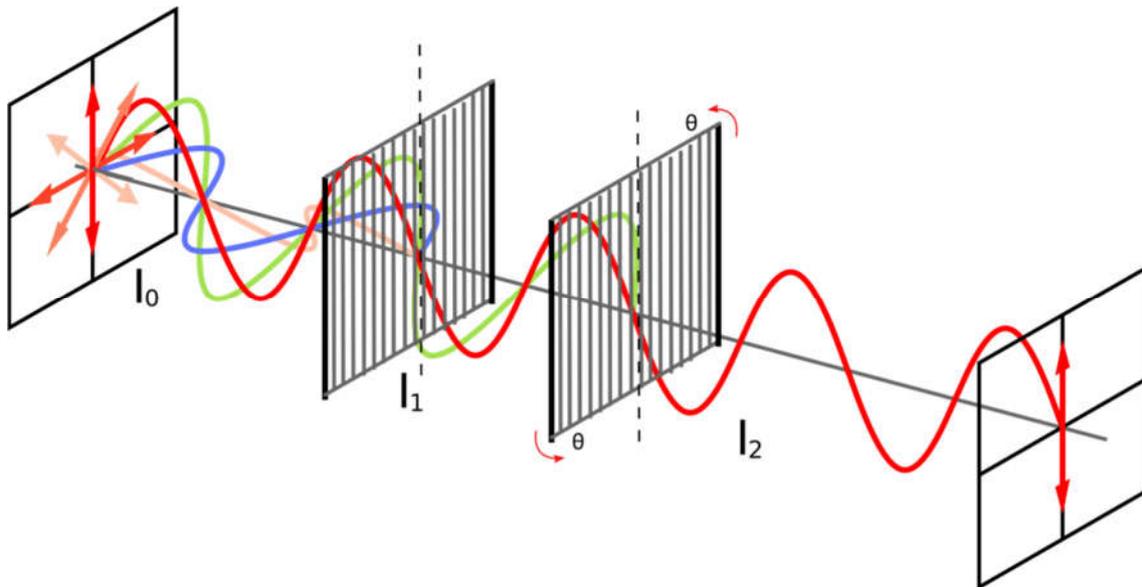




Buku Pegangan hanya untuk Kalangan Internal

Modul

Fisika Gelombang



Penulis :

Nya Daniaty Malau, M.Si

Program Studi Pendidikan Fisika
Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
Universitas Kristen Indonesia

2018

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kehadiran Tuhan Yang Esa yang telah memberikan rahmat dan kasih-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan Modul Fisika Gelombang. Ucapan terimakasih juga diberikan kepada Rektor Universitas Kristen Indonesia, Dekan dan Ketua program studi Pendidikan Fisika FKIP UKI. Serta berbagai pihak yang terlibat dalam penulisan dan penyusunan modul ini.

Modul Fisika Gelombang ini merupakan buku pegangan wajib mahasiswa untuk matakuliah Fisika Gelombang pada Kurikulum Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia (KKNI) di program studi pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Kristen Indonesia (FKIP-UKI).

Modul Fisika Gelombang ini berisi penjelasan mengenai materi-materi dalam mata kuliah Fisika Gelombang mulai dari getaran, gelombang dan optik serta rekayasa optik. Selain itu, modul ini juga berisi tentang aplikasi gelombang dan optik di dalam kehidupan sehari-hari, sehingga mempermudah mahasiswa memahami materi dan pengaplikasian ilmunya. Modul ini juga disertai dengan contoh soal dan evaluasi formatif yang dapat membantu mahasiswa untuk lebih memahami perumusan dan materi dari Fisika Gelombang dan Optik.

Tak ada gading yang tak retak, kami pun menyadari banyaknya kekurangan dari Modul Fisika Gelombang ini maka kami mengharapkan masukan dan kritikan yang dapat membangun dan memperbaiki isi dari Modul Fisika Gelombang ini.

Jakarta, 01 Juni 2018

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
PETUNJUK PENGGUNAAN MODUL.....	v
RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS).....	vii
PETA KEMAMPUAN AKHIR MATAKULIAH	xvi
MODUL 1 Osilasi	1
Kegiatan Pembelajaran 1 : Frekuensi Osilasi	3
Kegiatan Pembelajaran 2 : Bandul Matematis Sederhana	11
Kegiatan Pembelajaran 3 : Osilasi Pegas	16
MODUL 2 Aplikasi Osilasi	29
Kegiatan Pembelajaran 1 : Resonansi	30
Kegiatan Pembelajaran 2 : Osilasi Teredam	40
Kegiatan Pembelajaran 3 : Spektrometer Inframerah	48
MODUL 3 Besaran Gelombang	57
Kegiatan Pembelajaran 1 : Defenisi Gelombang	57
Kegiatan Pembelajaran 2 : Besaran Gelombang	64
Kegiatan Pembelajaran 3 : Persamaan Gelombang	71
Kegiatan Pembelajaran 4 : Muka Gelombang dan Prinsip Huygens	78
MODUL 4 Kecepatan Gelombang dan Sifat Medium	87
Kegiatan Pembelajaran 1 : Gelombang Tali	87
Kegiatan Pembelajaran 2 : Gelombang Longitudinal dalam Zat Padat	93
Kegiatan Pembelajaran 3 : Gelombang Longitudinal dalam Fluida	103
Kegiatan Pembelajaran 4 : Energi Gelombang	111
MODUL 5 Gelombang Bunyi	117
Kegiatan Pembelajaran 1 : Pengantar Gelombang Bunyi	118
Kegiatan Pembelajaran 2 : Getaran Dawai	123
Kegiatan Pembelajaran 3 : Pipa Organa	129
Kegiatan Pembelajaran 4 : Intensitas Bunyi	136
MODUL 6 Pemantulan	147
Kegiatan Pembelajaran 1 : Pemantulan Gelombang	147
Kegiatan Pembelajaran 2 : Pemantulan Cahaya	154

Kegiatan Pembelajaran 3 : Aplikasi Pemantulan Cahaya	167
MODUL 7 Pembiasan	179
Kegiatan Pembelajaran 1 : Pembiasan Gelombang	180
Kegiatan Pembelajaran 2 : Pembiasan Cahaya	191
Kegiatan Pembelajaran 3 : Aplikasi Pembiasan Cahaya	203
MODUL 8 Indeks Bias dan Superposisi	225
Kegiatan Pembelajaran 1 : Indeks Bias	225
Kegiatan Pembelajaran 2 : Superposisi	237
MODUL 9 Interferensi Cahaya	253
Kegiatan Pembelajaran 1 : Interferensi Celah Ganda	253
Kegiatan Pembelajaran 2 : Interferensi Oleh Celah Banyak.....	264
Kegiatan Pembelajaran 3 : Penguraian Gelombang Cahaya	278
MODUL 10 Difraksi	287
Kegiatan Pembelajaran 1 : Difraksi Gelombang	287
Kegiatan Pembelajaran 2 : Difraksi Cahaya	294
Kegiatan Pembelajaran 3 : Daya Resolusi	307
MODUL 11 Aplikasi Interferensi	321
Kegiatan Pembelajaran 1 : Interferensi Lapisan Tipis	321
Kegiatan Pembelajaran 2 : Cincin Newton	331
Kegiatan Pembelajaran 3 : Lapisan Anti Pantul	337
MODUL 12 Polarisasi	351
Kegiatan Pembelajaran 1 : Polarisasi Gelombang	351
Kegiatan Pembelajaran 2 : Polarisasi Cahaya	356
Kegiatan Pembelajaran 3 : Aplikasi Polarisasi	366
MODUL 13 Efek Doppler.....	381
Kegiatan Pembelajaran 1 : Pengantar Efek Doppler	381
Kegiatan Pembelajaran 2 : Aplikasi Efek Doppler	397
MODUL 14 Serat Optik	409
Kegiatan Pembelajaran 1 : Pengantar Serat Optik	410
Kegiatan Pembelajaran 2 : <i>Step-Index Fiber</i>	420
MODUL 15 Kristal Fotonik dan Laser	437
Kegiatan Pembelajaran 1 : Fotonik Kristal	437
Kegiatan Pembelajaran 2 : Laser	452

PETUNJUK PENGGUNAAN MODUL

Pendahuluan

Pada bagian pendahuluan berisikan pengantar dari materi yang akan dibahas dalam modul biasanya banyak dihubungkan dengan kehidupan sehari-hari.

Kegiatan Pembelajaran

Pada bagian ini berisikan tujuan mempelajari modul atau kemampuan yang diharapkan setelah menggunakan modul.

Uraian Materi

Pada bagian uraian materi, kita akan menemukan beberapa bagian yakni :

1. Konsep Materi

Pada konsep materi akan dipaparkan materi yang harus dipahami yang dilengkapi dengan contoh soal.

2. Penugasan Kelas

Pada bagian ini, mahasiswa diminta untuk berdiskusi dengan kelompok masing-masing tentang permasalahan yang ditemukan setelah mempelajari konsep materi, kemudian memaparkannya dalam bentuk presentasi.

3. Rangkuman

Bagian ini berisi intisari dari keseluruhan konsep materi, sehingga mempermudah mahasiswa dalam memahami materi dalam satu kegiatan pembelajaran

4. Evaluasi Formatif

Pada bagian ini berisikan tentang evaluasi yang digunakan untuk mengukur sejauh mana pemahaman mahasiswa secara personal terhadap materi yang diberikan

5. Lembar Kerja Praktek

Bagian ini merupakan tempat mahasiswa mengerjakan evaluasi formatif yang diberikan.

Rangkuman Modul

Bagian ini berisi intisari dari keseluruhan konsep materi, dalam satu modul yang mana biasanya terdiri dari dua atau lebih kegiatan pembelajaran. Bagian ini bertujuan mempermudah mahasiswa dalam memahami keseluruhan materi dalam satu modul.

Praktikum/ Project

Bagian ini berisi bahan praktikum/project sesuai dengan materi dalam suatu modul yang bisa dikerjakan baik di kelas maupun dilaboratorium

Daftar Pustaka

Bagian ini berisikan referensi materi yang digunakan dalam penyusunan modul ini, dan bisa digunakan mahasiswa sebagai bahan ajar tambahan selain modul ini.

	RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN	No. Dokumen	
		Berlaku sejak	20 Februari 2018
		No.Revisi	
		Tanggal Revisi	
		Halaman	1-10

A. IDENTITAS MATAKULIAH

Program Studi : Pendidikan Fisika
 Mata Kuliah : Fisika Gelombang dan Praktikum
 Kode Mata Kuliah :
 Semester : IV
 SKS : 5 sks
 Mata Kuliah Prasyarat : Metode Matematika untuk Fisika II dan Fisika Gerak
 Nama Dosen : Nya Daniaty Malau, M.Si

B. CAPAIAN PEMBELAJARAN YANG DIBEBANKAN KEPADA MATA KULIAH

Capaian Pembelajaran :

Parameter Sikap:

- SK-01 : Bertaqwa kepada Tuhan Yang Maha Esa dan mampu menunjukkan sikap religius.
- SK-02 : Menjunjung tinggi nilai kemanusiaan dalam menjalankan tugas berdasarkan agama, moral, dan etika.
- SK-03 : Berkontribusi dalam peningkatan mutu kehidupan bermasyarakat, berbangsa, bernegara, dan kemajuan peradaban berdasarkan Pancasila.
- SK-04 : Berperan sebagai warga negara yang bangga dan cinta tanah air, memiliki nasionalisme serta rasa tanggung jawab pada negara dan bangsa.
- SK-05 : Menghargai keanekaragaman budaya, pandangan, agama, dan kepercayaan, serta pendapat atau temuan orisinal orang lain.
- SK-06 : Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan.
- SK-07 : Taat hukum dan disiplin dalam kehidupan bermasyarakat dan bernegara.

- SK-08 : Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik.
- SK-09 : Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri.
- SK-10 : Menginternalisasi semangat kemandirian, kejuangan, dan kewirausahaan.
- SK-11 : Memiliki budi pekerti yang berlandaskan nilai-nilai kristiani: rendah hati, berbagi dan peduli, disiplin, professional dan bertanggung jawab dalam melaksanakan tugas yang dipercayakan.

Parameter Keterampilan Umum :

- KU-01 : Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya.
- KU-02 : Mampu menunjukkan kinerja mandiri, bermutu, dan terukur.
- KU-03 : Mampu mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora sesuai dengan keahliannya berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam rangka menghasilkan solusi, gagasan, desain atau kritik seni, menyusun deskripsi saintifik hasil kajiannya dalam bentuk skripsi atau laporan tugas akhir, dan mengunggahnya dalam laman perguruan tinggi.
- KU-04 : Menyusun deskripsi saintifik hasil kajian tersebut di atas dalam bentuk skripsi atau laporan tugas akhir, dan mengunggahnya dalam laman perguruan tinggi.
- KU-05 : Mampu mengambil keputusan secara tepat dalam konteks penyelesaian masalah di bidang keahliannya, berdasarkan hasil analisis informasi dan data.
- KU-06 : Mampu memelihara dan mengembangkan jaringan kerja dengan pembimbing, kolega, sejawat baik di dalam maupun di luar lembaganya.
- KU-07 : Mampu bertanggung jawab atas pencapaian hasil kerja kelompok dan melakukan supervisi dan evaluasi terhadap penyelesaian pekerjaan yang ditugaskan kepada pekerja yang berada di bawah tanggung jawabnya.
- KU-08 : Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri.
- KU-09 : Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi.
- KU-10 : Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika.
- KU-11 : Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika.

- KU-12 : Mampu mengkaji masalah-masalah dalam pembelajaran Fisika atau implementasi ilmu pendidikan Fisika berdasarkan kaidah dan etika ilmiah dan menyajikan gagasan atau desain pembelajaran yang lebih baik, dan/atau solusi terhadap masalah dalam pembelajaran Fisika, dan mampu menyajikan hasil kajian dalam bentuk laporan tertulis atau karya ilmiah (skripsi).
- KU-13 : Mampu menjalin kerjasama yang baik dengan kolega, pembimbing, dan atasan dalam pelaksanaan pembelajaran dan/atau pengajaran yang dipercayakan di dalam maupun di luar institusi.
- KU-14 : Mampu melakukan evaluasi dan pembelajaran mandiri dalam rangka meningkatkan kualitas pembelajaran dan pengajaran Fisika.
- KU-15 : Adaptif terhadap perbedaan budaya dan menunjukkan respons yang positif terhadap perbedaan tersebut dalam menunjang keberhasilan pembelajaran Fisika.
- KU-16 : Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam pengembangan atau implementasi ilmu pendidikan khususnya Fisika.
- KU-17 : Mampu menghasilkan solusi alternatif dalam rangka menyelesaikan masalah-masalah dalam pendidikan Fisika melalui identifikasi, analisis, dan deskripsi data
- KU-18 : Mampu memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi dalam mengolah, menganalisis, mendokumentasikan, mengamankan dan menemukan kembali data dan hasil kajian ilmiah dalam bidang pembelajaran Fisika.

Parameter Keterampilan Khusus :

- KK-01 : Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang fisika gelombang
- KK-02 : Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang aplikasi fisika gelombang dalam kehidupan sehari-hari

Parameter Pengetahuan :

- PG-01 : Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika gelombang
- PG-02 : Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip pengaplikasian fisika gelombang
- PG-03 : Mampu Menguasai konsep rekayasa Fisika Gelombang
- PG-04 : Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopis

Deskripsi Mata Kuliah

Mata Kuliah ini membahas mengenai Osilasi, Aplikasi Osilasi, Besaran gelombang, Kecepatan gelombang dan sifat medium, Gelombang Bunyi, Pemantulan, Pembiasan, Indeks bias dan superposisi, Interferensi cahaya, Difraksi, Aplikasi interferensi, Polarisasi, Efek doppler, Serat Optik, Kristal Fotonik dan Laser.

NB: Setiap Pertemuan alokasi 5 @50 menit

C. TABEL RENCANA PEMBELAJARAN

Minggu ke-	Kemampuan Akhir yang Diharapkan	Bahan Kajian (Materi Pokok)	Model/Strategi/Bentuk/Metode Pembelajaran	Pengalaman Belajar (penugasan)	Bentuk Penilaian	Bobot Penilaian	Referensi
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	Memahami garis besar mata kuliah, kontrak perkuliahan dan kembali mengingat materi mata kuliah prasyarat.	RPS dan Kontrak Perkuliahan	Presentasi, Ceramah dan Tanya Jawab				RPS dan Kontrak Perkuliahan B1 : Hal. viii-x
2	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang Osilasi	Osilasi <ul style="list-style-type: none"> • Frekuensi Osilasi • Bandul Matematis Sederhana • Osilasi Pegas 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi • Praktikum 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	5 %	B1 : Hal. 1-28 B2 : Hl. 495 - 506
3	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang Aplikasi Osilasi	Aplikasi Osilasi <ul style="list-style-type: none"> • Resonansi • Osilasi Tereadam • Spektrometer Inframerah 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	5 %	B1 : Hal. 29-56 B2 : Hal. 509 - 525

4	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang besaran gelombang	Besaran Gelombang <ul style="list-style-type: none"> Defenisi Gelombang Besaran gelombang Persamaan gelombang Muka Gelombang dan Prinsip Huygens 	<ul style="list-style-type: none"> Kuliah dan Tanya Jawab Diskusi kelompok Presentasi Latihan contoh soal Evaluasi 	<ul style="list-style-type: none"> Penugasan Kelas Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> Unjuk Kerja Evaluasi Kuis 	5 %	B1 : Hal. 57-86 B3 : Hal. 545 – 553, 579 - 580
5	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang kecepatan gelombang dan sifat medium	Kecepatan Gelombang dan Sifat Medium <ul style="list-style-type: none"> Gelombang tali Gelombang Longitudinal dalam Zat Padat Gelombang Longitudinal dalam Fluida Energi Gelombang 	<ul style="list-style-type: none"> Kuliah dan Tanya Jawab Diskusi kelompok Presentasi Latihan contoh soal Evaluasi 	<ul style="list-style-type: none"> Penugasan Kelas Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> Unjuk Kerja Evaluasi Kuis 	5 %	B1 : Hal. 87 – 116 B3 : Hal. 557 - 576
6	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan	Gelombang Bunyi <ul style="list-style-type: none"> Pengantar Gelombang Bunyi Getaran Dawai 	<ul style="list-style-type: none"> Kuliah dan Tanya Jawab Diskusi kelompok 	<ul style="list-style-type: none"> Penugasan Kelas Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> Unjuk Kerja Evaluasi Kuis 	5 %	B1 : Hal. 117 – 146 B5 : Hal. 45 - 57

	tentang Gelombang Bunyi	<ul style="list-style-type: none"> • Pipa Organa • Intensitas Bunyi 	<ul style="list-style-type: none"> • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi 				
7	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang Pemantulan	Pemantulan <ul style="list-style-type: none"> • Pemantulan Gelombang • Pemantulan Cahaya • Aplikasi Pemantulan Cahaya 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi • Praktikum 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	5 %	B1 : Hal. 147-178 B3 : Hal. 602 – 605, 690 - 702
8	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang Pembiasan	Pembiasan <ul style="list-style-type: none"> • Pembiasan Gelombang • Pembiasan Cahaya • Aplikasi Pembiasan Cahaya 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi • Praktikum 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	5 %	B1 : Hal. 179 – 224 B3 : Hal. 606 – 613, 703 - 708
9	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang indeks bias dan superposisi	Indeks Bias dan Superposisi <ul style="list-style-type: none"> • Indeks Bias • Superposisi 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	5 %	B1 : Hal. 225 – 252 B3 : Hal. 614 – 620, 730 - 736

10	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang interferensi cahaya	Interferensi Cahaya <ul style="list-style-type: none"> • Interferensi Celah Ganda • Interferensi oleh Celah banyak • Penguraian Gelombang Cahaya 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	5 %	B1 : Hal. 253 – 286 B3 : Hal. 737 - 762
11	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang difraksi	Difraksi <ul style="list-style-type: none"> • Difraksi Gelombang • Difraksi Cahaya • Daya Resolusi 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	5 %	B1 : Hal. 287 – 320 B3 : Hal. 636 – 641, 763 - 773
12	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang Aplikasi Interferensi	Aplikasi Interferensi <ul style="list-style-type: none"> • Interferensi Lapisan Tipis • Cincin Newton • Lapisan Anti Pantul 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	10 %	B1 : Hal. 321 – 350 B3 : Hal. 774 - 784
13	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang polarisasi	Polarisasi <ul style="list-style-type: none"> • Polarisasi Gelombang • Polarisasi Cahaya 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	10 %	B1 : Hal. 351 – 380 B3 : Hal. 642 – 643, 790 - 798

		<ul style="list-style-type: none"> • Aplikasi Polarisasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Latihan contoh soal • Evaluasi 				
14	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang efek doppler	<p>Efek Doppler</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pengantar Efek Doppler • Aplikasi Efek Doppler 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi • Project 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	10 %	B1 : Hal. 381 – 408 B3 : Hal. 646 - 662
15	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang serat optik	<p>Serat Optik</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pengantar tentang serat optik • <i>Step-index Fiber</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	10 %	B1 : Hal. 409 – 436 B3 : Hal. 713 – 715 B4 : Hal. 74 - 82
16	Mampu menyelesaikan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang kristal fotonik dan laser	<p>Kristal Fotonik dan Laser</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kristal Fotonik • Laser 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuliah dan Tanya Jawab • Diskusi kelompok • Presentasi • Latihan contoh soal • Evaluasi • Project 	<ul style="list-style-type: none"> • Penugasan Kelas • Evaluasi formatif 	<ul style="list-style-type: none"> • Unjuk Kerja • Evaluasi • Kuis 	10 %	B1 : Hal. 437 – 463 B4 : Hal. 118 – 132, 1 - 11

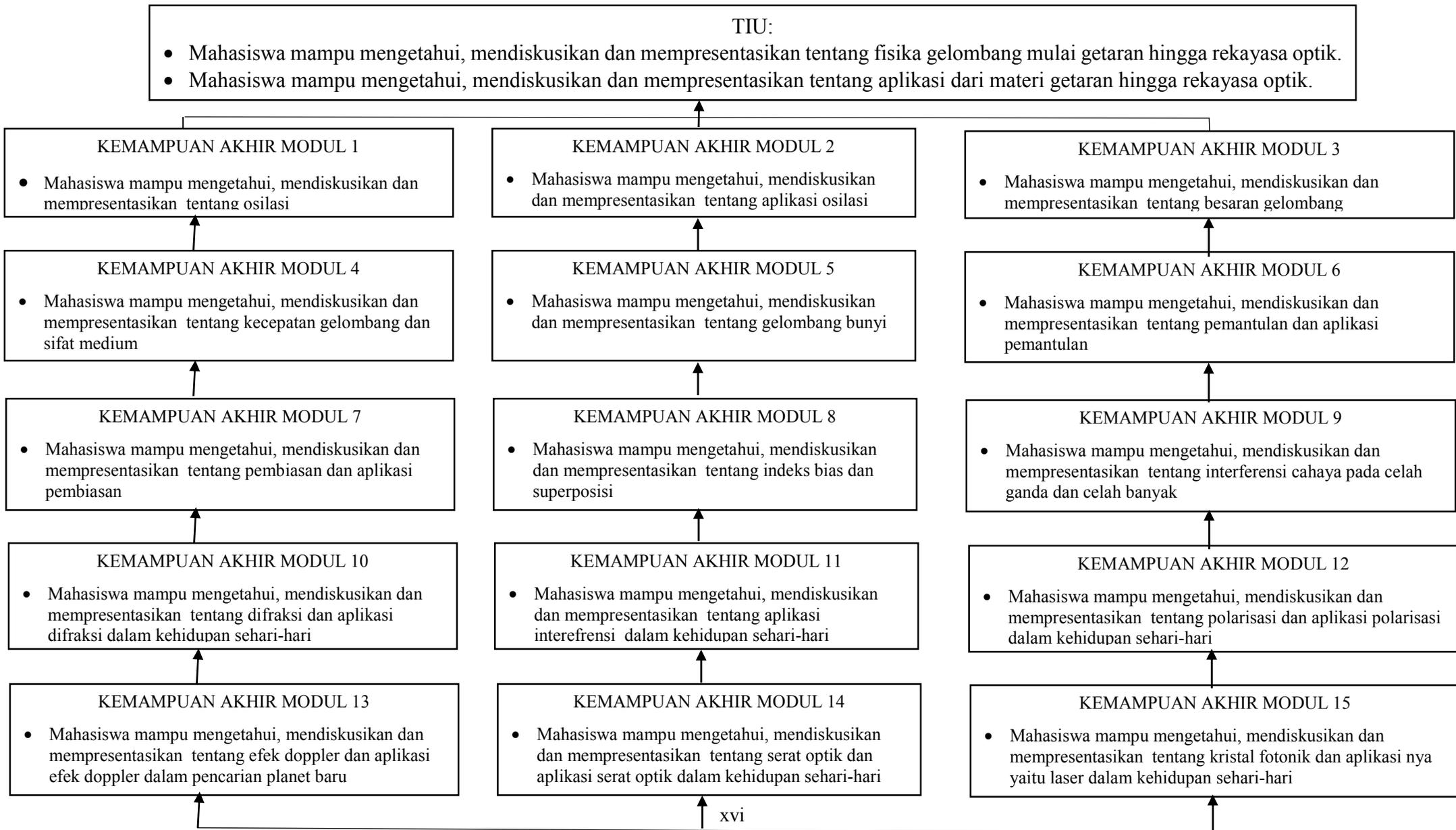
Referensi :

- B1 : Malau, N. D. 2018. Fisika Gelombang . Prodi Pendidikan Fisika FKIP-UKI. Jakarta
- B2 : Abdullah, Mikrajuddin. 2016. *Fisika Dasar 1*. Bandung : Institut Teknologi Bandung. E-book.
- B3 : Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : Institut Teknologi Bandung. E-book.
- B4 : Bahtiar, Ayi. 2008. *Rekayasa Optik*. Bandung : Universitas Pajajaran. E-Book.
- B5 : Ruwanto, Bambang. 2010. Gelombang dan Bunyi. Yogyakarta : Universitas Gajah Mada. E-Book

Dosen Pengampu

Nya Daniaty Malau, M.Si

PETA KEMAMPUAN AKHIR MATAKULIAH MATA KULIAH : FISIKA GELOMBANG



Modul 1:

Osilasi

PENDAHULUAN

Osilasi atau getaran adalah gerak bolak-balik di sekitar posisi setimbang. Pada posisi setimbang gaya netto yang bekerja pada sistem. Gerak osilasi adalah gerak menuju ke titik kesetimbangan. Tetapi saat mencapai posisi setimbang sistem masih memiliki kelebihan energi sehingga melampaui posisi setimbang. Tetapi sistem akan kembali berbalik arah menuju titik setimbang.

Banyak peristiwa osilasi yang dapat kita amati dalam kehidupan sehari-hari. Getaran daun atau cabang pohon yang ditiup angin adalah contoh osilasi (Gambar 1.1). Gerak dawai gitar adalah osilasi. Gerak pegas yang digantungi beban adalah osilasi. Gerak penggaris yang ditempel salah satu ujungnya di meja dan ujung lain disimpangkan lalu dilepas adalah osilasi. Gerak dawai piano (bukan piano elektrik) adalah osilasi. Gerak selaput suara manusia juga osilasi. Salah satu ciri yang jelas terlihat dari peristiwa osilasi adalah meskipun bergerak, namun benda yang berosilasi tidak berpindah tempat. Ketika osilasi berakhir benda kembali ke posisi setimbang. Apa manfaat osilasi? Kita tidak akan mendengar suara piano atau gitar tanpa osilasi dawai alat musik tersebut. Osilasi dawai menggetarkan udara di sekitar dawai. Getaran udara tersebut merambat di udara hingga sampai ke telinga kita. Tanpa osilasi muatan listrik pada antena handphone kita maka tidak akan dipancarkan gelombang mikro untuk berkomunikasi dengan orang lain. Tanpa piranti yang menghasilkan osilasi (namanya osilator) kita tidak mengenal komputer, handphone, dan peralatan digital lainnya. Tanpa memahami osilasi kita tidak akan berada di era teknologi informasi dan komunikasi seperti saat ini.

Pada dasarnya teknologi komunikasi dan informasi adalah aplikasi peristiwa osilasi dalam teknologi pemrosesan dan pengiriman data. Data dikirim dalam bentuk osilasi, data diterima dalam bentuk osilasi, dan data diproses dalam bentuk osilasi. Oleh karena itu tidak ada alasan bagi kita untuk tidak belajar fenomena osilasi secara seksama.



Gambar 1.1. Contoh osilasi yang dapat kita amati dalam kehidupan sehari-hari: (a) gerak daun yang ditiup angin, (b) gerak dawai gitar, (c) gerak selaput kendang (imgarcade.com, footage.framepool.com,kidsdiscover.com).

Kegiatan Pembelajaran 1: Frekuensi Osilasi

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai frekuensi osilasi dan mampu menurunkan persamaan frekuensi osilasi
2. Mahasiswa mampu merancang contoh aplikasi penggunaan frekuensi osilasi dalam kehidupan sehari-hari

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Apa syarat agar benda berosilasi? Perhatikan Gambar 1.2. Seperti sudah dijelaskan di atas bahwa osilasi adalah gerak bolak balik di sekitar posisi setimbang. Agar ini dapat terwujud maka saat benda menyimpang dari posisi setimbang harus ada gaya yang menarik kembali benda ke arah posisi setimbang. Ini berarti pada peristiwa osilasi arah gaya selalu berlawanan dengan arah simpangan. Bentuk paling sederhana persamaan osilasi yang memenuhi kriteria di atas adalah

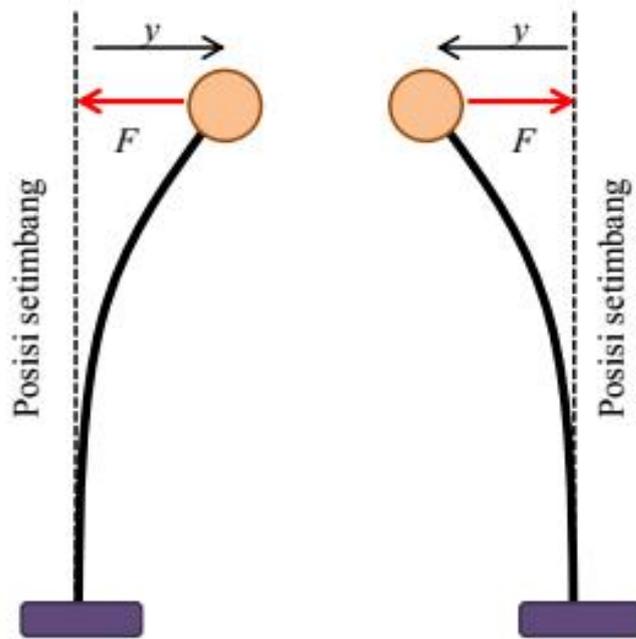
$$F = -Cy \quad (1.1)$$

dengan

y adalah simpangan benda dari posisi setimbang;

F adalah gaya yang menarik kembali benda ke posisi setimbang;

C adalah sebuah konstanta.



Gambar 1.2. Pada setiap gerak osilasi, arah gaya selalu berlawanan dengan arah simpangan. Gaya tersebut cenderung menarik kembali benda ke posisi setimbang. Pada posisi setimbang gaya netto yang dialami benda nol. Tetapi, ketika balik ke posisi setimbang, benda bergerak melampaui posisi setimbang, sehingga ditarik balik ke arah berlawanan. Begitu seterusnya sehingga osilasi berlangsung.

Tanda negatif pada persamaan (1.1) menjamin bahwa arah gaya selalu berlawanan dengan arah simpangan. Dengan demikian gaya menarik kembali benda ke posisi setimbang. Gaya yang memenuhi persamaan (1.1) dikenal dengan hukum Hooke. Hukum Hooke pertama kali diterapkan pada gaya pegas, namun selanjutnya diaplikasikan pada semua jenis gaya yang sebanding dengan simpangan tetapi berlawanan arah. Jika osilasi terjadi dalam ruang tiga dimensi maka gaya penyebab osilasi memenuhi persamaan

$$\vec{F} = -K\vec{r} \quad (1.2)$$

dengan

\vec{r} adalah vektor simpangan benda relatif terhadap posisi setimbang.

Misalkan benda yang berosilasi memiliki massa m . Berdasarkan hukum II Newton, $F = ma$

maka percepatan benda yang berosilasi memenuhi $ma = -Cy$ atau

$$a = -\frac{C}{m}y \quad (1.3)$$

Dalam ruang tiga dimensi, percepatan tersebut memenuhi persamaan $\vec{a} = -(C/m)\vec{r}$. Menarik untuk melihat bahwa percepatan benda yang berosilasi berbanding lurus dengan simpangannya. Tidak semua gerakan memenuhi kriteria ini. Gerakan yang memenuhi kriteria tersebut memiliki sifat yang khas. Fungsi simpangan tidak boleh sembarang, tetapi harus memiliki bentuk tertentu. Dan memang hanya fungsi sinusoidal yang menghasilkan kesebandingan antara percepatan dan simpangan dengan arah berlawanan. Fungsi sinusoidal dapat berupa fungsi sinus atau cosinus. Jika waktu bagi benda melakukan satu osilasi penuh adalah T (dalam satuan detik) yang dikenal dengan periode osilasi, maka jumlah osilasi per detik memenuhi

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.4)$$

Jumlah osilasi per satuan waktu disebut frekuensi. Satuan frekuensi adalah osilasi per detik (1/s) dan diberi nama hertz (Hz). Untuk frekuensi yang besar, satuan frekuensi sering disingkat menggunakan singkatan baku, seperti kHz (kilo hertz = 1.000 Hz), MHz (mega hertz = 1.000.000 Hz), dan GHz (giga hertz = 1.000.000.000 Hz).

Contoh Soal 1.1:

Sebuah stasiun radio FM bekerja pada frekuensi 100 MHz. Berapakah periode osilasi muatan listrik di antena yang memancarkan gelombang radio tersebut?

Jawab :

Frekuensi gelombang radio $f = 100 \text{ MHz} = 100.000.000 \text{ Hz}$. Periode osilasi muatan listrik sama dengan periode osilasi gelombang yang dipancarkan, yaitu $T = 1/f = 1/100.000.000 = 10^{-8} \text{ s}$.

Contoh Soal 1.2:

Ayunan di sebuah taman bermain mengayun 5 kali dalam waktu 10 detik. Berapa frekuensi osilasi ayunan tersebut?

Jawab :

Periode osilasi ayunan, $T = \text{waktu total ayunan/jumlah ayunan} = 10/5 = 2 \text{ s}$.
Frekuensi osilasi ayunan, $f = 1/T = 1/2 = 0,5 \text{ Hz}$.

Pertanyaan selanjutnya adalah, bagaimanakah hubungan antara frekuensi osilasi dengan sifat-sifat benda yang berosilasi? Karena kita menduga bahwa simpangan benda yang berosilasi memenuhi fungsi sinusoidal maka kita dapat memasukkan fungsi coba-coba berikut ini untuk menyatakan simpangan benda yaitu

$$y = A \cos (\check{S}t + \{_0) \quad (1.5)$$

dengan A dan φ_0 adalah konstanta. Konstanta A dikenal dengan amplitudo, yaitu simpangan maksimum benda yang berosilasi, ω dikenal dengan frekuensi sudut osilasi, dan φ_0 dikenal dengan fase awal. Fase di sini adalah faktor yang beraad dalam tanda cosinus atau sinus, yaitu $\omega t + \varphi_0$. Fase awal adalah fase saat $t = 0$ yaitu φ_0 . Satuan fase adalah radian.

Dari asumsi simpangan pada persamaan (1.5) maka kita dapatkan kecepatan osilasi benda adalah

$$\begin{aligned} v &= \frac{dy}{dt} \\ &= -\check{S}A \sin (\check{S}t + \{_0) \end{aligned} \quad (1.6)$$

dan percepatan osilasi adalah

$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} \\ &= -\check{S}^2 A \cos (\check{S}t + \{_0) \end{aligned} \quad (1.7)$$

Kita substitusi persamaan (1.5) dan (1.7) ke dalam persamaan (1.3) diperoleh

$$-\dot{S}^2 A \cos(\dot{S}t + \{\}_0) = -\sqrt{\frac{C}{m}} A \cos(\dot{S}t + \{\}_0)$$

Dengan demikian diperoleh frekuensi sudut osilasi memenuhi persamaan

$$\dot{S} = \sqrt{\frac{C}{m}}$$

Mengingat $\dot{S} = \frac{2\pi f}{T} = 2\pi f$ maka frekuensi osilasi memenuhi persamaan

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}} \quad (1.8)$$

Jadi, frekuensi osilasi f ditentukan oleh konstanta C dan massa benda yang berosilasi. Nilai f di atas disebut juga *frekuensi alamiah* benda yang berosilasi. Secara umum, jika diperoleh hubungan $a = -\alpha y$ dengan α adalah konstanta maka frekuensi osilasi memenuhi

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\alpha} \quad (1.9)$$

Contoh Soal 1.3:

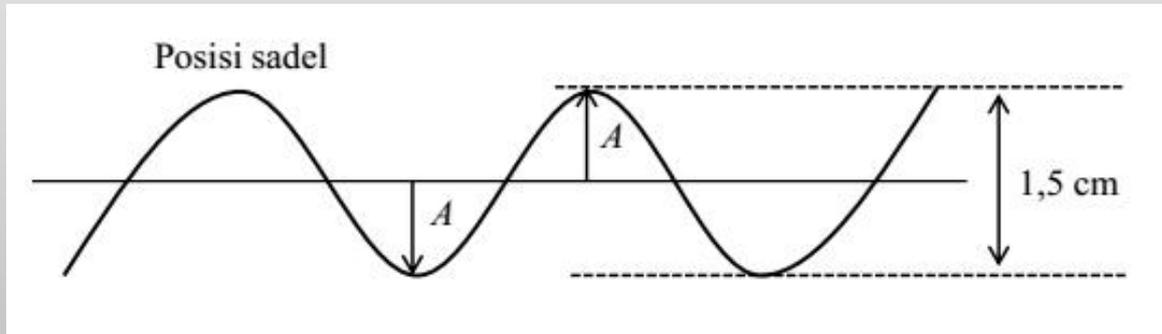
Ketika melewati jalan berlubang, *shockbreaker* sepeda motor bergetar 8 kali dalam 10 detik. Misalkan jarak antara posisi terendah dan tertinggi sadel sepeda motor adalah 1,5 cm tentukan

- Periode osilasi pegas *shockbreaker*.
- Frekuensi osilasi pegas *shockbreaker*.
- Amplitudo simpangan pegas *shockbreaker*.

Jawab :

- Periode osilasi pegas *shockbreaker*, $T = 10/8 = 1,25$ s
- Frekuensi osilasi pegas *shockbreaker*, $f = 1/T = 1/1,25 = 0,8$ Hz

c) Amplitudo simpangan. Untuk menentukan amplitudo simpangan, perhatikan Gambar 7.3. Tampak pada gambar di atas bahwa jarak antara posisi terendah dan tertinggi sadel sama dengan dua kali amplitudo simpangan. Jadi, amplitudo simpangan adalah $A = 1,5/2 = 0,75 \text{ cm} = 0,0075 \text{ m}$.



Gambar 1.3 Simpangan motor sebagai fungsi waktu

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah penurunan rumus frekuensi osilasi
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil contoh soal dan pengaplikasian frekuensi osilasi dalam kehidupan sehari-hari

RANGKUMAN

1. Osilasi adalah gerak bolak balik di sekitar posisi setimbang.
2. Syarat osilasi adalah saat benda menyimpang dari posisi setimbang harus ada gaya yang menarik kembali benda ke arah posisi setimbang.
3. Pada peristiwa osilasi arah gaya selalu berlawanan dengan arah simpangan. Bentuk paling sederhana persamaan osilasi yang memenuhi kriteria di atas adalah

$$F = -Cy$$

4. Jika osilasi terjadi dalam ruang tiga dimensi maka gaya penyebab osilasi memenuhi persamaan

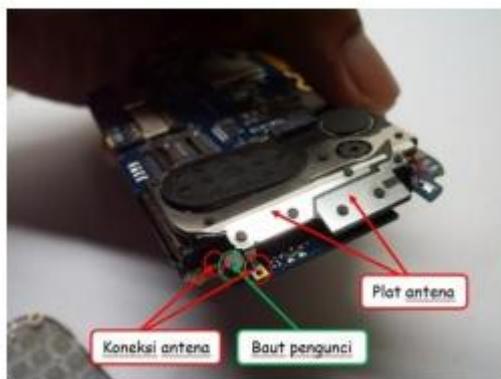
$$\vec{F} = -K\vec{r}$$

5. Jadi, frekuensi osilasi f ditentukan oleh konstanta C dan massa benda yang berosilasi. Nilai f di atas disebut juga *frekuensi alamiah* benda yang berosilasi. Secara umum, jika diperoleh hubungan $a = -\alpha y$ dengan α adalah konstanta maka frekuensi osilasi memenuhi

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\alpha}$$

EVALUASI FORMATIF 1

1. Turunkanlah persamaan frekuensi osilasi !
2. Dalam hp kita terdapat antene kecil yang tercetak pada rangkaian atau dalam bentuk pelat konduktor (Gambar 7.30). HP memancarkan gelombang ketika muatan listrik pada antene tersebut bergetar. Frekuensi getaran muatan pada antene persis sama dengan frekuensi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan hp saat berkomunikasi. Hp yang digunakan di Indonesia banyak menggunakan frekuensi GSM 850/900/1800/1900 MHz. Daria informasi ini tentukan periode osilasi elektron pada antene hp



n p

Gambar 1.4 Bagian dalam sebuah HP (icity.indosat.com)

3. Sebuah pegas memiliki konstanta pegas 15 N/m. Pada pegas digantung beban 250 g. Beban disimpangkan kemudian dilepas sehingga berosilasi. Berapa frekuensi osilasi beban?

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Bandul Matematis Sederhana

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami Bandul Matematis Sederhana
2. Mahasiswa mampu mengerjakan contoh dan latihan soal Bandul Matematis Sederhana

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Salah satu bentuk gerak osilasi yang lain adalah gerak bandul matematis sederhana. Bandul tersebut diilustrasikan pada Gambar 1.5. Bandul tersebut terdiri dari seutas tali yang dianggap tidak memiliki massa dan sebuah beban diikat di ujung bawah tali. Ujung atas tali dikaitkan pada posisi tetap (seperti paku). Beban bergantung bebas dan bergerak bolak-balik akibat pengaruh gaya gravitasi bumi. Sifat bandul matematis sederhana adalah simpangan tidak boleh terlalu besar. Kalau simpangan sangat besar maka gaya yang bekerja pada benda tidak lagi berbanding lurus dengan simpangan. Gaya berbanding lurus simpangan hanya untuk simpangan kecil. Pada Gambar 1.5 gaya penarik benda ke posisi setimbang (gaya yang menyinggung lintasan benda) adalah

$$F = -W \sin \theta \quad (1.10)$$

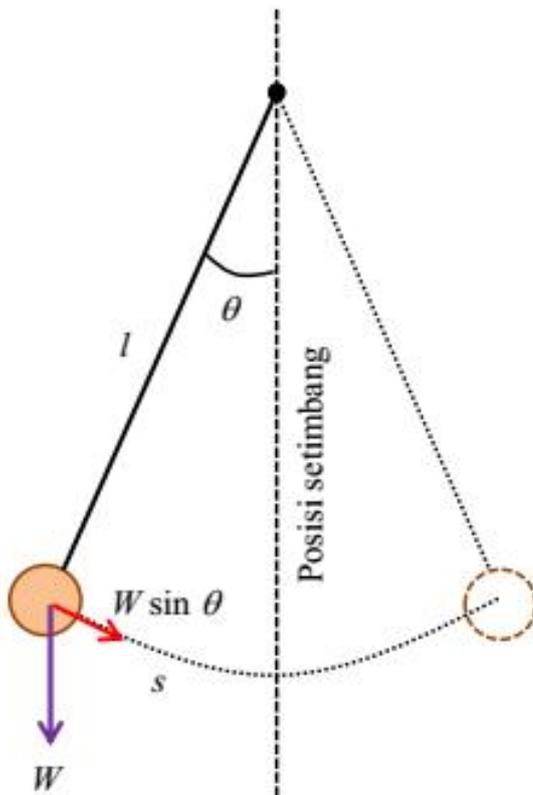
Untuk simpangan yang kecil maka kita dapat mengambil pendekatan

$$\sin \theta \approx \theta \quad (1.11)$$

(sudut θ harus dinyatakan dalam satuan radian). Dengan demikian, untuk simpangan kecil maka gaya penarik benda ke posisi setimbang didekati dengan

$$F \approx -W \theta = -mg \theta \quad (1.12)$$

Tanda negatif menyatakan arah gaya dan simpangan berlawanan.



Gambar 1.5. Skema bandul matematis sederhana. Beban digantung pada tali yang dianggap tidak memiliki massa. Posisi setimbang adalah posisi vertikal. Beban disimpangkan sedikit dari posisi setimbang lalu dilepas maka benda melakukan osilasi.

Besar simpangan benda adalah $s = l\theta$ di mana l adalah panjang tali bandul dan sudut θ dinyatakan dalam radian. Dengan demikian, gaya penarik benda ke arah posisi setimbang menjadi

$$\begin{aligned} F &= -mg(s/l) \\ &= -(mg/l)s \end{aligned}$$

Dengan menggunakan hukum II Newton $F = ma$ maka

$$-(mg/l)s = ma$$

Sehingga kita dapatkan percepatan benda memenuhi

$$a = -\left(\frac{g}{l}\right)s \quad (1.13)$$

Dengan mengacu ke persamaan (1.9) kita dapatkan frekuensi osilasi bandul matematis sederhana adalah

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (1.14)$$

Contoh Soal 1.4:

Salah satu cara sederhana membuktikan bahwa bumi berotasi adalah percobaan bandul Foucault. Percobaan tersebut dipelopori oleh Leon Foucault tahun 1851 di Paris, Prancis. Foucault menggunakan bandul yang terdiri dari beban timbal yang dilapisi kuningan dengan massa 28 kg dan digantung di atas kawat sepanjang 67 meter. Karena massa beban yang cukup berat maka gesekan udara dapat diabaikan dan bandul seolah-olah berayun tanpa gangguan. Diamati bahwa selama satu jam berayun, arah ayunan bandul menyimpang 11°. Arah ayunan bandul kembali ke arah semula setelah 32,7 jam. Hasil ini membuktikan adanya rotasi bumi. Perubahan arah ayunan bandul semata-mata disebabkan oleh rotasi bumi. Berdasarkan informasi di atas, berapakan periode ayunan bandul Foucault?

Jawaban :

Frekuensi ayunan dihitung dengan persamaan (4.8), $f = (1/2\pi) (g/l)^{1/2} = (1/2 \times 3,14)(10/67)^{1/2} = 0,061$ Hz. Periode ayunan, $T = 1/f = 1/0,061 = 16,4$ detik.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang bandul matematis sederhana
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh dan latihan bandul matematis sederhana

RANGKUMAN

1. Salah satu bentuk gerak osilasi yang lain adalah gerak bandul matematis sederhana.
2. Sifat bandul matematis sederhana adalah simpangan tidak boleh terlalu besar. Kalau simpangan sangat besar maka gaya yang bekerja pada benda tidak lagi berbanding lurus dengan simpangan.
3. Gaya berbanding lurus simpangan hanya untuk simpangan kecil.
4. Frekuensi osilasi bandul matematis sederhana adalah

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

EVALUASI FORMATIF 2

1. Turunkanlah persamaan frekuensi osilasi bandul matematis sederhana !
2. Gempa bumi yang terjadi di suatu kota membuat banyak bangunan di kota tersebut roboh. Yang roboh juga termasuk bangunan yang dibuat dengan mengikuti standar yang ketat. Menurut kalian, apa penyebab utama robohnya bangunan tersebut.
3. Sekelompok siswa ingin mengukur nilai percepatan gravitasi bumi di dalam kelas. Mereka membuat bandul matematis sederhana dengan panjang tali 1,6 meter dan massa beban 50 g. Setelah dilakukan pengukuran berulang-ulang maka mereka mendapatkan nilai rata-rata periode ayunan bandul adalah 2,54 s. Dari data tersebut, berapa percepatan gravitasi bumi?

Lembar Kerja Praktek 2

Kegiatan Pembelajaran 3: Osilasi Pegas

KEMAMPUAN YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang osilasi pada pegas
2. Mahasiswa mampu mengerjakan contoh soal dan latihan yang berhubungan dengan aplikasi osilasi pegas

URAIAN MATERI

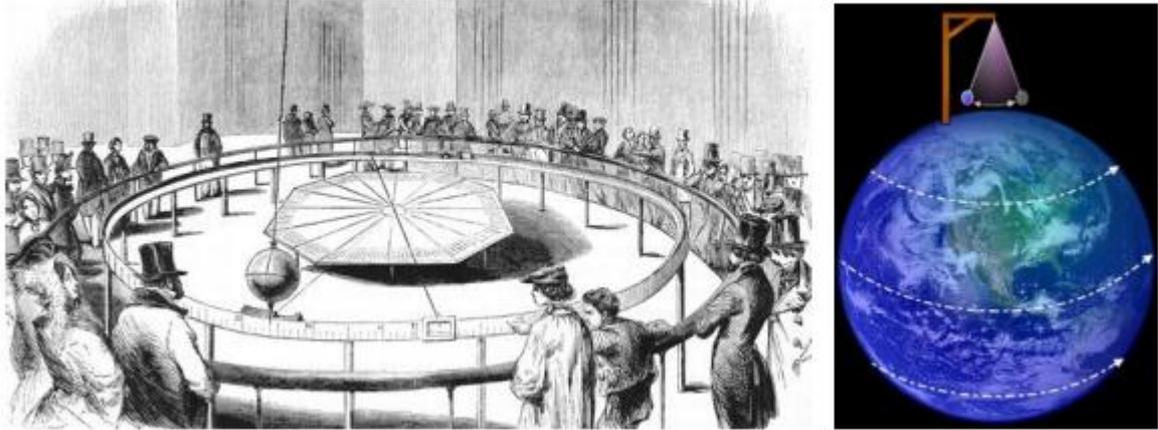
Konsep Dasar

Perhatikan pegas yang digantungi beban seperti pada Gambar 7.6. Massa beban adalah m dan pegas dianggap tidak memiliki massa. Ketika beban ditarik sejauh y yang tidak terlalu besar maka pegas menarik benda tersebut dengan gaya $F = -ky$. Inilah ungkapan hukum Hooke yang awal dan k dikenal dengan konstanta pegas. Berdasarkan hukum II Newton kita dapatkan

$$-ky = ma$$

atau

$$a = -\frac{k}{m}y \quad (1.15)$$

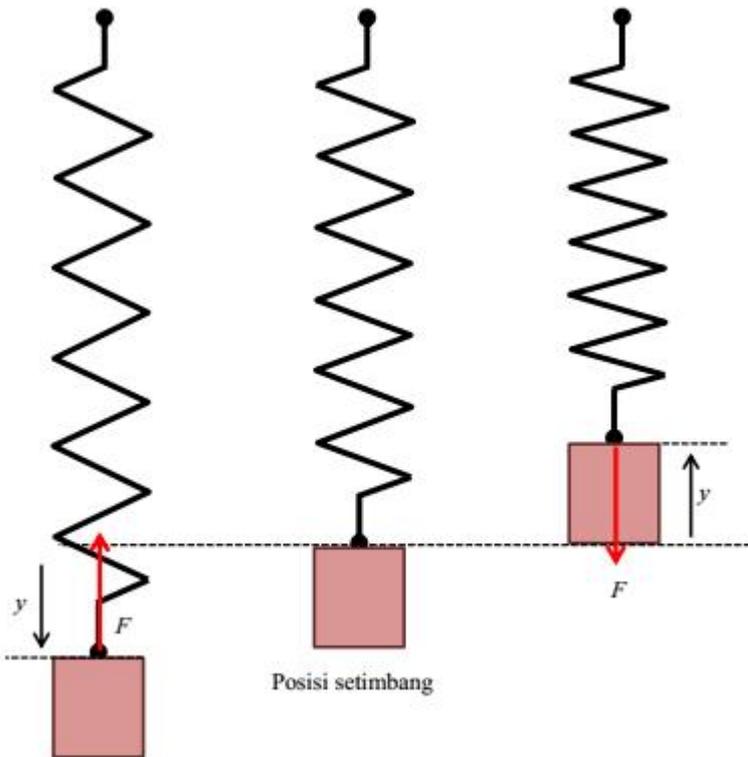


Gambar 1.6 Eksperimen bandul Foucault yang merupakan cara sederhana untuk membuktikan bahwa bumi berotasi. Saat berayun, bidang yang dibentuk osilasi bandul tidak berubah meskipun bumi berotasi. Setelah beberapa jam ketika bumi sudah berotasi dengan sudut yang cukup besar maka arah ayunan bandul menjadi berubah. Karena arah ayunan bandul tidak dipengaruhi oleh rotasi bumi, maka perubahan arah ayunan bandul membuktikan bahwa bumi sedang berotasi. Percobaan bandul Foucault mudah diamati di lokasi dekat kutub bumi, dan paling jelas diamati di kutub bumi (66south.com, zh.wikipedia.org)

Dengan mengacu ke persamaan (1.9) kita dapatakan frekuensi osilasi bandul matematis sederhana adalah

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.16)$$

Tampak dari persamaan (1.16) bahwa periode osilasi pegas bergantung pada konstanta pegas dan massa beban yang digantung pada pegas. Konstanta pegas yang besar menunjukkan bahwa pegas sulit ditekan atau diregangkan. Pegas jenis ini menghasilkan frekuensi osilasi yang besar. Sebaliknya, semakin besar massa beban yang digantung pada pegas maka osilasi pegas makin kecil. Penyebabnya adalah makin besar massa maka makin sulit diubah gerakannya (makin sulit diosilasikan)



Gambar 1.7. Pegas yang digantungi beban. Posisi setimbang adalah posisi ketika benda diam. Benda disimpangkan sedikit dari titik setimbang sehingga berosilasi di sekitar titik setimbang.

Contoh Soal 1.5 :

Pegas dari sebuah neraca memiliki panjang 20 cm. Ketika digunakan untuk menimbang sayuran 100 g, pegas mengalami pertambahan panjang 2 cm. Jika gantungan sayuran tersebut sedikit ditarik sehingga berosilasi, berapakah frekuensi osilasi yang terjadi?

Jawaban :

Pertama kita hitung dulu konstanta pegas. Besar gaya yang dialami pegas akibat menahan sayuran sama dengan berat sayuran atau $F = W_{\text{sayuran}} = m_{\text{sayuran}} \times g = 0,1 \times 10 = 1 \text{ N}$. Gaya gravitasi ini setimbang dengan gaya pegas (saat pegas menyimpang sejauh $x = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$). Dengan demikian, $kx = F$ atau $k \times 0,02 = 1$. Dengan demikian, konstanta pegas adalah $k = 1/0,02 = 50 \text{ N/m}$. Frekuensi osilasi yang terjadi jika gantungan sayur sedikit disimpangkan adalah $f = (1/2\pi) \sqrt{k/m} = [1/(2 \times 3,14)] \sqrt{50/0,1} = 3,56 \text{ Hz}$.

Energi Osilasi

Benda yang sedang berosilasi memiliki dua besaran yang selalu berubah-ubah, yaitu laju dan posisi. Dengan adanya laju maka benda memiliki energi kinetik $EK = (1/2) m v^2$. Dengan adanya posisi benda memiliki energy potensial. Dengan demikian, energi total benda yang sedang berosilasi di bawah pengaruh gaya konservatif adalah $EM = (1/2) m v^2 + EP$. Bentuk EP bergantung pada jenis gaya yang bekerja: apakah gaya gravitasi atau gaya pegas atau gaya lainnya.

Ciri benda yang berosilasi adalah

- 1) Pada saat benda memiliki laju maksimum, v_m , maka energi potensial nol, $EP = 0$. Dengan demikian $EM = (1/2) m v_m^2 + 0$, atau $EM = (1/2) m v_m^2$. Dengan demikian, persamaan energi benda yang sedang berosilasi pada sembarang laju dan posisi adalah

$$\frac{1}{2} m v_m^2 = \frac{1}{2} m v^2 + EP \quad (1.18)$$

- 2) Pada posisi maksimum, laju benda nol dan energi potensial memenuhi $(1/2) m v_m^2 = 0 + EP_m$, atau $EP_m = (1/2) m v_m^2$

Bandul Sederhana

Bandul sederhana berosilasi di bawah pengaruh gaya gravitasi. Dengan demikian, energi potensial bandul memenuhi $EP = mgy$ dengan m adalah massa beban, g adalah percepatan gravitasi, dan y adalah ketinggian beban dari posisi terendah. Dengan memasukkan persamaan ini ke dalam persamaan (1.18) diperoleh $(1/2) m v_m^2 = (1/2) m v^2 + mgy$, atau

$$v_m^2 = v^2 + 2gy \quad (1.19)$$

Saat di ketinggian maksimum, $v = 0$ dan $y = y_m$. Dengan demikian $v_m^2 = v^2 + 2gy_m$.

Pegas

Energi potensial pegas adalah $EP = (1/2)ky^2$. Dengan demikian, persamaan energi mekanik benda yang berosilasi di bawah pengaruh gaya pegas adalah $(1/2) m v_m^2 = (1/2) m v^2 + (1/2) ky^2$, atau $v_m^2 = v^2 + (k/m)y^2$. Dengan menggunakan persamaan (1.18) kita dapat menulis

$$v_m^2 = v^2 + 4f^2 f^2 y^2 \quad (1.20)$$

Contoh Soal 1.6 :

Teman kamu duduk di ayunan yang cukup panjang. Kamu simpangkan posisi temanmu sehingga naik setinggi 20 cm diukur dari posisi terendah. Ketika dilepas, temanmu berayun 3 kali dalam satu detik. Massa tubuh temanmu adalah 55 kg.

- Berapa energi osilasi total temanmu?
- Berapa laju maksimum temanmu?
- Berapa ketinggian temanmu saat lajunya sama dengan setengah laju maksimum?

Jawaban :

a) Energi mekanik temanmu $EM = (1/2)mv^2 + mgy$. Energi mekanik sama dengan energi potensial maksimum. Ketinggian maksimum temanmu, $y_m = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$. Dengan demikian, $EM = mgy_m = 55 \times 10 \times 0,2 = 110 \text{ J}$. Jadi, energi osilasi total temanmu adalah $EM = 110 \text{ J}$.

b) Energi kinetik maksimum sama dengan energi total. Jadi, $(1/2)mv_m^2 = 110 \text{ J}$, atau $(1/2) \times 55 \times v_m^2 = 110$, atau $v_m^2 = 4$, atau $v_m = 2 \text{ m/s}$.

c) Kembali ke persamaan umum $110 = (1/2)mv^2 + mgy$. Saat laju menjadi setengah laju maksimum maka $v = v_m/2 = 2/2 = 1 \text{ m/s}$. Ketinggian benda memenuhi $110 = (1/2) \times 55 \times 1^2 + 55 \times 10 \times y$ atau $2 = 1/2 + 10y$. Dengan demikian $y = 3/20 = 0,15 \text{ m}$.

PENUGASAN KELAS

- Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang osilasi pegas dan energi osilasi
- Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh dan latihan soal osilasi pegas dan energi osilasi

RANGKUMAN

1. Frekuensi osilasi pegas adalah

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

2. Periode osilasi pegas bergantung pada konstanta pegas dan massa beban yang digantung pada pegas.
3. Bandul sederhana berosilasi di bawah pengaruh gaya gravitasi. Dengan demikian, energi potensial bandul memenuhi $EP = mgy$ dengan m adalah massa beban, g adalah percepatan gravitasi, dan y adalah ketinggian beban dari posisi terendah. Persamaan energi mekanik benda yang berosilasi di bawah pengaruh gaya bandul sederhana adalah

$$v_m^2 = v^2 + 2gy$$

4. Persamaan energi mekanik benda yang berosilasi di bawah pengaruh gaya pegas

$$v_m^2 = v^2 + 4f^2 y^2$$

5. Dengan bandul sederhana kita dapat mengukur percepatan gravitasi bumi di tempat kita berada.

EVALUASI FORMATIF 3

1. Turunkanlah persamaan untuk menghitung frekuensi osilasi pada osilasi pegas !
2. Sebuah pegas memiliki konstanta 25 N/m. Pegas tersebut digantungi beban 50 g. Dari posisi setimbang, pegas diberi laju awal 0,5 m/s. Berapa simpangan maksimum osilasi pegas
3. Pegas dengan beban 800 g sedang berosilasi. Kamu melakukan pengukuran osilasi pegas tersebut dengan mistar. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa frekuensi osilasi pegas adalah 5 Hz. Dengan menggunakan mistar kamu mengukur bahwa jarak antara posisi terendah dan tertinggi beban adalah 10 cm. Dari hasil tersebut berapa energi total osilasi pegas

Lembar Kerja Praktek 3

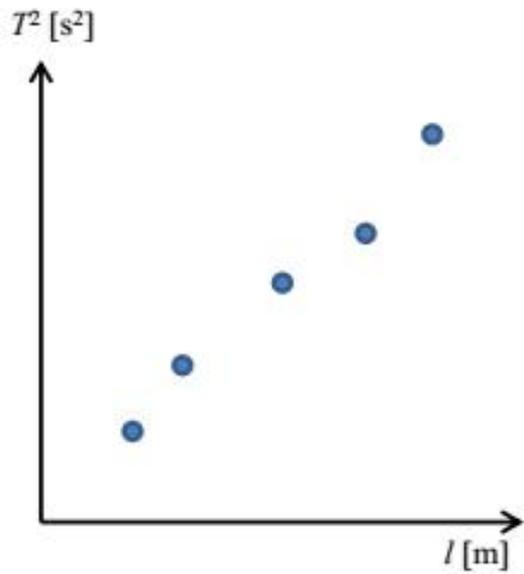
Praktikum Osilasi**Mengukur Percepatan Gravitasi Bumi**

Dengan bandul sederhana kita dapat mengukur percepatan gravitasi bumi di tempat kita berada. Dengan peralatan yang mudah dan murah tersebut kalian dapat menalukan percobaan fisika yang menarik. Alat yang dibutuhkan cuma tali, beban apa saja (bisa batu), meteran dan *stopwatch*. Untuk *stopwatch* kalian dapat menggunakan hp, karena hp yang paling sederhana pun sudah memiliki *stopwatch*.

Kita mulai dari persamaan untuk frekuensi osilasi bandul $f = (1/2\pi) \sqrt{g/l}$ atau $f^2 = (1/4\pi^2)g/l$. Karena $T=1/f$ maka kita dapat menulis $1/T^2 = (1/4\pi^2)g/l$ atau

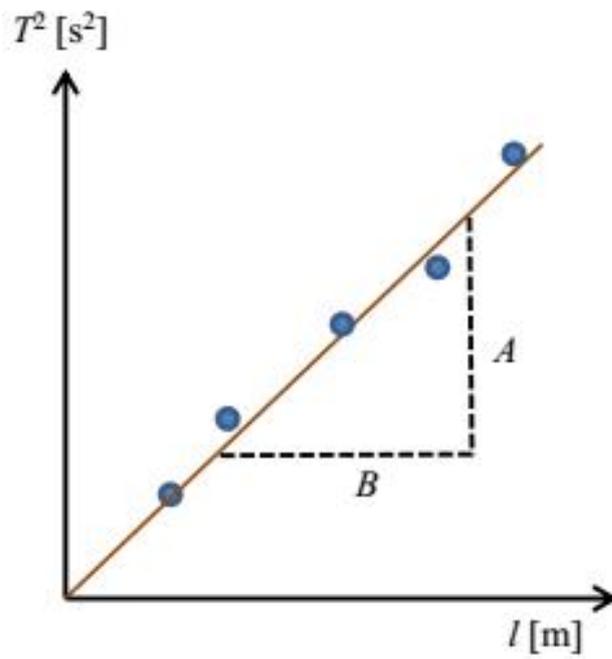
$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g}l \quad (1.21)$$

Langkah percobaan yang harus kalian lakukan sebagai berikut. Catat waktu yang diperlukan bandul untuk melakukan 20 kali ayunan penuh. Berdasarkan waktu tersebut kalian hitung periode ayunan bandul (lama waktu/20). Ubah panjang bandul dan lakukan langkah serupa (menghitung periode). Lakukan untuk 5 buah panjang yang berbeda. Jadi kalian memiliki lima pasang data, yaitu panjang bandul dan periode. Buat kurva kuadrat periode ayunan bandul (sumbu tegak) sebagai fungsi panjang bandul (sumbu horisontal). Kalian dapatkan lima titik pada kurva tersebut seperti pada Gambar 1.8.



Gambar 1.8. Kurva kuadrat periodik terhadap panjang bandul.

Selanjutnya tarik garis lurus yang melewati titik-titik tersebut sedekat mungkin (Gambar 7.8). Jelas tidak mungkin garis lurus tersebut melewati semua titik yang kalian dapat karena setiap percobaan pasti mengandung kesalahan. Kemudian cari kemiringan garis yang kalian buat dengan mengukur A dan B pada Gambar 1.9. Kemiringan garis tersebut adalah A/B . Kemiringan tersebut sama dengan $4\pi^2 / g$. Dengan demikian nilai percepatan gravitasi bumi dapat kalian tentukan. Nilai yang lebih teliti akan kalian dapatkan juga menggunakan variasi panjang bandul lebih banyak.



Gambar 1.9. Titik pengamatan dihubungkan dengan garis lurus. Pilih garis lurus yang paling mendekati semua titik pengamatan. Selanjutnya cari kemiringan garis yang dibuat, yaitu A/B

Lembar Kerja Praktikum

RANGKUMAN MODUL

1. Osilasi adalah gerak bolak balik di sekitar posisi setimbang.
2. Syarat osilasi adalah saat benda menyimpang dari posisi setimbang harus ada gaya yang menarik kembali benda ke arah posisi setimbang.
3. Pada peristiwa osilasi arah gaya selalu berlawanan dengan arah simpangan. Bentuk paling sederhana persamaan osilasi yang memenuhi kriteria di atas adalah

$$F = -Cy$$

4. Jika osilasi terjadi dalam ruang tiga dimensi maka gaya penyebab osilasi memenuhi persamaan

$$\vec{F} = -K\vec{r}$$

5. Jadi, frekuensi osilasi f ditentukan oleh konstanta C dan massa benda yang berosilasi. Nilai f di atas disebut juga *frekuensi alamiah* benda yang berosilasi. Secara umum, jika diperoleh hubungan $a = -\alpha y$ dengan α adalah konstanta maka frekuensi osilasi memenuhi

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\alpha}$$

6. Salah satu bentuk gerak osilasi yang lain adalah gerak bandul matematis sederhana.
7. Sifat bandul matematis sederhana adalah simpangan tidak boleh terlalu besar. Kalau simpangan sangat besar maka gaya yang bekerja pada benda tidak lagi berbanding lurus dengan simpangan.
8. Gaya berbanding lurus simpangan hanya untuk simpangan kecil.
9. Frekuensi osilasi bandul matematis sederhana adalah

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

10. Frekuensi osilasi pegas adalah

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

11. Periode osilasi pegas bergantung pada konstanta pegas dan massa beban yang digantung pada pegas.
12. Bandul sederhana berosilasi di bawah pengaruh gaya gravitasi. Dengan demikian, energi potensial bandul memenuhi $EP = mgy$ dengan m adalah massa beban, g adalah percepatan gravitasi, dan y adalah ketinggian beban dari posisi terendah. Persamaan energi mekanik benda yang berosilasi di bawah pengaruh gaya bandul sederhana adalah

$$v_m^2 = v^2 + 2gy$$

13. Persamaan energi mekanik benda yang berosilasi di bawah pengaruh gaya pegas

$$v_m^2 = v^2 + 4f^2 y^2$$

14. Dengan bandul sederhana kita dapat mengukur percepatan gravitasi bumi di tempat kita berada.

DAFTAR PUSTAKA

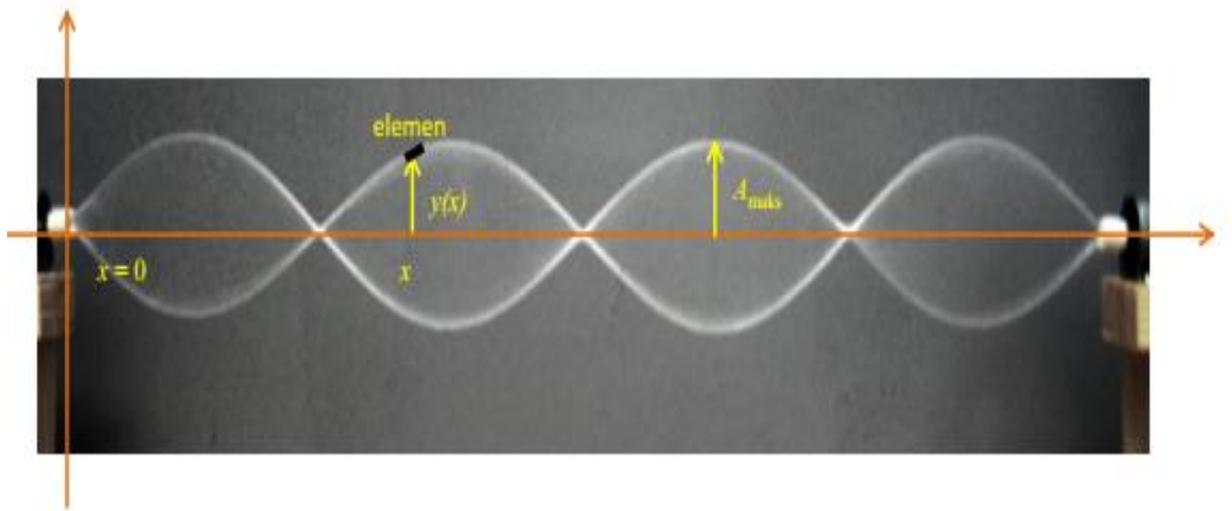
- Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta : Penerbit Andi
- Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing
- Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I
- Abdullah, Mikrajuddin. 2016. *Fisika Dasar 1*. Bandung : E-book.

Modul 2: Aplikasi Osilasi

PENDAHULUAN

Kalau kita potret dawai yang sedang dipetik akan tampak seperti Gambar 2.1 Tampak terbentuknya sejumlah perut dan simpul. Karena dua ujung dawai diikat pada titik tetap maka ujung dawai selalu memiliki simpangan nol.

Mengapa polanya demikian? Sebenarnya dawai gitar dapat dianggap sebagai sejumlah elemen yang berosilasi. Bayangkan dawai gitar dipotong-potong atas sejumlah elemen yang sangat pendek. Jumlah elemen menuju tak berhingga karena panjang tiap elemen mendekati nol. Tiap elemen berosilasi dengan frekuensi yang sama tetapi dengan amplitudo yang berbeda. Jadi, amplitudo osilasi elemen-elemen dawai merupakan fungsi posisi.



Gambar 2.1. Pola simpangan dawai yang digetarkan. Terbentuk sejumlah perut dan simpul. Karena dua ujung dawai diikat pada titik tetap maka ujung dawai selalu memiliki simpangan nol.

Kegiatan Pembelajaran 1: Resonansi

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai resonansi
2. Mahasiswa mampu merancang contoh aplikasi penggunaan resonansi dalam kehidupan sehari-hari

URAIAN MATERI

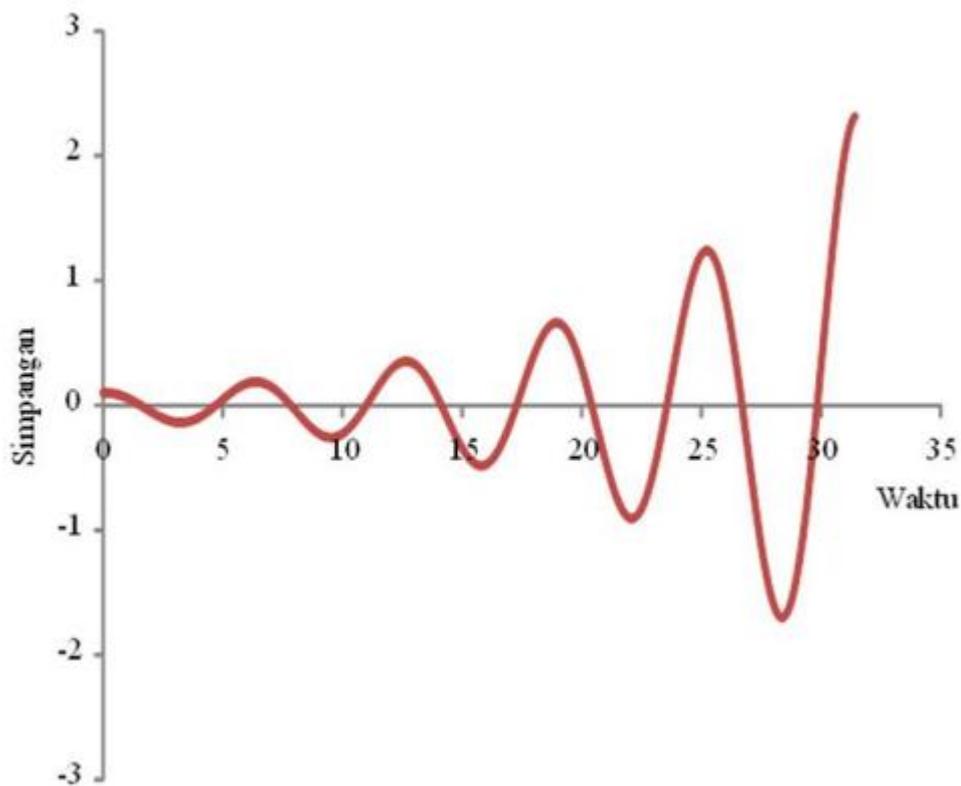
Konsep Dasar

Ketika disimpangkan dari posisi setimbang maka benda berosilasi pada frekuensi tertentu. Frekuensi ini disebut *frekuensi alamiah* benda. Untuk bandul matematis sederhana, frekuensi alamiahnya adalah $f = (1/2\pi) (g/l)^{1/2}$. Untuk pegas yang digantungi beban, frekuensi alamiahnya adalah $f = (1/2\pi) (k/m)^{1/2}$. Apa istimewanya frekuensi alamiah?

Yang istimewa dari frekuensi alamiah adalah jika pada benda diberi gangguan secara periodik (terus menerus) dengan frekuensi pemberian gangguan sama dengan frekuensi alamiah, maka benda akan berosilasi dengan amplitudo yang makin lama makin besar. Simpangan akan sangat besar jika gangguan berlangsung cukup lama, meskipun kekuatan tiap gangguan cukup kecil. Perubahan simpangan benda terhadap waktu diilustrasikan pada Gambar 2.2

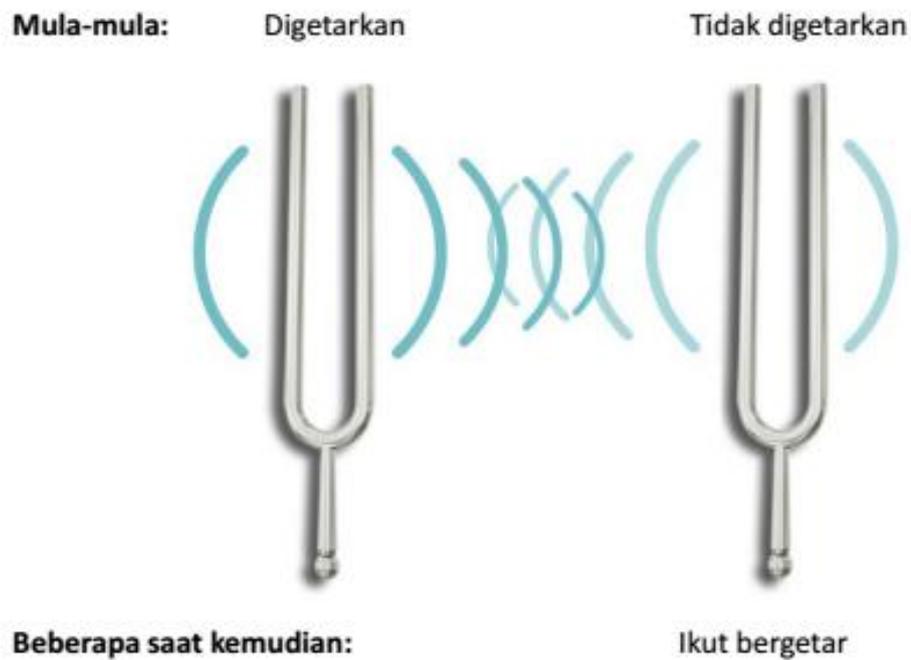
Sebagai contoh adalah bandul matematis sederhana yang sedang diam. Kemudian kalian tiup beban dengan tiupan kecil berulang-ulang. Atur agar frekuensi tiupan yang kalian berikan persis sama dengan frekuensi alamiah bandul. Kalian akan amati bahwa simpangan bandul sedikit demi sedikit membesar. Pada kasus ini frekuensi pengganggu persis sama dengan frekuensi alamiah benda yang diganggu. Sebagai akibatnya, amplitudo benda yang berosilasi makin besar jika pengganggu berlangsung terus menerus. Inilah peristiwa resonansi. Contoh lain adalah garpu tala sejenis yang ditempatkan berdekatan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Garpu tala kiri digetarkan, namun garpu tala kanan tidak digetarkan. Jika ditunggu maka garpu tala kanan mulai bergetar, mula-mula dengan simpangan kecil, lalu simpangan makin membesar. Mengapa demikian?

Garpu tala sejenis memiliki frekuensi alamiah yang sama. Ketika garpu tala kiri digetarkan maka udara di sekitar garpu tala kiri ikut bergetar pada frekuensi yang sama. Udara yang bergetar makin jauh hingga udara yang bersentuhan dengan garpu tala kanan. Karena frekuensi getaran udara sama dengan frekuensi alamiah garpu tala, maka garpu tala kanan mulai mendapatkan gangguan yang persis sama dengan frekuensi alamiahnya. Walaupun gangguan oleh udara kecil, namun karena berlangsung pada frekuensi alamiah dan terus menerus maka amplitudo garpu tala kanan makin lama makin besar. Jika garpu tala kiri digetarkan dalam waktu yang cukup lama maka garpu tala kanan dapat beresonansi hingga simpangan terbesar. Inilah peristiwa resonansi.

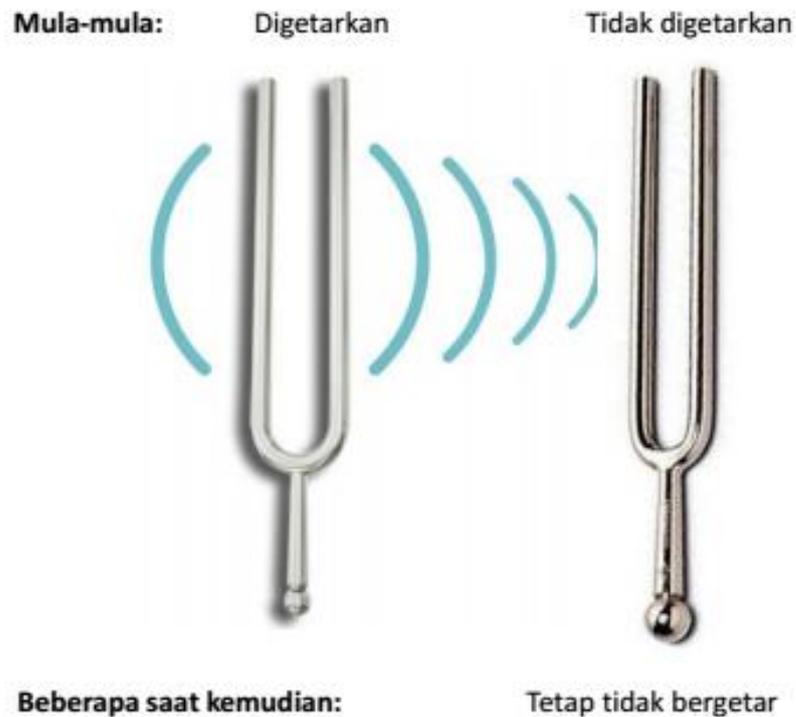


Gambar 2.2 Perubahan simpangan benda yang diberi gangguan dengan frekuensi sama dengan frekuensi alamiahnya.

Kondisi berbeda jika dua garpu tala tidak identik, atau frekuensi alamiah tidak sama (Gambar 2.4). Berapa lama pun garpu tala kiri bergetar, garpu tala kanan tetap tidak bergetar karena resonansi tidak akan terjadi.



Gambar 2.3. Dua garpu tala identik dan memiliki frekuensi alamiah yang sama. Garpu tala kiri saja yang digetarkan sedangkan garpu tala kanan tidak diganggu. Namun, beberapa saat kemudian garpu tala kanan akan ikut bergetar dengan frekuensi yang sama. Inilah peristiwa resonansi



Gambar 2.4 Dua garpu tala tidak identik sehingga memiliki frekuensi alamiah yang tidak sama. Garpu tala kiri saja yang digetarkan sedangkan garpu tala kanan tidak diganggu. Berapa lama pun garpu tala kiri digetarkan, garpu tala kanan tetap tidak bergetar akibat tidak terjadi peristiwa resonansi.

Resonansi dapat memiliki efek yang luar biasa pada bangunan. *Tacoma Narrow Bridge* (jembatan Tacoma) yang merupakan jembatan gantung di Washington, USA ambruk tanggal 7 November 1940 (Gambar 2.5). Padahal jembatan tersebut baru saja dibuka tanggal 1 Juli 1940. Jembatan gantung sepanjang 1,8 km tersebut ambruk oleh tiupan angin dengan kecepatan 64 km/jam. Banyak yang menyebutkan bahwa ambruknya jembatan tersebut disebabkan peristiwa resonansi. Angin yang bertiup membawa getaran pada frekuensi yang sama dengan frekuensi alamiah jembatan sehingga jembatan mengalami osilasi dengan amplitudo makin besar. Osilasi dengan amplitudo tak terkontrol menyebabkan kegagalan struktur jembatan sehingga jembatan ambruk.



Gambar 2.5. Jembatan *Tacoma Narrow Bridge* diduga ambruk karena peristiwa resonansi. Angin yang bertiup pelan membawa osilasi yang sama persis dengan frekuensi alamiah jembatan. Akibatnya terjadi resonansi. Osilasi jembatan makin lama makin besar sehingga terjadi kegagalan struktur dan ambruk (faculty.plattsburgh.edu)

Ambruknya jalan bebas hambatan Nimitz di Oakland, California tahun 1989 juga contoh peristiwa resonansi. Dimulai dari gempa bumi yang memiliki getaran pada berbagai frekuensi rendah. Frekuensi getaranyang dibawa gempa biasanya tersebar antara 1 Hz sampai 10 Hz. Bagian jembatan Nimitz ada yang dibangun di atas tanah berlumpur yang memiliki frekuensi alamiah sekitar 2,5 Hz. Ketika terjadi gempa, maka frekuensi 2,5 Hz yang terkandung dalam gempa menggetarkan tanah berlumpur tempat jembatan dibangun. Terjadi resonansi sehingga lapisan tanah bergetar sangat kencang yang berakibat jembatan yang dibangun di atasnya ambruk (Gambar 2.6).



Gambar 2.6. Jalan bebas hambatan Nimitz di Oakland, California yang ambruk tahun 1989 akibat peristiwa resonansi saat terjadi gempa bumi. Gempa bumi membawa frekuensi yang sama dengan frekuensi alamiah lapisan tanah tempat jembatan dibangun (vias.org)

Saat ini para insinyur harus memperhitungkan kondisi lingkungan ketika membuat bangunan atau jembatan. Pada lokasi tersebut, berapa saja frekuensi yang dibawa oleh angin dan kalau terjadi gempa, berapa frekuensi yang dibawa getaran gempa. Tanah yang ada juga harus diketahui frekuensi alamiahnya sehingga tidak bergoncang keras saat terjadi gempa yang menyebabkan bangunan di atasnya ambruk. Berdasarkan data tersebut maka bangunan atau jembatan dirancang agar memiliki frekuensi alamiah yang jauh dari frekuensi angin atau gempa yang terjadi atau mungkin terjadi di tempat tersebut. Dengan demikian saat terjadi tiupan angin atau saat muncul gempa tidak terjadi resonansi. Sehingga jembatan atau bangunan tidak ambruk.

Mengapa resonansi terjadi? Gangguan yang diberikan pada benda yang berosilasi dapat dipandang sebagai penyerahan energi pada benda berosilasi tersebut. Jika energi diberikan pada saat yang tepat maka energi tersebut akan terus-menerus diserap oleh benda yang sedang berosilasi sehingga energi benda yang berosilasi makin besar. Energi akan terus menerus diserap benda apabila frekuensi pemberian gangguan persis sama dengan frekuensi alamiah osilasi benda.

Berikut ini adalah hasil perhitungan frekuensi alamiah sejumlah bangunan di Amerika Serikat. Pine Flat Dam di Sacramento yang memiliki ketinggian 400 kaki (Gambar 7.15) memiliki frekuensi alamiah 3,47 Hz pada kedalaman 310 kaki dan 3,27 Hz pada kedalaman 345 kaki. Golden Gate Bridge memiliki frekuensi alamiah 0,055 Hz untuk getaran arah transversal, 0,092 Hz untuk getaran vertikal, 0,26 Hz untuk getaran arah longitudinal, dan 0,23 Hz untuk getaran torsional.



Gambar 2.7 Pine Flat Dam di Sacramento, Californai, Amerika Serikat memiliki frekuensi alamiah 3,47 Hz pada kedalaman 310 kaki dan 3,27 Hz pada kedalaman 345 kaki (gambar: www.spk.usace.army.mil)

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah perumusan resonansi
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil contoh soal dan pengaplikasian resonansi dalam kehidupan nyata.

RANGKUMAN

1. Ketika disimpangkan dari posisi setimbang maka benda berosilasi pada frekuensi tertentu. Frekuensi ini disebut *frekuensi alamiah* benda.
2. Yang istimewa dari frekuensi alamiah adalah jika pada benda diberi gangguan secara periodik (terus menerus) dengan frekuensi pemberian gangguan sama dengan frekuensi alamiah, maka benda akan berosilasi dengan amplitudo yang makin lama makin besar. Simpangan akan sangat besar jika gangguan berlangsung cukup lama, meskipun kekuatan tiap gangguan cukup kecil.
3. Garpu tala sejenis memiliki frekuensi alamiah yang sama. Ketika garpu tala kiri digetarkan maka udara di sekitar garpu tala kiri ikut bergetar pada frekuensi yang sama. Udara yang bergetar makin jauh hingga udara yang bersentuhan dengan garpu tala kanan. Karena frekuensi getaran udara sama dengan frekuensi alamiah garpu tala, maka garpu tala kanan mulai mendapatkan gangguan yang persis sama dengan frekuensi alamiahnya. Walaupun gangguan oleh udara kecil, namun karena berlangsung pada frekuensi alamiah dan terus menerus maka amplitudo garpu tala kanan makin lama makin besar. Jika garpu tala kiri digetarkan dalam waktu yang cukup lama maka garpu tala kanan dapat berosilasi hingga simpangan terbesar. Inilah peristiwa resonansi.
4. Kondisi berbeda jika dua garpu tala tidak identik, atau frekuensi alamiah tidak sama. Berapa lama pun garpu tala kiri bergetar, garpu tala kanan tetap tidak bergetar karena resonansi tidak akan terjadi.
5. Resonansi dapat memiliki efek yang luar biasa pada bangunan. *Tacoma Narrow Bridge* (jembatan Tacoma) yang merupakan jembatan gantung di Washington, USA ambruk tanggal 7 November 1940
6. Mengapa resonansi terjadi? Gangguan yang diberikan pada benda yang berosilasi dapat dipandang sebagai penyerahan energi pada benda berosilasi tersebut. Jika energi diberikan pada saat yang tepat maka energi tersebut akan terus-menerus diserap oleh benda yang sedang berosilasi sehingga energi benda yang berosilasi makin besar. Energi akan terus menerus diserap benda apabila frekuensi pemberian gangguan persis sama dengan frekuensi alamiah osilasi benda.

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskan apa yang dimaksud resonansi !
2. Jelaskan kenapa bisa terjadi resonansi !
3. Jelaskan bagaimana menghindari efek buruk resonansi pada bangunan seperti jembatan dan bangunan lainnya !
4. Jelaskan aplikasi dari resonansi !
5. Gempa bumi yang terjadi di suatu kota membuat banyak bangunan di kota tersebut roboh. Yang roboh juga termasuk bangunan yang dibuat dengan mengikuti standar yang ketat. Menurut kalian, apa penyebab utama robohnya bangunan tersebut.

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Osilasi Teredam

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami osilasi teredam
2. Mahasiswa mampu mengerjakan contoh dan latihan soal osilasi teredam dan aplikasi pada kehidupan nyata.

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

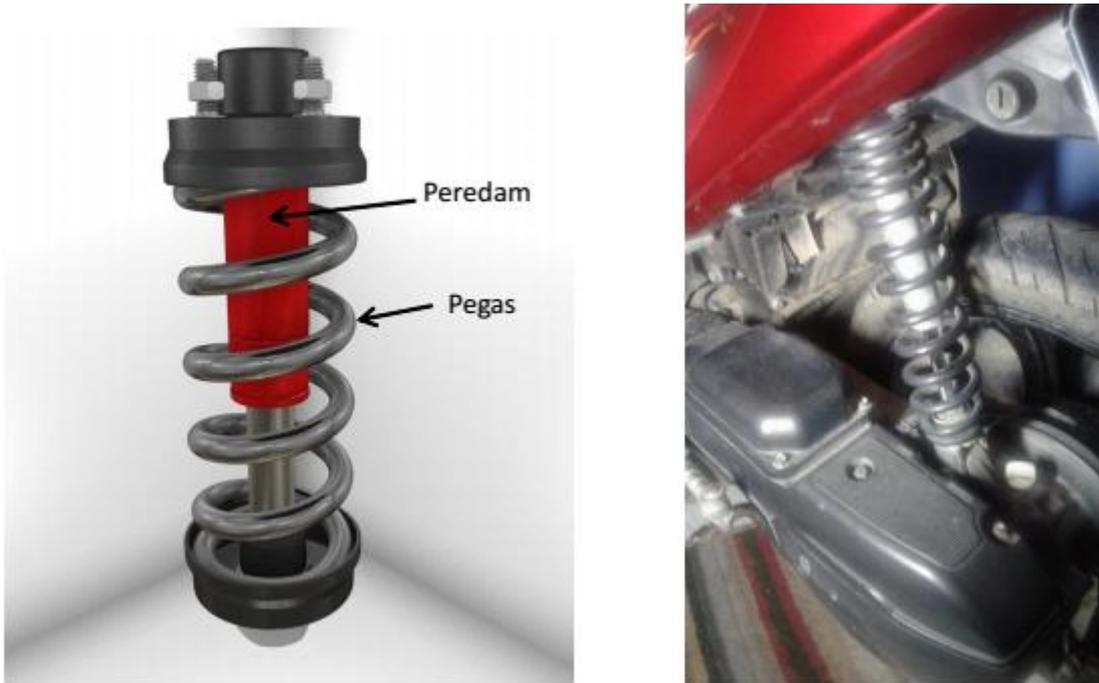
Pernah melihat *shockbreaker* motor? Bentuknya seperti pegas yang sangat kuat (gambar 2.9). Mobil pun sekarang dilengkapi dengan shockbreaker, khususnya mobil ukuran kecil. Kalau mobil jaman dulu tidak menggunakan shockbreaker tetapi sejumlah lempengan baja tempat melekatkan as mobil. Mobil besar seperti bus dan truk hingga saat ini masing menggunakan lempengan baja tersebut.

Sakitnya jatuh dan desain shockbreaker. Misalkan kamu jatuh dari ketinggian 1 meter dan lutut mengenai tanah. Jika diasumsikan bahwa lama lutut menyentuh tanah 0,1 detik maka gaya yang dialami lutut 2.214 N. Sakit yang dirasakan lutut sama dengan sakit yang dirasakan saat menahan batu bermassa 221 kg (lebih dari 2 karung goni beras).



Gambar 2.8 Golde Gate Dridge memiliki frekuensi alamiah 0,055 Hz untuk getaran arah transversal, 0,092 Hz untuk getaran vertikal, 0,26 Hz untuk getaran agah longitudinal, dan 0,23 Hz untuk getaran torsional.

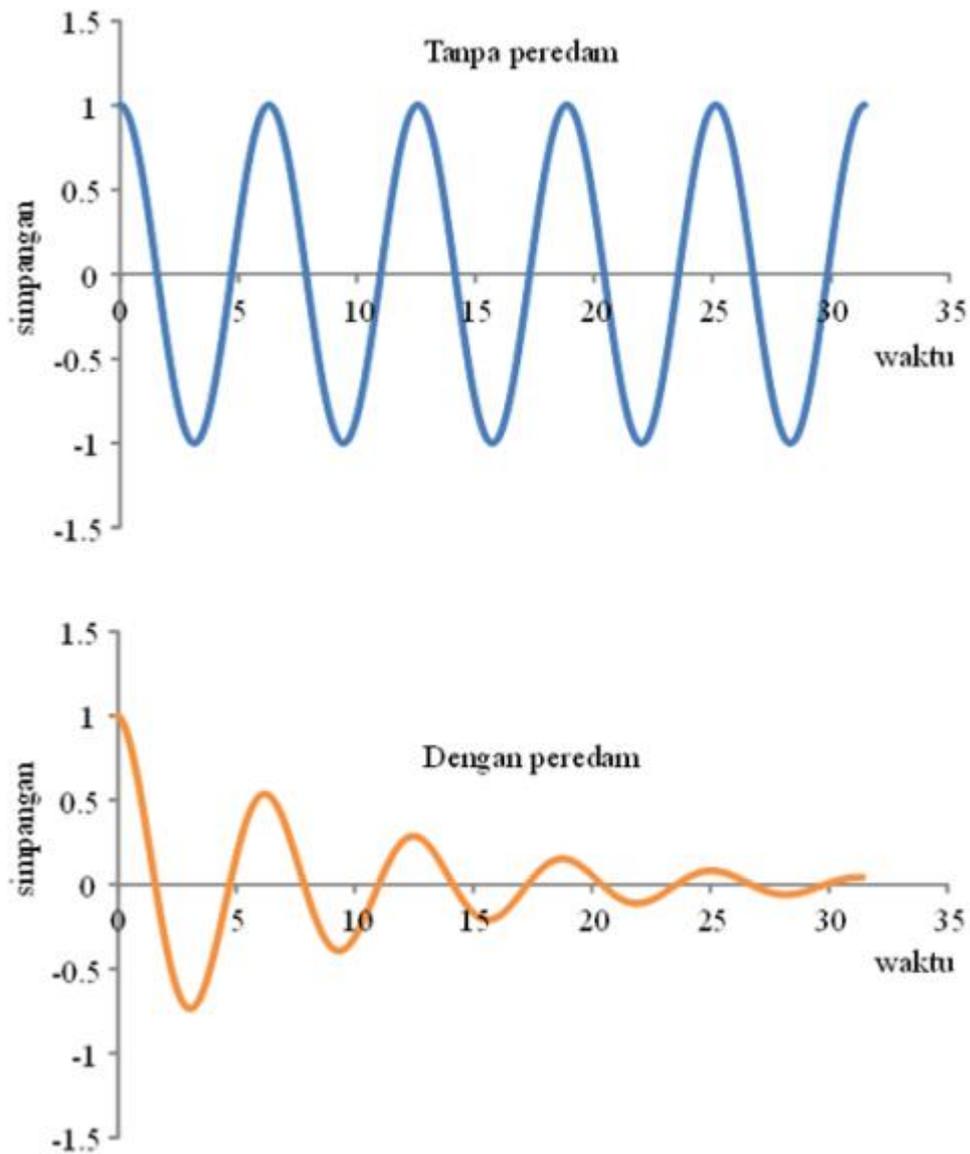
Untuk memperkecil gaya yang dirasakan saat jatuh, maka waktu berhenti saat jatuh harus diperbesar. Salah satu caranya adalah jatuh pada pegas. Jika jatuh pada pegas maka pegas akan memendek secara perlahan-lahan baru berhenti. Waktu berhenti kira-kira seperempat periode osilasi pegas. Jika perode osilasi pegas 1 detik maka gaya yang dirasakan ketika jatuh dari ketinggian 1 meter hanya 886 N atau setara dengan menahan beban 88,6 kg. Kalau periode pegas 3 detik maka beban yang ditahan sekitar 30 kg. Sifat pegas seperti inilah yang dimanfaatkan dalam pembuatan *shockbreaker*.



Gambar 2.9 .(kiri) contoh shockbreaker dan (kanan) shockbreaker yang dipasang di motor (kiosonderdil.com , luweh.com)

Salah satu bagian utama shockbreaker adalah pegas. Guna pegas adalah untuk menghasilkan osilasi. Tujuan pemasangan *shockbreaker* adalah agar kendaraan jatuh atau naik secara perlahan-lahan ketika melintasi jalan yang tidak rata. Tanpa *shockbreaker*, guncangan kendaraan akan sangat kasar dan tiba-tiba jika roda melintasi jalan berlubang atau melewati penghalang seperti batu. Pegas pada *shockbreaker* menghindari guncangan kasar dan tiba-tiba tersebut dan guncangan yang terjadi menjadi mulus. Jika ada jalan rusak maka kendaraan melakukan gerakan osilasi sehingga terasa lebih nyaman bagi penumpang. Konstanta pegas *shockbreaker* dirancang sedemikian rupa sehingga frekuensi osilasi kendaraan berada pada frekuensi kenyamanan manusia.

Tetapi menjadi tidak nyaman jika osilasi berlangsung terus menerus meskipun kendaraan sudah memasuki jalan mulus. Jika *shockbreaker* hanya terdiri dari pegas maka osilasi kendaraan akan terjadi sangat lama. Bisa jadi osilasi kendaraan berlangsung terus hingga jarak ratusan meter. Tentu tidak nyaman bukan? Oleh karena itu, *shockbreaker* dilengkapi bagian lain yaitu peredam.



Gambar 2.10. (atas) simpangan pegas kalau tidak ada peredam (b) simpangan pegas yang memiliki peredam.

Guna peredam adalah membuang energi osilasi sehingga osilasi segera hilang setelah beberapa saat. Peredam dapat berupa benda yang bergerak maju mundur dalam wadah berisi bubuk atau zat cair kental. Ketika terjadi osilasi maka benda dalam bubuk atau cairan tersebut ikut berosilasi. Gesekan dengan bubuk atau cairan menyebabkan hilangnya energi osilasi menjadi panas. Akibatnya, amplitudo osilasi makin lama makin kecil dan akhirnya hilang. Gambar 2.11 adalah simpangan osilasi tanpa dan dengan adanya peredam. Kalian dapat mempraktekkan osilasi teredam dengan menggunakan bandul matematis atau pegas yang memiliki beban. Amati simpangan bandul ketika beban berosilasi bebas di udara dan ketika beban berosilasi di dalam

wadah berisi air. Amati simpangan pegas ketika beban berosilasi bebas di udara dan ketika beban berosilasi dalam wadah berisi air. Mungkin sebagian kali pernah naik kereta api. Amati rel kereta api. Rel tersebut diletakkan di atas batu kerikil bukan? (Gambar 7.19) Apa guna batu kerikil tersebut? Batu kerikil adalah peredam getaran rel. Ketika kereta lewat maka rel bergetar. Getaran rel harus segera dihentikan agar tidak terjadi pembengkokan permanen atau tidak memperlonggar baut pengikat rel. Caranya adalah energi getaran rel harus segera dibuang. Bahan yang cukup efektif dan murah untuk menyerap energi getaran rel adalah kerikil. Getaran rel menyebabkan kerikil yang bersentuhan dengan rel ikut bergetar. Getaran tersebut menyebabkan tumbukan antar kerikil sehingga timbul panas. Ini berarti energi getaran rel berubah menjadi panas. Akibatnya amplitudo getaran rel makin kecil dan akhirnya rel berhenti bergetar.



Gambar 2.11. Rel kereta api ditempatkan di atas kerikil atau pecahan batu kecil-kecil. Guna kerikil adalah meredam getaran rel. Saat kereta lewat, rel bergetar. Setelah kereta melintas, getaran rel harus segera berhenti agar rel tidak bengkok permanen (beritakalimantan.co).

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang osilasi teredam
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh dan latihan osilasi teredam pada aplikasi sehari-hari

RANGKUMAN

1. Salah satu cara agar memperkecil gaya yang dirasakan saat jatuh, agar waktu berhenti saat jatuh diperbesar adalah jatuh pada pegas.
2. Salah satu bagian utama shockbreaker adalah pegas. Guna pegas adalah untuk menghasilkan osilasi. Tujuan pemasangan *shockbreaker* adalah agar kendaraan jatuh atau naik secara perlahan-lahan ketika melintasi jalan yang tidak rata. Tanpa *shockbreaker*, guncangan kendaraan akan sangat kasar dan tiba-tiba jika roda melintasi jalan berlubang atau melewati penghalang seperti batu.
3. Jika osilasi berlangsung terus menerus meskipun kendaraan sudah memasuki jalan mulus maka akan menjadi tidak nyaman. Oleh karena itu, *shockbreaker* dilengkapi bagian lain yaitu peredam.
4. Guna peredam adalah membuang energi osilasi sehingga osilasi segera hilang setelah beberapa saat. Peredam dapat berupa benda yang bergerak maju mundur dalam wadah berisi bubuk atau zat cair kental. Ketika terjadi osilasi maka benda dalam bubuk atau cairan tersebut ikut berosilasi. Gesekan dengan bubuk atau cairan menyebabkan hilangnya energi osilasi menjadi panas. Akibatnya, amplitudo osilasi makin lama makin kecil dan akhirnya hilang.
5. Amati rel kereta api. Rel tersebut diletakkan di atas batu kerikil. Batu kerikil adalah peredam getaran rel. Ketika kereta lewat maka rel bergetar. Getaran rel harus segera dihentikan agar tidak terjadi pembengkokan permanen atau tidak memperlonggar baut pengikat rel. Caranya adalah energi getaran rel harus segera dibuang. Bahan yang cukup efektif dan murah untuk menyerap energi getaran rel adalah kerikil. Getaran rel menyebabkan kerikil yang bersentuhan dengan rel ikut bergetar. Getaran tersebut menyebabkan tumbukan antar kerikil sehingga timbul panas. Ini berarti energi getaran rel berubah menjadi panas. Akibatnya amplitudo getaran rel makin kecil dan akhirnya rel berhenti bergetar.

EVALUASI FORMATIF 2

1. Bagaimana cara mengurangi rasa sakit ketika jatuh dari ketinggian?
2. Bagaimana menghitung tekanan yang diterima ketika jatuh dari ketinggian?
3. Mengapa ada *shockbreaker* pada kendaraan?
4. Apa tujuan osilasi teredam?
5. Jelaskan aplikasi osilasi teredam !
6. Bagaimana jika rel dikereta tidak disediakan batu kerikil?
7. Gambarkan dan diskusikan amplitudo pada osilasi teredam ! Dan jelaskan kenapa bisa seperti itu !

Lembar Kerja Praktek 2

Kegiatan Pembelajaran 3: Spektrometer Inframerah

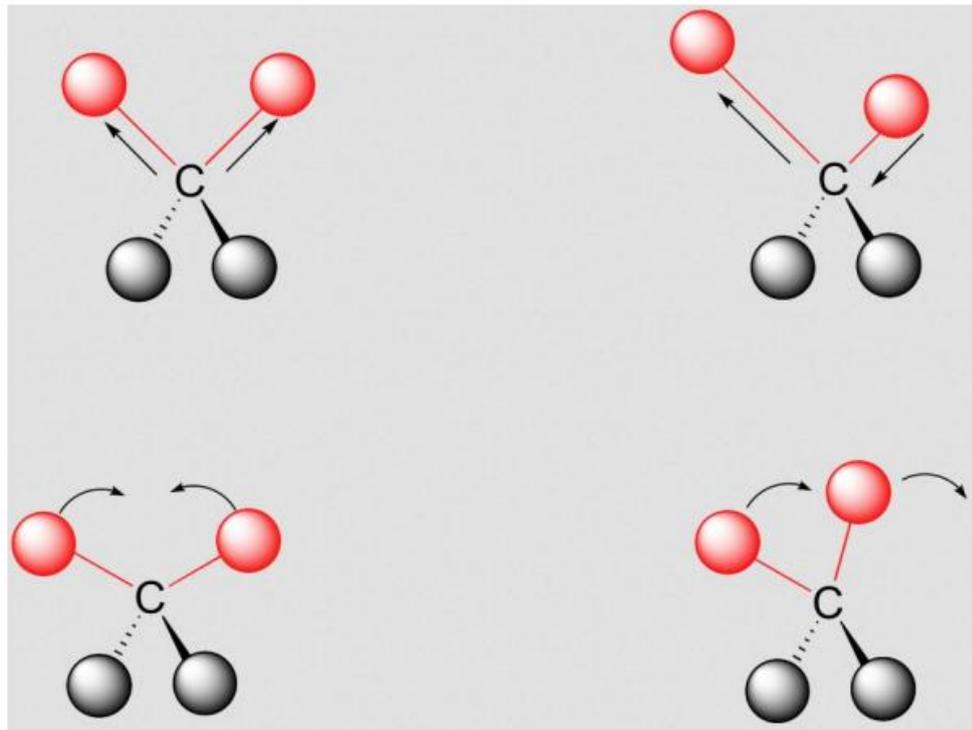
KEMAMPUAN YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang aplikasi osilasi pada spektrometer inframerah
2. Mahasiswa mampu mengerjakan contoh soal dan latihan yang berhubungan dengan aplikasi osilasi pada spektrometer inframerah

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Salah satu alat utama riset tentang molekul atau material adalah spektrometer inframerah. Spektrometer ini dirancang atas pemahaman para ahli bahwa semua atom penyusun molekul selalu bervibrasi atau berosilasi. Atom-atom yang berikatan dalam molekul selalu bergerak menjauh dan mendekat di sekitar titik setimbang. Dengan kata lain, atom-atom yang berikatan dalam molekul selalu berosilasi (Gambar 2.1). Frekuensi osilasi bergantung pada jenis atom berikatan. Tabel 2.1 adalah contoh frekuensi osilasi atom-atom yang berikatan.



Gambar 2.1. Atom-atom yang berikatan dalam molekul selalu berosilasi (chemwiki.ucdavis.edu). Frekuensi osilasi bergantung pada jenis atom yang berikatan.

Dari Table 2.1 tampak bahwa frekuensi osilasi atom dalam molekul berada dalam rentang antara 3×10^{13} Hz sampai $1,1 \times 10^{14}$ Hz. Frekuensi ini berada di daerah inframerah. Panjang gelombang inframerah berada dalam rentang 700 nm hingga 1 mm atau pada rentang frekuensi 3×10^{11} Hz – $4,3 \times 10^{14}$ Hz. Dengan demikian, jika gelombang inframerah diarahkan ke kumpulan molekul maka frekuensi yang tepat sama dengan frekuensi osilasi ikatan molekul akan menghasilkan peristiwa resonansi sehingga diserap oleh molekul tersebut. Frekuensi lainnya yang tidak sama dengan frekuensi ikatan molekul akan diloloskan (tidak diserap). Jika sinar inframerah yang menembus kumpulan molekul tersebut ditangkap dengan detektor maka ada sejumlah frekuensi yang hilang atau berkurang drastis intensitasnya. Frekuensi ini adalah frekuensi yang persis sama dengan frekuensi osilasi ikatan dalam molekul. Jadi, berdasarkan intensitas cahaya inframerah yang menembus molekul maka kita akan tahu ikatan apa saja yang dimiliki molekul tersebut. Dari jenis ikatan yang dimiliki maka kita akan tahu jenis molekul apa yang sedang kita ukur. Inilah prinsip yang digunakan dalam spectrometer inframerah (Gambar 2.2).

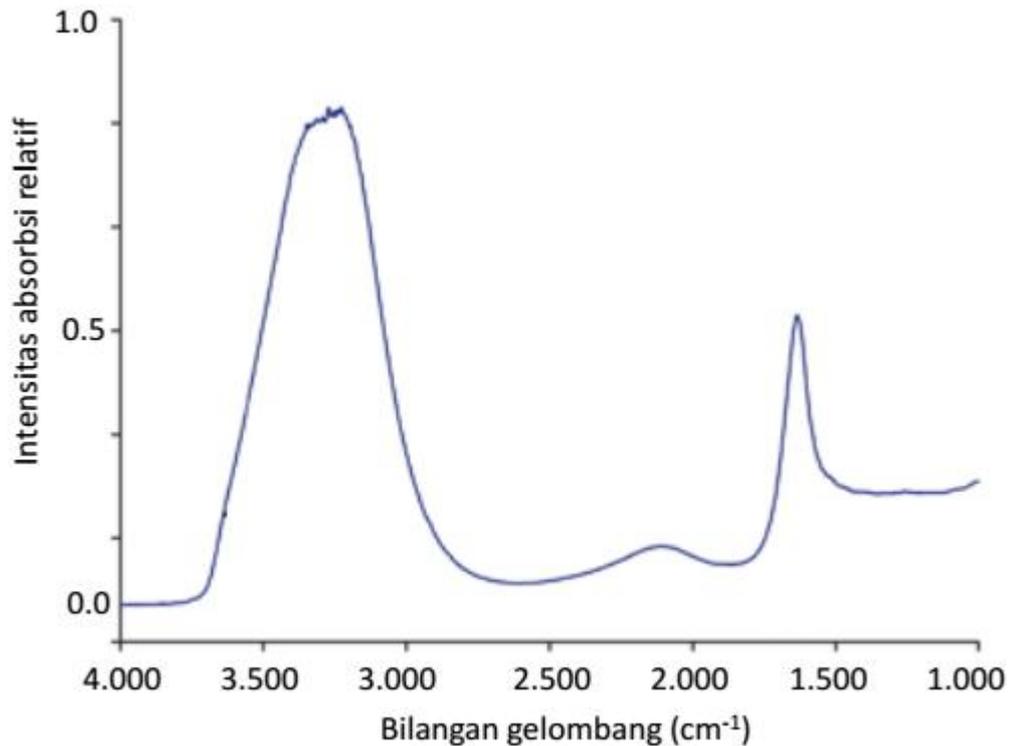
Tabel 2.1 Frekuensi osilasi sejumlah ikatan antar atom

Jenis ikatan	Frekuensi Osilasi ($\times 10^{13}$ Hz)	Jenis ikatan	Frekuensi Osilasi ($\times 10^{13}$ Hz)
Ikatan N - H	9,9 – 11,1	Ikatan C - H	9,03 – 9,9
Ikatan C = O	4,9 – 5,22	Ikatan C - N	3,1 – 4,02
Ikatan C = N	6,7 – 6,8	Ikatan C - O	3,0 – 3,78
Ikatan O - H	7,5 – 1,07	Ikatan C - F	3,0 – 4,2
Ikatan C = C	6,3 - 6,8	Ikatan N - O	4,04 – 4,16 dan 4,55 – 4,68



Gambar 2.2. Contoh spektrometer inframerah. Prinsip kerja alat ini adalah menembakkan sinar inframerah ke material. Cahaya inframerah yang lolos dideteksi. Cahaya yang lolos memiliki intensitas yang bervariasi: ada yang tetap tinggi dan ada yang sangat lemah. Intensitas yang sangat lemah menunjukkan bahwa pada frekuensi tersebut telah terjadi penyerapan oleh molekul karena terjadinya resonansi dengan osilasi ikatan molekul. Dari informasi ini dapat diketahui jenis ikatan apa yang ada. Dan pada akhirnya dapat diketahui jenis molekul yang ada (www.shimadzu.com).

Karena data frekuensi alamiah osilasi molekul sudah diukur dan ditabelkan maka dengan melihat data yang ada kita segera mengetahui ikatan-ikatan yang ada dalam material yang sedang diukur. Sebagai contoh, Gambar 2.3 adalah spektrum absorpsi inframerah molekul air. Jika kita mengukur spektrum inframerah zat dan didapat kurva seperti pada Gambar 2.3 maka dapat dipastikan bahwa zat tersebut adalah air atau mengandung banyak air.



Gambar 2.3. Spektrum absorpsi inframerah molekul air.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang hubungan spektrometer inframerah dan osilasi
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh aplikasi osilasi pada spektrometerserta jelaskan prinsip kerjanya

RANGKUMAN

1. Salah satu alat utama riset tentang molekul atau material adalah spektrometer inframerah.
2. Spektrometer ini dirancang atas pemahaman para ahli bahwa semua atom penyusun molekul selalu bervibrasi atau berosilasi.
3. Atom-atom yang berikatan dalam molekul selalu bergerak menjauh dan mendekat di sekitar titik setimbang. Dengan kata lain, atom-atom yang berikatan dalam molekul selalu berosilasi

4. Jika gelombang inframerah diarahkan ke kumpulan molekul maka frekuensi yang tepat sama dengan frekuensi osilasi ikatan molekul akan menghasilkan peristiwa resonansi sehingga diserap oleh molekul tersebut. Frekuensi lainnya yang tidak sama dengan frekuensi ikatan molekul akan diloloskan (tidak diserap).
5. Jika sinar inframerah yang menembus kumpulan molekul tersebut ditangkap dengan detektor maka ada sejumlah frekuensi yang hilang atau berkurang drastis intensitasnya. Frekuensi ini adalah frekuensi yang persis sama dengan frekuensi osilasi ikatan dalam molekul.
6. Jadi, berdasarkan intensitas cahaya inframerah yang menembus molekul maka kita akan tahu ikatan apa saja yang dimiliki molekul tersebut. Dari jenis ikatan yang dimiliki maka kita akan tahu jenis molekul apa yang sedang kita ukur.

EVALUASI FORMATIF 3

1. Jelaskan hubungan spektrometer dengan osilasi !
2. Mengapa aplikasi osilasi pada spektrometer harus pada panjang gelombang inframerah?
3. Jelaskan prinsip kerja spektrometer inframerah !
4. Jelaskan pengaplikasian osilasi pada spektrometer inframerah !
5. Jelaskan kegunaan spektrometer inframerah didalam suatu riset!

Lembar Kerja praktek 3

RANGKUMAN MODUL

1. Ketika disimpangkan dari posisi setimbang maka benda berosilasi pada frekuensi tertentu. Frekuensi ini disebut *frekuensi alamiah* benda.
2. Yang istimewa dari frekuensi alamiah adalah jika pada benda diberi gangguan secara periodik (terus menerus) dengan frekuensi pemberian gangguan sama dengan frekuensi alamiah, maka benda akan berosilasi dengan amplitudo yang makin lama makin besar. Simpangan akan sangat besar jika gangguan berlangsung cukup lama, meskipun kekuatan tiap gangguan cukup kecil.
3. Garpu tala sejenis memiliki frekuensi alamiah yang sama. Ketika garpu tala kiri digetarkan maka udara di sekitar garpu tala kiri ikut bergetar pada frekuensi yang sama. Udara yang bergetar makin jauh hingga udara yang bersentuhan dengan garpu tala kanan. Karena frekuensi getaran udara sama dengan frekuensi alamiah garpu tala, maka garpu tala kanan mulai mendapatkan gangguan yang persis sama dengan frekuensi alamiahnya. Walaupun gangguan oleh udara kecil, namun karena berlangsung pada frekuensi alamiah dan terus menerus maka amplitudo garpu tala kanan makin lama makin besar. Jika garpu tala kiri digetarkan dalam waktu yang cukup lama maka garpu tala kanan dapat berosilasi hingga simpangan terbesar. Inilah peristiwa resonansi.
4. Kondisi berbeda jika dua garpu tala tidak identik, atau frekuensi alamiah tidak sama. Berapa lama pun garpu tala kiri bergetar, garpu tala kanan tetap tidak bergetar karena resonansi tidak akan terjadi.
5. Resonansi dapat memiliki efek yang luar biasa pada bangunan. *Tacoma Narrow Bridge* (jembatan Tacoma) yang merupakan jembatan gantung di Washington, USA ambruk tanggal 7 November 1940.
6. Mengapa resonansi terjadi? Gangguan yang diberikan pada benda yang berosilasi dapat dipandang sebagai penyerahan energi pada benda berosilasi tersebut. Jika energi diberikan pada saat yang tepat maka energi tersebut akan terus-menerus diserap oleh benda yang sedang berosilasi sehingga energi benda yang berosilasi makin besar. Energi akan terus menerus diserap benda apabila frekuensi pemberian gangguan persis sama dengan frekuensi alamiah osilasi benda.
7. Salah satu cara agar memperkecil gaya yang dirasakan saat jatuh, agar waktu berhenti saat jatuh diperbesar adalah jatuh pada pegas.

8. Salah satu bagian utama shockbreaker adalah pegas. Guna pegas adalah untuk menghasilkan osilasi. Tujuan pemasangan *shockbreaker* adalah agar kendaraan jatuh atau naik secara perlahan-lahan ketika melintasi jalan yang tidak rata. Tanpa *shockbreaker*, guncangan kendaraan akan sangat kasar dan tiba-tiba jika roda melintasi jalan berlubang atau melewati penghalang seperti batu.
9. Jika osilasi berlangsung terus menerus meskipun kendaraan sudah memasuki jalan mulus maka akan menjadi tidak nyaman. Oleh karena itu, *shockbreaker* dilengkapi bagian lain yaitu peredam.
10. Guna peredam adalah membuang energi osilasi sehingga osilasi segera hilang setelah beberapa saat. Peredam dapat berupa benda yang bergerak maju mundur dalam wadah berisi bubuk atau zat cair kental. Ketika terjadi osilasi maka benda dalam bubuk atau cairan tersebut ikut berosilasi. Gesekan dengan bubuk atau cairan menyebabkan hilangnya energi osilasi menjadi panas. Akibatnya, amplitudo osilasi makin lama makin kecil dan akhirnya hilang.
11. Amati rel kereta api. Rel tersebut diletakkan di atas batu kerikil. Batu kerikil adalah peredam getaran rel. Ketika kereta lewat maka rel bergetar. Getaran rel harus segera dihentikan agar tidak terjadi pembengkokan permanen atau tidak memperlengkap baut pengikat rel. Caranya adalah energi getaran rel harus segera dibuang. Bahan yang cukup efektif dan murah untuk menyerap energi getaran rel adalah kerikil. Getaran rel menyebabkan kerikil yang bersentuhan dengan rel ikut bergetar. Getaran tersebut menyebabkan tumbukan antar kerikil sehingga timbul panas. Ini berarti energi getaran rel berubah menjadi panas. Akibatnya amplitudo getaran rel makin kecil dan akhirnya rel berhenti bergetar.
12. Salah satu alat utama riset tentang molekul atau material adalah spektrometer inframerah.
13. Spektrometer ini dirancang atas pemahaman para ahli bahwa semua atom penyusun molekul selalu bervibrasi atau berosilasi.
14. Atom-atom yang berikatan dalam molekul selalu bergerak menjauh dan mendekat di sekitar titik setimbang. Dengan kata lain, atom-atom yang berikatan dalam molekul selalu berosilasi.
15. Jika gelombang inframerah diarahkan ke kumpulan molekul maka frekuensi yang tepat sama dengan frekuensi osilasi ikatan molekul akan menghasilkan peristiwa resonansi sehingga diserap oleh molekul tersebut. Frekuensi lainnya yang tidak sama dengan frekuensi ikatan molekul akan diloloskan (tidak diserap).

16. Jika sinar inframerah yang menembus kumpulan molekul tersebut ditangkap dengan detektor maka ada sejumlah frekuensi yang hilang atau berkurang drastis intensitasnya. Frekuensi ini adalah frekuensi yang persis sama dengan frekuensi osilasi ikatan dalam molekul.
17. Jadi, berdasarkan intensitas cahaya inframerah yang menembus molekul maka kita akan tahu ikatan apa saja yang dimiliki molekul tersebut. Dari jenis ikatan yang dimiliki maka kita akan tahu jenis molekul apa yang sedang kita ukur.

DAFTAR PUSTAKA

- Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing
- Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I
- Abdullah, Mikrajuddin. 2016. *Fisika Dasar 1*. Bandung : E-book.

Modul 3:

Besaran Gelombang

PENDAHULUAN

Kalian tentu sudah sering mendengar istilah gelombang seperti gelombang suara, gelombang cahaya, gelombang laut, dan sebagainya. Kalian juga tentu pernah mengamati gelombang seperti gelombang air ketika batu dijatuhkan di permukaan air atau ketika perahu sedang bergerak. Tetapi apakah kalian sudah memahami apa gelombang itu? Bagaimana persamaan-persamaan fisika yang menerangkan gejala gelombang? Memahami persamaan fisis gelombang sangat penting mengingat aplikasi luar biasa gelombang dalam kehidupan kita. Dalam abad informasi dan komunikasi saat ini hidup kita tidak pernah lepas dari gelombang. Sebagai contoh, komunikasi hp menggunakan gelombang elektromagnetik sebagai pembawa suara atau gambar dari hp ke hp lain atau ke menara pemancar. Internet berbasis WiFi menggunakan gelombang untuk mengirim informasi. Kita melihat layar hp karena adanya gelombang cahaya dan kita mendengar suara percakapan atau musik karena adanya gelombang suara. Manusia menjadi tidak berdaya tanpa kehadiran gelombang. Dan makin hari manusia makin bergantung pada gelombang dan selalu mencari cara untuk memanfaatkan gelombang lebih besar lagi.

Kegiatan Pembelajaran 1: Defenisi Gelombang

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

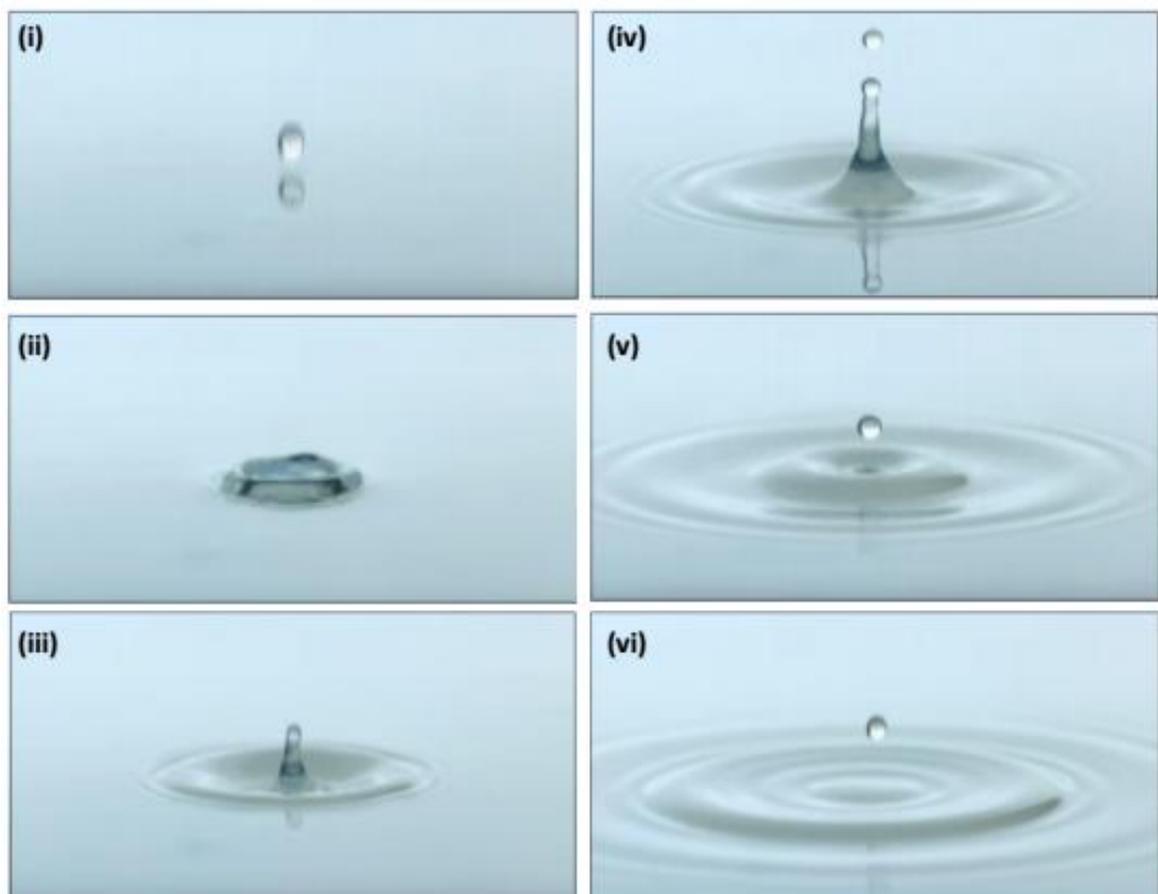
1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai besaran gelombang
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan penggunaan aplikasi gelombang

URAIAN MATERI**Konsep Dasar**

Kita mulai dengan definisi gelombang secara fisika. Apabila kita amati gelombang seperti penyebaran pola riak air ketika di permukaan air dijatuhkan batu, maka akan ada dua fenomena yang diamati sekaligus, yaitu

- a) Ada osilasi atau getaran, seperti titik di permukaan air yang bergerak naik dan turun
- b) Adanya perambatan pola

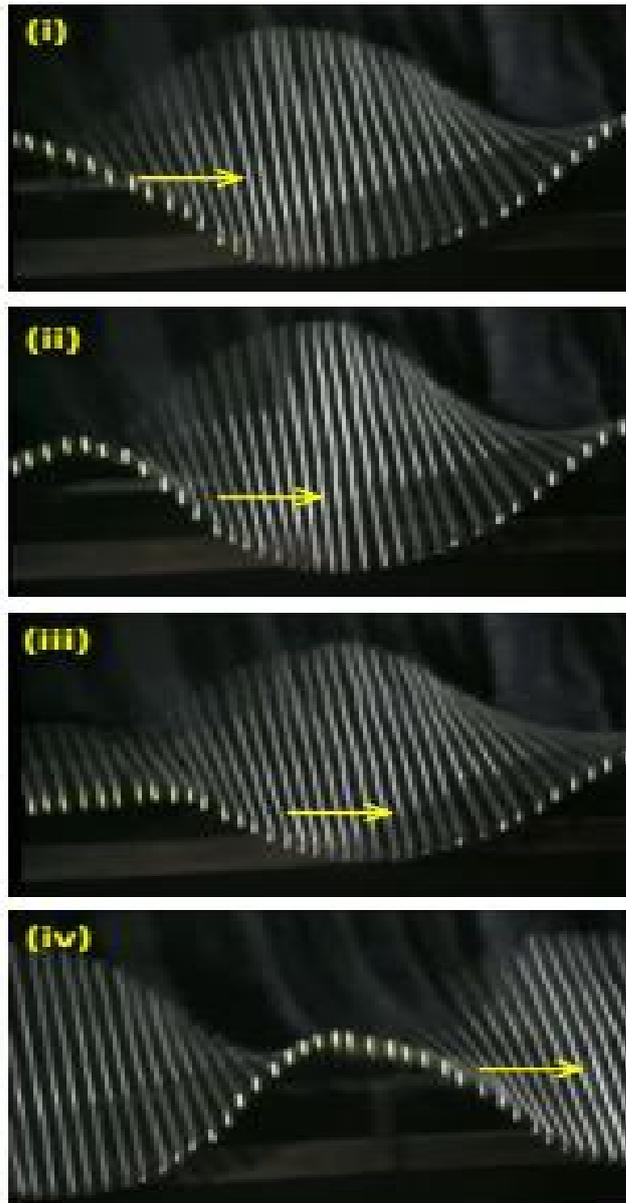
Dua peristiwa tersebut dapat dilihat pada **Gambar 3.1** mulai dari (i) sampai (vi). Titik-titik di permukaan air yang semula diam menjadi berosilasi naik turun. Pola yang semula berupa titik seukuran tetes air yang jatuh merambat keluar sehingga ukuran pola makin besar.



Gambar 3.1 Pada gelombang diamati dua fenomena sekaligus, yaitu osilasi titik pada medium dan perambatan pola osilasi. Titik-titik di permukaan air yang semula diam menjadi berosilasi naik turun. Pola yang semula berupa titik seukuran tetes air yang jatuh merambat keluar sehingga ukuran pola makin besar.

Dua fenomena ini pasti diamati pada gelombang apa saja. Ketika kalian menggetarkan salah satu ujung tali maka kalian akan melihat pola simpangan pada tali bergerak ke ujung tali yang lain. Namun kalian amati pula bahwa bagian-bagian tali itu sendiri tidak bergerak bersama pola gelombang. Titik-titik pada medium tempat perambatan hanya berosilasi di sekitar titik setimbangnya. Dari pengamatan tersebut kita dapat membuat definisi umum gelombang, yaitu:

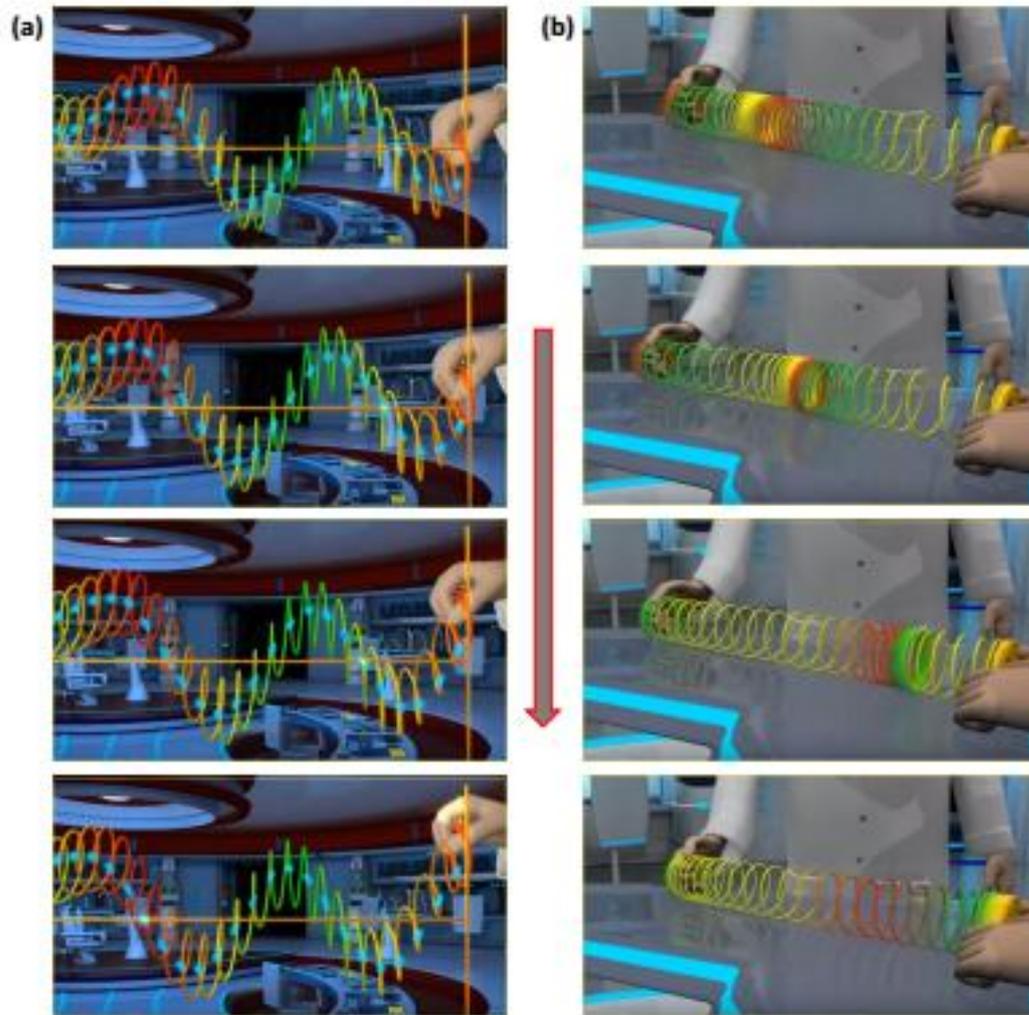
Gelombang adalah osilasi yang merambat



Gambar 3.2 Pada gelombang yang merambat hanya pola osilasi, sedangkan medium itu sendiri tidak merambat. Tampak batang-batang hanya berosilasi naik-dan turun tetapi tidak bergerak arah ke kiri atau ke kanan.

Jika perambatan gelombang memerlukan keberadaan suatu medium maka kita dapat mendefinisikan gelombang semacam ini sebagai **osilasi yang merambat pada suatu medium tanpa diikuti perambatan bagian-bagian medium itu sendiri**. **Gambar 3.2** lebih jelas menunjukkan bahwa pada gelombang yang merambat hanya pola osilasi, sedangkan medium itu sendiri tidak merambat. Pada gambar ini medium perambatan gelombang berupa batang-batang kecil yang ditempelkan pada sebuah kain atau kertas panjang. Tampak batang-batang hanya bersosilasi naik-dan turun tetapi tidak bergerak arah ke kiri atau ke kanan. Namun osilasi batang-batang tersebut menghasilkan pola yang merambat ke kanan.

Kalau kalian amati gelombang tali, pola yang terbentuk merambat sepanjang tali sedangkan gerakan komponen tali (simpangan) terjadi dalam arah tegak lurus tali. Gelombang dengan arah osilasi tegak lurus arah rambat dinamakan **gelombang transversal**. Untuk gelombang bunyi yang dihasilkan akibat pemberian tekanan, arah osilasi yang terjadi searah dengan perambatan gelombang. Contohnya, gelombang bunyi di udara. Gelombang ini dihasilkan dengan memberikan tekanan secara periodik pada salah satu bagian udara sehingga molekul-molekul udara di sekitar daerah tersebut ikut bergetar. Molekul yang bergetar menumbuk molekul di sekitarnya yang diam, sehingga molekul yang mula-mula diam ikut bergetar dalam arah yang sama. Begitu seterusnya sehingga molekul yang makin jauh ikut bergetar. Ini adalah fenomena perambatan gelombang. Arah getaran persis sama dengan arah rambat gelombang. Gelombang dengan arah osilasi sama dengan arah rambat gelombang dinamakan **gelombang longitudinal**. **Gambar 3.3** adalah contoh gelombang transversal dan gelombang longitudinal yang merambat pada slinki. Gelombang tersebut dihasilkan dengan cara osilasi yang berbeda. Gelombang transversal dihasilkan dengan mengosilasikan ujung slinki dalam arah tegak lurus panjang slinki. Gelombang longitudinal dihasilkan dengan mengosilasikan slinki dalam arah sejajar sumbu slinki.



Gambar 2.3 Contoh gelombang transversal (a) dan gelombang longitudinal (b) yang merambat pada slinki. Kedua jenis gelombang dihasilkan dengan memberikan arah simpangan yang berbeda. Untuk menghasilkan gelombang transversal maka slinki harus disimpangkan dalam arah tegak lurus. Untuk menghasilkan gelombang longitudinal maka slinki harus ditekan dan didorong sejajar slinki.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang definisi gelombang
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh aplikasi gelombang dalam kehidupan sehari-hari

RANGKUMAN

1. Gelombang adalah osilasi yang merambat
2. Jika perambatan gelombang memerlukan keberadaan suatu medium maka gelombang adalah **osilasi yang merambat pada suatu medium tanpa diikuti perambatan bagian-bagian medium itu sendiri**
3. Gelombang dengan arah osilasi tegak lurus arah rambat dinamakan **gelombang transversal**.
4. Gelombang dengan arah osilasi sama dengan arah rambat gelombang dinamakan **gelombang longitudinal**

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskanlah gelombang pada fenomena pola riak air ketika di permukaan air dijatuhkan batu !
2. Jelaskanlah hal apa saja yang mempengaruhi cepat rambat gelombang?
3. Apakah pada gelombang medium ikut merambat? Jika ya jelaskan, Jika tidak juga jelaskan !
4. Jelaskan perbedaan gelombang transversal dan gelombang longitudinal !
5. Gambarkan bentuk gelombang pada gelombang transversal dan gelombang longitudinal !
6. Carilah dan periksa contoh gelombang transversal dan gelombang longitudinal yang ada dalam kehidupan sehari-hari !

Lembar Kerja praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Besaran Gelombang

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami tentang besaran-besaran dalam gelombang
2. Mahasiswa mampu memahami contoh dan latihan tentang besaran-besaran dalam gelombang

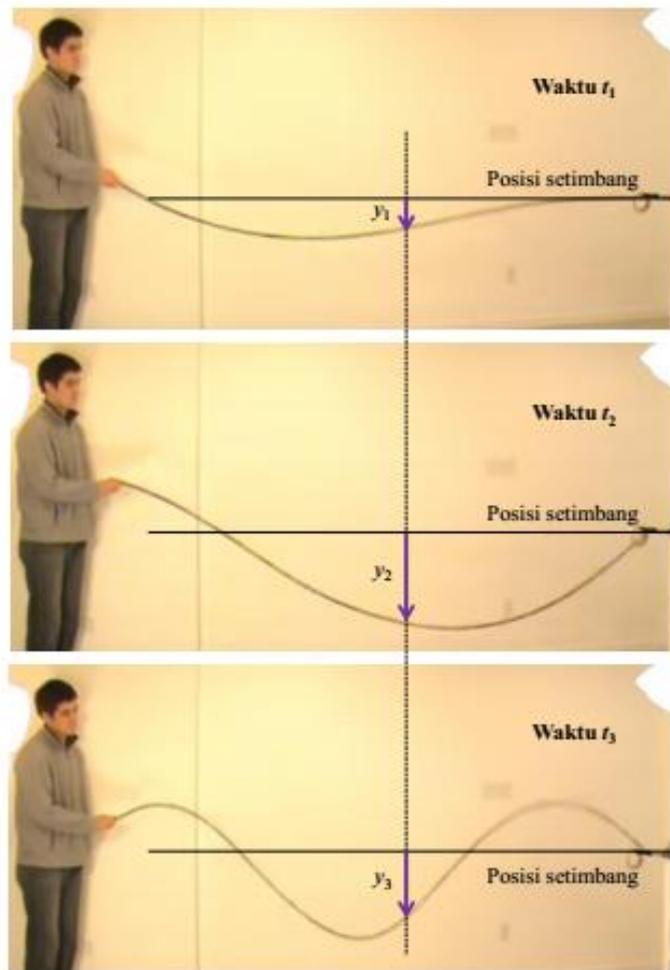
URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Mari kita pelajari besaran-besaran apa yang dimiliki gelombang. Besaran-besaran tersebut akan menentukan secara langsung sifat-sifat fisis gelombang.

Simpangan

Simpangan adalah jarak perpindahan titik pada medium diukur dari posisi keseimbangan. Selama gelombang merambat, simpangan suatu titik pada medium selalu berubah-ubah, mulai dari nilai minimum hingga nilai maksimum. Nilai maksimum dan minimum dicapai secara periodik. **Gambar 3.4** memperlihatkan simpangan suatu titik pada tali pada selang waktu yang berbeda. Simpangan terjadi karena titik tersebut berosilasi.



Gambar 3.4 Simpangan suatu gelombang. Simpangan adalah jarak suatu titik pada medium ke posisi kesetimbangan. Jarak tersebut selalu berubah terhadap waktu dan bisa positif atau negatif.

Amplitudo

Amplitudo adalah simpangan maksimum titik dalam medium yang dilewati gelombang.

Gambar 3.5 adalah contoh amplitude pada gelombang tali. Simpangan maksimum dapat positif maupun negatif. Nilai absolut simpangan maksimum tersebut adalah amplitudo.

Periode

Periode adalah waktu yang diperlukan oleh satu titik pada medium kembali ke keadaan osilasi semula.

- i. Misalkan suatu titik berada pada simpangan nol.
- ii. Kemudian simpangannya membesar dan mencapai maksimum.

- iii. Terus mengecil menjadi nol.
- iv. Lalu bergerak menuju simpangan maksimum negatif.
- v. Kemudian kembali menjadi nol.

Selang waktu untuk urutan gerakan i) sampai v) di atas disebut satu periode.

Frekuensi

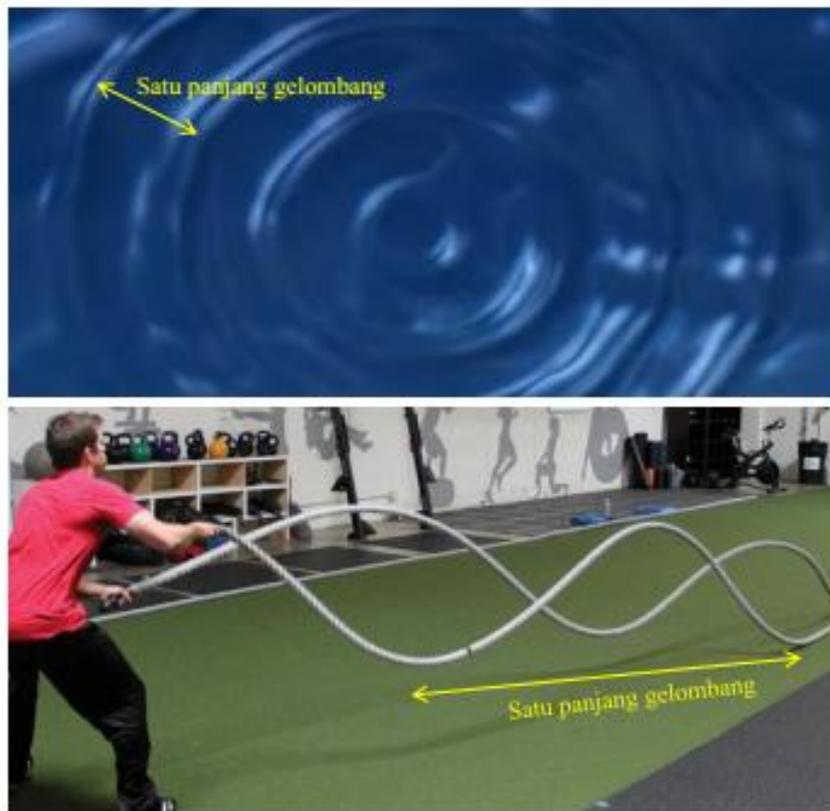
Frekuensi adalah jumlah osilasi yang dilakukan titik-titik pada medium selama satu detik. Berapa kali satu proses lengkap i) sampai v) di atas berlangsung selama satu detik mendefinisikan frekuensi gelombang.



Gambar 3.5 Amplitudo gelombang adalah panjang simpangan maksimum (www.onnit.com)

Panjang gelombang

Coba kalian amati gelombang yang terjadi pada permukaan air saat menjatuhkan batu di permukaan air tersebut. Kalian amati puncak dan lembah yang lokasinya bergantian. Yang didefinisikan sebagai panjang gelombang adalah jarak dua puncak berdekatan atau jarak dua lembah berdekatan. Atau jarak antara dua titik yang lokasinya paling dekat yang memiliki keadaan gerak yang sama. Panjang gelombang di permukaan air dan gelombang tali ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3.6 Panjang gelombang untuk gelombang permukaan air dan gelombang tali. Panjang gelombang adalah jarak dua titik yang memiliki keadaan osilasi yang sama, seperti sama-sama di puncak atau sama-sama di lembah.

Kecepatan Osilasi

Kecepatan osilasi mengukur berapa cepat perubahan simpangan titik-titik pada medium. Untuk gelombang transversal, kecepatan osilasi mengukur berapa cepat gerakan naik dan turun simpangan (dalam arah tegak lurus arah gerak gelombang). Untuk gelombang longitudinal, kecepatan osilasi mengukur berapa cepat getaran maju mundur titik-titik dalam medium.

Kecepatan rambat gelombang

Kecepatan rambat gelombang mengukur berapa cepat pola osilasi berpindah dari satu tempat ke tempat lain. Untuk gelombang di permukaan air yang dihasilkan dengan menjatuhkan batu, kecepatan rambat gelombang mengukur berapa cepat sebaran gelombang arah radial keluar meninggalkan titik jatuhnya batu seperti diilustrasikan pada Gambar 8.7



Gambar 3.7 Arah kecepatan rambat gelombang

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang besaran gelombang
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil contoh besaran gelombang serta kerjakan latihan soal

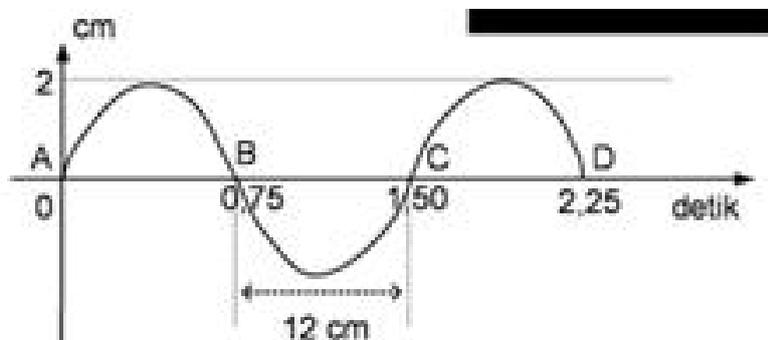
RANGKUMAN

1. Simpangan adalah jarak perpindahan titik pada medium diukur dari posisi keseimbangan. Selama gelombang merambat, simpangan suatu titik pada medium selalu berubah-ubah, mulai dari nilai minimum hingga nilai maksimum.
2. Amplitudo adalah simpangan maksimum titik dalam medium yang dilewati gelombang.
3. Periode adalah waktu yang diperlukan oleh satu titik pada medium kembali ke keadaan osilasi semula.
4. Frekuensi adalah jumlah osilasi yang dilakukan titik-titik pada medium selama satu detik.
5. Panjang gelombang adalah jarak dua puncak berdekatan atau jarak dua lembah berdekatan. Atau jarak antara dua titik yang lokasinya paling dekat yang memiliki keadaan gerak yang sama.
6. Kecepatan osilasi mengukur berapa cepat perubahan simpangan titik-titik pada medium. Untuk gelombang transversal, kecepatan osilasi mengukur berapa cepat gerakan naik dan turun simpangan (dalam arah tegak lurus arah gerak gelombang). Untuk gelombang longitudinal, kecepatan osilasi mengukur berapa cepat getaran maju mundur titik-titik dalam medium.

7. Kecepatan rambat gelombang mengukur berapa cepat pola osilasi berpindah dari satu tempat ke tempat lain.

EVALUASI FORMATIF 2

1. Jelaskan apa yang dimaksud besaran gelombang dan jenis nya !
2. Jelaskan perbedaan dan persamaan antara simpangan dan amplitudo, serta tuliskan contohnya masing-masing !
3. Jelaskan hubungan antara frekuensi dan periode yang kamu ketahui, serta berikan contoh sebagai pembuktiannya !
4. Jelaskan perbedaan kecepatan osilasi dan kecepatan rambat gelombang lengkap dengan contohnya !
5. Sebuah gelombang merambat dengan kecepatan 340 m/s. Jika frekuensi gelombang adalah 50 Hz, tentukan panjang gelombangnya!
6. Periode suatu gelombang adalah 0,02 s dengan panjang gelombang sebesar 25 meter. Hitunglah cepat rambat gelombangnya!
7. Perhatikan gambar berikut!



Tentukan:

- a) berapa jumlah gelombang pada gambar di atas
- b) amplitudo gelombang
- c) periode gelombang
- d) panjang gelombang
- e) cepat rambat gelombang
- f) jumlah gelombang dalam 2 menit

Lembar Kerja praktek 2

Kegiatan Pembelajaran 3: Persamaan Gelombang

KEMAMPUAN YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang persamaan gelombang
2. Mahasiswa mampu mengerjakan contoh soal tentang persamaan gelombang

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Sekarang mari kita tentukan persamaan gelombang secara matematis. Kita akan focus pada gelombang dengan pola sederhana, yaitu gelombang sinusoidal. Untuk gelombang yang memiliki pola sinusoidal, artinya, pola gelombang merupakan fungsi sinus atau cosinus, bentuk umum simpangan gelombang memenuhi

$$y(x,t) = A \cos \left(2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda} + \phi_0 \right) \quad (3.1)$$

Dengan

- $y(x,t)$ adalah simpangan titik pada medium yang berada pada koordinat x pada waktu t ,
- A amplitudo simpangan,
- T periode gelombang,
- λ panjang gelombang, dan
- ϕ_0 fase awal gelombang.

Semua bagian yang berada dalam tanda kurung cosinus dinamakan **fase gelombang**. Jadi fase gelombang adalah $2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda} + \phi_0$

Dengan mendefinisikan

$$\text{Frekuensi sudut:} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.2)$$

$$\text{Bilangan gelombang :} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.3)$$

maka kita dapat juga menulis persamaan gelombang sebagai berikut

$$y(x,t) = A \cos(\omega t - kx + \phi_0) \quad (3.4)$$

Berapa kecepatan gelombang yang diungkapkan persamaan (3.1) atau (3.4)? Kita tinjau gelombang tali yang baru terbentuk. Di depan pola tersebut belum terbentuk simpangan. Kita amati pola yang terjadi pada waktu yang berbeda-beda seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.8**. Berdasarkan gambar tersebut kita melihat keadaan-keadaan dari atas ke bawah sebagai berikut:

- a) titik ujung kiri memiliki simpangan maksimum dan sedang bergerak ke atas
- b) titik ujung kiri memiliki simpangan nol dan sedang bergerak ke atas
- c) titik ujung kiri memiliki simpangan maksimum positif dan sedang bergerak ke bawah
- d) titik ujung kiri memiliki simpangan nol dan sedang bergerak ke bawah
- e) titik ujung kiri memiliki simpangan maksimum dan sedang bergerak ke atas.

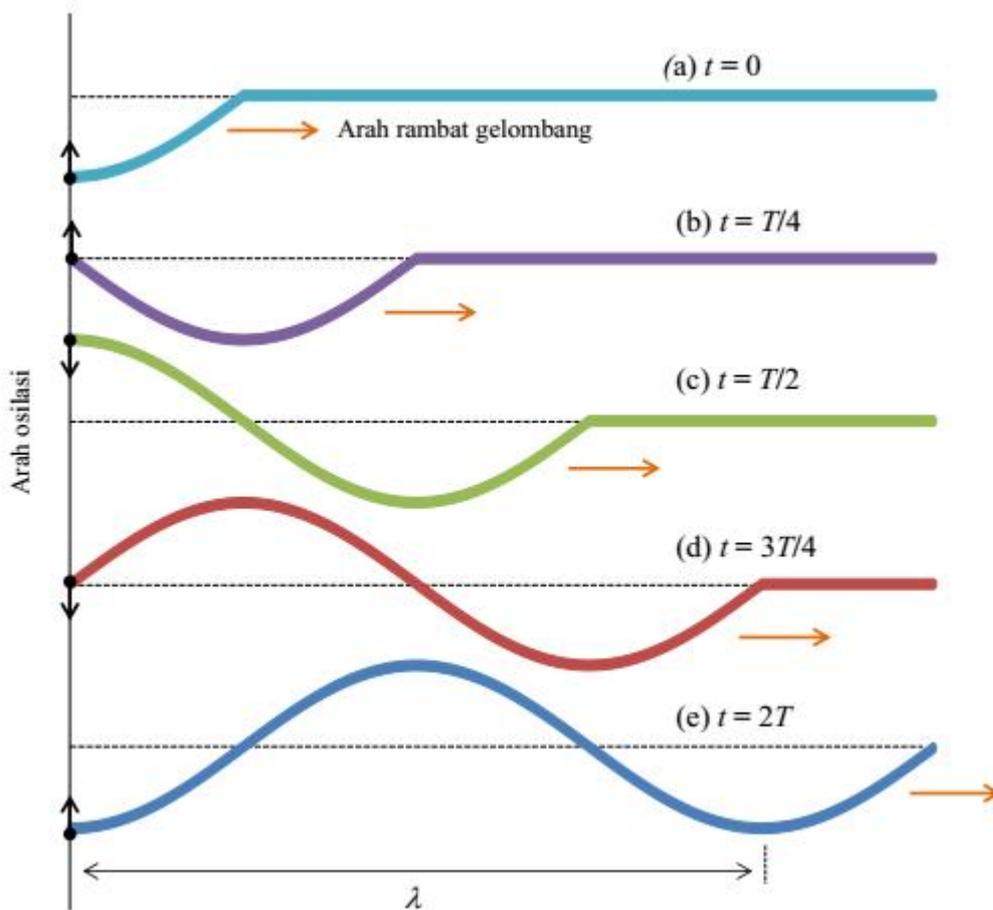
Keadaan ini persis sama dengan keadaan (a).

Dengan demikian, waktu yang diperlukan gelombang berubah dari keadaan (a) ke keadaan (e) sama dengan satu periode, atau $t = T$. Namun, selama selang waktu ini, gelombang telah berpindah sejauh λ . Dengan demikian, kecepatan rambat gelombang memenuhi

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (3.5)$$

Dengan menggunakan definisi pada persamaan (3.2) dan (3.3) kita dapat juga menulis

$$v = \frac{\omega}{k} \quad (3.6)$$



Gambar 3.8 Bentuk gelombang pada berbagai waktu. Tampak bahwa dengan berubahnya waktu maka posisi pola juga berubah. Pola tampak bergeser ke kanan, namun materi sendiri tidak bergeser ke kanan. Materi hanya berosilasi ke atas dan ke bawah.

Contoh Soal 3.1:

Ujung tali digetarkan dengan periode 0,4 s. Simpangan maksimum yang dibentuk adalah 10 cm. Jika pada saat $t = 0,2$ s ujung tali mengalami simpangan maksimum dan gelombang yang terbentuk merambat dengan laju 4 m/s, Tentukan persamaan simpangan gelombang

Jawab :

Dari soal kita dapatkan informasi $T = 0,4$ s, $A = 10$ cm = 0,1 m, dan $v = 4$ m/s.

Frekuensi sudut, $\omega = 2\pi/T = 5\pi$ dan bilangan gelombang $k = \omega/v = 5\pi/4$.

Persamaan umum simpangan gelombang diberikan oleh persamaan(3.1), yaitu

$$\begin{aligned}
 y(x,t) &= A\cos(\omega t - kx + \varphi_0) \\
 &= 0,1\cos(5\pi t - 5\pi x / 4 + \varphi_0)
 \end{aligned}$$

Pada saat $t = 0,2$ s, ujung tali (yaitu $x = 0$) mengalami simpangan maksimum.

Jadi $y(0,0) = 0,1$. Masukkan ke persamaan di atas maka

$$0,1 = 0,1 \cos(\pi + \varphi_0)$$

$$1 = \cos(\pi + \varphi_0)$$

yang menghasilkan $\pi + \varphi_0 = 0$, atau $\varphi_0 = -\pi$. Dengan demikian, persamaan simpangan gelombang adalah

$$y(x,t) = 0,1 \cos(5\pi t - 5\pi x/4 - \pi)$$

Persamaan umum gelombang

Mari kita lihat sifat turunan fungsi gelombang pada persamaan (3.4) dengan melakukan diferensial parsial terhadap posisi dan waktu.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = kA \sin(\check{S}t - kx + \{o\})$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -k^2 A \cos(\check{S}t - kx + \{o\})$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -k^2 y$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\check{S}A \sin(\check{S}t - kx + \{o\})$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\check{S}^2 A \cos(\check{S}t - kx + \{o\})$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\check{S}^2 y$$

Tampak bahwa :

$$\frac{\partial^2 y / \partial x^2}{k^2} = \frac{\partial^2 y / \partial t^2}{\check{S}^2}$$

atau

$$\frac{\partial^2 y / \partial x^2}{k^2} - \frac{\partial^2 y / \partial t^2}{\check{S}^2} = 0$$

Karena $v = \check{S} / k$ maka kita dapat menuliskan

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (3.7)$$

Persamaan (3.7) merupakan bentuk umum persamaan gelombang satu dimensi. Setiap gelombang satu dimensi memenuhi fungsi di atas. Untuk gelombang yang merambat dalam ruang lebih dari satu dimensi maka persamaannya dapat diperluas dari persamaan gelombang satu dimensi di atas. Misalkan $\Psi(x,y,z)$ adalah simpangan gelombang yang merambat dalam ruang tiga dimensi. Persamaan yang dipenuhi simpangan tersebut adalah :

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (3.8)$$

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah Persamaan gelombang
2. Diskusikanlah variasi contoh soal persamaan gelombang
3. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang latihan soal untuk persamaan gelombang

RANGKUMAN

1. Untuk gelombang yang memiliki pola sinusoidal, artinya, pola gelombang merupakan fungsi sinus atau cosinus, bentuk umum simpangan gelombang memenuhi :

$$y(x,t) = A \cos \left(2\pi f \frac{t}{T} - 2\pi f \frac{x}{\lambda} + \left\{ \begin{matrix} 0 \\ \end{matrix} \right\} \right)$$

2. Fase gelombang adalah $2\pi f \frac{t}{T} - 2\pi f \frac{x}{\lambda} + \left\{ \begin{matrix} 0 \\ \end{matrix} \right\}$

3. Frekuensi sudut: $\omega = \frac{2\pi f}{T}$

4. Bilangan gelombang : $k = \frac{2\pi f}{\lambda}$

5. Persamaan gelombang adalah :

$$y(x,t) = A \cos(\omega t - kx + \phi_0)$$

6. Bentuk umum persamaan gelombang satu dimensi :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

7. Misalkan $\Psi(x,y,z)$ adalah simpangan gelombang yang merambat dalam ruang tiga dimensi. Persamaan yang dipenuhi simpangan tersebut adalah :

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0$$

EVALUASI FORMATIF 3

1. Jelaskan darimana munculnya persamaan gelombang !
2. Jelaskan apa yang dimaksud beda fase dan persamaannya !
3. Ujung tali digetarkan dengan periode 0,8 s. Simpangan maksimum yang dibentuk adalah 20 cm. Jika pada saat $t = 0,4$ s ujung tali mengalami simpangan maksimum dan gelombang yang terbentuk merambat dengan laju 8 m/s, Tentukan persamaan simpangan gelombang !
4. Sebuah gelombang berjalan mempunyai persamaan simpangan $y = 0.5 \sin f (40t + 8x)$ m
Tentukan :
 - a. Cepat rambat gelombang
 - b. Amplitudo
 - c. Frekuensi Sudut
 - d. Frekuensi gelombang
5. Pada permukaan air laut terdapat dua gabus yang terpisah satu sama lain sejauh 60 cm. Keduanya naik turun bersama permukaan air laut sebanyak 20 kali dalam 10 sekon. Bila salah satu dipuncak gelombang yang lain di lembah gelombang sedangkan diantara dua gabus terdapat satu bukit, maka tentukan :
 - a. Periode gelombang
 - b. Cepat rambat gelombang
6. Sebuah gelombang berjalan mempunyai persamaan simpangan $y = 0,5 \sin 0,5 (100t - 0,25 x)$, t dalam sekon dan x dan y dalam cm.
Tentukan :
 - a. Cepat rambat gelombang
 - b. Amplitudo
 - c. Frekuensi Sudut
 - d. Frekuensi gelombang

Lembar Kerja praktek 3

Kegiatan Pembelajaran 4: Muka Gelombang dan Prinsip Huygens

KEMAMPUAN YANG DIHARAPKAN

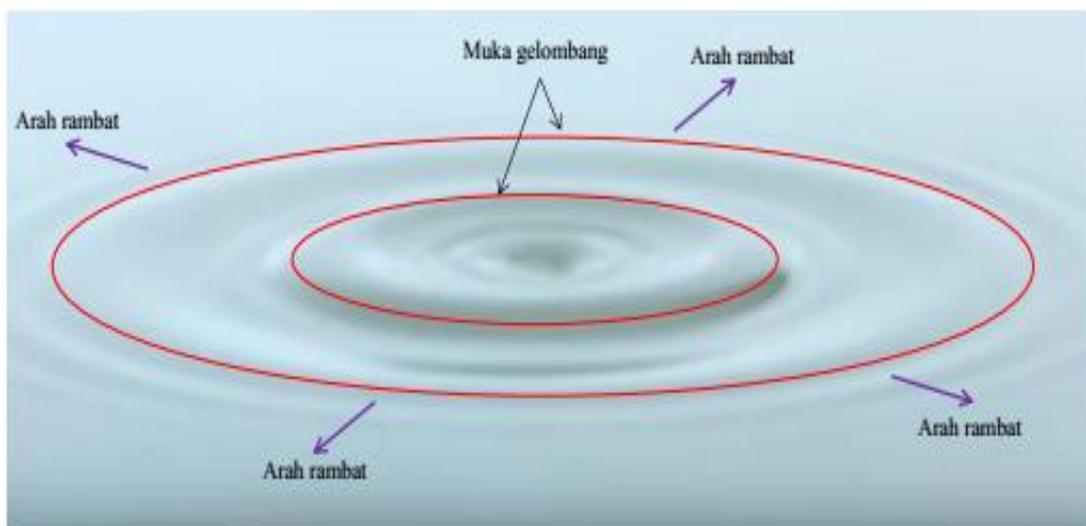
1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami materi tentang muka gelombang
2. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami materi tentang prinsip Huygens

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

A. Muka Gelombang

Setelah membahas besaran-besaran gelombang, mari kita meningkat ke pembahasan yang berkaitan dengan fenomena-fenomena gelombang. Pada bagian ini kita akan mempelajari sifat pemantulan, pembiasan, dan superposisi gelombang. Fenomena ini merupakan ciri khas gelombang apa saja sehingga sangat penting untuk dipahami. Mari kita awali dengan mendefinisikan muka gelombang. Untuk mudahnya, kita lihat gelombang yang merambat di permukaan air akibat dijatuhkan sebutir batu.



Gambar 3.9 Muka gelombang air yang berbentuk lingkaran

Kalian amati pola yang bergerak secara radial keluar bukan? Bagaimana bentuk pola tersebut? Berbentuk lingkaran bukan? Nah, pola lingkaran yang diamati tersebut, seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.9**, adalah contoh muka gelombang.

Secara formal muka gelombang dapat didefinisikan sebagai: **Kumpulan titik-titik pada medium yang memiliki fase simpangan yang sama.**

Ingat, fase simpangan memenuhi $\phi = \omega t - kx + \phi_0$. Jadi muka gelombang adalah kumpulan titik-titik yang memiliki ϕ yang sama.

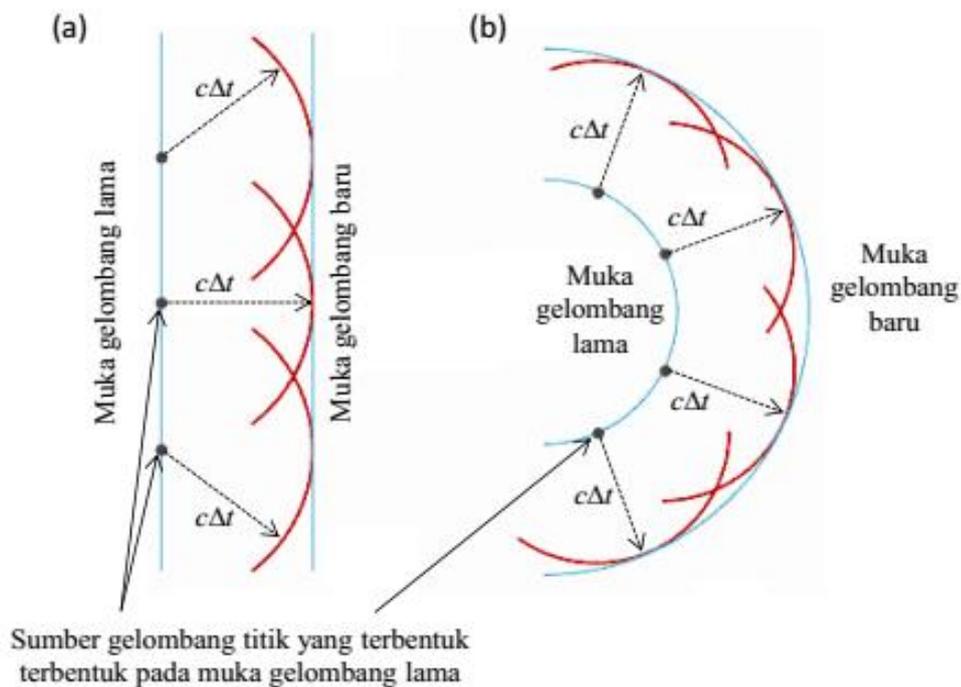
- i. Untuk gelombang air yang kita bahas di atas, titik-titik dengan fase yang sama tentu berada pada keliling lingkaran dengan pusat adalah titik tempat menjatuhkan batu.
- ii. Untuk gelombang bunyi yang bersumber dari satu titik, muka gelombang adalah permukaan bola yang pusatnya berada pada lokasi sumber bunyi.
- iii. Untuk gelombang air yang dihasilkan dengan menaik-turunkan pelat yang panjang, maka muka gelombang akan berbentuk garis datar. Satu sifat yang menarik adalah, ***arah perambatan gelombang selalu tegak lurus muka gelombang.***

B. Prinsip Huygens

Salah satu prinsip yang penting pada pembahasan tentang gelombang adalah **prinsip Huygens**. Prinsip ini memperlihatkan terbentuknya sumber gelombang baru secara terus menerus. Prinsip ini menyatakan bahwa **Setiap titik pada muka gelombang berperan sebagai sumber gelombang titik yang baru.**

Muka gelombang baru dapat dipandang sebagai gabungan muka gelombang yang dihasilkan sumber gelombang titik pada muka gelombang lama. Tiap sumber gelombang titik menghasilkan muka gelombang berbentuk bola. Penjumlahan semua muka gelombang titik menghasilkan muka gelombang baru. **Gambar 3.9** adalah ilustrasi prinsip Huygens. (a) Gelombang datar. Muka gelombang berupa bidang datar. Tiap titik pada bidang datar menjadi sumber gelombang baru yang memiliki muka gelombang berbentuk bola. Setelah selang waktu Δt muka gelombang titik tersebut telah bergerak sejauh $c\Delta t$ dengan c adalah kecepatan rambat gelombang. Jumlah gelombang titik pada muka gelombang lama tersebut tak berhingga sehingga terbentuk tak berhingga muka gelombang berbentuk bola. Penjumlahan semua muka

gelombang berbentuk bola tersebut menghasilkan muka gelombang baru yang berupa bidang datar. Mekanisme yang sama terjadi pada muka gelombang lingkaran seperti diilustrasikan pada gambar (b). Pada tiap titik di permukaan bola terbentuk sumber gelombang titik yang bergerak dengan kecepatan c ke segala arah. Bentuk muka gelombang titik berupa lingkaran dengan jari-jari $c\Delta t$. Jumlah sumber gelombang titik tak berhingga. Namun, penjumlahan semua muka gelombang titik tersebut menghasilkan permukaan berbentuk bola dengan jari-jari lebih besar.



Gambar 3.10 Prinsip Huygens: (a) muka gelombang datar, dan (b) muka gelombang lingkaran atau bola. Setiap titik pada muka gelombang berperan sebagai sumber gelombang titik yang baru. Tiap sumber gelombang titik menghasilkan muka gelombang berbentuk bola. Penjumlahan semua muka gelombang titik menghasilkan muka gelombang baru. (a) Gelombang datar. Muka gelombang berupa bidang datar. Tiap titik pada bidang datar menjadi sumber gelombang baru yang memiliki muka gelombang berbentuk bola. Setelah selang waktu Δt muka gelombang titik tersebut telah bergerak sejauh $c\Delta t$ dengan c adalah kecepatan rambat gelombang. Jumlah gelombang titik pada muka gelombang lama tersebut tak berhingga sehingga terbentuk tak berhingga muka gelombang berbentuk bola. Penjumlahan semua muka gelombang berbentuk bola tersebut menghasilkan muka gelombang baru yang berupa bidang datar. Mekanisme yang sama terjadi pada muka gelombang lingkaran seperti diilustrasikan pada gambar (b).

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang muka gelombang dan contohnya dalam kehidupan sehari hari.
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh penggunaan prinsip Huygens dalam kehidupan sehari hari.

RANGKUMAN

1. Muka gelombang dapat didefinisikan sebagai: Kumpulan titik-titik pada medium yang memiliki fase simpangan yang sama.
2. Jadi muka gelombang adalah kumpulan titik-titik yang memiliki ϕ yang sama dengan fase simpangan memenuhi $\phi = \omega t - kx + \phi_0$.
3. Untuk gelombang air yang kita bahas di atas, titik-titik dengan fase yang sama tentu berada pada keliling lingkaran dengan pusat adalah titik tempat menjatuhkan batu.
4. Untuk gelombang bunyi yang bersumber dari satu titik, muka gelombang adalah permukaan bola yang pusatnya berada pada lokasi sumber bunyi.
5. Untuk gelombang air yang dihasilkan dengan menaik-turunkan pelat yang panjang, maka muka gelombang akan berbentuk garis datar. Satu sifat yang menarik adalah, *arah perambatan gelombang selalu tegak lurus muka gelombang*.
6. Salah satu prinsip yang penting pada pembahasan tentang gelombang adalah prinsip Huygens.
7. Prinsip Huygens. memperlihatkan terbentuknya sumber gelombang baru secara terus menerus.
8. Prinsip Huygens. menyatakan bahwa Setiap titik pada muka gelombang berperan sebagai sumber gelombang titik yang baru.
9. Tiap titik pada bidang datar menjadi sumber gelombang baru yang memiliki muka gelombang berbentuk bola.

EVALUASI FORMATIF 4

1. Jelaskan defenisi muka gelombang !
2. Jelaskan muka gelombang pada gelombang air yang bersumber dari satu titik!
3. Jelaskan muka gelombang pada gelombang bunyi yang bersumber dari satu titik!
4. Jelaskan muka gelombang pada gelombang air yang dihasilkan dengan menaik-turunkan pelat yang panjang !
5. Jelaskan prinsip huygens !
6. Jelaskan prinsip huygens dan hubungannya dengan muka gelombang !

Lembar Kerja praktek 4

RANGKUMAN MODUL

1. Gelombang adalah osilasi yang merambat
2. Jika perambatan gelombang memerlukan keberadaan suatu medium maka gelombang adalah **osilasi yang merambat pada suatu medium tanpa diikuti perambatan bagian-bagian medium itu sendiri**
3. Gelombang dengan arah osilasi tegak lurus arah rambat dinamakan **gelombang transversal**.
4. Gelombang dengan arah osilasi sama dengan arah rambat gelombang dinamakan **gelombang longitudinal**
5. Simpangan adalah jarak perpindahan titik pada medium diukur dari posisi keseimbangan. Selama gelombang merambat, simpangan suatu titik pada medium selalu berubah-ubah, mulai dari nilai minimum hingga nilai maksimum.
6. Amplitudo adalah simpangan maksimum titik dalam medium yang dilewati gelombang.
7. Periode adalah waktu yang diperlukan oleh satu titik pada medium kembali ke keadaan osilasi semula.
8. Frekuensi adalah jumlah osilasi yang dilakukan titik-titik pada medium selama satu detik.
9. Panjang gelombang adalah jarak dua puncak berdekatan atau jarak dua lembah berdekatan. Atau jarak antara dua titik yang lokasinya paling dekat yang memiliki keadaan gerak yang sama.
10. Kecepatan osilasi mengukur berapa cepat perubahan simpangan titik-titik pada medium. Untuk gelombang transversal, kecepatan osilasi mengukur berapa cepat gerakan naik dan turun simpangan (dalam arah tegak lurus arah gerak gelombang). Untuk gelombang longitudinal, kecepatan osilasi mengukur berapa cepat getaran maju mundur titik-titik dalam medium.
11. Kecepatan rambat gelombang mengukur berapa cepat pola osilasi berpindah dari satu tempat ke tempat lain.
12. Untuk gelombang yang memiliki pola sinusoidal, artinya, pola gelombang merupakan fungsi sinus atau cosinus, bentuk umum simpangan gelombang memenuhi :

$$y(x,t) = A \cos \left(2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda} + \phi_0 \right)$$

13. Fase gelombang adalah $2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda} + \phi_0$

14. Frekuensi sudut: $\check{S} = \frac{2f}{T}$

15. Bilangan gelombang : $k = \frac{2f}{\lambda}$

16. Persamaan gelombang adalah :

$$y(x,t) = A \cos(\omega t - kx + \phi_0)$$

17. Bentuk umum persamaan gelombang satu dimensi :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

18. Misalkan $\Psi(x,y,z)$ adalah simpangan gelombang yang merambat dalam ruang tiga dimensi.

Persamaan yang dipenuhi simpangan tersebut adalah :

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0$$

19. Muka gelombang dapat didefinisikan sebagai: Kumpulan titik-titik pada medium yang memiliki fase simpangan yang sama.
20. Jadi muka gelombang adalah kumpulan titik-titik yang memiliki ϕ yang sama dengan fase simpangan memenuhi $\phi = \omega t - kx + \phi_0$.
21. Untuk gelombang air yang kita bahas di atas, titik-titik dengan fase yang sama tentu berada pada keliling lingkaran dengan pusat adalah titik tempat menjatuhkan batu.
22. Untuk gelombang bunyi yang bersumber dari satu titik, muka gelombang adalah permukaan bola yang pusatnya berada pada lokasi sumber bunyi.
23. Untuk gelombang air yang dihasilkan dengan menaik-turunkan pelat yang panjang, maka muka gelombang akan berbentuk garis datar. Satu sifat yang menarik adalah, *arah perambatan gelombang selalu tegak lurus muka gelombang*.
24. Salah satu prinsip yang penting pada pembahasan tentang gelombang adalah prinsip Huygens.
25. Prinsip Huygens. memperlihatkan terbentuknya sumber gelombang baru secara terus menerus.
26. Prinsip Huygens. menyatakan bahwa Setiap titik pada muka gelombang berperan sebagai sumber gelombang titik yang baru.
27. Tiap titik pada bidang datar menjadi sumber gelombang baru yang memiliki muka gelombang berbentuk bola.

DAFTAR PUSTAKA

- Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing
- Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I
- Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.

Modul 4:

Kecepatan Gelombang dan Sifat Medium

PENDAHULUAN

Bagaimana pengaruh sifat medium terhadap kecepatan rambat gelombang? Sifat medium berpengaruh besar pada laju perambatan gelombang dalam medium tersebut. Mari kita bahas untuk beberapa kasus.

Kegiatan Pembelajaran 1: Gelombang Tali

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai gelombang tali
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan penggunaan aplikasi gelombang tali

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Kecepatan rambat gelombang pada tali bergantung pada tegangan tali dan massa jenis tali. Kecepatan tersebut memenuhi

$$v = \frac{F_T}{\mu} \quad (4.1)$$

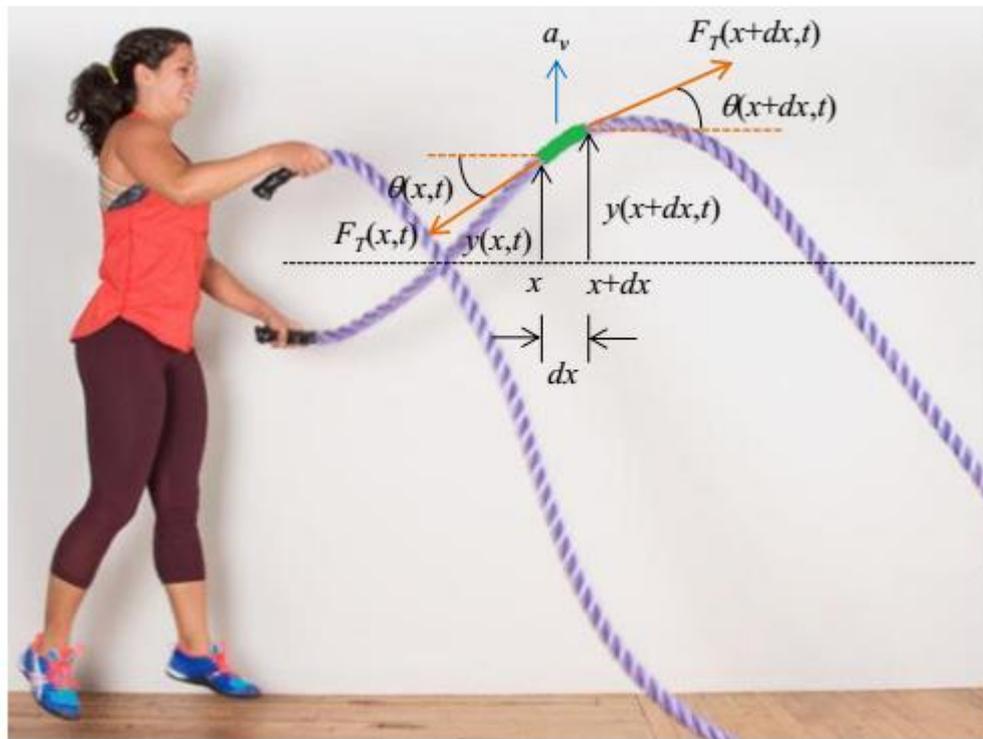
dengan F_T adalah gaya tegangan tali dan

μ adalah massa tali per satuan panjang.

Penurunan persamaan (4.1) diuraikan berikut ini dan dianjurkan untuk dipelajari bagi mahasiswa yang menyukai tantangan.

Penurunan kecepatan rambat gelombang tali (boleh diloncati). Lihat segmen kecil tali yang sedang dilewati gelombang seperti pada **Gambar 4.1**. Segmen tersebut berada antara posisi x

dan $x+dx$. Dengan demikian panjang segmen tersebut adalah dx . Kita anggap tali homogen dan gaya tegangan tali konstanta sepanjang tali.



Gambar 4.1 Simpangan elemen tali yang dilewati gelombang. Ujung kiri dan kanan segmen menerima gaya yang berbeda besarnya sehingga bergerak ke atas atau ke bawah.

Tinjau ujung segmen pada posisi x . Ujung ini ditarik oleh gaya $F_T(x,t)$ ke kiri yang membentuk sudut $\theta(x)$ ke bawah. Dengan demikian, gaya $F_T(x,t)$ dapat diuraikan atas dua komponen yang saling tegak lurus, yaitu :

$$F(x)_h = F_T(x,t) \cos \theta(x)$$

$$F(x)_v = F_T(x,t) \sin \theta(x)$$

Tinjau ujung segmen pada posisi $x+dx$. Ujung ini ditarik oleh gaya $F_T(x+dx,t)$ ke kanan yang membentuk sudut $\theta(x+dx)$ ke atas. Gaya $F_T(x+dx,t)$ juga dapat diuraikan atas dua komponen yang saling tegak lurus, yaitu

$$F(x+dx)_h = F_T(x+dx,t) \cos \theta(x+dx)$$

$$F(x+dx)_v = F_T(x+dx,t) \sin \theta(x+dx)$$

Untuk simpangan yang tidak terlalu besar, atau $\theta(x) \ll 1$ radian dan $\theta(x+dx) \ll 1$ maka kita dapat mengaproksimasi

$$\cos \theta(x) \rightarrow 1$$

$$\cos \theta(x+dx) \rightarrow 1$$

$$\sin \theta(x) \rightarrow \tan \theta(x) = \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_x$$

$$\sin \theta(x+dx) \rightarrow \tan \theta(x+dx) = \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x+dx}$$

Dengan aproksimasi ini maka

$$F(x,t)_h \cong F_T(x,t)$$

$$F(x,t)_v = F_T(x,t) \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_x$$

$$F(x+dx,t)_h \cong F_T(x+dx,t)$$

$$F(x+dx,t)_v = F_T(x+dx,t) \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x+dx}$$

Karena elemen tidak mengalami gerakan arah horizontal maka gaya netto arah horizontal yang bekerja pada segmen tali nol yang menyebabkan

$$F(x+dx,t)_h \cong F(x,t)_h$$

yang berimplikasi

$$F_T(x+dx,t)_h \cong F_T(x,t)$$

Hubungan ini menyatakan bahwa gaya F_T tidak bergantung pada posisi. Gaya F_T hanya bergantung pada waktu, atau $F_T(t)$.

Gaya netto pada segmen tali dalam arah vertikal adalah

$$\begin{aligned} F_v &= F(x+dx,t)_v - F(x,t)_v = F_T \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x+dx} - F_T \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_x \\ &= F_T(t) \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x+dx} - F_T \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= F_T(t) \left(\left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x+dx} - \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_x \right) \\
 &= F_T(t) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx
 \end{aligned}$$

Karena gaya netto arah horisontal nol maka tidak ada percepatan arah horisontal. Dan karena gaya netto arah vertikal tidak nol maka ada percepatan arah vertikal pada segmen tali. Jika massa segmen tali dm maka dengan hukum Newton II diperoleh

$$F_v = dma_v$$

Percepatan arah vertikal merupakan turunan dua kali simpangan terhadap waktu, atau

$$a_v = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Karena rapat massa tali persatuan panjang μ maka massa segmen tali adalah

$$dm = \mu dx$$

Dengan demikian

$$F_T(t) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx = (\mu dx) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

atau

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{\mu}{F_T(t)} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (4.2)$$

Kalau kita bandingkan persamaan (4.2) dengan persamaan umum gelombang satu dimensi, maka kita simpulkan bahwa kecepatan gelombang tali memenuhi persamaan (4.1). Tampak dari persamaan (4.2) bahwa kecepatan gelombang tali dapat merupakan fungsi waktu jika gaya tegang tali berubah-ubah terhadap waktu. Misalkanya saat gelombang merambat, tarikan yang diberikan pada tali diubah-ubah (misalnya dikencangkan dan diregangkan) maka kecepatan gelombang dalam tali tersebut berubah-ubah. Untuk kasus khusus dimana gaya tegang tali konstan, atau $F_T(t) = \text{konstan}$ maka kecepatan rambat gelombang pada tali terntuk konstan, kecuali tali yang massa jenisnya bergantung pada posisi.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang gelombang tali
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh soal gelombang tali

RANGKUMAN

1. Kecepatan rambat gelombang pada tali bergantung pada tegangan tali dan massa jenis tali.
2. Kecepatan rambat gelombang memenuhi
$$v = \frac{F_T}{\sim}$$
3. Gaya F_T tidak bergantung pada posisi. Gaya F_T hanya bergantung pada waktu, atau $F_T(t)$.
4. Pada kasus khusus dimana gaya tegang tali konstan, atau $F_T(t) = \text{konstan}$ maka kecepatan rambat gelombang pada tali terntuk konstan, kecuali tali yang massa jenisnya bergantung pada posisi.

EVALUASI FORMATIF 1

1. Turunkanlah persamaan cepat rambat gelombang!
2. Jelaskanlah hal apa saja yang mempengaruhi cepat rambat gelombang?
3. Rancanglah aplikasi penggunaan persamaan cepat rambat gelombang dalam kehidupan sehari-hari !

Lembar Kerja praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Gelombang Longitudinal dalam Zat Padat

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami tentang gelombang longitudinal dalam zat padat
2. Mahasiswa mampu menjelaskan aplikasi tentang gelombang longitudinal dalam zat padat

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Perambatan gelombang dalam zat padat cukup sering kita alami. Salah satu yang terkenal adalah gempa bumi. Gelombang gempa berasal dari pusat gempa yang berada di dalam lapisan bumi. Gempa bumi dapat disebabkan oleh tabrakan lempeng bumi, runtuhannya, atau letusan vulkanik. Lokasi di permukaan bumi tepat di atas pusat gempa dinamakan episentrum. Kebanyakan gelombang yang merambat dalam zat padat merupakan gelombang longitudinal. Laju perambatan gelombang longitudinal dalam zat padat memenuhi hubungan

$$v = \frac{Y}{\rho} \quad (4.3)$$

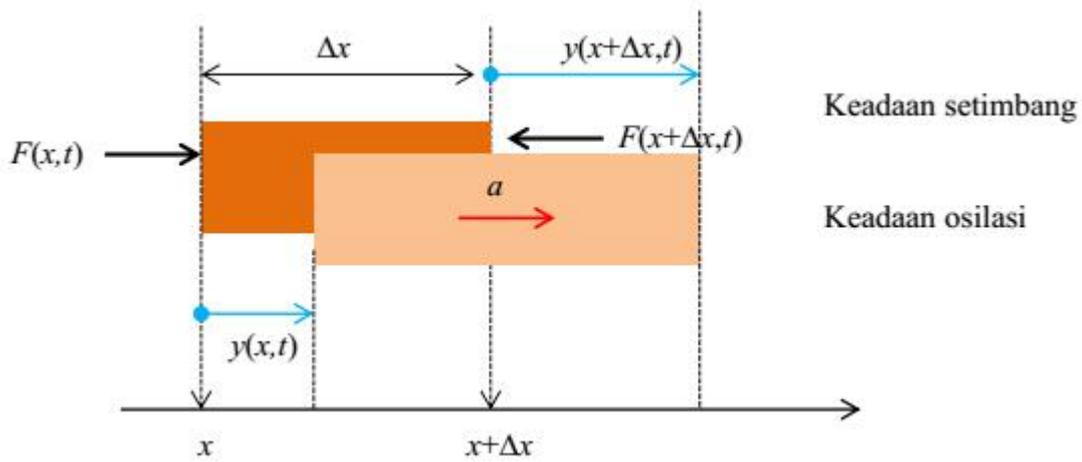
dengan

Y adalah modulus elastisitas zat padat, dan

ρ adalah massa jenis zat padat.

Penurunan kecepatan rambat gelombang longitudinal dalam zat padat Gambar 4.2 adalah sebuah batang dengan luas penampang A dan massa jenis homogen ρ . Mula-mula batang dalam keadaan seimbang. Tinjau segmen batang sepanjang Δx ketika batang dalam keadaan seimbang. Ujung kiri segmen tersebut berada pada posisi x dan ujung kanan berada pada posisi $x + \Delta x$. Ketika terjadi osilasi, ujung kiri menyimpang sejauh $y(x, t)$ dan ujung kanan menyimpang sejauh $y(x + \Delta x, t)$. Perubahan panjang segmen adalah

$$\Delta y = y(x + \Delta x, t) - y(x, t)$$



Gambar 4.2 Simpangan segmen zat padat yang dilewati gelombang

Tampak disini bahwa segmen yang mula-mula memiliki panjang Δx mengalami perubahan panjang Δy . Dengan demikian, strain yang bekerja pada batang adalah

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{\Delta y}{\Delta x} \\
 &= \frac{y(x + \Delta x, t) - y(x, t)}{\Delta x} \\
 &= \frac{\partial y}{\partial x}
 \end{aligned}$$

Stress yang bekerja pada segmen batang adalah

$$\dagger = \frac{F}{A}$$

Jika Y adalah modulus Young maka terpenuhi $Y = \dagger / u$ atau

$$u = \frac{\dagger}{Y} = \frac{1}{AY} F \text{ atau } F = AY \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_x$$

dan gaya yang bekerja pada sisi kanan segmen adalah

$$F(x + \Delta x, t) = AY \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x + \Delta x}$$

Gaya netto yang bekerja pada segmen batang adalah

$$\Delta F = F(x + \Delta x, t) - F(x, t)$$

$$\begin{aligned}
 &= AY \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} - AY \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_x \\
 &= AY \left(\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} - \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_x \right) \\
 &= AY \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Delta x
 \end{aligned}$$

Massa segmen batang adalah

$$\Delta m = \dots dV = \dots A \Delta x$$

Percepatan osilasi segmen batang adalah

$$a = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Dengan menggunakan hukum Newton II maka

$$\Delta F = \Delta m a$$

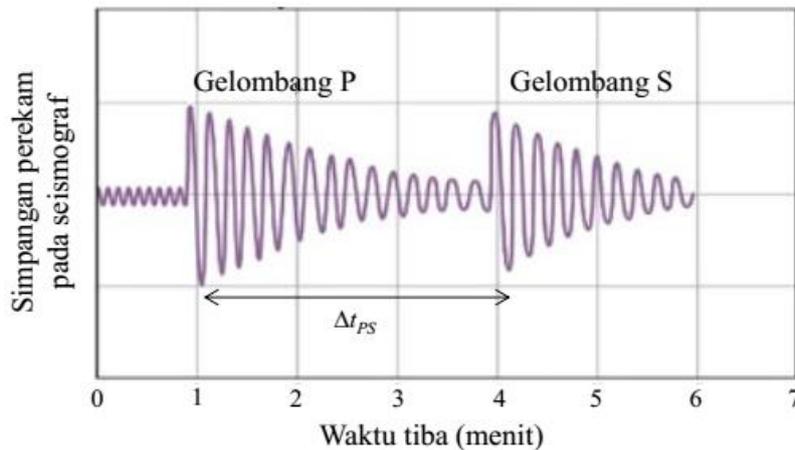
$$\begin{aligned}
 AY \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Delta x &= \dots A \Delta x \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \\
 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} &= \dots \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \dots \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \tag{4.4}$$

Dengan membandingkan persamaan (4.4) dengan persamaan umum gelombang, kita simpulkan bahwa laju perambatan gelombang memenuhi persamaan (4.3).

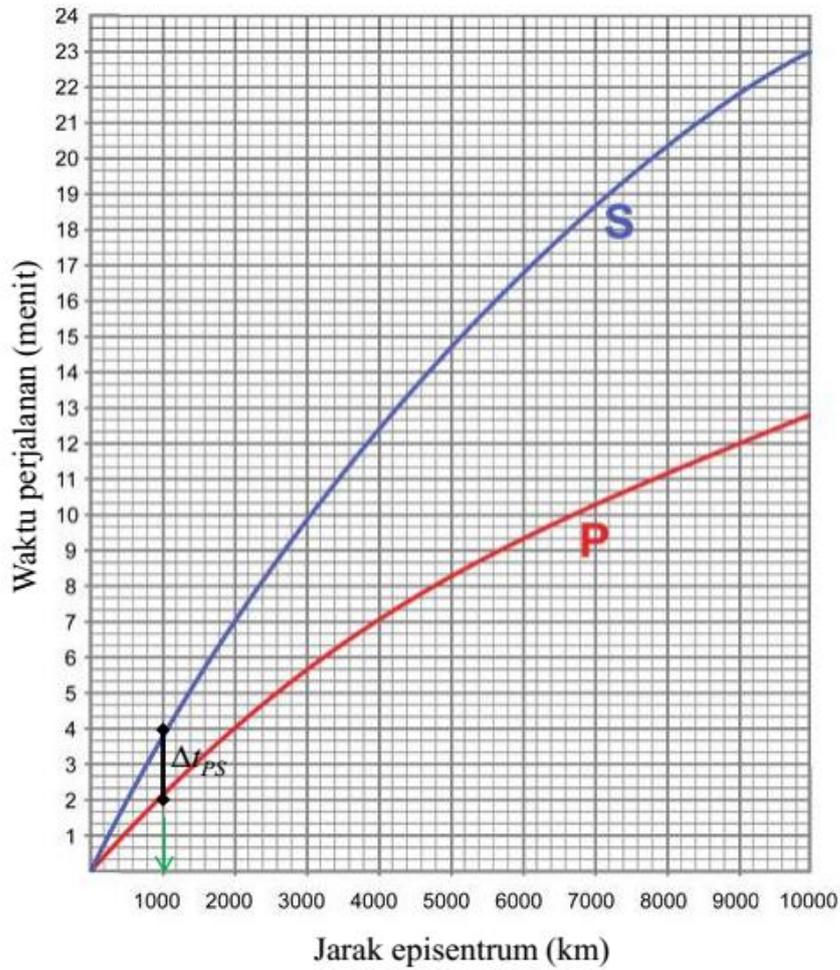
Menentukan lokasi episentrum gempa bumi. Ketika terjadi gempa bumi, maka dalam hitungan menit BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika) langsung dapat meninformasikan lokasi gempa. Bagaimana cara mengetahui lokasi gempa dalam waktu yang begitu cepat? Ternyata caranya cukup mudah. Di negara kita, termasuk di seluruh dunia banyak dipasang alat pencatan gempa yang dikenal dengan seismograf. Alat inilah yang mencatat getaran tanah akibat terdadinya gempa. Alat tersebut sangat sensitif hingga getaran gempa yang tidak dirasakan manusia pun dapat dicatat. Ketika terjadi gempa maka terjadi getaran tanah dari pusat gempa ke segala arah hingga mencapai sejumlah sismograf. Satu fenomena yang sangat spesifik adalah setiap terjadi gempa bumi maka akan muncul dua getaran kuat yang berturutan

dan sismograf selalu mencatat dua getaran kuat tersebut. Dua getaran kuat tersebut dinamakan gelombang P dan gelombang S (**Gambar 2.3**). Getaran kuat pertama yang dicatat seismograf pasti gelombang P dan getaran kuat kedua pastilah gelombang S. Selang waktu munculnya gelombang P dan gelombang S tergantung pada jarak episentrum ke seismograf. Jadi, dengan mengukur selang waktu gelombang P dan gelombang S, Δt_{PS} , maka jarak episentrum ke seismograf tersebut dapat dihitung.



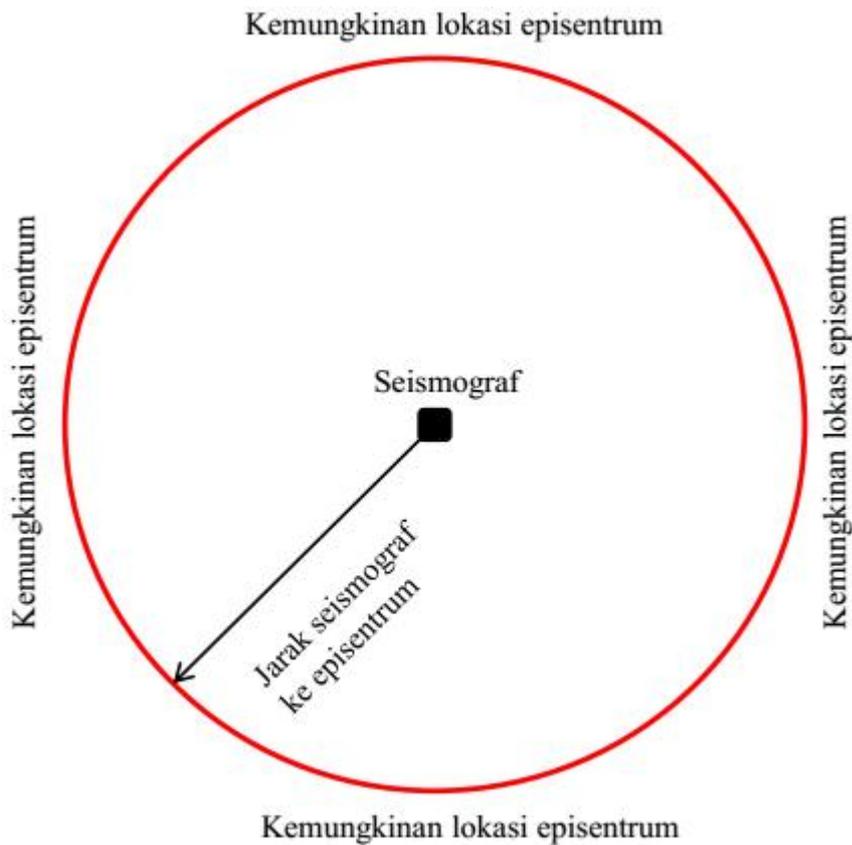
Gambar 4.3 Simpangan perekam seismograf ketika mencatat kedatangan gelombang P dan gelombang S. Informasi yang penting untuk diketahui adalah perbedaan waktu tibanya gelombang P dan gelombang S, Δt_{PS} .

Setelah menentukan selisih waktu tibanya gelombang P dan gelombang S berdasarkan catatan seismograf maka kita gunakan kurva gelombang-P dan gelombang-S yang telah dibakukan. Kurva tersebut tampak pada **Gambar 4.4**. Sumbu datar adalah jarak episentrum dalam km dan sumbu vertikal adalah waktu perjalanan dalam menit. Setelah mengetahui Δt_{PS} dalam satuan menit, maka tentukan lokasi pada kurva **Gambar 4.4** sedemikian sehingga jarak vertikal antara dua kurva persis sama dengan Δt_{PS} . Setelah menentukan posisi tersebut maka, koordinat sumbu datar tepat di bawah posisi tersebut menyatakan jarak episentrum dari seismograf. Contohnya, pada **Gambar 4.4**, jarak seismograf ke episentrum adalah 1.000 km.



Gambar 4.4 kurva waktu perjalanan gelombang-P dan gelombang-S yang telah dibakukan.

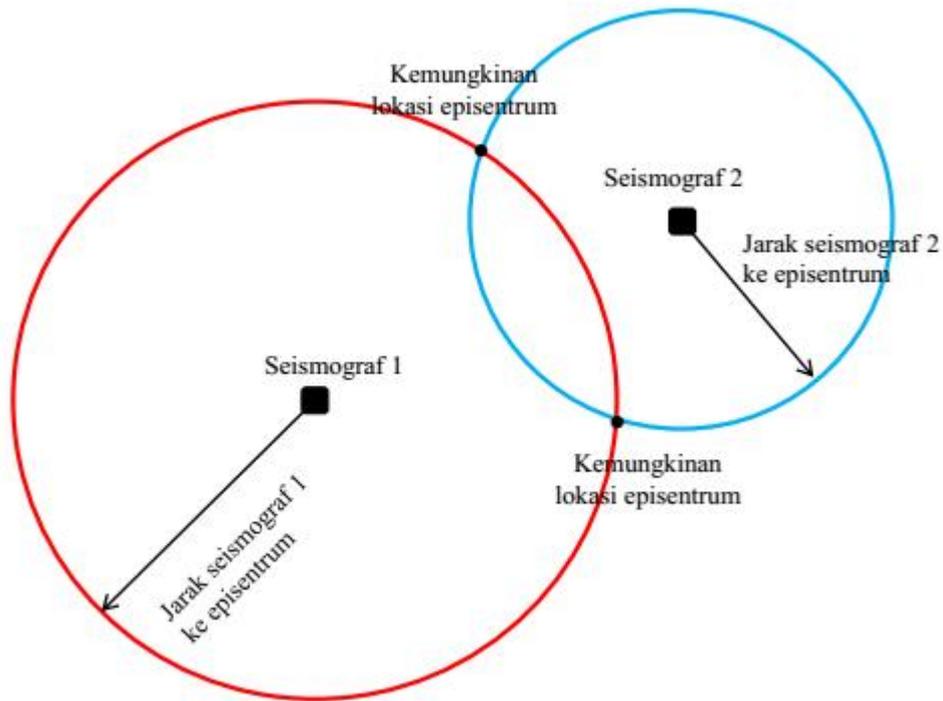
Setelah jarak tersebut ditentukan maka lokasi episentrum belum dapat ditentukan. Yang pasti episentrum berada pada keliling lingkaran di mana seismogram tersebut merupakan pusat lingkaran, seperti diilustrasikan pada **Gambar 4.5**.



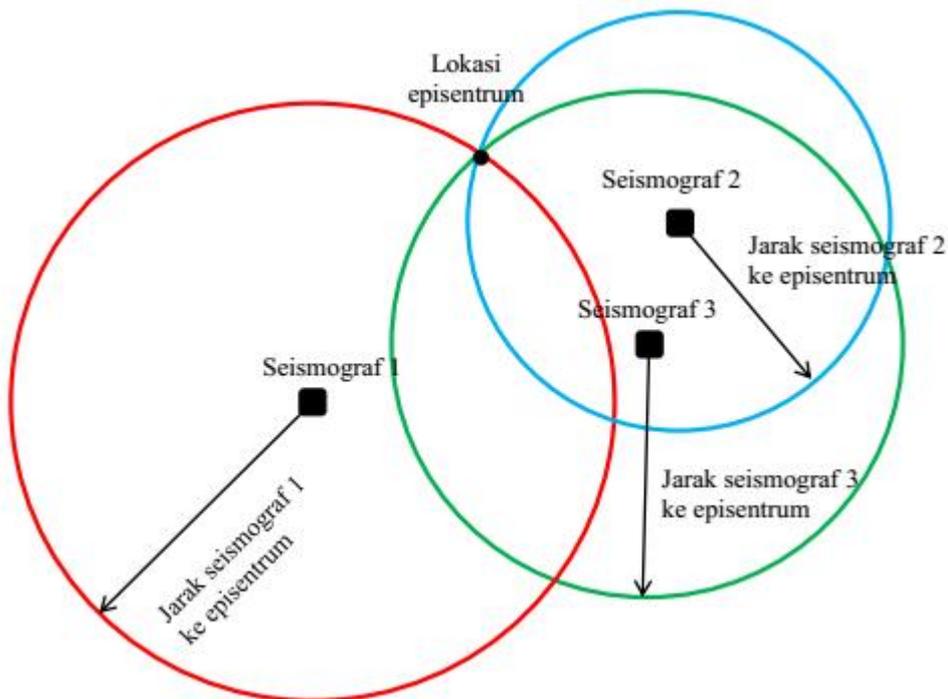
Gambar 4.5 Kemungkinan lokasi episentrum berada pada keliling lingkaran yang berpusat pada seismograf.

Untuk menentukan dengan pasti lokasi episentrum kita gunakan data yang dicatat oleh sejumlah seismogram. Seismogram lain mencatat selisih waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S yang berbeda. Dengan demikian, jarak episentrum ke seismogram kedua berbeda. Kita kembali membuat lingkaran dengan pusat seismogram kedua, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.6**. Lokasi episentrum ada di perpotongan dua lingkaran tersebut. Jadi, dengan menggunakan data dua seismogram maka kita peroleh hanya dua kemungkinan lokasi episentrum. Dengan menggunakan catatan dua seismograf maka kita sudah mereduksi kemungkinan lokasi episentrum menjadi dua lokasi.

Untuk menentukan lokasi tepat episentrum kita gunakan data dari seismograf ketiga. Kita buat pula lingkaran dari hasil catatan seismograf ketiga. Ketika lingkaran akan berpotongan pada satu titik (**Gambar 4.7**). Nah, titik perpotongan itulah yang merupakan lokasi pasti episentrum.



Gambar 4.6 Perpotongan dua lingkaran yang diperoleh dari catatan dua seismograf merupakan dua kemungkinan lokasi episentrum.



Gambar 4.7 Perpotongan tiga lingkaran yang diperoleh dari catatan tiga seismograf merupakan berada pada satu titik. Lokasi titik tersebut merupakan lokasi episentrum.

PENUGASAN KELAS

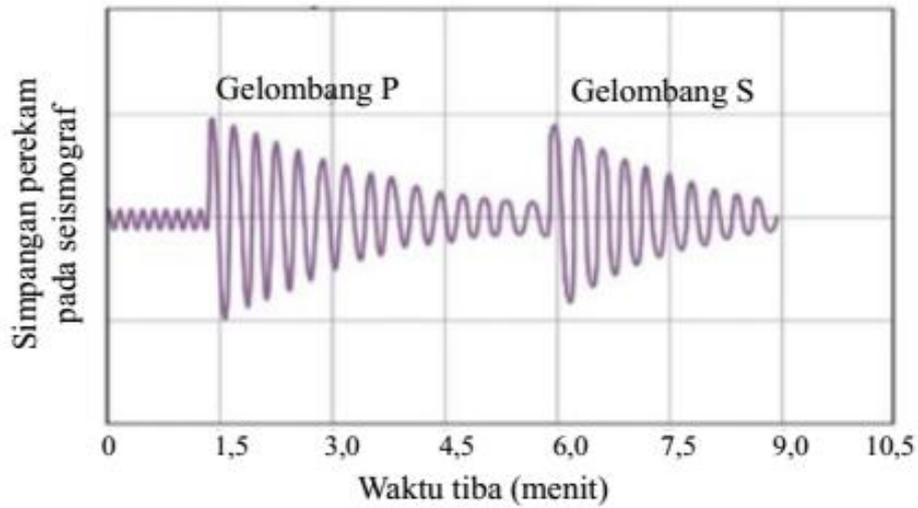
1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang gelombang longitudinal dalam zat padat !
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang gempa bumi !

RANGKUMAN

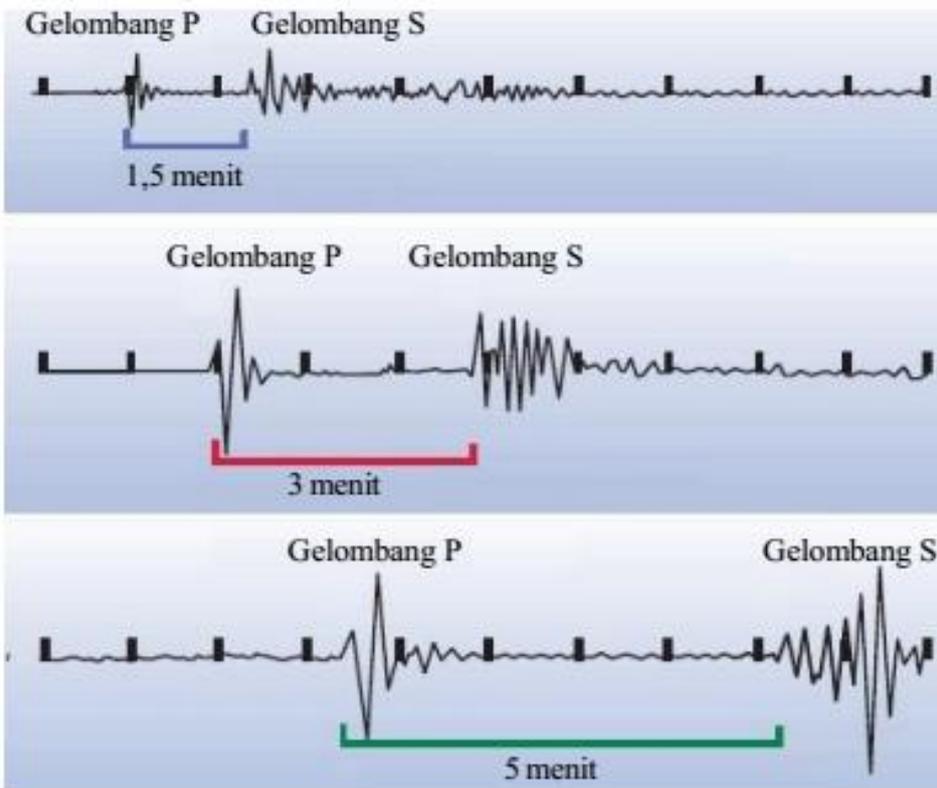
1. Gelombang gempa berasal dari pusat gempa yang berada di dalam lapisan bumi.
2. Gempa bumi dapat disebabkan oleh tabrakan lempeng bumi, runtuhan, atau letusan vulkanik.
3. Lokasi di permukaan bumi tepat di atas pusat gempa dinamakan episentrum.
4. Kebanyakan gelombang yang merambat dalam zat padat merupakan gelombang longitudinal.
5. Laju perambatan gelombang longitudinal dalam zat padat memenuhi hubungan
$$v = \frac{Y}{\dots}$$
6. Untuk menentukan dengan pasti lokasi episentrum kita gunakan data yang dicatat oleh sejumlah seismogram. Seismogram lain mencatat selisih waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S yang berbeda.

EVALUASI FORMATIF 2

1. Jelaskan kenapa terjadi gempa bumi dan hubungannya dengan materi pada bab ini !
2. Jelaskan penurunan rumus laju perambatan gempabumi !
3. Bagaimana cara menentukan lokasi gempa? Jelaskan dengan aplikasi !
4. Berdasarkan **dibawah** tentukan jarak episentrum ke posisi seismograf.



5. Gambar dibawah adalah rekaman dari tiga buag seismograf dari suatu gempa bumi. Tentukan jarak seismograf-seismograf tersebut dari episentrum



Lembar Kerja praktek 2

Kegiatan Pembelajaran 3: Gelombang Longitudinal dalam Fluida

KEMAMPUAN YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang gelombang dalam medium fluida
2. Mahasiswa mampu mengerjakan contoh aplikasi gelombang dalam medium fluida

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Untuk gelombang longitudinal yang merambat dalam fluida (zat cair atau gas), laju perambatan gelombang memenuhi

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (4.5)$$

dengan

B adalah modulus volum (bulk) fluida dan

ρ adalah massa jenis fluida.

Penurunan persamaan (4.5) diuraikan berikut ini dan dianjurkan untuk dipelajari bagi mahasiswa yang menyukai tantangan.

Penurunan kecepatan rambat gelombang longitudinal dalam fluida

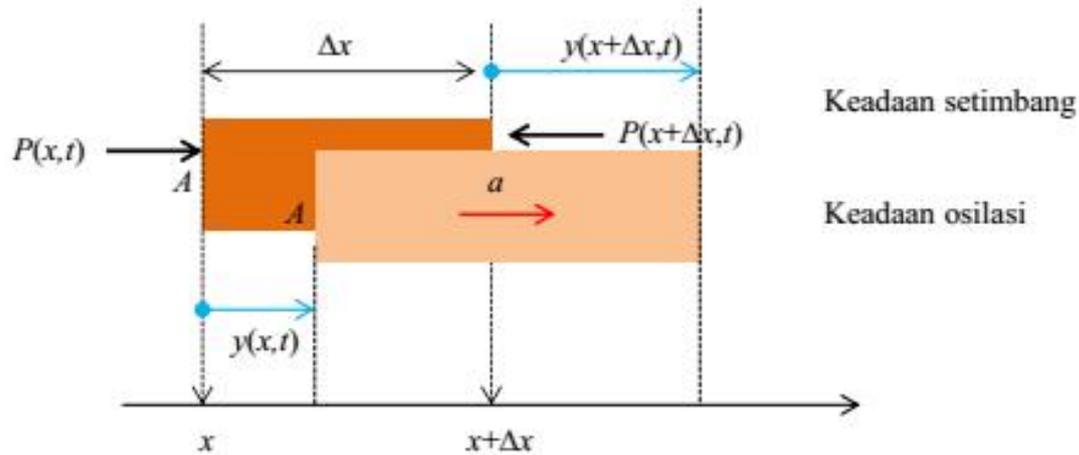
Pembuktian persamaan ini mirip dengan pembuktian pada gelombang yang merambat dalam zat padat. Lihat **Gambar 4.8**. Kita memiliki elemen volum fluida yang memiliki luas penampang A . Dalam keadaan seimbang panjang elemen ini adalah Δx sehingga volumenya adalah $\Delta V = A\Delta x$. Ujung kiri elemen berada pada posisi x dan ujung kanannya berada pada posisi $x + \Delta x$. Ketika berosilasi, ujung kiri elemen menyimpang sejauh $y(x, t)$ dan ujung kanan menyimpang sejauh $y(x + \Delta x, t)$. Dengan demikian, perubahan volum elemen adalah $A[y(x + \Delta x, t) - y(x, t)]$. Jika B adalah modulus bulk dari fluida maka terpenuhi

$$B = - \frac{P}{A[y(x + \Delta x, t) - y(x, t)]/\Delta V}$$

atau

$$P = -BA \frac{y(x + \Delta x, t) - y(x, t)}{\Delta V} = -BA \frac{y(x + \Delta x, t) - y(x, t)}{A\Delta x}$$

$$P = -B \frac{\partial y}{\partial x}$$



Gambar 4.8 Osilasi elemen volum dalam fluida

Gaya yang bekerja di sisi kiri elemen adalah

$$F(x) = P(x)A = -BA \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_x$$

dan gaya yang bekerja di sisi kanan elemen adalah

$$F(x + \Delta x) = P(x + \Delta x)A = -BA \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x+\Delta x}$$

Gaya netto yang bekerja pada elemen adalah

$$\begin{aligned} \Delta F &= F(x + \Delta x) - F(x) \\ &= -BA \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x+\Delta x} + BA \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_x = -BA \left(\left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x+\Delta x} - \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_x \right) = -BA \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Delta x \end{aligned}$$

Gaya ini arahnya menekan elemen ke dalam. Gaya arah ke luar yang menyebabkan elemen memiliki percepatan adalah negatif dari gaya ini, yaitu

$$\Delta F' = -\Delta F = BA \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Delta x$$

Massa elemen adalah

$$\Delta m = \dots dV = \dots A\Delta x$$

Percepatan osilasi elemen fluida adalah

$$a = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Dengan menggunakan hukum Newton II maka

$$\Delta F' = \Delta ma$$

$$BA \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Delta x = \dots A\Delta x \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\dots}{B} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{\dots}{B} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

Dengan membandingkan persamaan di atas dengan persamaan umum gelombang, kita simpulkan bahwa laju perambatan gelombang dalam fluida memenuhi persamaan (3.5)

Contoh Soal 4.1:

Gelombang dengan panjang 0,3 m merambat sepanjang tali yang memiliki panjang total 300 m dan massa 15 kg. Jika tegangan tali adalah 1000 N, berapa laju perambatan gelombang dan berapa pula frekuensinya?

Jawab :

Massa tali persatuan panjang

$$\sim = \frac{m}{L} = \frac{15}{300} = 0.05 \text{ kg/m}$$

Laju perambatan gelombang pada tali

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\sim}} = \sqrt{\frac{1000}{0.05}} = \sqrt{20000} = 141 \text{ m/s}$$

Periode gelombang

$$T = \frac{\lambda}{v} = \frac{0,3}{141} = 0,002 \text{ s}$$

Frekuensi gelombang

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,002} = 500 \text{ Hz}$$

Contoh Soal 4.2:

Berapa lama waktu yang diperlukan gelombang bunyi merambat sepanjang rel kereta api sepanjang 1 km? Massa jenis baja adalah $7,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ dan modulus elastisitasnya $2,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$.

Jawab :

Laju perambatan gelombang

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} = \sqrt{\frac{2,0 \times 10^{11}}{7,8 \times 10^3}} = 5,1 \times 10^3 \text{ m/s}$$

Waktu yang diperlukan gelombang merambat sejauh $x = 1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$ adalah

$$\Delta t = \frac{x}{v} = \frac{1000}{5,1 \times 10^3} = 0,2 \text{ s}$$

Khusus untuk gelombang air yang beresilasi di bawah pengaruh gaya gravitasi, kita memiliki rumus aproksimasi. Khusus untuk air yang tidak terlalu dalam, kecepatan rambat gelombang air dapat didekati dengan persamaan

$$v = \sqrt{gd} \quad (4.6)$$

dengan

g adalah percepatan gravitasi

d adalah kedalaman air.

Kecepatan gelombang tsunami akibat letusan Tambora. Letusan gunung Tambora di Kabupaten Dompu, NTB 200 tahun yang lalu merupakan letusan gunung api terbesar yang tercatat dalam sejarah manusia. Letusan mulai terjadi 5 April 1815 dan mencaai puncak mulai jam 7 sore tanggal 10 April hingga 11 April 1815. Suara letusan besar terdengar hingga Fort Marlborough, Bengkulu (Bengkulu) (1.800 km), Mukomuko (2.000 km), dan Trumon (2.600 km) di pulau Sumatera, serta Ternate (1.400 km) di Maluku. Letusan 10 April 1815 juga menyebabkan tsunami setinggi 4 meter di Sanggar (yang berjarak 30 km ke arah timur), pada jam 10 malam. Tsunami bergerak ke arah barat dan mencapai Besuki, Jawa Timur (jarak 500 km) setinggi 1-2 meter tengah malam. Apakah data ini dapat dijelaskan dengan menggunakan persamaan diatas? Mari kita bahas.

Perhatikan peta pada **Gambar 4.9**. Besuki di Jawa Timur memiliki jarak sekitar 500 km dari gunung Tambora. Karena tsunami mencapai Besuki tengah malam, maka waktu tempuh tsunami (sejak letusan jam 7 malam) sekitar 5 jam. Dengan demikian, kecepatan gelombang tsunami sekitar $500 \text{ km} / 7 \text{ jam} \approx 71 \text{ km/jam}$.



Gambar 4.9 Besuki di Jawa Timur memiliki jarak sekitar 500 km dari gunung Tambora. Pada lokasi ini terjadi tsunami dengan ketinggian 1-2 m akibat letusan Tambora (GoogleMap).

Tsunami bergerak dari laut sekitar Tambora melewati pantai utara Sumbawa, Lombok, dan Bali. Kedalaman air di sepanjang pantai tersebut mencapai sekitar 50 meter. Data diestimasi dari Data dari website aquamarinediving.com yang menyebutkan kedaaman pantai timur laut

Bali antara 3 – 40 meter. Dengan menggunakan persamaan diatas maka kecepatan gelombang tsunami sekitar $\sqrt{9,8 \times 50} = 22 \text{ m/s} = 80 \text{ km/jam}$. Angka ini dekat dengan perhitungan sebelumnya. Dengan perkataan lain, persamaan tersebut dapat memprediksi dengan cukup baik kecepatan gelombang tsunami sepanjang pantai utara Sumbawa, Lombok, Balin, dan Jawa Timur bagian timur.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah penurunan rumus gelombang longitudinal dalam fluida
2. Diskusikanlah penerapan gelombang longitudinal dalam fluida pada aplikasi yang dapat kita amati yaitu gempa bumi
3. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh dan latihan soal pada gelombang longitudinal dalam fluida.

RANGKUMAN

1. Untuk gelombang longitudinal yang merambat dalam fluida (zat cair atau gas), laju perambatan gelombang memenuhi

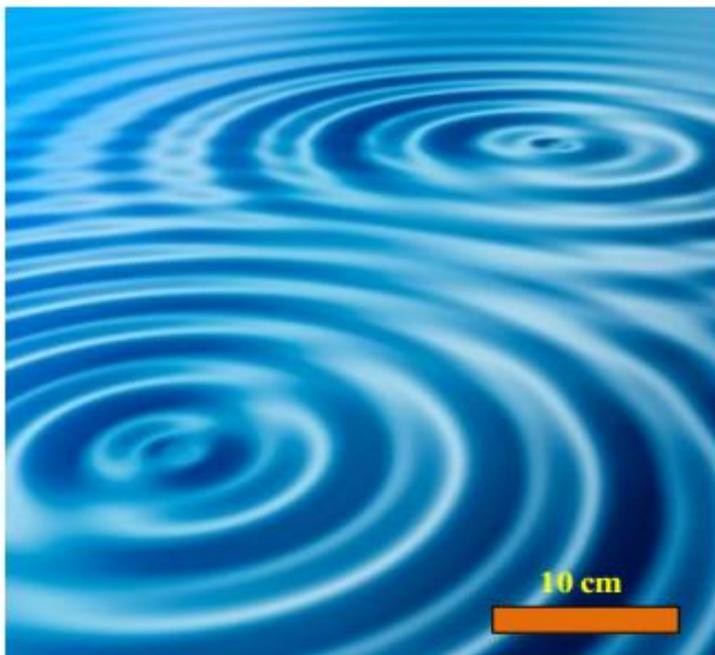
$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

2. Khusus untuk air yang tidak terlalu dalam, kecepatan rambat gelombang air dapat didekati dengan persamaan

$$v = \sqrt{gd}$$

EVALUASI FORMATIF 3

1. Turunkanlah persamaan untuk menghitung laju perambatan gelombang dalam fluida
2. Bagaimana laju gelombang jika terjadi tsunami seperti yang di Aceh? Ceritakan sebagai aplikasi dari materi ini !
3. Pada **Gambar dibawah** gelombang merambat di air. Yang berada di dalam kolam. Kedalaman kolam adalah 2 meter. Kecepatan rambat gelombang di air dangkal memenuhi persamaan \sqrt{gh} dengan g konstanta gravitasi dan h kedalaman air. Dengan mengacu pada skala yang ada pada gambar, perkirakan: panjang dan frekuensi gelombang tersebut.



4. Misalkan suatu saat kamu sedang terbang dengan helikopter di teluk Jakarta dan melihat sebuah boat sedang bergerak di teluk Jakarta. Tampak olehmu bahwa muka gelombang air yang dihasilkan oleh boat membentuk sudut 20° . Jika laju gelombang air adalah $2,0 \text{ m/s}$, berapakah laju boat?

Lembar Kerja praktek 3

Kegiatan Pembelajaran 4: Energi Gelombang

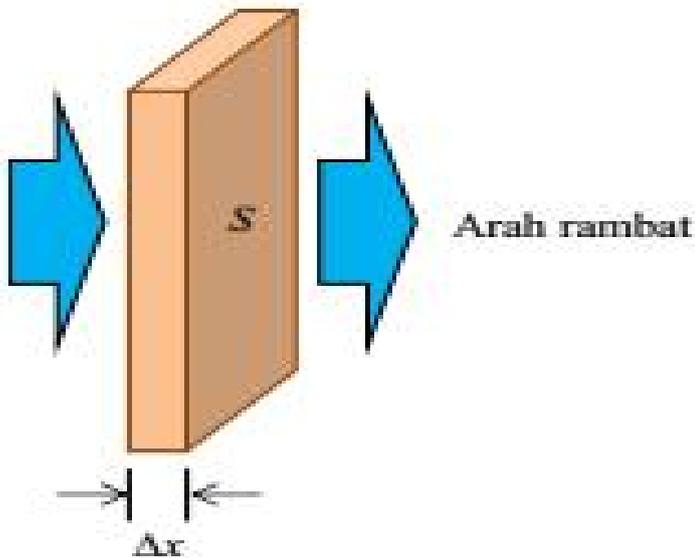
KEMAMPUAN YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami energi yang dibawa gelombang
2. Mahasiswa mampu memberikan contoh energi yang dibawa oleh gelombang.

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Gelombang memindahkan pola simpangan dari sumber ke lokasi lain di medium. Bagian medium yang semula diam, akhirnya bergerak dengan adanya gelombang yang menjalar. Karena getaran memiliki energi, maka bagian medium yang semula tidak memiliki energi (diam) menjadi memiliki energi (bergetar) dengan adanya gelombang yang menjalar. Ini hanya mungkin terjadi jika gelombang berperan memindahkan energi dari sumber ke tempat yang dilaluinya. Berapa energi yang dibawa gelombang?



Gambar 4.10 Menentukan energi yang dimiliki gelombang dalam elemen ΔV

Untuk gelombang sinusoidal di mana simpangannya berubah menurut fungsi harmonik (sinus atau kosinus), partikel-partikel medium memiliki energi rata-rata yang berbanding lurus dengan

amplitude gelombang, yaitu $E = (1/2)kA^2$. Kita tinjau medium dalam kotak yang panjangnya Δx dan luas penampangnya S seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.10**

Volume elemen: $\Delta V = \Delta x S$

Massa elemen: $\Delta m = \rho \Delta V = \rho \Delta x S$

Energi gelombang dalam elemen tersebut $\Delta E = \frac{1}{2} kA^2$

Dalam pelajaran tentang osilator harmonik kita memiliki hubungan: $\check{S} = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Dengan demikian, untuk elemen massa Δm berlaku: $k = \omega^2 \Delta m = \omega^2 \rho \Delta x S$ sehingga energi gelombang dalam elemen massa Δm adalah

$$\begin{aligned}\Delta E &= \frac{1}{2} (\check{S}^2 \dots \Delta x S) A^2 \\ &= \frac{1}{2} \check{S}^2 \dots \frac{\Delta x}{\Delta t} S A^2 \Delta t \\ &= \frac{1}{2} \check{S}^2 \dots v S A^2 \Delta t\end{aligned}$$

Daya yang dibawa gelombang menjadi

$$\begin{aligned}P &= \frac{\Delta E}{\Delta t} \\ &= \frac{\frac{1}{2} \check{S}^2 \dots v S A^2 \Delta t}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{2} \check{S}^2 \dots v S A^2\end{aligned}$$

Intensitas gelombang adalah daya per satuan luas, yaitu

$$\begin{aligned}I &= \frac{P}{S} \\ &= \frac{1}{2} \check{S}^2 \dots v A^2\end{aligned}$$

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah penurunan rumus energi gelombang
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh penggunaan persamaan energi gelombang !

RANGKUMAN

1. Gelombang memindahkan pola simpangan dari sumber ke lokasi lain di medium. Bagian medium yang semula diam, akhirnya bergerak dengan adanya gelombang yang menjalar. Karena getaran memiliki energi, maka bagian medium yang semula tidak memiliki energi (diam) menjadi memiliki energi (bergerak) dengan adanya gelombang yang menjalar.

2. Energi gelombang dalam elemen massa Δm adalah

$$\Delta E = \frac{1}{2} \dot{S}^2 \dots vSA^2 \Delta t$$

3. Daya yang dibawa gelombang menjadi

$$P = \frac{1}{2} \dot{S}^2 \dots vSA^2$$

4. Intensitas gelombang adalah daya per satuan luas, yaitu

$$I = \frac{1}{2} \dot{S}^2 \dots vA^2$$

EVALUASI FORMATIF 4

1. Apa yang dimaksud energi gelombang?
2. Turunkan persamaan Energi Gelombang !
3. Turunkan persamaan Daya !
4. Turunkan persamaan Intensitas !
5. Sebuah gelombang panjang nya 35 cm dan amplitudonya 1,2 cm bergerak dengan kecepatan 47,4 m/s di sepanjang tali yang panjangnya 15 m dan massanya 80 gr. Besarnya energi total gelombang pada tali dan daya yang dirampatkan tali tersebut adalah

Lembar Kerja Praktek 4

RANGKUMAN MODUL

1. Kecepatan rambat gelombang pada tali bergantung pada tegangan tali dan massa jenis tali.

2. Kecepatan rambat gelombang memenuhi

$$v = \frac{F_T}{\mu}$$

3. Gaya F_T tidak bergantung pada posisi. Gaya F_T hanya bergantung pada waktu, atau $F_T(t)$.

4. Pada kasus khusus dimana gaya tegang tali konstan, atau $F_T(t) = \text{konstan}$ maka kecepatan rambat gelombang pada tali terntuk konstan, kecuali tali yang massa jenisnya bergantung pada posisi.

5. Gelombang gempa berasal dari pusat gempa yang berada di dalam lapisan bumi.

6. Gempa bumi dapat disebabkan oleh tabrakan lempeng bumi, runtuhan, atau letusan vulkanik.

7. Lokasi di permukaan bumi tepat di atas pusat gempa dinamakan episentrum.

8. Kebanyakan gelombang yang merambat dalam zat padat merupakan gelombang longitudinal.

9. Laju perambatan gelombang longitudinal dalam zat padat memenuhi hubungan

$$v = \frac{Y}{\rho}$$

10. Untuk menentukan dengan pasti lokasi episentrum kita gunakan data yang dicatat oleh sejumlah seismogram. Seismogram lain mencat selisih waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S yang berbeda.

11. Untuk gelombang longitudinal yang merambat dalam fluida (zat cair atau gas), laju perambatan gelombang memenuhi

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

12. Khusus untuk air yang tidak terlalu dalam, kecepatan rambat gelombang air dapat didekati dengan persamaan

$$v = \sqrt{gd}$$

13. Gelombang memindahkan pola simpangan dari sumber ke lokasi lain di medium. Bagian medium yang semula diam, akhirnya bergerak dengan adanya gelombang yang menjalar.

Karena getaran memiliki energi, maka bagian medium yang semula tidak memiliki energi (diam) menjadi memiliki energi (bergetar) dengan adanya gelombang yang menjalar.

14. Energi gelombang dalam elemen massa Δm adalah

$$\Delta E = \frac{1}{2} \tilde{S}^2 \dots v SA^2 \Delta t$$

15. Daya yang dibawa gelombang menjadi

$$P = \frac{1}{2} \tilde{S}^2 \dots v SA^2$$

16. Intensitas gelombang adalah daya per satuan luas, yaitu

$$I = \frac{1}{2} \tilde{S}^2 \dots v A^2$$

DAFTAR PUSTAKA

- Jati, B.M.E, 2010, *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*, Penerbit Andi, Yogyakarta
- Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing
- Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I
- Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.

Modul 5:

Gelombang Bunyi

PENDAHULUAN

Kita telah mempelajari gelombang mekanik. Salah satu gelombang mekanik, yaitu gelombang longitudinal, memegang peranan penting dalam kehidupan manusia. Gelombang longitudinal yang merambat dalam medium, biasanya udara, disebut sebagai gelombang bunyi. Telinga manusia sangat peka dan dapat mendeteksi gelombang bunyi meskipun intensitasnya sangat rendah. Di samping berguna untuk mendengarkan lawan bicara, telinga manusia mampu menangkap isyarat-isyarat dari lingkungan: dari suara binatang di malam hari hingga bunyi klakson mobil yang bergerak mendekati.

Sekarang kita akan membahas beberapa sifat penting dari gelombang bunyi, seperti frekuensi, amplitudo, dan intensitas. Telinga manusia sangat peka terhadap perubahan tekanan. Oleh karena itu, dalam membahas gelombang bunyi pembahasan perubahan tekanan seringkali sangat bermanfaat. Kita akan membahas hubungan antara pergeseran, perubahan tekanan, dan intensitas serta hubungan antara ketiga besaran ini dengan persepsi bunyi oleh manusia. Kita juga akan mempelajari interferensi dari dua gelombang bunyi yang frekuensinya berbeda sedikit sehingga menimbulkan fenomena layangan. Efek Doppler sebagai salah satu fenomena yang terjadi pada gelombang bunyi juga akan dibicarakan.

Kegiatan Pembelajaran 1: Pengantar Gelombang Bunyi

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai gelombang bunyi
2. Mahasiswa mampu mengerjakan contoh soal dan latihan mengenai gelombang bunyi

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Bunyi adalah gelombang longitudinal yang merambat dalam suatu medium. Bunyi dapat merambat dalam zat padat, zat cair, dan gas. Pada bagian ini hanya akan dibahas gelombang bunyi di udara.

Gelombang bunyi yang paling sederhana adalah gelombang sinusoidal yang memiliki frekuensi, amplitudo, dan panjang gelombang tertentu. Telinga manusia peka terhadap gelombang bunyi dengan jangkauan frekuensi antara 20 Hz – 20.000 Hz. Jangkauan ini dikenal sebagai jangkauan suara yang dapat didengar (*audible range*). Gelombang bunyi dengan frekuensi di luar daerah jangkauan yang dapat didengar mungkin dapat sampai ke telinga, tetapi kita tidak sadar akan frekuensi tersebut. Gelombang bunyi yang frekuensinya di atas 20.000 Hz disebut gelombang ultrasonik. Anjing dan kelelawar adalah hewan yang dapat mendengar bunyi ultrasonik. Gelombang bunyi yang frekuensinya di bawah 20 Hz disebut gelombang infrasonik. Sumber-sumber gelombang infrasonik adalah gempa bumi, gunung meletus, halilintar, dan gelombang-gelombang yang dihasilkan oleh getaran mesin yang sangat kuat.

Sekarang kita akan membahas gelombang bunyi sinusoidal yang merambat ke arah sumbu x positif. Gelombang ini dapat dinyatakan dengan persamaan

$$y(x,t) = A \sin(\tilde{\omega}t - kx). \quad (5.1)$$

Ingat, dalam gelombang longitudinal pergeseran partikel sejajar dengan arah perambatan. Oleh karena itu, x dan y diukur sejajar tidak tegak lurus seperti pada gelombang transversal.

Gelombang bunyi dapat juga dijelaskan sebagai perubahan tekanan di berbagai titik. Untuk gelombang bunyi sinusoidal di udara, tekanannya berubah-ubah dapat di atas atau di bawah tekanan atmosfer p_a . Telinga manusia bekerja dengan mengindra perubahan tekanan ini. Ketika gelombang bunyi memasuki telinga, ada perbedaan tekanan pada kedua sisi gendang telinga sehingga gendang telinga bergetar.

Diandaikan $p(x,t)$ menunjukkan perubahan tekanan di titik x pada saat t . Artinya, $p(x,t)$ menunjukkan perbedaan tekanan di titik itu terhadap tekanan atmosfer p_a . Ada hubungan antara perbedaan tekanan $p(x,t)$ dan modulus bulk udara B , yaitu

$$p(x,t) = -B \frac{\partial y(x,t)}{\partial x}. \quad (5.2)$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa perubahan volume menyebabkan tekanan berkurang. Dengan mengingat Persamaan (5.1), diperoleh

$$p(x,t) = BkA \cos(\check{S}t - kx). \quad (5.3)$$

Kuantitas BkA pada Persamaan (4.3) menunjukkan perubahan tekanan maksimum atau sering disebut sebagai amplitudo tekanan, dengan simbol p_{maks} . Jadi,

$$p_{\text{maks}} = BkA. \quad (5.4)$$

Persamaan (5.4) menunjukkan bahwa amplitudo tekanan p_{maks} berbanding lurus dengan amplitudo pergeseran A . Amplitudo tekanan juga bergantung pada panjang gelombang, sebab $k = 2\pi / \lambda$.

Contoh Soal 5.1:

Gelombang bunyi di udara menghasilkan perbedaan tekanan yang dinyatakan dengan persamaan $p(x,t) = 0,75 \cos \frac{1}{2}f(340 - x)$, dengan p dalam pascal, x dalam meter, dan t dalam sekon. Hitunglah (a) amplitudo tekanan, (b) panjang gelombang, (c) frekuensi, dan (d) laju gelombang.

Jawaban :

Dengan membandingkan antara persamaan $p(x,t) = 0,75 \cos \frac{1}{2}f(340 - x)$, diperoleh

- (a) amplitudo tekanan $p_{\text{maks}} = 0,75$ pascal,
- (b) $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{1}{2}f$, panjang gelombang $\lambda = 4$ meter,
- (c) $\omega = 2\pi f = 170f$, frekuensi $f = 85$ Hz, dan
- (d) laju gelombang $v = \lambda f = (85 \text{ Hz})(4 \text{ m}) = 340 \text{ m/s}$.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang gelombang bunyi
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil soal dan contoh soal serta aplikasi gelombang bunyi

RANGKUMAN

1. Bunyi adalah gelombang longitudinal yang merambat dalam suatu medium.
2. Bunyi dapat merambat dalam zat padat, zat cair, dan gas.

3. Telinga manusia peka terhadap gelombang bunyi dengan jangkauan frekuensi antara 20 Hz – 20.000 Hz. Jangkauan ini dikenal sebagai jangkauan suara yang dapat didengar (*audible range*).
4. Gelombang bunyi yang frekuensinya di atas 20.000 Hz disebut gelombang ultrasonik. Anjing dan kelelawar adalah hewan yang dapat mendengar bunyi ultrasonik.
5. Gelombang bunyi yang frekuensinya di bawah 20 Hz disebut gelombang infrasonik. Sumber-sumber gelombang infrasonik adalah gempa bumi, gunung meletus, halilintar, dan gelombang-gelombang yang dihasilkan oleh getaran mesin yang sangat kuat
6. Gelombang bunyi sinusoidal yang merambat ke arah sumbu x positif. Gelombang ini dapat dinyatakan dengan persamaan

$$y(x, t) = A \sin(\tilde{S}t - kx).$$

7. Untuk gelombang bunyi sinusoidal di udara, tekanannya berubah-ubah dapat di atas atau di bawah tekanan atmosfer p_a .
8. Ketika gelombang bunyi memasuki telinga, ada perbedaan tekanan pada kedua sisi gendang telinga sehingga gendang telinga bergetar.

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan bunyi !
2. Jelaskan perambatan bunyi !
3. Jelaskan apa yang dimaksud dengan ultrasonik dan contohnya !
4. Jelaskan apa yang dimaksud dengan infrasonik dan contohnya !
5. Jelaskan range frekuensi yang biasa kita dengar sehari-hari !

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Getaran Dawai

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami getaran dawai
2. Mahasiswa mampu mengerjakan contoh dan latihan soal tentang getaran dawai

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Kita akan meninjau dawai yang panjangnya L yang kedua ujungnya diikat pada penopang (tetap). Dawai semacam ini terdapat pada alat musik gitar, piano, dan biola. Bila dawai gitar dipetik, pada dawai akan terjadi gelombang. Gelombang ini dipantulkan pada kedua ujungnya yang tidak bergerak, sehingga diperoleh gelombang berdiri. Selanjutnya, gelombang berdiri pada dawai ini akan menghasilkan gelombang bunyi di udara dengan frekuensi tertentu.

Untuk dawai yang kedua ujungnya diikat pada penopang, gelombang berdiri yang dihasilkan harus memiliki titik simpul pada kedua ujungnya. Kita telah mempelajari bahwa jarak antara dua titik simpul yang berdekatan adalah setengah panjang gelombang atau $\lambda/2$. Dengan demikian, untuk dawai yang panjangnya L berlaku

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5.5)$$

Artinya, jika dawai yang panjangnya L dan kedua ujungnya diikat pada penopang, maka gelombang berdiri hanya dapat terjadi jika panjang gelombang memenuhi Persamaan (5.5). Dengan menuliskan nilai-nilai panjang gelombang yang dapat terjadi sebagai λ_n , berdasarkan Persamaan (5.5) diperoleh

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}. \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5.6)$$

Setiap panjang gelombang λ_n terdapat frekuensi f_n , sesuai dengan persamaan umum gelombang $f_n = v/\lambda_n$. Frekuensi paling kecil terjadi jika panjang gelombangnya paling besar. Hal ini terjadi ketika $n = 1$, yaitu $\lambda_1 = 2L$. Dengan demikian,

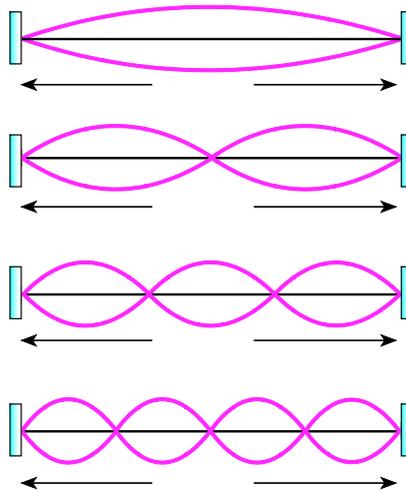
$$f_1 = \frac{v}{2L}. \quad (5.7)$$

Besaran f_1 dikenal sebagai frekuensi dasar. Frekuensi gelombang berdiri yang lain adalah $f_2 = 2v/2L$, $f_3 = 3v/2L$, dan seterusnya. Perhatikan bahwa $f_2 = 2f_1$,

$f_3 = 3f_1$, dan seterusnya. Secara umum,

$$f_n = n \frac{v}{2L} = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5.8)$$

Frekuensi-frekuensi f_n dinamakan harmonik dan deretan frekuensi ini dinamakan deret harmonik. Para musisi menyebut f_2 , f_3 , f_3 , dan seterusnya dengan istilah nada atas (*overtone*). Jadi, f_2 adalah harmonik kedua atau nada atas pertama, f_3 adalah harmonik ketiga atau nada atas kedua, dan seterusnya. Harmonik pertama sama dengan nada dasar.



Gambar 5.1 Posisi simpul dan perut gelombang pada dawai yang kedua ujungnya diikat.

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa pada frekuensi dasar terdapat 2 simpul dan 1 perut. Harmonik kedua (nada atas pertama) terdapat 3 simpul dan 2 perut, harmonik ketiga (nada atas kedua) terdapat 4 simpul dan 3 perut, dan seterusnya.

Dari laju gelombang transversal pada dawai dikombinasikan dengan persamaan (5.7) menghasilkan

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (5.9)$$

Persamaan (5.9) menunjukkan bahwa frekuensi f berbanding terbalik dengan panjang dawai L . Hal ini ditunjukkan pada piano atau biola di mana bagian bass (memiliki frekuensi rendah) memiliki dawai yang lebih panjang daripada bagian trebel (memiliki frekuensi tinggi).

Contoh Soal 5.2:

Sebuah biola alto memiliki beberapa dawai yang panjangnya 5 m di antara dua titik tetap. Salah satu dawai memiliki massa per satuan panjang 40 g/m dan frekuensi dasar 20 Hz. Hitunglah (a) tegangan dawai, (b) frekuensi dan panjang gelombang dawai pada harmonik kedua, dan (c) frekuensi dan panjang gelombang dawai pada nada atas kedua.

Jawaban :

- (a) Diketahui, panjang dawai $L = 5$ m, massa per satuan panjang dawai $\mu = 40$ g/m $= 40 \times 10^{-3}$ kg/m, dan frekuensi dasar $f_1 = 20$ Hz. Dengan menggunakan Persamaan (4.9), diperoleh

$$F = 4\mu L^2 f_1^2 = 4(40 \times 10^{-3} \text{ kg/m})(5 \text{ m})^2 (20 \text{ Hz})^2 = 1.600 \text{ N}.$$

- (b) Dengan menggunakan Persamaan (4.8), frekuensi harmonik kedua ($n = 2$) adalah $f_2 = 2f_1 = 2(20 \text{ Hz}) = 40$ Hz. Dengan menggunakan Persamaan (5.6), panjang gelombang dawai untuk harmonik kedua adalah

$$\lambda_2 = \frac{2L}{2} = \frac{2(5 \text{ m})}{2} = 5 \text{ m}.$$

- (c) Nada atas kedua merupakan nada kedua di atas nada dasar, yaitu $n = 3$. Jadi, frekuensinya adalah $f_3 = 3f_1 = 3(20 \text{ Hz}) = 60$ Hz. Panjang gelombang untuk nada atas kedua adalah

$$\lambda_3 = \frac{2L}{3} = \frac{2(5 \text{ m})}{3} = 3,3 \text{ m}.$$

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang getaran dawai
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh dan latihan getaran dawai

RANGKUMAN

1. Dawai terdapat pada alat musik gitar, piano, dan biola. Bila dawai gitar dipetik, pada dawai akan terjadi gelombang. Gelombang ini dipantulkan pada kedua ujungnya yang tidak bergerak, sehingga diperoleh gelombang berdiri. Selanjutnya, gelombang berdiri pada dawai ini akan menghasilkan gelombang bunyi di udara dengan frekuensi tertentu.
2. Untuk dawai yang kedua ujungnya diikat pada penopang, gelombang berdiri yang dihasilkan harus memiliki titik simpul pada kedua ujungnya.
3. Untuk dawai yang panjangnya L berlaku

$$L = n \frac{\lambda}{2},$$

4. Nilai panjang gelombang yang dapat terjadi sebagai λ_n , adalah

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}.$$

5. Frekuensi f berbanding terbalik dengan panjang dawai L . Hal ini ditunjukkan pada piano atau biola di mana bagian bass (memiliki frekuensi rendah) memiliki dawai yang lebih panjang daripada bagian trebel (memiliki frekuensi tinggi).

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}.$$

EVALUASI FORMATIF 2

1. Sebutkan contoh gelombang berdiri !
2. Jelaskan hubungan frekuensi terhadap panjang dawai !
3. Sebuah biola alto memiliki beberapa dawai yang panjangnya 10 m di antara dua titik tetap. Salah satu dawai memiliki massa per satuan panjang 30 g/m dan frekuensi dasar 50 Hz. Hitunglah (a) tegangan dawai, (b) frekuensi dan panjang gelombang dawai pada harmonik kedua, dan (c) frekuensi dan panjang gelombang dawai pada nada atas kedua !

Lembar Kerja Praktek 2

Kegiatan Pembelajaran 3: Pipa Organa

KEMAMPUAN YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang pipa organa baik terbuka maupun tertutup.
2. Mahasiswa mampu mengerjakan contoh soal dan latihan pipa organa baik terbuka maupun tertutup.

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

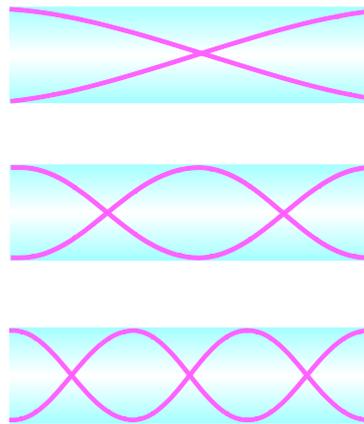
Gelombang berdiri longitudinal dapat menghasilkan bunyi pada alat musik tiup. Salah satu contoh alat musik tiup yang paling sederhana adalah pipa organa. Ketika pipa organa ditiup, getaran bibir peniup membantu membangun getaran kolom udara dalam pipa. Udara dalam pipa bergetar dalam bentuk gelombang berdiri longitudinal.

Ketika peniup pipa organa memasukkan udara ke mulut pipa organa, udara bergetar sehingga pada mulut pipa organa selalu terjadi titik perut karena di mulut pipa ini udara dapat bergerak bebas. Selanjutnya, pola gelombang yang terbentuk pada kolom udara di dalam pipa organa tergantung pada jenis pipa. Ada dua jenis pipa organa, yaitu pipa organa terbuka dan pipa organa tertutup.

Pipa Organa Terbuka

Pipa organa yang terbuka pada kedua ujungnya dinamakan pipa organa terbuka. Pada pipa organa terbuka kedua ujungnya merupakan titik perut (Gambar 4.2). Frekuensi dasar pipa organa terbuka f_1 memiliki pola gelombang berdiri dengan titik-titik perut pada kedua ujungnya dan sebuah titik simpul di tengah-tengahnya (Gambar 3.2). Jadi, frekuensi dasar pipa organa terbuka memiliki 2 perut dan 1 simpul. Jarak antara dua titik perut yang berurutan selalu sama dengan $\frac{1}{2}\lambda$. Jarak ini sama dengan panjang pipa, yaitu L . Dengan demikian, $L = \frac{1}{2}\lambda$ atau $\lambda = 2L$. Dengan mengingat rumus umum gelombang, $f = v/\lambda$, diperoleh

$$f_1 = \frac{v}{2L}. \quad (5.10)$$



Gambar 5.2 Pipa organa terbuka dengan pola harmonik pertama atau nada dasar, pola harmonik kedua atau nada atas pertama, pola harmonik ketiga atau nada atas kedua.

Gambar 5.2 menunjukkan pola harmonik kedua dan harmonik ketiga (nada atas pertama dan nada atas kedua) sebuah pipa organa terbuka. Pada harmonik kedua terdapat 3 perut dan 2 simpul, sedangkan pada harmonik ketiga terdapat 4 perut dan 3 simpul. Pada harmonik kedua, $L = 2\left(\frac{1}{2}\lambda\right) = \lambda$. Jadi,

$$f_2 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{L} = 2f_1.$$

Pada harmonik ketiga, $L = 3\left(\frac{1}{2}\lambda\right) = 3\lambda/2$ atau $\lambda = 2L/3$. Jadi,

$$f_3 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\frac{2}{3}L} = \frac{3v}{2L} = 3f_1.$$

Untuk setiap nada harmonik pipa organa terbuka panjang pipa L harus memenuhi persamaan

$$L = n\frac{\lambda_n}{2} \quad \text{atau} \quad \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (5.11)$$

Oleh karena itu, setiap frekuensi nada harmonik pipa organa terbuka selalu memenuhi persamaan

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2L/n} = n \frac{v}{2L} = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (5.12)$$

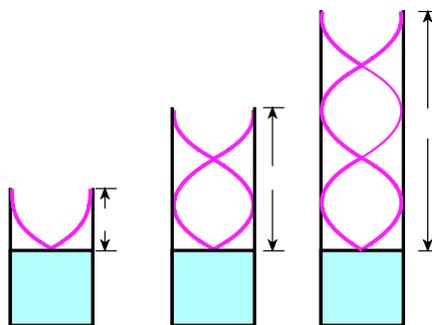
Untuk $n = 1$ bersesuaian dengan frekuensi dasar f_1 , $n = 2$ bersesuaian dengan frekuensi nada atas pertama (harmonik kedua), dan seterusnya.

Pipa Organa Tertutup

Pipa organa tertutup adalah pipa organa yang salah satu ujungnya tertutup. Gambar 4.3 menunjukkan penampang pipa organa yang terbuka di ujung atas dan tertutup di ujung bawah. Ketika pipa organa tertutup ditiup, ujung terbuka merupakan titik perut, tetapi ujung tertutup merupakan titik simpul. Jarak antara titik perut dan titik simpul yang berdekatan adalah seperempat panjang gelombang. Gambar 3.3 menunjukkan pola frekuensi dasar atau frekuensi dasar, f_1 . Panjang pipa $L = \lambda/4$ atau $\lambda = 4L$. Frekuensi dasar f_1 dapat diperoleh berdasarkan rumus gelombang $f = v/\lambda$, sehingga

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L}. \quad (5.13)$$

Jika Persamaan (5.13) dibandingkan Persamaan (5.10), tampak bahwa frekuensi dasar pipa organa tertutup sama dengan setengah frekuensi dasar pipa organa terbuka yang panjangnya sama. Dalam istilah musik, titi nada pipa organa tertutup adalah satu oktaf lebih rendah daripada titi nada pipa organa terbuka yang panjangnya sama.



Gambar 5.3 Penampang pipa organa tertutup yang menunjukkan pola harmonik pertama, harmonik kedua, dan harmonik ketiga.

Gambar 3.3 menunjukkan pola harmonik kedua, dengan panjang pipa $L = 3\lambda/4$ atau $\lambda = 4L/3$. Pola harmonik ini memiliki frekuensi f_3 , yaitu:

$$f_3 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L/3} = 3\frac{v}{4L} = 3f_1.$$

Gambar 3.3 menunjukkan pola harmonik ketiga, dengan panjang pipa $L = 5\lambda/4$ atau $\lambda = 4L/5$. Pola harmonik ini memiliki frekuensi f_5 , yaitu:

$$f_5 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L/5} = 5\frac{v}{4L} = 5f_1.$$

Secara umum, panjang gelombang yang mungkin dimiliki pipa organa tertutup diberikan oleh persamaan

$$L = n\frac{\lambda_n}{4} \text{ atau } \lambda_n = \frac{4L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (5.14)$$

Frekuensi-frekuensi harmonik pipa organa tertutup diperoleh berdasarkan rumus gelombang $f_n = v/\lambda_n$, yaitu

$$f_n = n\frac{v}{4L} = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (5.15)$$

dengan f_1 diberikan oleh Persamaan (5.13). Dalam pipa organa tertutup, harmonik kedua, harmonik keempat, dan semua harmonik genap tidak muncul. Dengan kata lain, dalam pipa organa tertutup yang mungkin terjadi hanya harmonik-harmonik ganjil.

Contoh Soal 4.3 :

Sebuah pipa organa panjangnya 26 cm. Hitunglah frekuensi dasar dan tiga nada harmonik yang pertama untuk (a) pipa organa terbuka dan (b) pipa organa tertutup. Laju gelombang bunyi di udara 345 m/s.

Jawaban :

(a) Untuk pipa organa terbuka, frekuensi dasar dapat dihitung dengan Persamaan (3-10):

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{345 \text{ m/s}}{2(0,26 \text{ m})} = 663 \text{ Hz.}$$

Oleh karena itu, tiga nada harmonik yang pertama adalah $f_2 = 2f_1 = 1.326 \text{ Hz}$,
 $f_3 = 3f_1 = 1.989 \text{ Hz}$, dan $f_4 = 4f_1 = 2.326 \text{ Hz}$.

(b) Untuk pipa organa tertutup, frekuensi dasar dapat dihitung dengan Persamaan (3-13):

$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{345 \text{ m/s}}{4(0,26 \text{ m})} = 332 \text{ Hz.}$$

Dalam pipa organa tertutup hanya harmonik gasal yang muncul. Oleh karena itu, tiga nada harmonik yang pertama adalah $f_3 = 3f_1 = 996 \text{ Hz}$, $f_5 = 5f_1 = 1.660 \text{ Hz}$,
dan $f_7 = 7f_1 = 2.324 \text{ Hz}$.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah apa yang dimaksud pipa organa baik terbuka maupun tertutup.
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh dan latihan pipa organa baik terbuka maupun tertutup.

RANGKUMAN

1. Gelombang berdiri longitudinal dapat menghasilkan bunyi pada alat musik tiup. Salah satu contoh alat musik tiup yang paling sederhana adalah pipa organa. Ketika pipa organa ditiup, getaran bibir peniup membantu membangun getaran kolom udara dalam pipa. Udara dalam pipa bergetar dalam bentuk gelombang berdiri longitudinal.

2. Ada dua jenis pipa organa, yaitu pipa organa terbuka dan pipa organa tertutup.
3. Pipa organa yang terbuka pada kedua ujungnya dinamakan pipa organa terbuka. Frekuensi nada harmonik pipa organa terbuka memenuhi persamaan

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2L/n} = n \frac{v}{2L} = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

4. Pipa organa tertutup adalah pipa organa yang salah satu ujungnya tertutup. Frekuensi-frekuensi harmonik pipa organa tertutup diperoleh berdasarkan rumus gelombang $f_n = v/\lambda_n$, yaitu

$$f_n = n \frac{v}{4L} = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

EVALUASI FORMATIF 3

1. Jelaskan apa itu pipa organa?
2. Jelaskan 2 jenis pipa organa !
3. Jelaskan bagaimana mencari frekuensi nada harmonik pipa organa terbuka?
4. Jelaskan bagaimana mencari frekuensi nada harmonik pipa organa tertutup?
5. Sebuah pipa organa panjangnya 52 cm. Hitunglah frekuensi dasar dan tiga nada harmonik yang pertama untuk (a) pipa organa terbuka dan (b) pipa organa tertutup. Laju gelombang bunyi di udara 345 m/s. !

Lembar Kerja Praktek 3

Kegiatan Pembelajaran 4: Intensitas Bunyi

KEMAMPUAN YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan intensitas bunyi
2. Mahasiswa mampu mengerjakan contoh soal dan latihan tentang intensitas bunyi

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Sebagaimana gelombang pada umumnya, gelombang bunyi yang merambat juga memindahkan energi dari satu tempat ke tempat lain. Intensitas gelombang, dengan simbol I , didefinisikan sebagai energi rata-rata yang dipindahkan oleh gelombang per satuan waktu per satuan luas. Jadi, intensitas merupakan daya rata-rata per satuan luas. Akan tetapi, daya sama dengan hasil kali antara gaya dan kecepatan. Oleh karena itu, daya per satuan luas pada gelombang bunyi yang merambat dalam arah sumbu $-x$ sama dengan hasil kali antara perubahan tekanan $p(x,t)$ (gaya per satuan luas) dan kecepatan partikel $v_y(x,t)$. Untuk gelombang bunyi yang dinyatakan dengan Persamaan (5.1), perubahan tekanan $p(x,t)$ dinyatakan dengan Persamaan (5.3). Kecepatan partikel $v_y(x,t)$ adalah turunan parsial terhadap waktu dari Persamaan (5.1):

$$v_y(x,t) = \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \tilde{S}A \cos(\tilde{S}t - kx).$$

Dengan demikian,

$$p(x,t)v_y(x,t) = (BkA \cos(\tilde{S}t - kx))(\tilde{S}A \cos(\tilde{S}t - kx)) = B\tilde{S}kA^2 \cos^2(\tilde{S}t - kx).$$

Seperti telah diuraikan di atas, intensitas merupakan harga rerata dari $p(x,t)v_y(x,t)$. Nilai rerata dari $\cos^2(\tilde{S}t - kx)$ pada satu periode $T = 2f / \tilde{S}$ adalah $\frac{1}{2}$. Dengan demikian,

$$I = \frac{1}{2} B \check{S} k A^2. \quad (5.16)$$

Dengan mengingat $k = \check{S}/v$ dan $v = \sqrt{B/\dots}$, Persamaan (3-16) menjadi

$$I = \frac{1}{2} \check{S}^2 A^2 \sqrt{B\dots}. \quad (5.17)$$

Persamaan (5.17) menunjukkan bahwa intensitas I sebanding dengan kuadrat amplitudo pergeseran A . Dengan mengingat amplitudo tekanan $p_{\text{maks}} = BkA$ dan $v = \check{S}/k$, Persamaan (5.17) menjadi

$$I = \frac{vp_{\text{maks}}^2}{B}. \quad (5.18)$$

Sebagai alternatif, Persamaan (5.17) dapat dinyatakan dalam bentuk

$$I = \frac{p_{\text{maks}}^2}{2\dots v} = \frac{p_{\text{maks}}^2}{2\sqrt{\dots B}}. \quad (5.19)$$

Contoh Soal 5.4 :

Suara paling lemah yang masih dapat ditangkap oleh telinga manusia pada frekuensi 1.000 Hz bersesuaian dengan intensitas bunyi 10^{-12} W/m^2 (ambang pendengaran). Sebaliknya, suara paling keras yang masih dalam batas toleransi pendengaran manusia bersesuaian dengan intensitas bunyi 1 W/m^2 (ambang rasa sakit). Jika massa jenis udara $\rho = 1,20 \text{ kg/m}^3$ dan laju gelombang bunyi $v = 344 \text{ m/s}$, berapakah (a) amplitudo tekanan dan (b) amplitudo pergeseran yang bersesuaian dengan batas-batas intensitas ini?

Jawaban :

Kita akan membahas intensitas $I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

- (a) Dengan menggunakan Persamaan (3-19), diperoleh

$$p_{\text{maks}} = \sqrt{2\rho v I} = \sqrt{(2)(1,20 \text{ kg/m}^3)(344 \text{ m/s})(10^{-12} \text{ W/m}^2)} = 2,9 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2.$$

- (b) Dengan mengingat $v = \sqrt{B/\rho}$ atau $B = \rho v^2$ dan $k = \tilde{S}/v = 2ff/v$, Persamaan (3-4) dapat ditulis menjadi

$$p_{\text{maks}} = BkA = \rho v^2 (2ff/v)A = 2ff\rho v A,$$

$$A = \frac{p_{\text{maks}}}{2ff\rho v}.$$

Dengan demikian, untuk frekuensi 1.000 Hz memberikan amplitudo pergeseran sebesar

$$A = \frac{p_{\text{maks}}}{2ff\rho v} = \frac{2,9 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2}{2f(1.000 \text{ Hz})(1,20 \text{ kg/m}^3)(344 \text{ m/s})} = 1,1 \times 10^{-11} \text{ m}.$$

Sebagai latihan, Anda dapat mengerjakan soal ini untuk intensitas 1 W/m^2 .

Jika sumber bunyi dapat dipandang sebagai sebuah titik, intensitas bunyi pada jarak r dari sumber bunyi akan berbanding terbalik dengan r^2 . Hal ini dapat diperoleh berdasarkan hukum kekekalan energi: jika daya yang keluar dari sumber bunyi adalah P , maka intensitas I_1 yang melalui bola yang berjari r_1 dengan luas penampang $4\pi r_1^2$ adalah

$$I_1 = \frac{P}{4\pi r_1^2}.$$

Dengan cara yang sama, intensitas I_2 yang melalui bola yang berjari r_2 dengan luas penampang $4\pi r_2^2$ adalah

$$I_2 = \frac{P}{4\pi r_2^2}.$$

Secara umum, jika sumber bunyi berbentuk titik mengeluarkan bunyi dengan daya P , maka besarnya intensitas I pada jarak r dari sumber bunyi itu adalah

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}. \quad (5.20)$$

Jika tidak ada energi yang hilang di antara kedua bola yang berjari r_1 dan r_2 , maka daya P harus sama. Oleh karena itu,

$$4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2$$

atau

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (5.21)$$

Mengingat telinga manusia peka terhadap jangkauan intensitas yang sangat lebar, maka intensitas bunyi sering digunakan skala logaritmik. Taraf intensitas bunyi, dengan simbol S , didefinisikan sebagai

$$S = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (5.22)$$

dengan $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ disebut intensitas ambang, yaitu ambang pendengaran manusia pada frekuensi 1.000 Hz. Satuan taraf intensitas bunyi adalah decibel, disingkat dB ($1 \text{ dB} = 0,1 \text{ bell}$).

Gelombang bunyi dengan intensitas $I = I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ memiliki taraf intensitas $S = 0$. Sebaliknya, gelombang bunyi dengan intensitas $I = 1 \text{ W/m}^2$ memiliki taraf intensitas $S = 120 \text{ dB}$.

Contoh Soal 5.5 :

Taraf intensitas bunyi pesawat jet yang terbang pada ketinggian 20 m adalah 140 dB. Berapakah taraf intensitasnya pada ketinggian 200 m?

Jawaban :

Intensitas I_1 pada ketinggian $r_1 = 20 \text{ m}$ dapat dihitung dengan

$$S = 10 \log \frac{I}{I_0},$$

$$140 = 10 \log \frac{I_1}{10^{-12} \text{ W/m}^2},$$

$$I_1 = 100 \text{ W/m}^2.$$

Intensitas I_2 pada ketinggian $r_2 = 200 \text{ m}$ dapat dihitung dengan

$$I_2 = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 I_1 = \left(\frac{20 \text{ m}}{200 \text{ m}} \right)^2 (100 \text{ W/m}^2) = 1 \text{ W/m}^2.$$

Dengan demikian, taraf intensitas bunyi pada ketinggian $r_2 = 200 \text{ m}$ adalah

$$S = 10 \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \log \frac{1 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 120 \text{ dB}.$$

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang instensitas bunyi !
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh dan latihan tentang instensitas bunyi !

RANGKUMAN

1. Intensitas gelombang, dengan simbol I , didefinisikan sebagai energi rata-rata yang dipindahkan oleh gelombang per satuan waktu per satuan luas. Jadi, intensitas merupakan daya rata-rata per satuan luas.

2. Untuk gelombang bunyi, perubahan tekanan $p(x,t)$ dinyatakan dengan

$$p(x,t)v_y(x,t) = (BkA \cos(\tilde{S}t - kx))(SA \cos(\tilde{S}t - kx)) = B\tilde{S}kA^2 \cos^2(\tilde{S}t - kx).$$

3. Intensitas I sebanding dengan kuadrat amplitudo pergeseran A . Dengan mengingat amplitudo tekanan $p_{\text{maks}} = BkA$ dan $v = \tilde{S}/k$, maka

$$I = \frac{vp_{\text{maks}}^2}{B}.$$

4. Sebagai alternatif, intensitas dapat dinyatakan dalam bentuk

$$I = \frac{p_{\text{maks}}^2}{2\rho v} = \frac{p_{\text{maks}}^2}{2\sqrt{\rho B}}.$$

5. Jika tidak ada energi yang hilang di antara kedua bola yang berjari r_1 dan r_2 , maka daya P harus sama. Oleh karena itu,

$$4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2$$

atau

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}.$$

6. Mengingat telinga manusia peka terhadap jangkauan intensitas yang sangat lebar, maka intensitas bunyi sering digunakan skala logaritmik. Taraf intensitas bunyi, dengan simbol S , didefinisikan sebagai

$$S = 10 \log \frac{I}{I_0},$$

EVALUASI FORMATIF 4

1. Jelaskan defenisi intensitas !
2. Jelaskan hubungan besar intensitas terhadap jarak !
3. Jelaskan bagaimana menentukan taraf intensitas bunyi !
4. Suara paling lemah yang masih dapat ditangkap oleh telinga manusia pada frekuensi 3.000 Hz bersesuaian dengan intensitas bunyi 10^{-12} W/m^2 (ambang pendengaran). Sebaliknya, suara paling keras yang masih dalam batas toleransi pendengaran manusia bersesuaian dengan intensitas bunyi 10 W/m^2 (ambang rasa sakit). Jika massa jenis udara $\rho = 1,20 \text{ kg/m}^3$ dan laju gelombang bunyi 344 m/s , berapakah (a) amplitudo tekanan dan (b) amplitudo pergeseran yang bersesuaian dengan batas-batas intensitas ini?
5. Taraf intensitas bunyi pesawat jet yang terbang pada ketinggian 10 m adalah 160 dB. Berapakah taraf intensitasnya pada ketinggian 400 m?

Lembar Kerja Praktek 4

RANGKUMAN MODUL

1. Bunyi adalah gelombang longitudinal yang merambat dalam suatu medium.
2. Bunyi dapat merambat dalam zat padat, zat cair, dan gas.
3. Telinga manusia peka terhadap gelombang bunyi dengan jangkauan frekuensi antara 20 Hz – 20.000 Hz. Jangkauan ini dikenal sebagai jangkauan suara yang dapat didengar (*audible range*).
4. Gelombang bunyi yang frekuensinya di atas 20.000 Hz disebut gelombang ultrasonik. Anjing dan kelelawar adalah hewan yang dapat mendengar bunyi ultrasonik.
5. Gelombang bunyi yang frekuensinya di bawah 20 Hz disebut gelombang infrasonik. Sumber-sumber gelombang infrasonik adalah gempa bumi, gunung meletus, halilintar, dan gelombang-gelombang yang dihasilkan oleh getaran mesin yang sangat kuat
6. Gelombang bunyi sinusoidal yang merambat ke arah sumbu x positif. Gelombang ini dapat dinyatakan dengan persamaan

$$y(x, t) = A \sin(\tilde{S}t - kx).$$

7. Untuk gelombang bunyi sinusoidal di udara, tekanannya berubah-ubah dapat di atas atau di bawah tekanan atmosfer p_a .
8. Ketika gelombang bunyi memasuki telinga, ada perbedaan tekanan pada kedua sisi gendang telinga sehingga gendang telinga bergetar.
9. Dawai terdapat pada alat musik gitar, piano, dan biola. Bila dawai gitar dipetik, pada dawai akan terjadi gelombang. Gelombang ini dipantulkan pada kedua ujungnya yang tidak bergerak, sehingga diperoleh gelombang berdiri. Selanjutnya, gelombang berdiri pada dawai ini akan menghasilkan gelombang bunyi di udara dengan frekuensi tertentu.
10. Untuk dawai yang kedua ujungnya diikat pada penopang, gelombang berdiri yang dihasilkan harus memiliki titik simpul pada kedua ujungnya.
11. Untuk dawai yang panjangnya L berlaku

$$L = n \frac{\lambda}{2},$$

12. Nilai panjang gelombang yang dapat terjadi sebagai λ_n , adalah

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}.$$

13. Frekuensi f berbanding terbalik dengan panjang dawai L . Hal ini ditunjukkan pada piano atau biola di mana bagian bass (memiliki frekuensi rendah) memiliki dawai yang lebih panjang daripada bagian trebel (memiliki frekuensi tinggi).

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}.$$

14. Gelombang berdiri longitudinal dapat menghasilkan bunyi pada alat musik tiup. Salah satu contoh alat musik tiup yang paling sederhana adalah pipa organa. Ketika pipa organa ditiup, getaran bibir peniup membantu membangun getaran kolom udara dalam pipa. Udara dalam pipa bergetar dalam bentuk gelombang berdiri longitudinal.
15. Ada dua jenis pipa organa, yaitu pipa organa terbuka dan pipa organa tertutup.
16. Pipa organa yang terbuka pada kedua ujungnya dinamakan pipa organa terbuka. Frekuensi nada harmonik pipa organa terbuka memenuhi persamaan

$$17. f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2L/n} = n \frac{v}{2L} = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

18. Pipa organa tertutup adalah pipa organa yang salah satu ujungnya tertutup. Frekuensi-frekuensi harmonik pipa organa tertutup diperoleh berdasarkan rumus gelombang $f_n = v/\lambda_n$, yaitu

$$f_n = n \frac{v}{4L} = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

19. Intensitas gelombang, dengan simbol I , didefinisikan sebagai energi rata-rata yang dipindahkan oleh gelombang per satuan waktu per satuan luas. Jadi, intensitas merupakan daya rata-rata per satuan luas.

20. Untuk gelombang bunyi, perubahan tekanan $p(x, t)$ dinyatakan dengan

$$p(x, t)v_y(x, t) = (BkA \cos(\tilde{S}t - kx))(A \cos(\tilde{S}t - kx)) = B\tilde{S}kA^2 \cos^2(\tilde{S}t - kx).$$

21. Intensitas I sebanding dengan kuadrat amplitudo pergeseran A . Dengan mengingat amplitudo tekanan $p_{\text{maks}} = BkA$ dan $v = \tilde{S}/k$, maka

$$I = \frac{vP_{\text{maks}}^2}{B}$$

22. Sebagai alternatif, intensitas dapat dinyatakan dalam bentuk

$$I = \frac{P_{\text{maks}}^2}{2 \dots v} = \frac{P_{\text{maks}}^2}{2 \sqrt{\dots B}}$$

23. Jika tidak ada energi yang hilang di antara kedua bola yang berjari r_1 dan r_2 , maka daya P harus sama. Oleh karena itu,

$$4fr_1^2 I_1 = 4fr_2^2 I_2$$

atau

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

24. Mengingat telinga manusia peka terhadap jangkauan intensitas yang sangat lebar, maka intensitas bunyi sering digunakan skala logaritmik. Taraf intensitas bunyi, dengan simbol S , didefinisikan sebagai

$$S = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

DAFTAR PUSTAKA

- Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing
- Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I
- Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.

Modul 6:

Pemantulan

PENDAHULUAN

sekarang kita fokus pada gelombang elektromagnetik yang paling akrab dengan kita, yaitu cahaya. Kita akan mempelajari sifat cahaya seperti pemantulan cahaya dan aplikasi pemantulan cahaya.

Kegiatan Pembelajaran 1: Pemantulan Gelombang

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

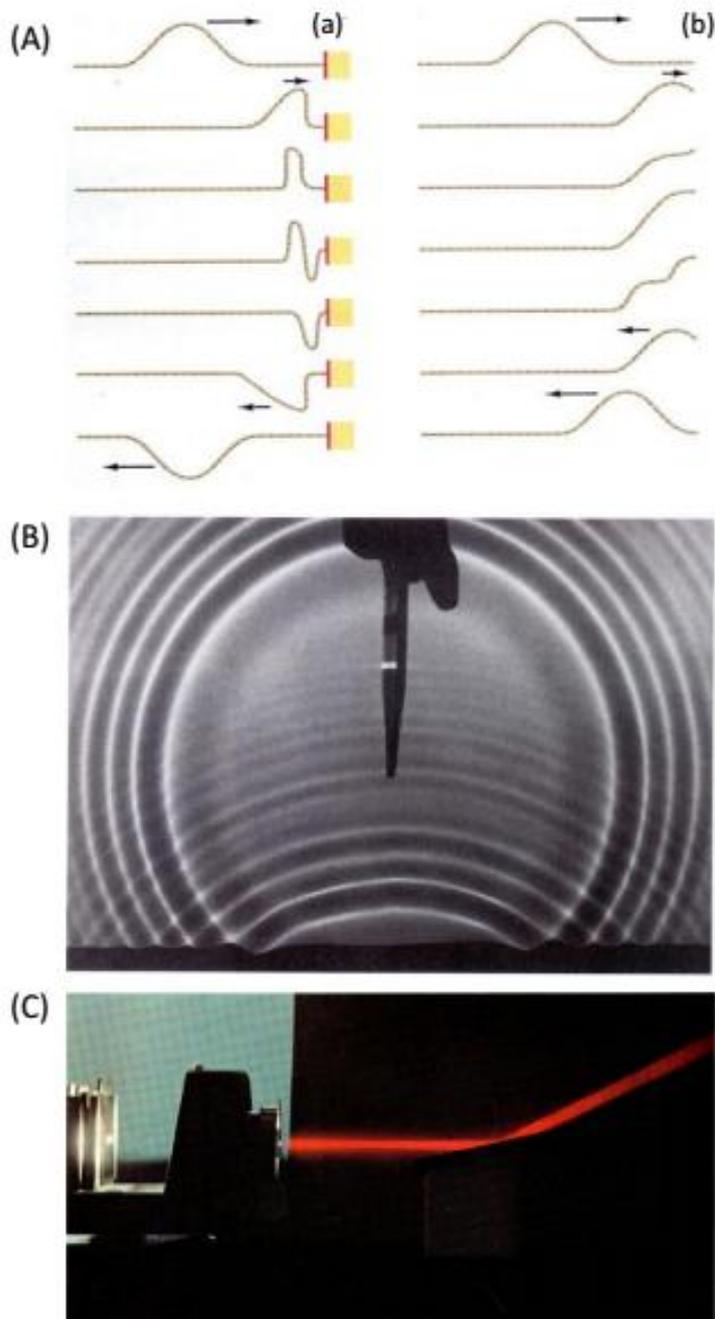
1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai pemantulan gelombang
2. Mahasiswa memiliki pemahaman akan contoh dan aplikasi pemantulan gelombang dalam kehidupan sehari-hari.

URAIAN MATERI

Kita mulai dengan mempelajari fenomena pemantulan. Pemantulan adalah pembelokan arah rambat gelombang karena mengenai bidang batas medium yang berbeda. Gelombang pantul adalah gelombang yang berada pada medium yang sama dengan gelombang datang. Pada gelombang tali, pemantulan terjadi pada ujung tali, baik ujung tersebut diikatkan pada penyangga yang tetap atau dibiarkan bebas (**Gambar 6.1(A)**). Medium yang berada di seberang ujung tali adalah medium yang berbeda (penyangga atau udara). Ketika gelombang sampai ke ujung tali gelombang tersebut mengalami pemantulan dan merambat dalam arah berlawanan.

Gelombang air yang sedang merambat mengalami pemantulan ketika mengenai dinding penghalang (**Gambar 6.1(B)**). Gelombang cahaya yang datang dari udara dan mengenai permukaan kaca, sebagian akan masuk ke dalam kaca dan sebagian mengalami pemantulan

(Gambar 6.1(C)). Gelombang cahaya yang jatuh pada cermin hampir semuanya mengalami pemantulan. Pertanyaan selanjutnya adalah bagaimanakah hubungan antara arah gelombang datar dan gelombang pantul?



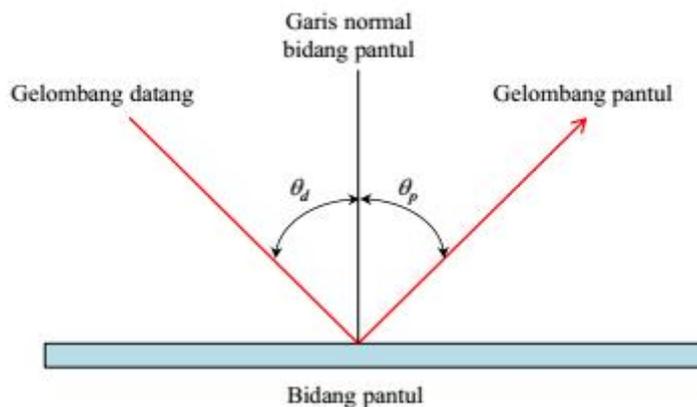
Gambar 6.1 Contoh peristiwa pemantulan gelombang. (A) Pemantulan gelombang tali: (a) pemantulan pada ujung tetap dan (b) pemantulan pada ujung bebas. (B) pemantulan gelombang permukaan air oleh dinding. (C) pemantulan gelombang cahaya oleh logam.

Sebelum menentukan hubungan tersebut, mari kita terlebih dahulu berkenalan dengan definisi besaran-besaran yang terkait dengan peristiwa pemantulan. Besaran-besaran tersebut diilustrasikan pada **Gambar 9.2**:

- a) Arah normal, yaitu adalah arah yang tegak lurus bidang pantul.
- b) Sudut datang (θ_d) adalah sudut yang dibentuk oleh arah sinar datang dan arah normal
- c) Sudut pantul (θ_p) adalah sudut yang dibentuk oleh arah sinar pantul dan arah normal

Hukum pemantulan menyatakan bahwa sudut datang persis sama dengan sudut pantul, atau

$$\theta_d = \theta_p \quad (6.1)$$



Gambar 6.2 Arah gelombang datang dan gelombang pantul

Pembuktian hukum pemantulan. Untuk membuktikan hukum pemantulan, mari kita perhatikan **Gambar 6.3** Gelombang yang dipantulkan berupa gelombang bidang.

- a) Pada saat t_1 (gambar atas), baru bagian bawah gelombang yang menyentuh bidang pantul. Bagian atas masih belum mencapai bidang pantul.
- b) Pada saat t_2 (gambar tengah), bagian atas gelombang telah menyentuh bidang pantul sedangkan bagian bawah sudah dipantulkan.
- c. Pada saat t_3 (gambar bawah), bagian atas dan bawah gelombang sudah meninggalkan bidang pantul dan menjadi gelombang pantul. Mari kita perhatikan gambar tengah. Perhatikan titik A, B, C, dan D. Waktu yang diperlukan gelombang merambat dari titik A ke titik D persis sama dengan waktu yang diperlukan gelombang merambat dari titik B ke titik C. Dengan demikian kita dapatkan panjang $AD = BC$. Segitiga ADC dan ABC adalah segitiga siku-siku dengan sudut siku-siku berada di titik D dan titik B. Dengan demikian

$$\text{sudut BAC} = \text{sudut datang } \theta_d$$

$$\text{sudut DCA} = \text{sudut pantul } \theta_p$$

Dengan aturan trigonometri sederhana maka

$$BC = AC \sin \theta_d$$

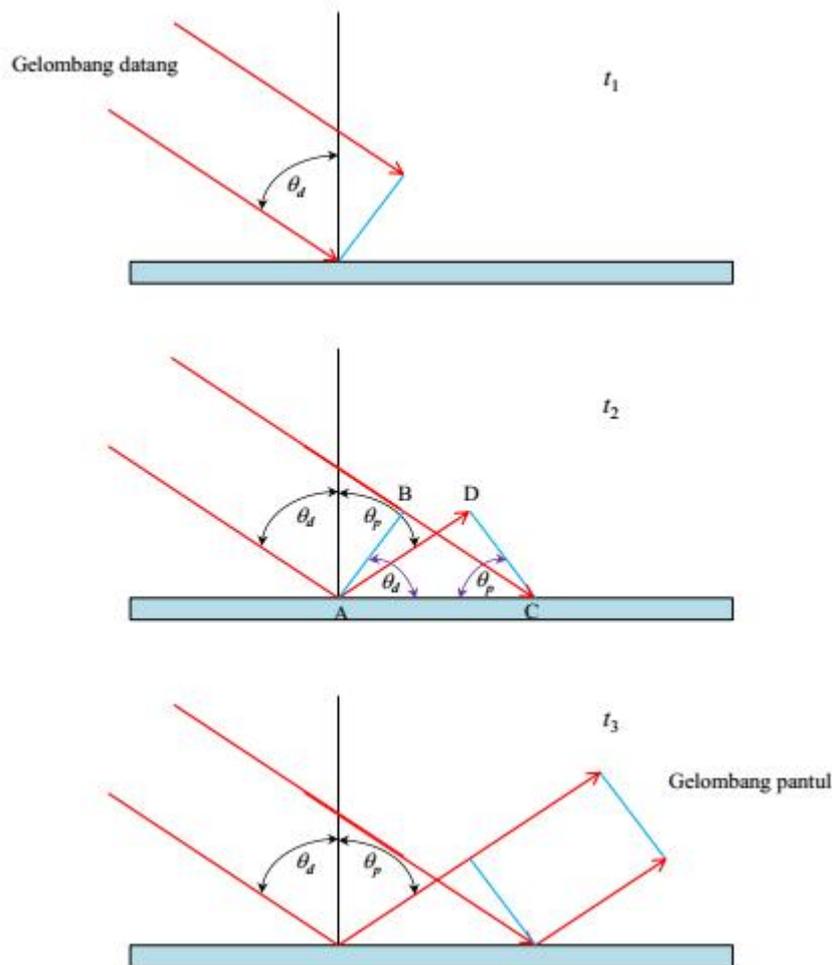
$$AD = AC \sin \theta_p$$

Selanjutnya, karena $AD = BC$ maka

$$\sin \theta_d = \sin \theta_p,$$

yang menghasilkan

$$\theta_d = \theta_p$$



Gambar 6.3 Pembuktian hukum pemantulan. Dari atas ke bawah adalah perambatan gelombang saat t_1 , t_2 , dan t_3 . Pada saat t_1 , berkas cahaya ujung bawah tepat mencapai bidang batas sedangkan berkas cahaya ujung atas belum mencapai bidang batas. Pada saat t_2 , berkas cahaya ujung atas baru sampai bidang batas sedangkan berkas cahaya ujung bawah sudah dipantulkan. Pada saat t_3 kedua berkas cahaya sudah dipantulkan. Pembuktian dilakukan hanya dengan menggunakan aturan geometri sederhana.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang pemantulan gelombang
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang pembuktian hukum pemantulan
3. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh pemantulan yang biasa kamu amati dalam kehidupan sehari-hari

RANGKUMAN

1. Pemantulan adalah pembelokan arah rambat gelombang karena mengenai bidang batas medium yang berbeda.
2. Gelombang pantul adalah gelombang yang berada pada medium yang sama dengan gelombang datang.
3. Pada gelombang tali, pemantulan terjadi pada ujung tali, baik ujung tersebut diikatkan pada penyangga yang tetap atau dibiarkan bebas .
4. Pada gelombang air yang sedang merambat mengalami pemantulan ketika mengenai dinding penghalang.
5. Gelombang cahaya yang datang dari udara dan mengenai permukaan kaca, sebagian akan masuk ke dalam kaca dan sebagian mengalami pemantulan
6. Gelombang cahaya yang jatuh pada cermin hampir semuanya mengalami pemantulan.

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskan pengertian pemantulan !
2. Jelaskanlah pengertian gelombang pantul !
3. Jelaskan peristiwa pemantulan p-ada gelombang tali, gelombang air dan gelombang cahaya, lengkapi dengan gambar !
4. Jelaskan bagaimanakah hubungan antara arah gelombang datar dan gelombang pantul?
5. Jelaskan hukum pemantulan, lengkapi beserta gambar !
6. Jelaskan penurunan rumus hukum pemantulan !

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Pemantulan Cahaya

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai pemantulan cahaya oleh permukaan bola
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai pemantulan cahaya oleh permukaan parabola

URAIAN MATERI

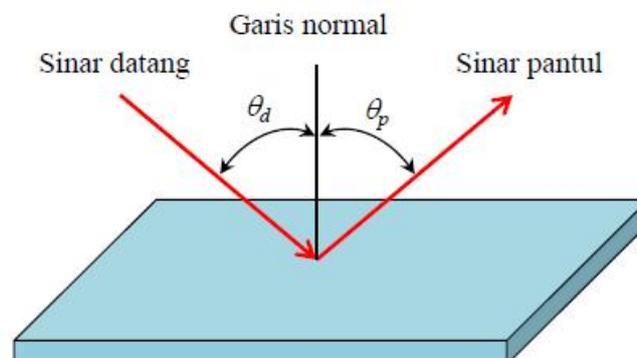
Pemantulan cahaya adalah perubahan arah rambat cahaya ke arah sisi (medium) asalnya, setelah menumbuk antar muka dua medium. Cahaya yang jatuh pada bidang pembatas dua material mengalami pemantulan dengan sudut pantul (diukur dari arah tegak lurus bidang pembatas medium) persis sama dengan sudut datang. Hukum pemantulan cahaya adalah sudut datang sama dengan sudut pantul cahaya, jika dituliskan dengan persamaan matematisnya maka akan menjadi :

$$\theta_d = \theta_p$$

Dengan :

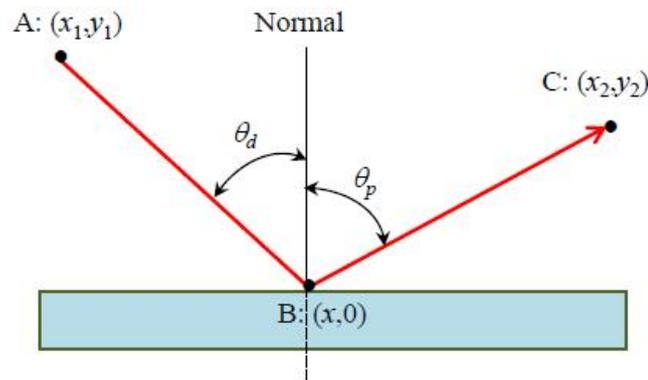
θ_d : adalah sudut datang cahaya

θ_p : adalah sudut pantul cahaya



Gambar 6.4 Peristiwa pemantulan cahaya

Mengapa cahaya selalu dipantulkan dengan sudut datang dan sudut pantul yang sama? Jawabannya diberikan oleh prinsip Fermat. Cahaya akan mengambil lintasan dengan waktu tempuh terpendek. Jika cahaya merambat dari satu titik ke titik lain melewati bidang pantul maka sudut lintasan yang diambil adalah lintasan yang menghasilkan waktu tempuh terpendek dan lintasan tersebut menghasilkan sudut datang dan sudut pantul yang sama.



Gambar 6.5 Pembuktian hukum Pemantulan cahaya

Cahaya datang dari titik A dengan koordinat (x_1, y_1) menuju titik C dengan koordinat (x_2, y_2) . Cahaya dipantulkan di titik B dengan koordinat $(x, 0)$ kita anggap bidang pantul berada di sumbu x sehingga koordinat y dari bidang tersebut adalah nol. Maka jarak tempuh dari BA dan BC masing-masing

$$AB = \sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2}$$

$$BC = \sqrt{(x - x_2)^2 + y_2^2}$$

Laju cahaya dari A ke B dan dari B ke C sama, v , sehingga waktu yang diperlukan cahaya untuk merambat dari titik A ke titik C menjadi

$$t = \frac{AB + BC}{v}$$

$$t = \frac{1}{v} \left(\sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2} + \sqrt{(x - x_2)^2 + y_2^2} \right)$$

Tampak juga disini bahwa waktu tempuh cahaya merupakan fungsi x (koordinat titik B). Waktu tempuh akan minimum jika turunan waktu tempuh tersebut terhadap koordinat x nol, atau

$$\frac{dt}{dx} = 0$$

Dengan metode diferensi bisa di dapatkan persamaan

$$\frac{x - x_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2}} + \frac{x - x_2}{\sqrt{(x - x_2)^2 + y_2^2}} \quad (6.2)$$

Dengan melihat persamaan 5.1 maka $x - x_1$ bertanda positif sehingga

$$\frac{x - x_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2}} = \sin \theta_d \quad (6.3)$$

dan $(x - x_2)$ bertanda negatif sehingga

$$\frac{x - x_2}{\sqrt{(x - x_2)^2 + y_2^2}} = -\sin \theta_p \quad (6.4)$$

Substitusi persamaan (6.3) dan persamaan (6.4) ke dalam persamaan (6.2) maka diperoleh

$$\sin \theta_d - \sin \theta_p = 0$$

atau $\theta_d = \theta_p$ yang tidak lain merupakan hukum tentang sudut pada peristiwa pemantulan.

Pemantulan cahaya tidak hanya terjadi ketika cahaya jatuh pada medium yang tidak ditembus cahaya.

Ketika jatuh pada medium tembus cahaya pun sebagian cahaya dipantulkan. Ketika cahaya datang dari udara ke kaca maka sebagian dibiaskan dan sebagian dipantulkan. Begitu pun sebaliknya. Bahkan, ketika cahaya datang dari kaca atau air menuju udara maka bisa terjadi seluruh cahaya dipantulkan jika sudut datang melebihi sudut kritis (pemantulan internal total). Intinya adalah, cahaya akan mengalami pemantulan jika mengenai bidang batas dua medium yang berbeda. Beberapa fenomena pemantulan yang terjadi adalah:

- a. Jika material kedua tidak dapat ditembus cahaya, maka cahaya hanya mengalami pemantulan.

- b. Jika material kedua dapat ditembus cahaya, maka cahaya mengalami pemantulan dan pembiasan.
- c. Jika material kedua memiliki indeks bias lebih kecil dari material pertama dan cahaya datang dengan sudut lebih besar daripada sudut kritis maka cahaya dipantulkan seluruhnya.

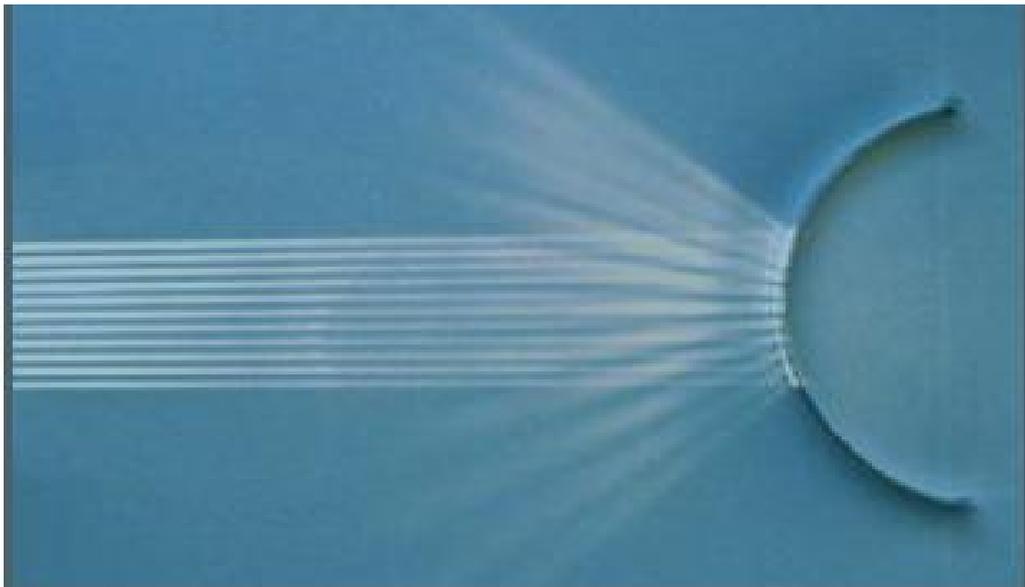
Sifat pemantulan cahaya yang memenuhi sudut datang sama dengan sudut pantul memunculkan fenomena pemantulan yang berbeda jika permukaan pembias rata dan tidak rata :

- a. Jika berkas cahaya sejajar jatuh pada bidang pembatas yang rata maka berkas cahaya yang dipantulkan juga sejajar.
- b. Jika berkas cahaya sejajar jatuh pada bidang pembatas yang tidak sejajar (tidak teratur) maka berkas cahaya pantul memiliki arah yang tidak teratur pula.

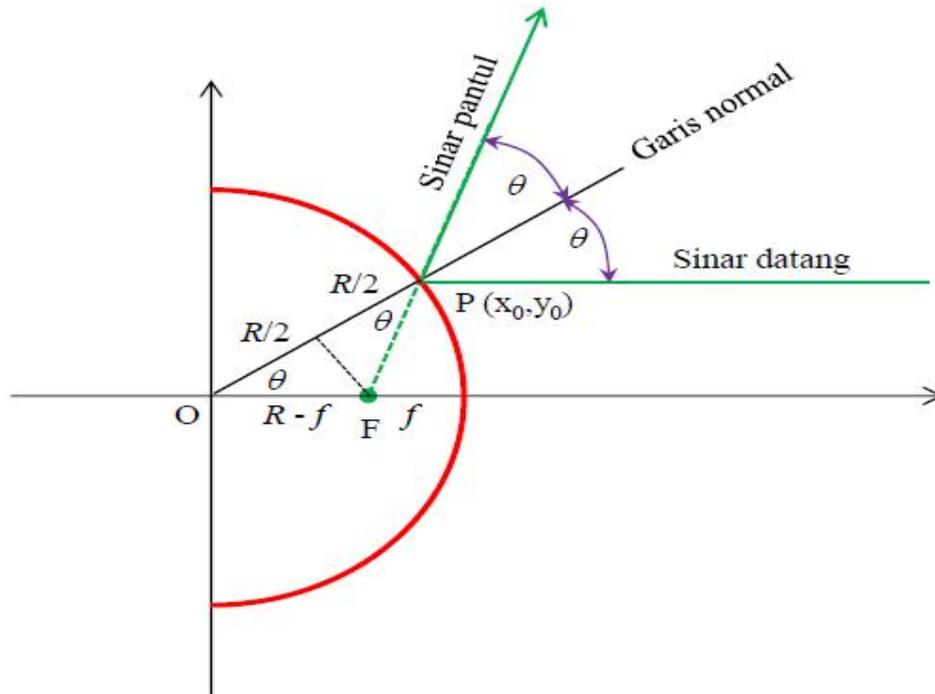
Pemantulan Cahaya Oleh Permukaan Bola

Pemantulan Cahaya oleh Permukaan Cembung

Sekarang kita akan tinjau kasus khusus, yaitu pemantulan cahaya oleh permukaan melengkung. Kita akan bahas sifat pemantulan cahaya oleh permukaan bola pada sisi cembung. Berikut ini adalah contoh pemantulan oleh cermin berbentuk permukaan bola.



Gambar 6.6 Bentuk berkas cahaya yang dipantulkan oleh permukaan bola (Fact monster)



Gambar 6.7 Pemantulan cahaya oleh permukaan cembung sebuah bola yang berjari-jari R .

Permukaan cembung sebuah bola berjari-jari R . Kita hanya melihat persoalan dua dimensi, yaitu pada bidang xy sehingga persamaan bidang pantul adalah $x^2 + y^2 = R$. Cahaya datang dan mengenai permukaan cermin pada koordinat (x_0, y_0) . Sudut yang dibentuk cahaya datang garis normal adalah θ .

Sudut ini persis sama dengan sudut antara vektor jari-jari yang mengarah ke koordinat (x_0, y_0) dengan sumbu datar. Cahaya pantul juga membentuk sudut yang sama terhadap garis normal. Yang akan kita cari adalah perpotongan garis yang sejajar sinar pantul dengan sumbu datar. Perpanjangan garis pantul ke arah belakang akan memotong sumbu x pada titik F . Titik F memiliki jarak f dari tepi terluar lensa atau memiliki jarak $R - f$ dari pusat koordinat. Dengan memperhatikan secara seksama segitiga OFP tampak bahwa segitiga tersebut merupakan segitiga sama sisi. Jika dilihat dari persamaan matematisnya maka akan menjadi :

$$\frac{R}{2}(R - f)\cos \theta$$

Dari persamaan di atas diperoleh jarak dari tepi terluar lensa ke perpotongan garis sinar pantul adalah

$$f = R \left(1 - \frac{1}{2 \cos \theta} \right) \tag{6.5}$$

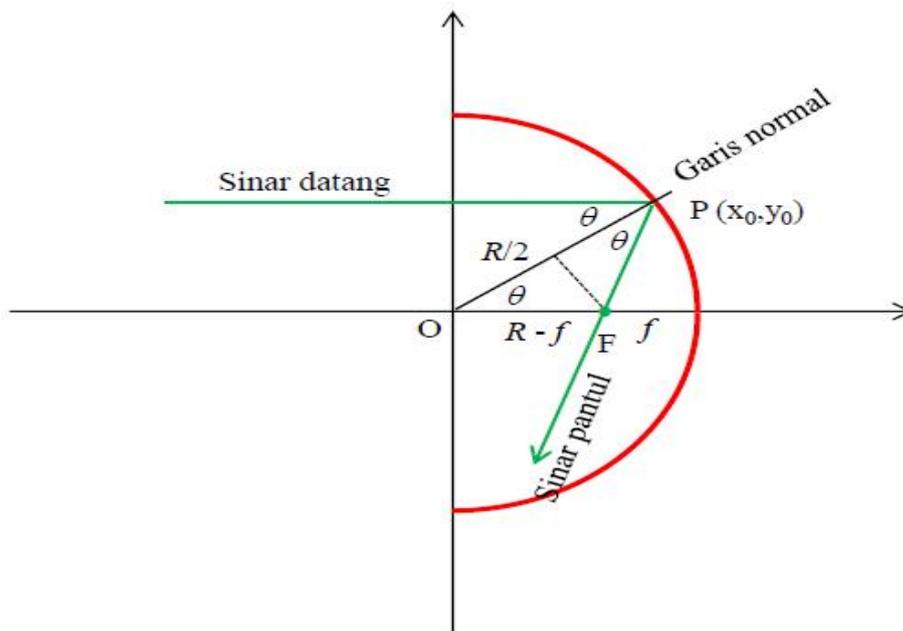
Jarak f inilah yang kita sebut sebagai panjang fokus cermin dengan irisan permukaan bola. Tampak jelas di sini bahwa panjang fokus sangat bergantung pada sudut yang dibentuk sinar datang. Untuk kasus khusus di mana sudut datang cahaya sangat kecil maka kita dapat melakukan aproksimasi $\cos \theta \approx 1$ sehingga panjang fokus menjadi $f \approx \frac{R}{2}$

Pemantulan Cahaya oleh Permukaan Cekung

Pada pemantulan cahaya oleh permukaan cekung sinar datang sejajar sumbu datar dan dipantulkan melalui titik F . Jarak titik F ke pusat cermin adalah f , atau jarak titik F dari pusat koordinat adalah $R - f$.

Segitiga OPF adalah segitiga sama kaki. Kaki yang sama panjang adalah kaki OF dan FP. Dengan aturan geometri sederhana maka akan didapatkan persamaan matematis

$$\frac{R}{2} = (R - f) \cos \theta$$



Gambar 6.8 Pemantulan cahaya oleh permukaan cembung sebuah bola yang berjari-jari R

Akhirnya diperoleh jarak dari tepi terluar lensa ke perpotongan garis sinar pantul adalah:

$$f = R \left(1 - \frac{1}{2 \cos \theta} \right)$$

Rumus ini persis sama dengan rumus yang berlaku untuk pemantulan pada bagian cembung cermin. Juga tampak jelas di sini bahwa panjang fokus sangat bergantung pada sudut yang dibentuk sinar datang. Ketika sudut datang cahaya terhadap garis normal sangat kecil maka kita kembali mendapatkan aproksimasi.

$$f \approx R/2$$

Pemantulan Cahaya Oleh Permukaan Parabola

Dari pembahasan pemantulan cahaya oleh permukaan bola jelas bahwa cahaya yang dipantulkan pada posisi yang berbeda di permukaan cermin irisan permukaan bola tidak mengumpul di satu titik. Titik jatuh cahaya pada sumbu cermin bergantung pada sudut datang cahaya. Makin besar sudut datang cahaya maka cahaya akan jatuh makin dekat ke lensa. Hanya ketika sudut datang mendekati nol baru cahaya jatuh pada titik yang berjarak sekitar setengah jari-jari cermin. Akibatnya, cahaya yang dikumpulkan oleh cermin berupa irisan permukaan bola tidak pernah benar-benar berupa satu titik. Cahaya yang dikumpulkan akan berupa lingkaran dengan jari-jari tertentu.

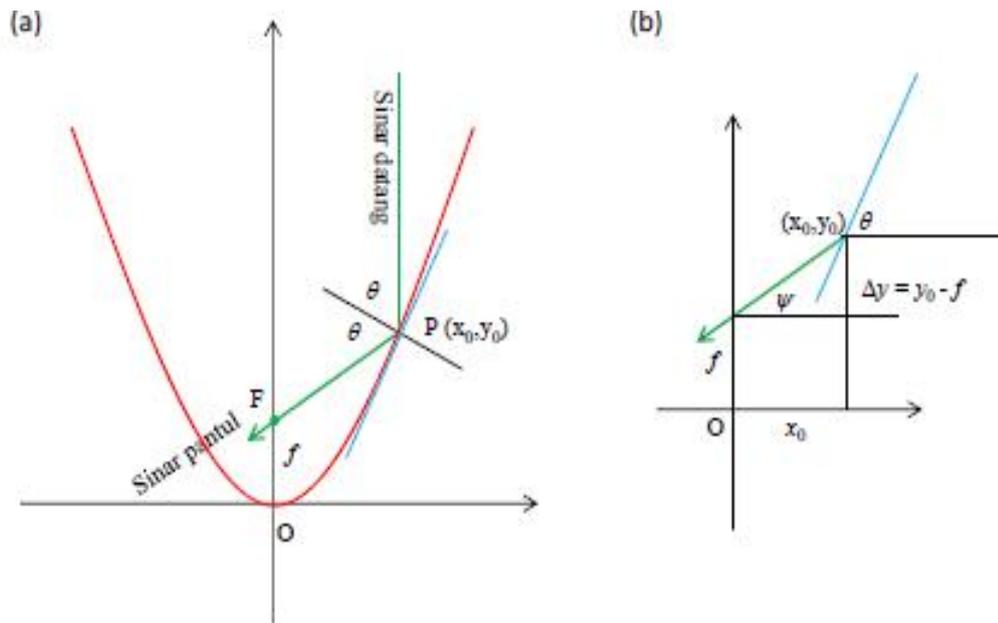
Cahaya datang sejajar sumbu parabola. Bentuk umum persamaan parabola yang simetri terhadap sumbu y dan titik puncak berada pada pusat koordinat adalah :

$$y = ax^2 \tag{6.6}$$

Dengan :

a adalah konstanta

Cahaya datang dan mengenai permukaan parabola di titik P yang memiliki koordinat (x_0, y_0) . Sudut datang adalah θ



Gambar 6.9 (a). Pemantulan cahaya oleh permukaan cermin parabola (b). garis-garis dan variabel-variabel disekitar titik pemantulan.

Cahaya datang membentuk sudut $\frac{f}{2}$ terhadap sumbu datar. Cahaya pantul membentuk sudut 2θ terhadap cahaya datang. Dengan demikian cahaya pantul membentuk sudut $\frac{f}{2} + 2\theta$ terhadap sumbu datar. Ini berarti, garis yang berimpit dengan cahaya pantul membentuk sudut terhadap sumbu datar sebesar

$$\begin{aligned} \epsilon &= \left(\frac{f}{2} + 2\theta \right) - f \\ &= 2\theta - \frac{f}{2} \end{aligned}$$

Dari gambar 5.6 dengan hanya melihat segitiga disekitar lokasi pemantulan. Dari segitiga tersebut kita dapatkan persamaan berikut ini:

$$\frac{\Delta y}{x_0} = \tan \epsilon \quad \text{atau} \quad \frac{y_0 f}{x_0} = \tan 2\theta - \frac{f}{2} \tag{6.7}$$

dimana

$$\begin{aligned}
f &= y_0 - x_0 \tan\left(2_\theta - \frac{f}{2}\right) \\
&= y_0 - x_0 \frac{\sin\left(2_\theta - \frac{f}{2}\right)}{\cos\left(2_\theta - \frac{f}{2}\right)} \\
&= y_0 - x_0 \frac{-\cos(2_\theta)}{\sin(2_\theta)} \\
&= y_0 + x_0 \frac{\cos^2 \theta - \sin^2 \theta}{2 \sin \theta \cos \theta} \\
&= y_0 + x_0 \frac{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta}}{2 \frac{\sin \theta}{\cos \theta}} \\
&= y_0 + x_0 \frac{1 - \tan^2 \theta}{2 \tan \theta} \tag{6.8}
\end{aligned}$$

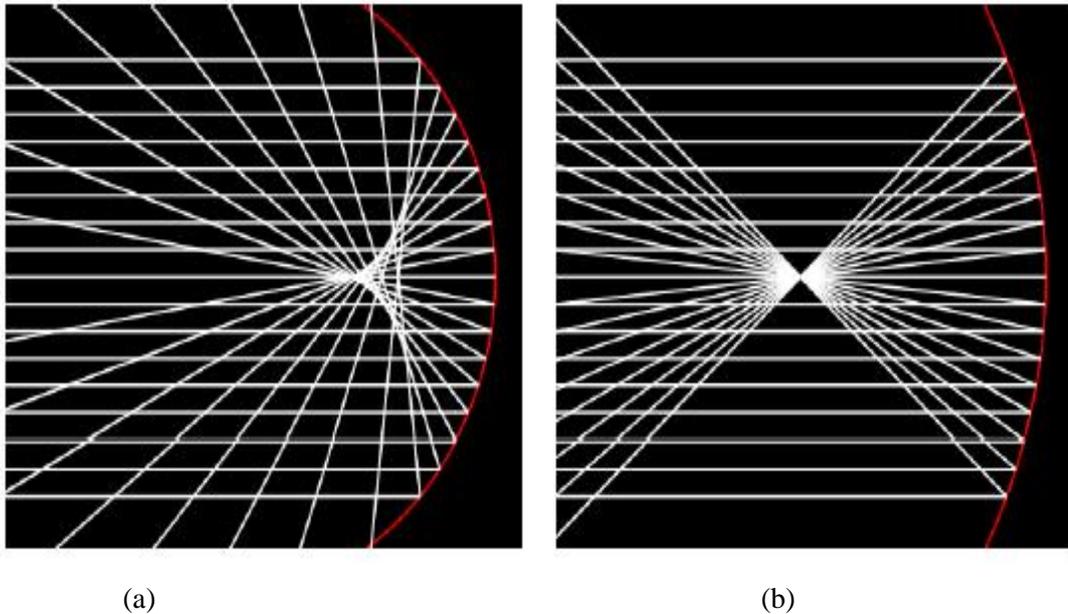
Kita dapat buktikan dengan mudah bahwa sudut sinar datang persis sama dengan sudut kemiringan kurva pada koordinat x_0, y_0 kita ingat bahwa kemiringan kurva sama dengan diferensial dari kurva tersebut. Jadi kita dapat menulis persamaannya menjadi:

$$\begin{aligned}
\tan \theta &= \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_0} \\
&= 2ax_0
\end{aligned}$$

Jika persamaan di atas di substitusikan ke dalam persamaan (5.7) maka diperoleh :

$$\begin{aligned}
f &= y_0 + x_0 \frac{1 - (2ax_0)^2}{2(2ax_0)} \\
&= y_0 + \frac{1}{4a} (1 - 4a^2 x_0^2) \\
&= y_0 + \frac{1}{4a} - ax_0^2 \\
&= \frac{1}{4a} \tag{6.9}
\end{aligned}$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa jarak jatuh cahaya terhadap pusat parabola selalu konstan, sama sekali tidak bergantung pada lokasi cahaya jatuh pada cermin. Ini berarti cermin parabola akan memantulkan semua cahaya sejajar yang jatuh padanya tetap di satu titik, tidak peduli pada koordinat mana cahaya itu jatuh. Itu penyebabnya mengapa antena yang banyak digunakan sekarang berupa antena parabola. Antena parabola akan memfokuskan cahaya tetap di satu titik. Di titik tersebut ditempatkan detektor sehingga ditangkap sinyal dengan intensitas maksimal.



Gambar 6.10 (a). Cermin permukaan bola (b). Cermin permukaan parabola

Pada gambar (6.10) bagian (a) jelas terlihat bahwa cahaya yang dipantulkan cermin permukaan bola tidak tepat mengumpul disatu titik. Namun, pada bagian (b) jelas terlihat bahwa cahaya yang dipantulkan permukaan parabola dikumpulkan tepat disatu titik. Pada cermin permukaan bola, cahaya yang datang sejajar sumbu cermin tidak persis dipantulkan disatu titik. Sebaliknya, pada cermin irisan parabola, semua berkas cahaya yang sejajar sumbu tepat dipantulkan disatu titik yang tajam.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang pemantulan cahaya pada pemantulan permukaan bola dan parabola
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh pemantulan cahaya pada pemantulan permukaan bola dan parabola

RANGKUMAN

1. Pemantulan cahaya adalah perubahan arah rambat cahaya ke arah sisi (medium) asalnya, setelah menumbuk antar muka dua medium.
2. Hukum pemantulan cahaya adalah sudut datang sama dengan sudut pantul cahaya, jika dituliskan dengan persamaan matematisnya maka akan menjadi :

$$i = r$$

3. Sifat pemantulan cahaya yang memenuhi sudut datang sama dengan sudut pantul memunculkan fenomena pemantulan yang berbeda jika permukaan pembias rata dan tidak rata :
 - a. Jika berkas cahaya sejajar jatuh pada bidang pembatas yang rata maka berkas cahaya yang dipantulkan juga sejajar.
 - b. Jika berkas cahaya sejajar jatuh pada bidang pembatas yang tidak sejajar (tidak teratur) maka berkas cahaya pantul memiliki arah yang tidak teratur pula.
4. Titik jatuh cahaya pada sumbu cermin bergantung pada sudut datang cahaya.
5. Bentuk umum persamaan parabola yang simetri terhadap sumbu y dan titik puncak berada pada pusat koordinat adalah :

$$y = ax^2$$

6. Pemantulan adalah pembelokan arah rambat gelombang karena mengenai bidang batas medium yang berbeda.

EVALUASI FORMATIF 2

1. Turunkanlah persamaan pemantulan cahaya!
2. Jelaskanlah hal apa saja yang mempengaruhi pemantulan cahaya?
3. Jika titik Titik jatuh cahaya pada sumbu cermin bergantung pada ?
4. Tuliskan bentuk umum persamaan parabola simetri ?

Lembar Kerja Praktek 2

Kegiatan Pembelajaran 3: Aplikasi Pemantulan Cahaya

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami tentang aplikasi pemantulan cahaya pada permukaan bola dan permukaan parabola
2. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami tentang aplikasi pemantulan cahaya pada permukaan parabola dan *hybrid solar lighting (HSL)*

URAIAN MATERI

Aplikasi Pemantulan Cahaya pada Permukaan Bola

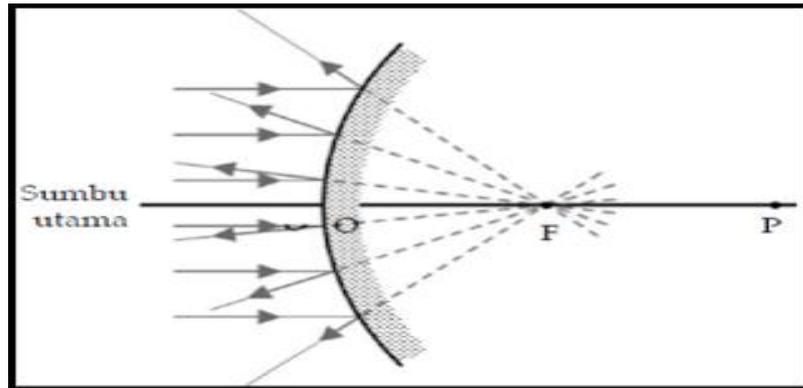
Salah satu penerapan pemantulan cahaya pada permukaan bola adalah cermin pada tikungan jalan seperti pada gambar berikut:



Gambar 6.11 Cermin pada tikungan jalan

Untuk kasus pemantulan cahaya pada permukaan bola dengan contoh cermin cembung yang berada di tikungan jalan merupakan perpaduan antara pemantulan cahaya pada permukaan bola dengan pemantulan cermin cembung. Karena berbentuk cembung, maka cermin cembung dapat memantulkan cahaya melengkung ke luar. Sifat lain yang dimiliki oleh

cermin cembung adalah dapat menyebarkan cahaya (*divergen*) karena berkas cahaya yang datang mengenai permukaan cermin cembung sehingga cahaya tersebut akan dipantulkan kembali dari satu titik dan menyebar. Dengan demikian, jika terdapat berkas-berkas cahaya sejajar mengenai permukaan cermin cembung, maka berkas-berkas cahaya pantulnya akan disebarkan dari satu titik yang sama. Hal ini yang menyebabkan area pandangan pada cermin di tikungan jalan lebih luas dibandingkan dengan cermin datar. Hal tersebut dapat diperjelas melalui gambar berikut :

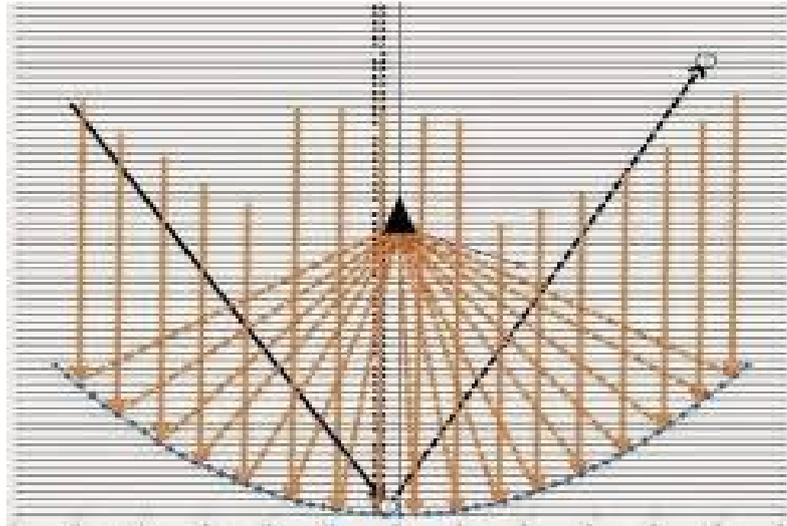


Gambar 6.12 Hasil pemantulan cahaya pada cermin ditikungan jalan

Aplikasi Pemantulan Cahaya pada Permukaan Parabola pada Antena Parabola

Prinsip pemantulan pada *dish* parabola sebenarnya mengikuti hukum pemantulan cahaya pada permukaan parabola dimana titik pantul pada permukaan yang berpusat pada satu titik digunakan untuk memperkuat penangkapan sinyal. Dimana prinsip-prinsip tersebut adalah:

1. Sinar sejajar dengan sumbu utama akan dipantulkan melalui titik fokus
2. Sinar melalui titik fokus akan dipantulkan sejajar dengan sumbu utama
3. Sinar yang melalui jari-jari kelengkungan cermin, akan dipantulkan kembali melalui jari-jari kelengkungan cermin tersebut



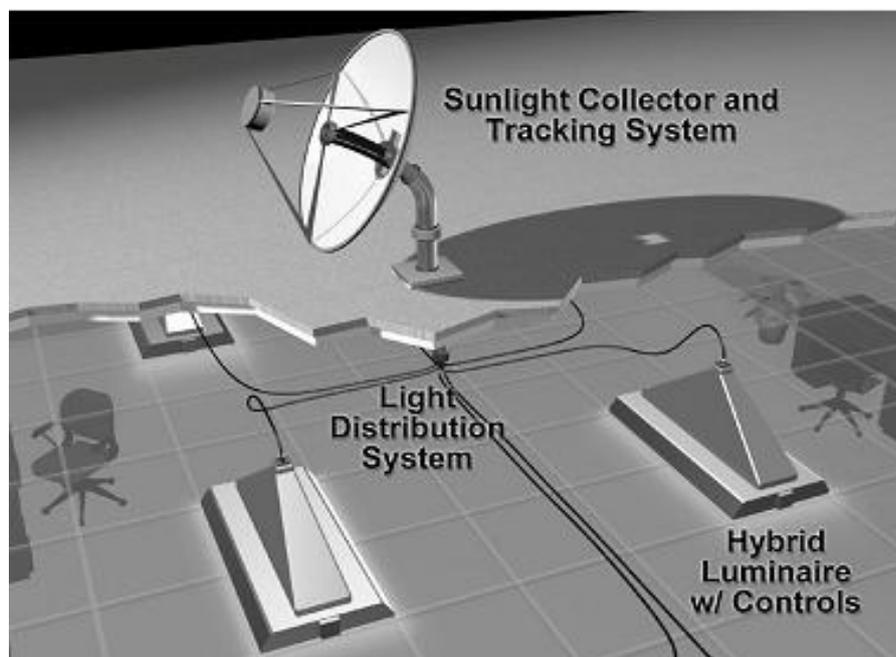
Gambar 6.13 Aplikasi pemantulan cahaya pada permukaan parabola pada antenna parabola

Karena satelit terletak pada jarak sekitar 3.600 km di atas permukaan laut, hal sangat jauh bila dibandingkan dengan titik fokus antenna parabola. Oleh sebab itu, dapat dianggap bahwa “jarak satelit ke cermin lebih besar daripada jarak titik fokus ke cermin”, sehingga jarak satelit dapat dianggap terletak pada jarak tak terhingga. Hal ini menyebabkan sinyal dari satelit dapat digambarkan sebagai sinar. Benda yang memancarkan sinar dengan gelombang yang berfrekuensi tinggi pada jarak yang tak terhingga akan sejajar dengan sumbu utama *dish* (sebagai cermin cekung) sehingga berdasarkan prinsip cermin cekung bahwa sinar sejajar dengan sumbu utama akan dipantulkan ke titik fokus. Dengan demikian, sinyal-sinyal satelit akan terkumpul dititik fokus bila sumbu *dish* parabola sejajar dengan sinyal satelit yang datang.

Apliakasi pemantulan cahaya pada permukaan parabola pada *Hybrid Solar Lighting (HSL)*

Hybrid Solar Lighting (HSL) adalah salah satu teknologi yang memanfaatkan energi surya dan berbentuk parabola sebagai pengumpul energi matahari yang dibantu oleh *fiber* optik sebagai pembawa energi matahari tersebut. Pengumpulan cahaya matahari dengan parabola membutuhkan cahaya yang datang sejajar sumbu utama untuk mendapatkan efisiensi yang maksimum. Sehingga dibutuhkan kolektor surya yang mengikuti arah pergerakan matahari sehingga didapatkan sumber yang sejajar dengan sumbu utama. Untuk itu, kolektor surya dilengkapi dengan teknologi *solar tracker* sebagai penggerak mengikuti pergerakan matahari. Permasalahan yang didapatkan dari penggunaan *solar tracker* adalah mahalnya teknologi ini

dan peluang kerusakan sistem yang cukup besar karena menggunakan komponen elektronik, yang pada akhirnya akan berpengaruh pada efisiensi pengumpulan sinar matahari.



Gambar 6.14 *Hybrid Solar Lighting (HSL)*

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang aplikasi pemantulan cahaya pada permukaan bola dan permukaan cahaya parabola
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang aplikasi pemantulan cahaya pada permukaan parabola dan *hybrid solar lighting (HSL)*

RANGKUMAN

1. Salah satu penerapan pemantulan cahaya pada permukaan bola adalah cermin pada tikungan jalan.
2. Sifat lain yang dimiliki oleh cermin cembung adalah dapat menyebarkan cahaya (*divergen*) karena berkas cahaya yang datang mengenai permukaan cermin cembung sehingga cahaya tersebut akan dipantulkan kembali dari satu titik dan menyebar..
3. Prinsip pemantulan pada *dish* parabola sebenarnya mengikuti hukum pemantulan cahaya pada permukaan parabola dimana titik pantul pada permukaan yang berpusat pada satu titik digunakan untuk memperkuat penangkapan sinyal. Dimana prinsip-prinsip tersebut adalah:
 - a. Sinar sejajar dengan sumbu utama akan dipantulkan melalui titik fokus
 - b. Sinar melalui titik fokus akan dipantulkan sejajar dengan sumbu utama
 - c. Sinar yang melalui jari-jari kelengkungan cermin, akan dipantulkan kembali melalui jari-jari kelengkungan cermin tersebut
4. *Hybrid Solar Lighting (HSL)* adalah salah satu teknologi yang memanfaatkan energi surya dan berbentuk parabola sebagai pengumpul energi matahari yang dibantu oleh *fiber optik* sebagai pembawa energi matahari tersebut.
5. Permasalahan yang didapatkan dari penggunaan *solar tracker* adalah mahalnya teknologi ini dan peluang kerusakan sistem yang cukup besar karena menggunakan komponen elektronik, yang pada akhirnya akan berpengaruh pada efisiensi pengumpulan sinar matahari.

EVALUASI FORMATIF 3

1. Jelaskan penerapan pemantulan cahaya pada permukaan bola !
2. Jelaskan sifat lain yang dimiliki oleh cermin cembung !
3. Tuliskan Prinsip pemantulan pada *dish* parabola !
4. Jelaskan mengenai *Hybrid Solar Lighting* (HSL) !

Lembar Kerja Praktek 3

Praktikum Pemantulan

Percobaan Sifat Pemantulan Gelombang

Tujuan: Untuk mengamati sifat pemantulan gelombang

Alat dan bahan

- Slinky
- Benang
- Kerikil

Langkah kerja

- ✓ Menjatuhkan kerikil diatas permukaan airyang ada didalam bak cucian. Kemudian mengamati gelombang yang terjadi dipermukaan air. Bagaimana bentuk gelombangnya, kemudian memperhatikan sisi bak yang dikenai gelombang. Dan menentukan apakah ada gelombang yang dipantulkan.
- ✓ Mengikat ujung slinki pada tiang dimana ujung tidak boleh bergeser.
- ✓ Kemudian memegang dan menggetarkan ujung slinki yang lain cukup satu kali sampai membentuk $\frac{1}{2}$ gelombang. Setelah itu mengamati perambatan $\frac{1}{2}$ gelombang sampai gelombang hilang. Apakah gelombang dapat dipantulkan? Mengamati bagaimana fase gelombang pantul dan gelombang asalnya.
- ✓ Mengikat ujung slinki yang sebelumnya terikat pada tiang dengan benang yang panjangnya 150cm sehingga ujung slinki dapat bergerak bebas.
- ✓ Memegang ujung slinki yang lain dengan tangan, kemudian menggetarkannya sampai membentuk setengah gelombang. Setelah itu mengamati perambatan setengah panjajng gelombang, bagaimana fase gelombang pantul dibanding gelombang asalnya.

Lembar Kerja Praktikum

RANGKUMAN MODUL

1. Pemantulan adalah pembelokan arah rambat gelombang karena mengenai bidang batas medium yang berbeda.
2. Gelombang pantul adalah gelombang yang berada pada medium yang sama dengan gelombang datang.
3. Pada gelombang tali, pemantulan terjadi pada ujung tali, baik ujung tersebut diikatkan pada penyangga yang tetap atau dibiarkan bebas .
4. Pada gelombang air yang sedang merambat mengalami pemantulan ketika mengenai dinding penghalang.
5. Gelombang cahaya yang datang dari udara dan mengenai permukaan kaca, sebagian akan masuk ke dalam kaca dan sebagian mengalami pemantulan
6. Gelombang cahaya yang jatuh pada cermin hampir semuanya mengalami pemantulan.
7. Pemantulan cahaya adalah perubahan arah rambat cahaya ke arah sisi (medium) asalnya, setelah menumbuk antar muka dua medium.
8. Hukum pemantulan cahaya adalah sudut datang sama dengan sudut pantul cahaya, jika dituliskan dengan persamaan matematisnya maka akan menjadi :

$$i = r$$

9. Sifat pemantulan cahaya yang memenuhi sudut datang sama dengan sudut pantul memunculkan fenomena pemantulan yang berbeda jika permukaan pembias rata dan tidak rata :
 - c. Jika berkas cahaya sejajar jatuh pada bidang pembatas yang rata maka berkas cahaya yang dipantulkan juga sejajar.
 - d. Jika berkas cahaya sejajar jatuh pada bidang pembatas yang tidak sejajar (tidak teratur) maka berkas cahaya pantul memiliki arah yang tidak teratur pula.
10. Titik jatuh cahaya pada sumbu cermin bergantung pada sudut datang cahaya.
11. Bentuk umum persamaan parabola yang simetri terhadap sumbu y dan titik puncak berada pada pusat koordinat adalah :

$$y = ax^2$$

12. Pemantulan adalah pembelokan arah rambat gelombang karena mengenai bidang batas medium yang berbeda.

13. Salah satu penerapan pemantulan cahaya pada permukaan bola adalah cermin pada tikungan jalan.
14. Sifat lain yang dimiliki oleh cermin cembung adalah dapat menyebarkan cahaya (*divergen*) karena berkas cahaya yang datang mengenai permukaan cermin cembung sehingga cahaya tersebut akan dipantulkan kembali dari satu titik dan menyebar..
15. Prinsip pemantulan pada *dish* parabola sebenarnya mengikuti hukum pemantulan cahaya pada permukaan parabola dimana titik pantul pada permukaan yang berpusat pada satu titik digunakan untuk memperkuat penangkapan sinyal. Dimana prinsip-prinsip tersebut adalah:
 - a. Sinar sejajar dengan sumbu utama akan dipantulkan melalui titik fokus
 - b. Sinar melalui titik fokus akan dipantulkan sejajar dengan sumbu utama
 - c. Sinar yang melalui jari-jari kelengkungan cermin, akan dipantulkan kembali melalui jari-jari kelengkungan cermin tersebut
16. *Hybrid Solar Lighting* (HSL) adalah salah satu teknologi yang memanfaatkan energi surya dan berbentuk parabola sebagai pengumpul energi matahari yang dibantu oleh *fiber* optik sebagai pembawa energi matahari tersebut.
17. Permasalahan yang didapatkan dari penggunaan *solar tracker* adalah mahalnya teknologi ini dan peluang kerusakan sistem yang cukup besar karena menggunakan komponen elektronik, yang pada akhirnya akan berpengaruh pada efisiensi pengumpulan sinar matahari.

DAFTAR PUSTAKA

- Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing
- Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I
- Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.
- <http://3.bp.blogspot.com/Reflektor+Bundar.jpg>
- <https://www.google.com/pemantulan-cahaya-pada-cermin-cembung>
- <https://belfis.wordpress.com/cermin-cekung-parabola>

Modul 7: Pembiasan

Pendahuluan

Cahaya adalah energi berbentuk gelombang elektromagnetik. Cahaya sebagai gelombang elektromagnetik dan transversal mempunyai salah satu sifat yaitu dapat mengalami pembiasan (*refraksi*). Dimana pembiasan ini terjadi yang kasat mata berdasarkan pengertian dan sifat cahaya, maka perubahan arah cahaya pada saat cahaya melewati bidang batas antara 2 medium berbeda. Jika sudut datang tidak 0 hal ini disebut pembiasan. Banyak contoh yang sering kita jumpai dalam kehidupan sehari-hari seperti pensil yang dimasukkan dalam gelas yang berisi air, pasti yang melihat akan memandang pensil itu bengkok (gambar 7.1) Hal ini dikarenakan adanya indeks bias antara udara dan air. Apabila sudut datang (i) dan sudut bias (r) diketahui, maka indeks bias dari suatu bahan dapat dicari dengan menggunakan prinsip hukum Snellius, yang menyatakan bahwa perbandingan sinus sudut datang dan sinus sudut bias adalah konstan.



(Sumber : <http://www.gurupendidikan.co.id/>)

Gambar 7.1 Pensil terlihat patah ketika dimasukkan ke dalam gelas berisi air

Kegiatan Pembelajaran 1: Pembiasan Gelombang

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai pembiasan gelombang
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan penggunaan aplikasi dalam kehidupan sehari-hari tentang pembiasan gelombang

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

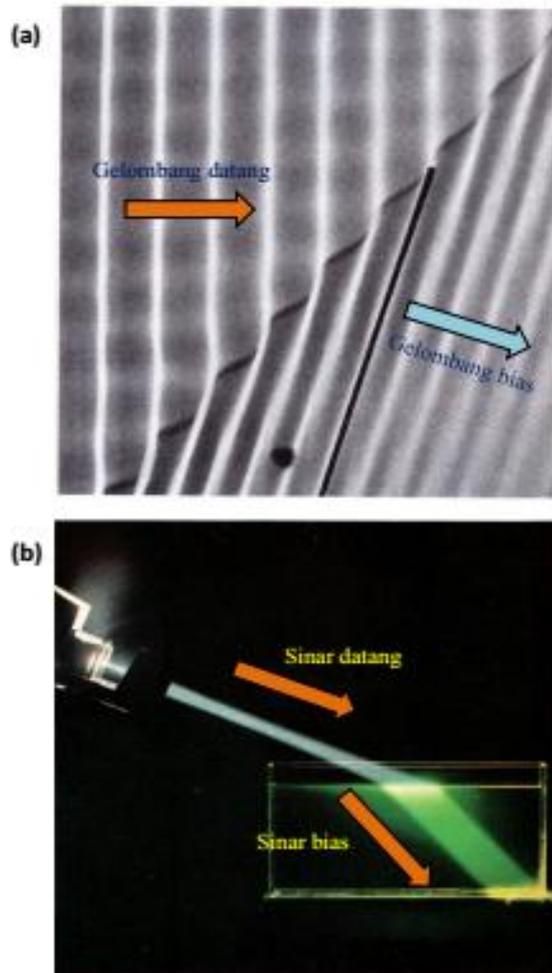
Pembiasan terjadi karena gelombang memasuki medium yang berbeda dan kecepatan gelombang pada medium awal dan medium yang dimasuki berbeda. Jika arah datang gelombang tidak sejajar dengan garis normal maka pembiasan menyebabkan pembelokan arah rambat gelombang. Gelombang air yang melalui daerah yang lebih dangkal mengalami perubahan kecepatan, sehingga terjadi pembiasan. Cahaya yang bergerak dari udara ke air mengalami pembiasan karena perbedaan kecepatan cahaya di udara dan di air. **Gambar 7.2** adalah contoh pembiasan gelombang air dan gelombang cahaya. Pertanyaan berikutnya adalah bagaimana hubungan antara arah gelombang datang dan arah gelombang bias? Misalkan kecepatan gelombang pada medium pertama adalah v_1 dan kecepatan gelombang pada medium kedua adalah v_2 . Misalkan gelombang datang dari medium pertama ke medium kedua, maka hubungan antara sudut datang dan sudut bias memenuhi :

$$\frac{\sin \theta_d}{v_1} = \frac{\sin \theta_b}{v_2} \quad (7.1)$$

dengan

θ_d sudut datang dan

θ_b sudut bias.



Gambar 7.2 (a) Pembiasan gelombang permukaan air dan (b) gelombang cahaya

Pembuktian hukum pembiasan. Kita dapat membuktikan persamaan di atas seperti saat membuktikan hukum pemantulan. Mari kita perhatikan **Gambar. 7.2** Gelombang yang dibiaskan berupa gelombang bidang.

- a) Pada saat t_1 (gambar atas), baru bagian bawah gelombang yang menyentuh bidang batas. Bagian atas masih belum mencapai bidang batas.
- b) Pada saat t_2 (gambar tengah), bagian atas gelombang telah menyentuh bidang pantul sedangkan bagian bawah sudah dibiaskan.
- c) Pada saat t_3 (gambar bawah), bagian atas dan bawah gelombang sudah dibiaskan mengikuti bagian bawah. Mari kita perhatikan gambar tengah. Perhatikan titik A, B, C, dan D. Waktu yang diperlukan gelombang merambat dari titik A ke titik D persis sama dengan waktu yang diperlukan gelombang merambat dari titik B ke titik C. Jika selang waktu tersebut adalah Δt maka

$$AD = v_2 \Delta t$$

$$BC = v_1 \Delta t$$

Segitiga ADC dan ABC adalah segitiga siku-siku dengan sudut siku-siku berada di titik D dan titik B. Dengan demikian

$$BC = AC \sin \theta_d$$

$$AD = AC \sin \theta_b$$

Selanjutnya dengan menggunakan empat persamaan di atas maka kita dapat menulis

$$v_1 \Delta t = AC \sin \theta_d$$

$$v_2 \Delta t = AC \sin \theta_b$$

Jika dua persamaan terakhir dibagi maka diperoleh

$$\frac{v_1 \Delta t}{v_2 \Delta t} = \frac{AC \sin \theta_d}{AC \sin \theta_b}$$

Atau

$$\frac{\sin \theta_d}{v_1} = \frac{\sin \theta_b}{v_2}$$

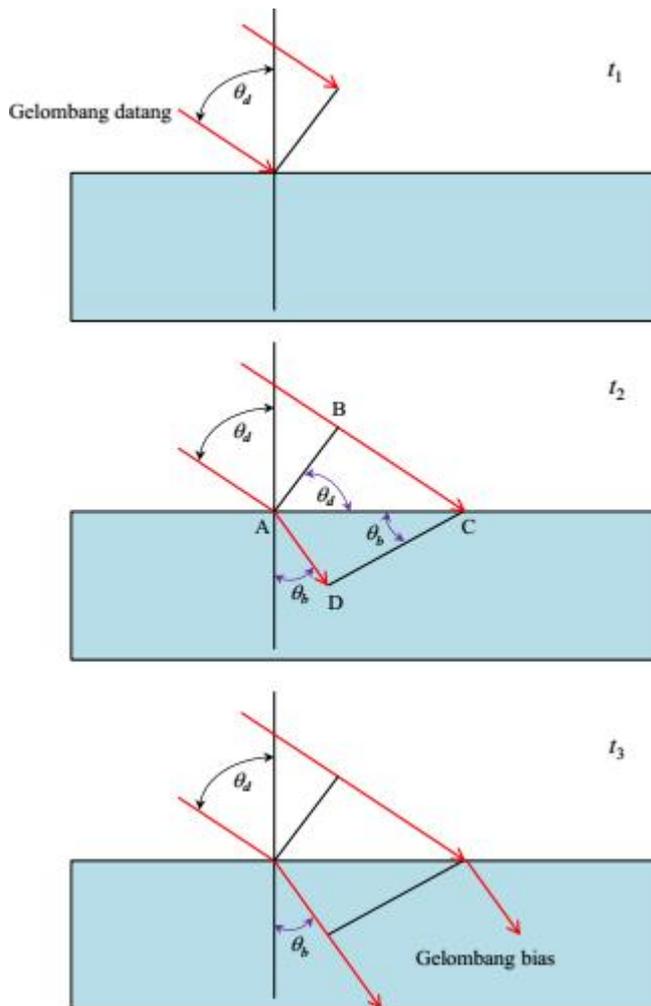
Khusus untuk **gelombang cahaya**, kecepatan rambat gelombang dalam medium dengan indeks bias n adalah $v = c / n$. Dengan demikian, hukum pembiasan untuk gelombang cahaya dapat ditulis

$$\frac{\sin \theta_d}{c/n_1} = \frac{\sin \theta_b}{c/n_2}$$

atau

$$n_1 \sin \theta_d = n_2 \sin \theta_b \quad (7.2)$$

yang merupakan ungkapan **hukum Snell**. Jelas dari hukum ini bahwa jika gelombang masuk ke medium dengan indeks bias lebih besar maka arah rambat mendekati garis normal, dan sebaliknya.



Gambar 7.3 Pembuktian hukum pembiasan. Dari atas ke bawah adalah perambatan gelombang saat t_1 , t_2 , dan t_3 .

Pembiasan gelombang oleh medium tidak homogen. Pembahasan tentang pembiasan gelombang umumnya difokuskan pada dua medium. Jadi, pembiasan hanya terjadi satu kali. Persoalan ini dapat kita kembangkan untuk mempelajari pembiasan terus menerus pada medium bersusun yang memiliki indeks bias berbeda. Dan lebih lanjut lagi kita dapat kembangkan pembiasan pada medium dengan indeks bias berubah secara kontinu. Yang pada akhirnya akan menentukan lintasan yang ditempuh cahaya.

Contoh Soal 7.1:

Di dalam suatu tabung dimasukkan air dan alcohol (air di bawah dan alcohol di atas). Modulus volum masing-masing zat cair tersebut adalah $2,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ untuk air dan $1,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ untuk alcohol. Massa jenis air dan alcohol masing-masing 10^3 kg/m^3 dan $7,9 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$. Gelombang udara merambat dalam alcohol dan mengenai bidang batas antara alcohol dan air dengan sudut datang 45° . Tentukan

a) Kecepatan rambat gelombang dalam air dan dalam alcohol

b) Sudut bias gelombang ketika memasuki air.

Jawaban :

a) Kecepatan rambat gelombang bunyi dalam fluida memenuhi

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Kecepatan rambat bunyi dalam alcohol

$$v_1 = \sqrt{\frac{1,01 \times 10^9}{7,9 \times 10^2}} = 1125 \text{ m/s}$$

Kecepatan rambat bunyi dalam air

$$v_2 = \sqrt{\frac{2,0 \times 10^9}{10^3}} = 1414 \text{ m/s}$$

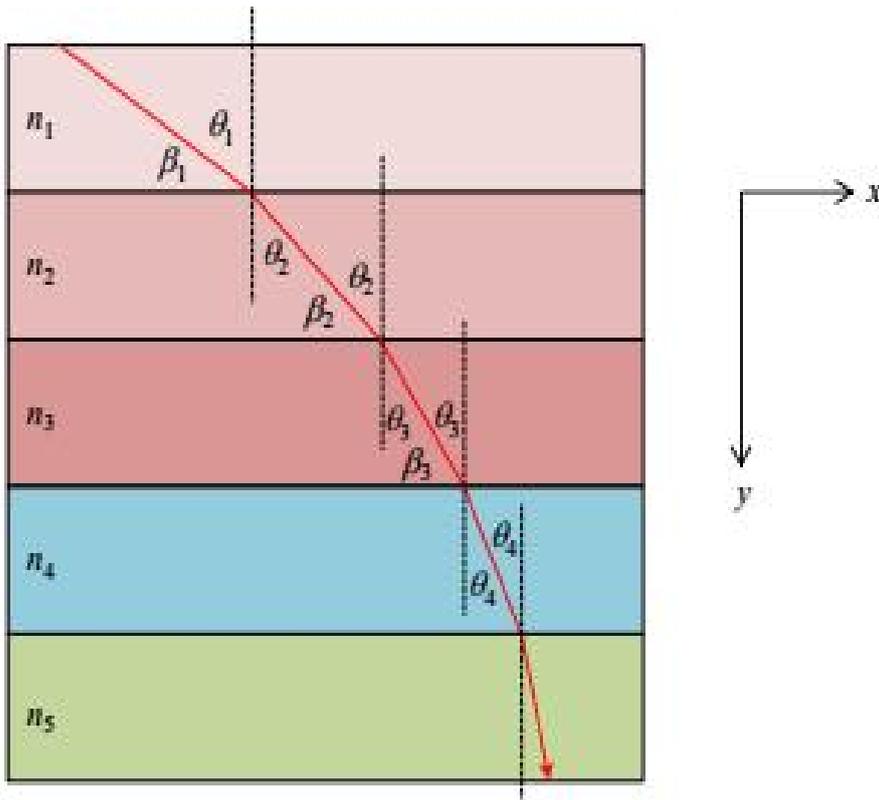
b) Diberikan sudut datang, $\theta_D = 45^\circ$

Dengan menggunakan hukum pemantulan :

$$\frac{\sin \theta_d}{v_1} = \frac{\sin \theta_b}{v_2} \text{ atau } \sin \theta_b = \frac{v_2}{v_1} \sin \theta_d = \frac{1414}{1125} \sin 45^\circ = 1,26 \times 0,71 = 0,895$$

Atau

$$\theta_b = 63,5^\circ$$



Gambar 7.4 Cahaya merambat dalam medium berlapis dengan indeks bias berbeda-beda.

Misalkan kita memiliki susunan medium seperti pada **Gambar 7.4** yang memiliki indeks bias dari atas ke bawah adalah n_1 , n_2 , n_3 , dan seterusnya. Cahaya datang dari medium pertama ke medium kedua dengan sudut datang θ_1 dan dibiaskan di medium kedua dengan sudut bias θ_2 . Dengan demikian berlaku hukum Snell $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$. Cahaya pada medium kedua masuk ke medium ketiga dengan sudut θ_2 dan dibiaskan dengan sudut θ_3 . Dengan hukum Snell maka diperoleh $n_2 \sin\theta_2 = n_3 \sin\theta_3$. Kemudian cahaya dari medium ketiga masuk ke medium keempat dengan sudut θ_3 dan dibiaskan dengan sudut θ_4 yang memenuhi hukum Snell $n_3 \sin\theta_3 = n_4 \sin\theta_4$. Begitu seterusnya sehingga kita dapat persamaan

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 = n_3 \sin\theta_3 = n_4 \sin\theta_4 = \text{konstan}$$

Tampak dari Gambar 7.4 bahwa $\theta + \beta = \pi/2$. Dengan demikian $\sin\theta_i = \sin(\pi/2 - \beta_i) = \cos\beta_i$. Oleh karena itu hukum Snell untuk semua pembiasan pada semua lapisan dapat juga dinyatakan dalam sudut β sebagai berikut

$$n_1 \cos \beta_1 = n_2 \cos \beta_2 = n_3 \cos \beta_3 = n_4 \cos \beta_4 = K = \text{konstan}$$

Selanjutnya kita misalkan medium mengalami perubahan indeks bias secara kontinu dalam arah vertikal. Contoh medium ini adalah atmosfer. Indeks bias medium pada ketinggian y dinyatakan dengan $n(y)$ dan sudut yang dibentuk oleh cahaya terhadap sumbu datar (sumbu x) adalah $\beta(y)$. Dengan menggunakan hukum Snell maka kita dapat menulis keterkaitan sudut dengan indeks bias sebagai

$$n(y)\cos\beta(y) = K = n(y_0)\cos\beta(y_0)$$

atau

$$\cos S(y) = \frac{K}{n(y)}$$

Gradien kurva lintasan cahaya memenuhi

$$\begin{aligned} \tan S &= \frac{\sin S}{\cos S} \\ &= \frac{\sqrt{1 - \cos^2 S}}{\cos S} \\ &= \frac{\sqrt{1 - (K/n(y))^2}}{K/n(y)} \\ &= \frac{\sqrt{n(y)^2 - (K)^2}}{K} \end{aligned}$$

Tetapi $\tan \beta = dy / dx$. Dengan demikian

$$\frac{dx}{dy} = \frac{\sqrt{n(y)^2 - (K)^2}}{K}$$

Atau

$$\frac{dx}{\sqrt{n(y)^2 - (K)^2}} = \frac{dy}{K}$$

Kita lakukan integral pada dua ruas persamaan di atas sehingga diperoleh

$$\int \frac{dx}{\sqrt{n(y)^2 - (K)^2}} = \int \frac{dy}{K}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{n(y)^2 - (K)^2}} = \frac{1}{K}(x - x_0)$$

yang dapat ditulis ulang menjadi

$$y = \frac{\sqrt{n_0^2 - K^2}}{K}x + (y_0 - x_0 / K)$$

Persamaan ini merupakan persamaan garis lurus ($y = ax + b$) sehingga cahaya merambat dalam lintasan garis lurus, seperti yang kita harapkan.

Neutrino lebih cepat dari cahaya. Ketika supernova 1987A dideteksi di bumi, neutrino yang dipancarkan supernova tersebut mencapai bumi 20 menit lebih cepat daripada cahaya meskipun keduanya tercipta pada saat yang bersamaan. Apakah pengamatan ini tidak bertentangan dengan konsep bahwa tidak ada materi yang dapat melebihi kecepatan cahaya? Pengamatan ini menunjukkan bahwa ruang antar bintang tidak benar-benar vakum tetapi masih mengandung materi walaupun dengan kerapatan sangat rendah. Akibatnya, ruang antar bintang memiliki indeks bias lebih besar daripada satu sehingga laju cahaya dalam ruang antar bintang lebih kecil daripada laju cahaya dalam ruang vakum. Neutrino adalah materi yang lajunya hampir mendekati laju cahaya dan sangat sulit dihambat oleh materi. Selama bergerak dalam ruang antar bintang (meskipun ruang tersebut terisi oleh materi) laju neutrino hampir tidak berubah. Laju materi yang tidak dapat melebihi cahaya maksudnya adalah laju cahaya dalam ruang hampa. Sedangkan dalam ruang antar bintang, laju cahaya bisa lebih kecil dari laju cahaya dalam ruang yang benar-benar hampa. Dengan demikian, bisa terjadi laju neutrino dalam ruang antar bintang lebih besar daripada laju cahaya. Itu sebabnya, neutrino dapat mencapai bumi lebih cepat daripada cahaya.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang pembiasan gelombang dan penurunan rumus pembiasan.
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh pembiasan dan bagaimana pembiasan dalam medium berlapis dengan indeks bias berbeda-beda.

RANGKUMAN

1. Pembiasan terjadi karena gelombang memasuki medium yang berbeda dan kecepatan gelombang pada medium awal dan medium yang dimasuki berbeda.
2. Jika arah datang gelombang tidak sejajar dengan garis normal maka pembiasan menyebabkan pembelokan arah rambat gelombang.
3. Gelombang air yang melalui daerah yang lebih dangkal mengalami perubahan kecepatan, sehingga terjadi pembiasan.
4. Misalkan gelombang datang dari medium pertama ke medium kedua, maka hubungan antara sudut datang dan sudut bias memenuhi :

$$\frac{\sin \theta_d}{v_1} = \frac{\sin \theta_b}{v_2}$$

5. Jika gelombang masuk ke medium dengan indeks bias lebih besar maka arah rambat mendekati garis normal, dan sebaliknya.
6. Cahaya merambat dalam lintasan garis lurus dari persamaan :

$$y = \frac{\sqrt{n_0^2 - K^2}}{K} x + (y_0 - x_0 / K)$$

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskan bagaimana proses terjadinya pembiasan !
2. Jelaskan pembuktian hukum snellius tentang pembiasan !
3. Jelaskan pembiasan pada lapisan atmosfer !
4. Jelaskan pembiasan dalam medium berlapis dengan indeks bias berbeda-beda !

5. Di dalam suatu tabung dimasukkan air dan alcohol (air di bawah dan alcohol di atas). Modulus volum masing-masing zat cair tersebut adalah $4,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ untuk air dan $2,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ untuk alcohol. Massa jenis air dan alcohol masing-masing 10^3 kg/m^3 dan $5,9 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$. Gelombang udara merambat dalam alcohol dan mengenai bidang batas antara alcohol dan air dengan sudut datang 60° . Tentukan
- Kecepatan rambat gelombang dalam air dan dalam alcohol
 - Sudut bias gelombang ketika memasuki air.

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Pembiasan Cahaya

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai sudut kritis untuk pembiasan.
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan penggunaan aplikasi dalam kehidupan sehari-hari tentang pembiasan.

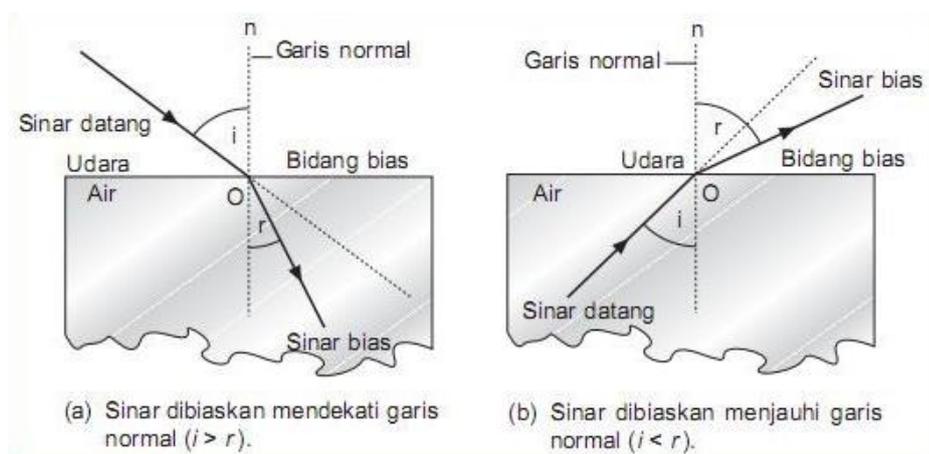
URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Adapun syarat-syarat agar terjadi pembiasan menurut hukum snellius adalah:

1. Cahaya melalui dua medium yang berbeda kerapatan optiknya
2. Cahaya datang tidak tegak lurus terhadap bidang batas (sudut datang lebih kecil dari 90°) karena jika cahaya tegak lurus terhadap bidang batas maka cahaya akan dipantulkan.

Ketika terjadi pembiasan, arah pembiasan cahaya dibedakan menjadi dua macam berdasarkan jenis medium yang dilewatinya yaitu :



(Sumber : Giancoli, 2001: 258)

Gambar 7.5 Skema pembiasan cahaya

1) Mendekati garis normal

Cahaya dibiaskan mendekati garis normal jika cahaya merambat dari medium yang kurang rapat ke medium yang lebih rapat, contohnya adalah ketika cahaya merambat dari udara ke dalam air

2) Menjauhi garis normal

Cahaya dibiaskan menjauhi garis normal jika cahaya merambat dari medium yang lebih rapat ke medium yang kurang rapat, contohnya adalah ketika cahaya merambat dari dalam air ke udara.

Pembiasan cahaya dapat terjadi dikarenakan perbedaan laju cahaya pada kedua medium. Laju cahaya pada medium yang rapat lebih kecil dibandingkan dengan laju cahaya pada medium yang kurang rapat. Menurut Christian Huygens (1629-1695) : “*Perbandingan laju cahaya dalam ruang hampa dengan laju cahaya dalam suatu zat dinamakan indeks bias*”

Indeks bias (*Refractive Index*) itu sendiri tidak pernah bernilai lebih dari 1 atau $n \leq 1$ yang secara matematis dapat dirumuskan :

$$n = \frac{c}{v} \quad (7.3)$$

dimana :

n : indeks bias

c : kecepatan cahaya ($3 \times 10^8 \cdot \frac{m}{s}$)

v : laju cahaya dalam zat

Berikut beberapa indeks bias (*Refractive Index*) zat yang telah didapat dengan dilakukannya eksperimen yaitu :

Tabel 7.1 Tabel Indeks Bias Mutlak Beberapa Zat (*Refractive Index*)

Medium	Indeks Bias Mutlak
Udara ((1 atm, 0 ⁰ C)	(1,00029)
Udara ((1 atm, 0 ⁰ C)	(1,00028)

Udara ((1 atm, 0 ⁰ C)	(1,00026)
Air	(1,33)
Alkohol	(1,36)
Gliserin	(1,47)
Kaca Kuarsa	(1,46)
Kaca Kerona	(1,52)
Kaca Flinta	(1,65)
Intan	(2,42)

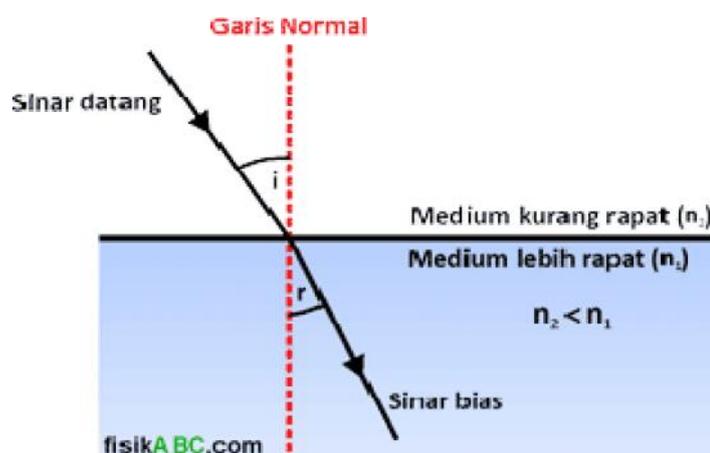
(Sumber : <https://belajar.kemdikbud.go.id/>)

Hukum Snellius tentang Pembiasan

Hukum pembiasan pertama kali dinyatakan oleh Willebrord Snellius (1580–1626), seorang ahli Fisika berkebangsaan Belanda. Snellius melakukan eksperimen dengan melewatkan seberkas sinar pada balok kaca.

Menurut hasil eksperimen tersebut, Snellius merumuskan bunyi hukum pembiasan sebagai berikut :

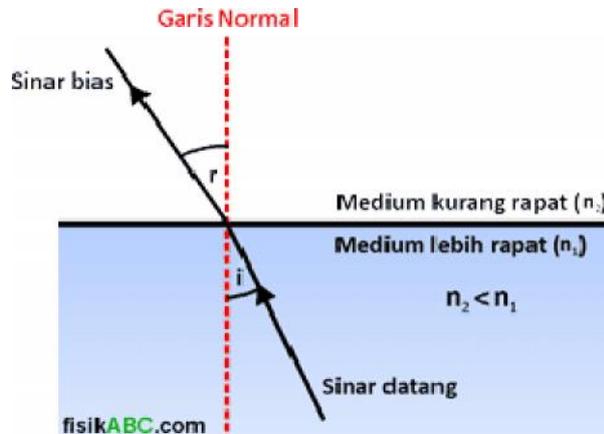
1. Sinar datang, sinar bias, dan garis normal terletak pada satu bidang datar.
2. Jika sinar datang dari medium yang kurang rapat menuju medium yang lebih rapat, sinar akan dibiaskan mendekati garis normal



(Sumber : <http://www.fisikabc.com/>)

Gambar 7.6 Sinar bias mendekati garis normal

Jika sinar datang dari medium yang lebih rapat menuju medium yang kurang rapat, sinar akan dibiaskan menjauhi garis normal.



(Sumber : <http://www.fisikabc.com>)

Gambar 7.7 Sinar bias menjauhi garis normal

3. Perbandingan sinus sudut datang (i) dengan sinus sudut bias (r) merupakan suatu bilangan tetap. Bilangan tetap inilah yang sebenarnya menunjukkan indeks bias zat (*Refractive Index*) tersebut.

$$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = n = \text{kons tan} \quad (7.4)$$

Adapun hasil eksperimen Snellius tersebut mendapatkan persamaan matematis hubungan sudut datang (i) dan sudut bias (r) atau yang dikenal dengan Hukum Pembiasan Snellius yaitu sebagai berikut :

$$n_1 \sin \theta_d = n_2 \sin \theta_b \quad (7.5)$$

dimana :

n_1 : Indeks bias (*Refractive Index*) medium tempat cahaya datang

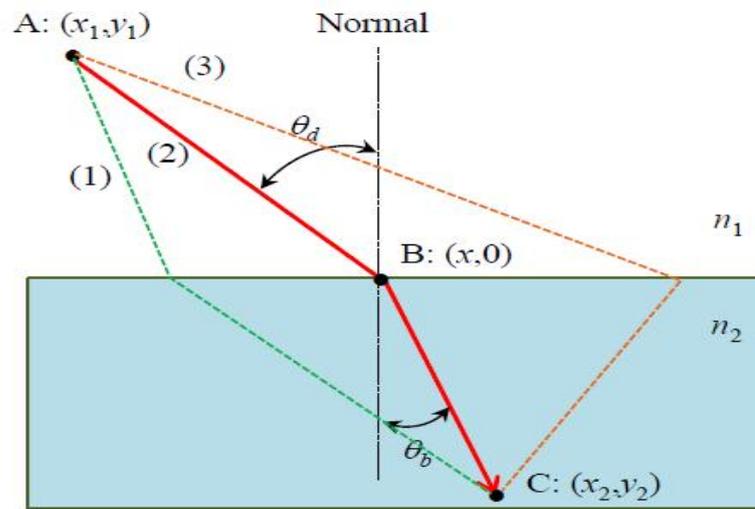
n_2 : Indeks bias (*Refractive Index*) medium tempat cahaya tuju

θ_1 : Sudut datang cahaya diukur dari garis normal bidang

θ_2 : Sudut bias cahaya diukur dari garis normal bidang

Prinsip dasar hukum pembiasan Snellius yaitu cahaya selalu merambat dari suatu titik ke titik lain pada lintasan sedemikian sehingga waktu tempuhnya paling kecil. Jadi peristiwa pembiasan adalah peristiwa ketika cahaya mengambil lintasan dengan waktu tempuh paling

kecil. Untuk membuktikan hukum pembiasan Snellius, akan dianalisis gambar 7.8 dibawah ini dengan menggunakan prinsip fermat.



(Sumber : Modul Fisika Dasar II Mikrajudin Abdullah, IPB)

Gambar 7.8 Membuktikan hukum snellius dengan prinsip fermat

Misalkan cahaya akan merambat dari titik A di medium n_1 ke titik C di medium n_2 . Lintasan manakah yang akan ditempuh cahaya ? Apakah lintasan (1), (2) atau (3) ? Kita akan tentukan dengan menggunakan prinsip dasar cahaya maka lintasan dengan waktu tempuh paling singkat yang akan kita gunakan yaitu lintasan (2).

Misalkan koordinat titik A adalah (x_1, y_1) dan koordinat titik C adalah (x_2, y_2) . Misalkan cahaya jatuh pada bidang batas dua medium pada titik B Karena bidang batas berimpit dengan sumbu x maka koordinat titik B adalah $(x, 0)$. Dengan demikian kita dapatkan panjang lintasan cahaya di medium 1 dan medium 2 sebagai berikut:

$$AB = \sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2}$$

$$BC = \sqrt{(x - x_2)^2 + y_2^2}$$

Berdasarkan persamaan 2.1 maka laju cahaya di medium 1 dan medium 2 masing-masing adalah:

$$v_1 = \frac{c}{n_1}$$

$$v_2 = \frac{c}{n_2}$$

Dengan demikian, waktu yang diperlukan cahaya untuk merambat dari titik A ke titik C menjadi:

$$t = \frac{AB}{v_1} + \frac{BC}{v_2}$$

$$t = \frac{n_1}{c} \sqrt{(x-x_1)^2 + y_1^2} + \frac{n_2}{c} \sqrt{(x-x_2)^2 + y_2^2}$$

Tampak bahwa waktu tempuh cahaya hanya merupakan fungsi x (koordinat titik B). Waktu tempuh akan minimum jika turunan waktu tempuh tersebut terhadap koordinat $x=0$

atau $\frac{dt}{dx} = 0$

Dengan metode diferensial biasa kita dapatkan :

$$\frac{n_1}{c} \frac{x-x_1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + y_1^2}} + \frac{n_2}{c} \frac{x-x_2}{\sqrt{(x-x_2)^2 + y_2^2}} = 0$$

Karena $x-x_1$ bernilai positif dan $x-x_2$ bernilai negatif maka didapat

$$\begin{aligned} \frac{x-x_1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + y_1^2}} &= \text{Sin}_{\theta_d} \\ \frac{x-x_2}{\sqrt{(x-x_2)^2 + y_2^2}} &= -\text{Sin}_{\theta_b} \end{aligned}$$

maka didapat persamaan diatas menjadi:

$$\frac{n_1}{c} \text{Sin}_{\theta_d} = \frac{n_2}{c} \text{Sin}_{\theta_b} \quad n_1 \text{Sin}_{\theta_d} = n_2 \text{Sin}_{\theta_b}$$

(7.6)

Contoh Soal 7.2:

Berkas cahaya datang dari udara dengan sudut datang 30^0 menuju air. Berapakah sudut pembiasan cahaya dalam air ?

Jawaban :

Berdasarkan Tabel 7.1 $n_1 =$ indeks bias udara = 1, $n_2 =$ indeks bias air = 1,33. Dengan menggunakan hukum Snell kita dapat menulis :

$$\sin n_b = \frac{n_1 \sin n_d}{n_2} = \frac{1 \times \sin 30^0}{1,33} = \frac{0,5}{1,33} = 0,375$$

$$n_b = \text{Arc sin } 0,375 = 22^0$$

Contoh Soal 7.3:

Cahaya datang dari es menuju udara dengan sudut datang 45^0 . Berapakah sudut bias cahaya tersebut ?

Jawaban :

Berdasarkan Tabel 7.1 $n_1 =$ indeks bias es = 1,309 $\frac{\sqrt{2}}{2} =$ indeks bias udara = 1. Dengan menggunakan hukum Snell kita dapat menulis :

$$\sin n_b = \frac{n_1 \sin n_d}{n_2} = \frac{1,309 \times \sin 45^0}{1} = \frac{0,926}{1} = 0,926$$

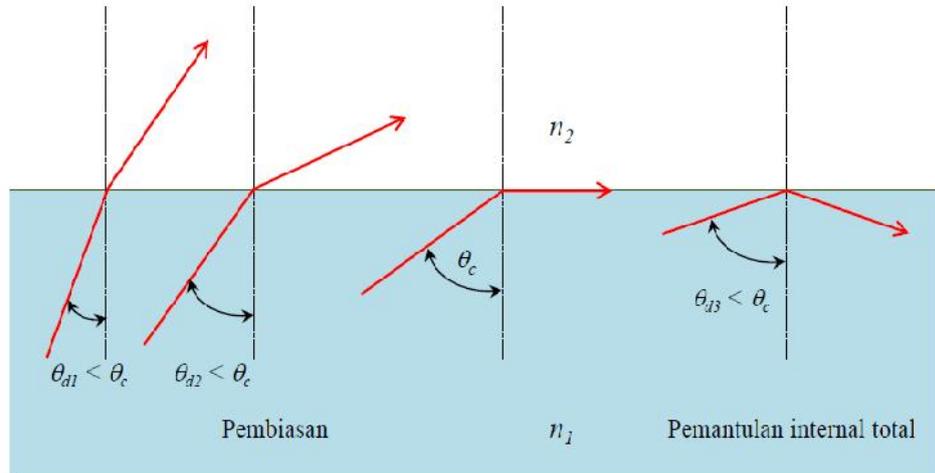
$$n_b = \text{Arc sin } 0,926 = 68^0$$

Sudut Kritis untuk Pembiasan

Jika sinar datang dari medium lebih rapat menuju medium kurang rapat, maka sinar akan dibiaskan menjauhi garis normal. Jika sudut sinar datang kita perbesar, maka sudut bias akan makin besar pula.

Suatu saat, sudut bias akan sama dengan 90^0 . Hal ini berarti sinar dibiaskan sejajar dengan bidang antar medium. Sudut datang ini yang disebut sebagai **sudut kritis** (n_c). Jadi sudut kritis adalah saat sudut datang ketika sinar datang dibiaskan dengan sudut bias 90^0 .

Jika sudut datang diperbesar lagi melebihi sudut kritis, cahaya tidak akan dibiaskan melainkan akan dipantulkan sempurna (pemantulan internal total). Artinya, cahaya tidak akan keluar dari medium.



(Sumber : Modul Fisika Dasar II Mikrajudin Abdullah, IPB Hlm 709)

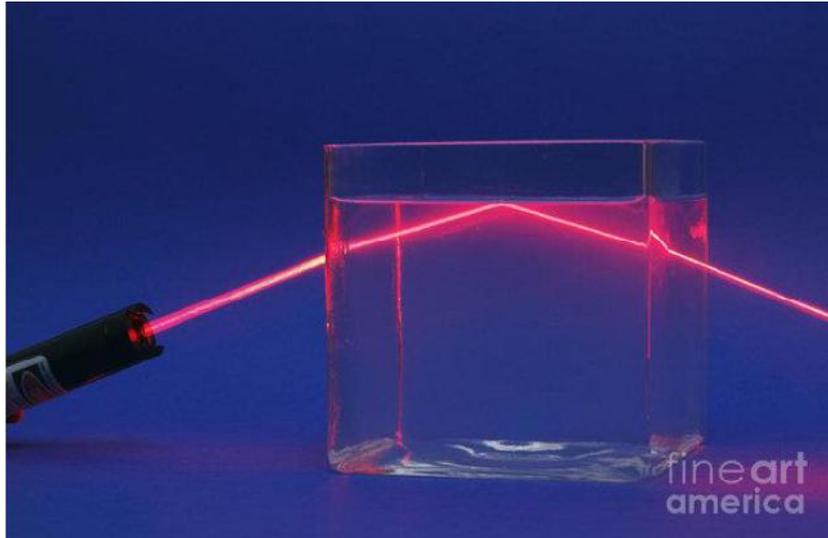
Gambar 7.9 Sudut kritis dan pemantulan internal total

Secara matematis, sudut kritis dapat dicari dengan menggunakan persamaan hukum pembiasan Snell yaitu :

$$n_1 \sin \theta_d = n_2 \sin \theta_b \quad (7.7)$$

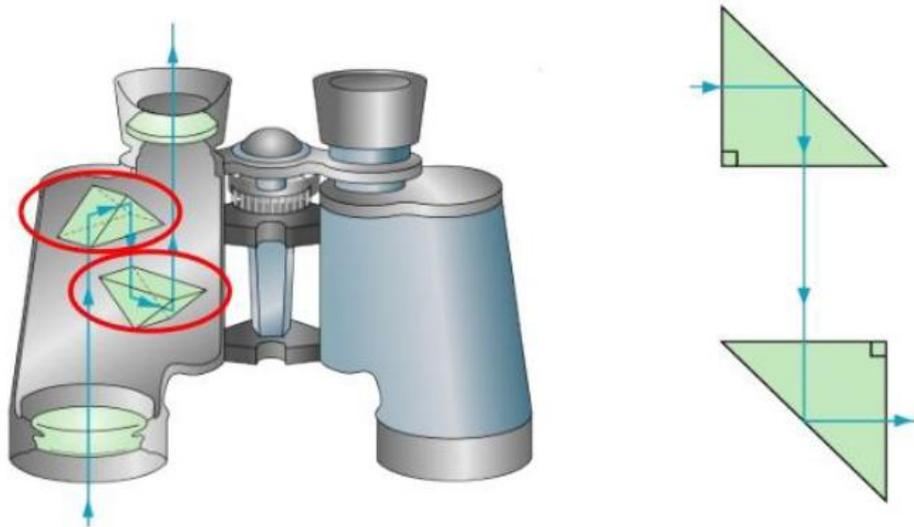
Dimana ketika $\theta_b = 90^\circ$ maka $\sin 90^\circ = 1$ dan $\theta_d = \theta_c$ maka persamaan hukum pembiasan Snell menjadi :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (7.8)$$



(Sumber : Modul Fisika Dasar II Mikrajudin Abdullah, IPB)

Gambar 7.10 Contoh pemantulan internal total berkas laser oleh bidang batas air dan udara. Sinar laser datang dari air dengan sudut lebih besar daripada sudut kritis (Fine Art America)



(Sumber : Modul Fisika Dasar II Mikrajudin Abdullah, IPB Hlm 711)

Gambar 7.11 Teleskop *binocular* menggunakan dua prisma untuk memantulkan cahaya. Cahaya yang masuk ke dalam teleskop mengalami pemantulan internal total hingga sampai ke mata pengamat.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang pembiasan cahaya dan sudut kritis.
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh pembiasan cahaya dan aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari

RANGKUMAN

1. Adapun syarat-syarat agar terjadi pembiasan menurut hukum Snellius adalah:
 - Cahaya melalui dua medium yang berbeda kerapatan optiknya
 - Cahaya datang tidak tegak lurus terhadap bidang batas (sudut datang lebih kecil dari 90°) karena jika cahaya tegak lurus terhadap bidang batas maka cahaya akan dipantulkan.
2. Pembiasan cahaya dapat terjadi dikarenakan perbedaan laju cahaya pada kedua medium. Laju cahaya pada medium yang rapat lebih kecil dibandingkan dengan laju cahaya pada medium yang kurang rapat.
3. Indeks bias (*Refractive Index*) itu sendiri tidak pernah bernilai lebih dari 1 atau $n \leq 1$ yang secara matematis dapat dirumuskan :

$$n = \frac{c}{v}$$

4. Peristiwa pembiasan adalah peristiwa ketika cahaya mengambil lintasan dengan waktu tempuh paling kecil.
5. Jika sinar datang dari medium lebih rapat menuju medium kurang rapat, maka sinar akan dibiaskan menjauhi garis normal. Jika sudut sinar datang kita perbesar, maka sudut bias akan makin besar pula.
6. Jika sudut datang diperbesar lagi melebihi sudut kritis, cahaya tidak akan dibiaskan melainkan akan dipantulkan sempurna (pemantulan internal total). Artinya, cahaya tidak akan keluar dari medium.

EVALUASI FORMATIF 2

1. Jelaskan bagaimana proses terjadinya pembiasan pada gelombang cahaya!
2. Jelaskan pembuktian hukum snellius tentang pembiasan pada gelombang cahaya!
3. Berkas cahaya datang dari air dengan sudut datang 60° menuju udara. Berapakah sudut pembiasan cahaya dalam udara ?
4. Cahaya datang dari es menuju alkohol dengan sudut datang 45° . Berapakah sudut bias cahaya tersebut ?
5. Cahaya datang dari kaca kuarsa menuju intan dengan sudut datang 30° . Berapakah sudut bias cahaya tersebut ?
6. Berapa sudut kritis bagi berkas cahaya yang keluar dari intan menuju air ?

Lembar Kerja Praktek 2

Kegiatan Pembelajaran 3: Aplikasi Pembiasan Cahaya

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

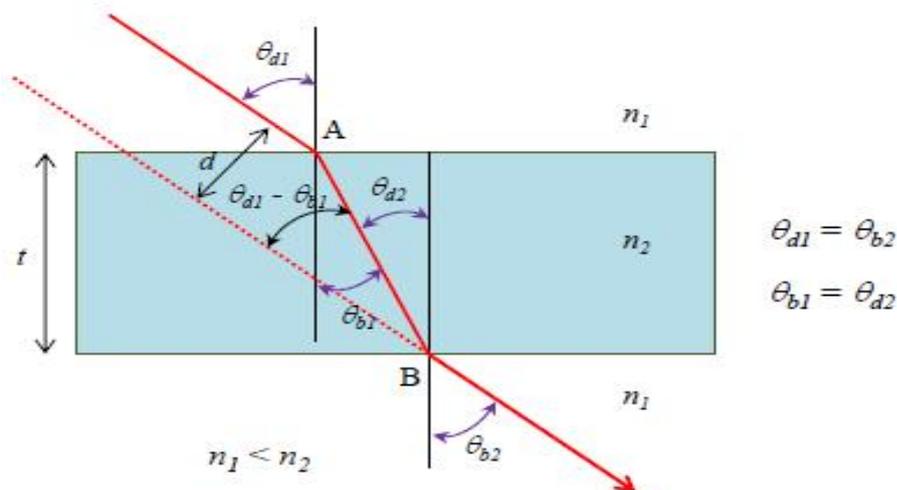
1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai pembiasan cahaya oleh lapisan sejajar.
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan penggunaan aplikasi dalam kehidupan sehari-hari tentang pembiasan cahaya oleh lapisan sejajar.

URAIAN MATERI

A. Pembiasan Cahaya Oleh Lapisan Sejajar

Contoh lapisan sejajar adalah plat kaca di udara atau dalam air. Cahaya datang dari udara menuju sisi pertama pelat kaca sehingga mengalami pembiasan. Cahaya merambat dalam kaca menuju sisi kedua dan mengalami pembiasan kembali di sisi kedua hingga cahaya kembali ke udara. Bagaimana bentuk lintasan cahaya tersebut?

Cahaya yang keluar pada bidang batas kedua ini merambat dalam arah persis sama dengan cahaya datang pada bidang batas pertama. Tetapi, arah rambat cahaya telah mengalami pergeseran. Berapa besarnya pergeseran tersebut?



(Sumber : Fisika Dasar II, Mikrajudin Abdullah)

Gambar 7.12 Pergeseran arah rambat cahaya setelah melewati material dengan ketebalan tertentu.

Pergeseran arah rambat cahaya adalah d . Misalkan tebal medium adalah t . Hubungan antara sudut datang dan sudut bias dibidang batas pertama adalah

$$n_1 \sin \theta_{d1} = n_2 \sin \theta_{b1} \quad (7.9)$$

Jika di lihat dari gambar 7.12 Tampak bahwa

$$\theta_{d1} = \theta_{b2}$$

$$\theta_{b1} = \theta_{d2}$$

$$d = AB \sin(\theta_{d1} - \theta_{b1})$$

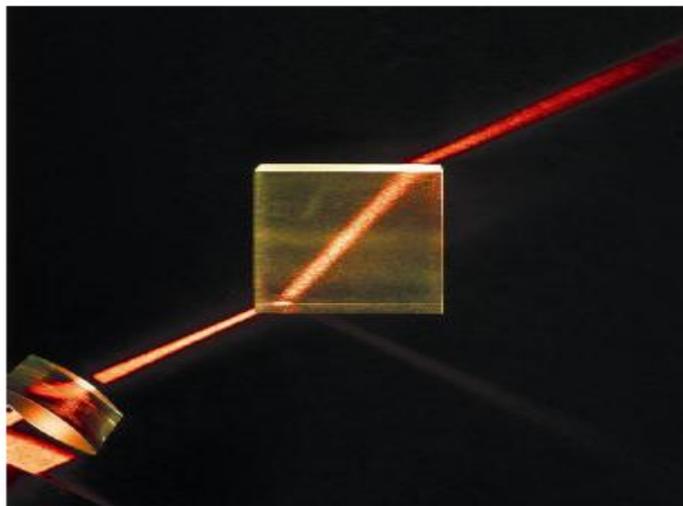
Dengan

$$\frac{t}{AB} = \cos \theta_{b1}, \text{ atau } AB = \frac{t}{\cos \theta_{b1}}$$

maka:

$$d = \frac{t}{\cos \theta_{b1}} \sin(\theta_{d1} - \theta_{b1}) \quad (7.10)$$

Dibawah ini contoh berkas cahaya yang melewati kaca dengan ketebalan tertentu.



(Sumber : Fisika Dasar II, Mikrajudin Abdullah)

Gambar 7.13 Pergeseran arah rambat cahaya setelah melewati kaca
 Dari gambar di atas jelas terlihat bahwa pergeseran arah rambat cahaya setelah melewati kaca. Setelah keluar dari kaca, arah rambat cahaya kembali sama dengan arah rambat sebelum memasuki kaca.

Agar lebih memahami mengenai pergeseran arah rambat perhatikan contoh soal berikut :

Contoh Soal 7.4:

Cahaya datang dari udara ke selambar silica yang tebalnya 5 cm. Jika indeks bias silica untuk cahaya tersebut 1,458 dan sudut datang cahaya adalah 60° berapakah pergeseran arah rambat cahaya setelah meninggalkan silica?

Jawaban :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

$$1 \times \sin 60^\circ = 1,458 \times \sin r \qquad r = 36,5^\circ$$

$$d = \frac{1}{\cos r} \sin (i - r) = \frac{5}{\cos 36,5^\circ} \sin (60^\circ - 36,5^\circ) = 2,48 \text{ cm}$$

B. Pembiasan Cahaya Oleh Permukaan Bola

Dilakukan oleh permukaan cekung dan permukaan cembung. Persamaan yang diperoleh menjadi dasar perancangan lensa cekung dan lensa cembung.

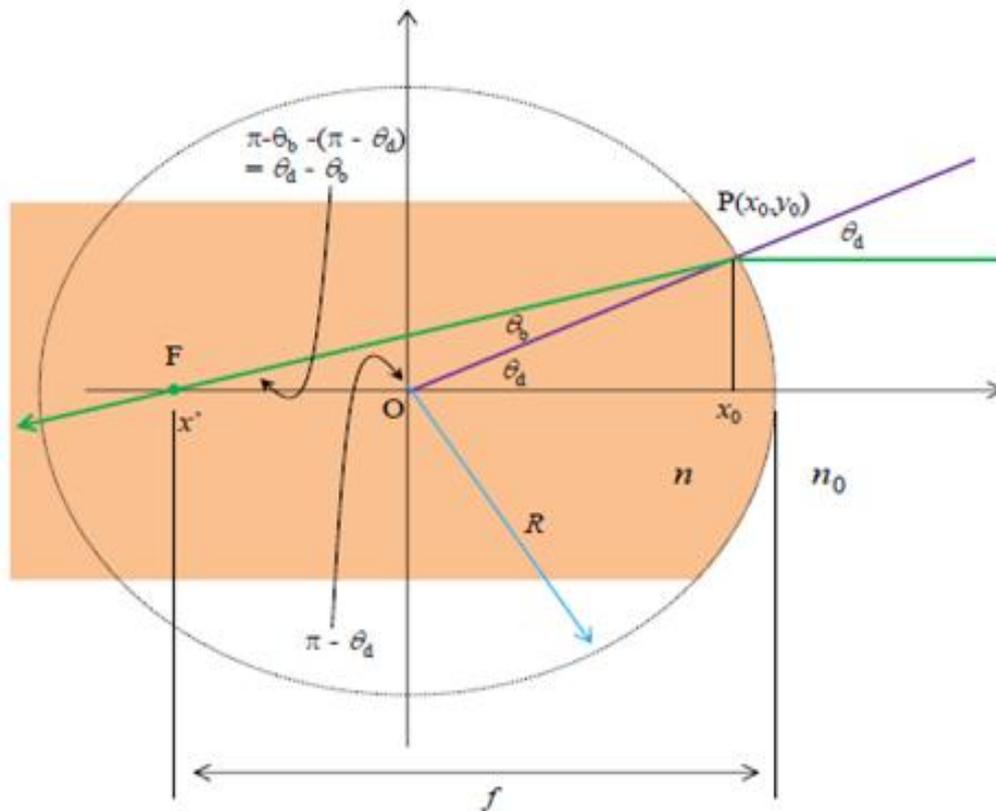
Pembiasaan Oleh Permukaan Cembung Bola

Cahaya datang sejajar sumbu permukaan bola. Permukaan bola memiliki jari-jari R . Cahaya mengenai permukaan bola pada koordinat (x_0, y_0) . Sudut datang cahaya terhadap garis normal adalah θ_d . Cahaya kemudian dibiaskan dengan sudut θ_b dan memotong sumbu datar pada titik F . Yang akan kita tentukan adalah berapa jarak titik F dari ujung terluar permukaan bola, yaitu panjang f . Pertama kita memiliki hukum Snell yang menghubungkan sudut datang dan sudut bias, yaitu :

$$n_0 \sin \theta_d = n \sin \theta_b$$

Serta parameter-parameter yang akan digunakan dalam perhitungan. Dari gambar tersebut kemiringan garis yang sejajar dengan sinar bias adalah:

$$m = \tan(\theta_d - \theta_b)$$



Gambar 7.14 Ilustrasi arah rambat cahaya datang dan cahaya bias yang datang di permukaan cembung bola

Untuk kemudahan analisis, kita hanya fokuskan pada kasus sederhana di mana baik sudut datang maupun sudut bias sangat kecil. Jika gunakan aturan umum bahwa untuk nilai x yang kecil maka $\tan x \approx \sin x \approx x$. Jika θ_d maupun θ_b sangat kecil maka $\theta_d - \theta_b$ juga sangat kecil sehingga kita dapat melakukan aproksimasi berikut ini:

$$\begin{aligned}
 m &\approx \sin(\theta_d - \theta_b) \\
 &\approx \theta_d - \theta_b \\
 &\approx \sin \theta_d - \sin \theta_b
 \end{aligned}
 \tag{7.11}$$

hukum Snell pada persamaan (7.11) maka diperoleh

$$\begin{aligned}
 m &\approx \sin \theta_d - \frac{n_0 \sin \theta_d}{n} \\
 m &\approx \sin \theta_d \left(1 - \frac{n_0}{n} \right)
 \end{aligned}$$

Garis yang sejajar dengan sinar bias memiliki gradien m dan melewati titik (x_0, y_0) . Maka persamaan garis tersebut adalah

$$y - y_0 = m(x - x_0)$$

Garis tersebut memotong sumbu datar pada koordinat $(x', 0)$ yang memenuhi persamaan

$$0 - y_0 = m(x' - x_0)$$

Atau

$$x' = x_0 - \frac{y_0}{m}$$

Dari gambar tersebut juga di dapatkan $x_0 = R \cos_{\theta_d}$ dan $y_0 = R \sin_{\theta_d}$ dengan demikian titik potong sinar bias dengan sumbu datar dapat ditulis

$$\begin{aligned} x' &= R \cos_{\theta_d} - \frac{R \sin_{\theta_d}}{\sin_{\theta_d} (1 - n_0/n)} \\ &= R \left(\cos_{\theta_d} - \frac{n}{n - n_0} \right) \end{aligned}$$

Karena $n/n - n_0 > 1$ maka $x' < 0$ dengan demikian nilai positif dari x' adalah:

$$|x'| = R \left(\frac{n}{n - n_0} - \cos_{\theta_d} \right) \quad (7.12)$$

Maka jelas dari persamaan (7.12) bahwa cahaya yang jatuh dengan sudut datang didapatkan jarak jatuhnya sinar bias diukur dari ujung terluar bidang adalah:

$$\begin{aligned} f &= R + |x'| \\ &= \frac{n}{n - n_0} R + R(1 - \cos_{\theta_d}) \end{aligned} \quad (7.13)$$

Berbeda akan memotong sumbu datar pada posisi yang berbeda. Dengan perkataan lain cahaya yang dibiaskan tidak benar-benar difokuskan. Jika kita tangkap cahaya bias maka cahaya tersebut tidak membentuk satu titik yang tajam tetapi berbentuk lingkaran dengan diameter tertentu.

Untuk kasus khusus jika sudut datang sinar kecil sekali maka kita dapat melakukan aprosimasi $\cos \theta_d \approx 1$ sehingga jarak titik potong sinar bias dengan sumbu datar diaproksimasi menjadi

$$f = \frac{n}{n - n_0} R \quad (7.14)$$

Persamaan ini yang sering kita gunakan selama ini. Untuk berkas yang datang dengan sudut sangat kecil maka berkas tersebut difokuskan pada satu titik.

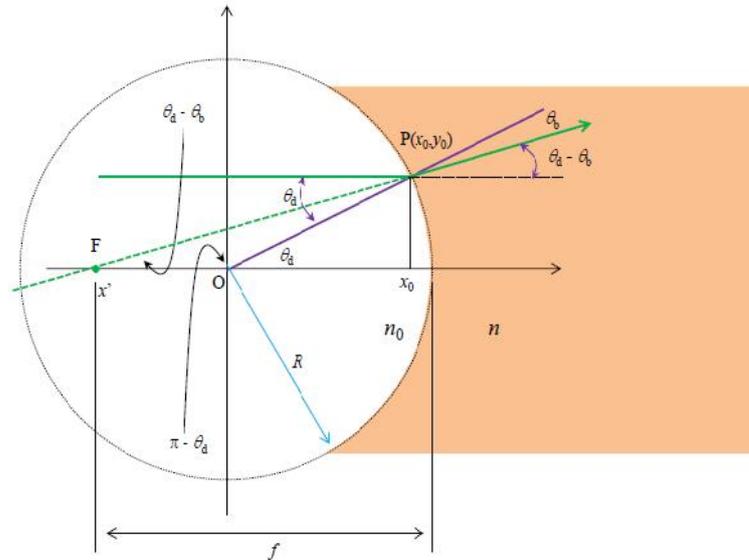
Pembiasan oleh permukaan cekung bola

Selanjutnya akan dibahas dimana cahaya datang dari permukaan cekung bola. Sangat jelas dari gambar diatas bahwa sinar bias membentuk sudut $\theta_d - \theta_b$ terhadap sumbu datar sehingga kemiringan garis yang sejajar sinar bias adalah:

$$m = \tan (\theta_d - \theta_b)$$

Kembali dengan asumsi bahwa sudut datang maupun sudut bias sangat kecil maka kita dapat melakukan aproksimasi.

$$\begin{aligned} m &\approx \sin(\theta_d - \theta_b) \\ &\approx \theta_d - \theta_b \\ &\approx \sin \theta_d - \sin \theta_b \\ &= \sin \theta_d \left(1 - \frac{\sin \theta_b}{\sin \theta_d} \right) \\ &= \sin \theta_d \left(1 - \frac{n_0}{n} \right) \end{aligned}$$



Gambar 7.14 Ilustrasi arah rambat cahaya datang dan cahaya bias yang datang di permukaan cekung bola, serta parameter-parameter yang akan digunakan dalam perhitungan.

Pada persamaan terakhir telah digunakan hukum Snell untuk pembiasan. Garis yang sejajar sinar bias memiliki gradien m dan melewati koordinat (x_0, y_0) dengan langkah yang sama seperti yang kita gunakan untuk pembiasan oleh permukaan cembung maka kita akan dapatkan jarak titik potong sinar bias dengan sumbu datar memenuhi:

$$f = \frac{n}{n_0} R + R(1 - \cos \theta_d)$$

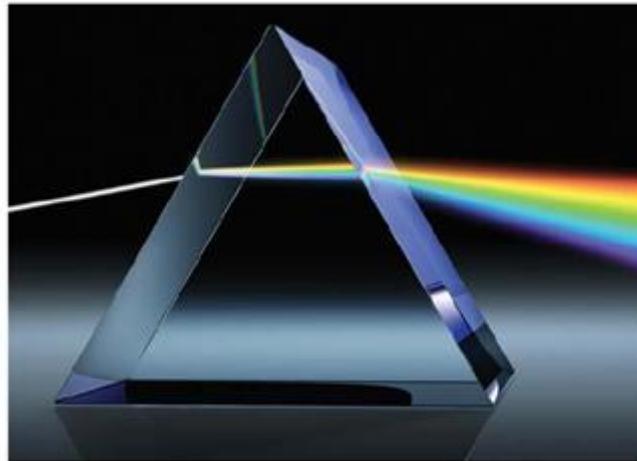
Untuk sudut datang yang kecil kita kembali mendapatkan persamaan (7.14) Dari pembahasan di atas bahwa jarak titik potong garis yang sejajar sinar bias dengan sumbu datar untuk pembiasan oleh permukaan cembung maupun permukaan cekung bola sama, yaitu diberikan oleh persamaan (7.14).

Namun keduanya berbeda. Kalau pembiasan oleh permukaan cekung bola maka sumbu datar dipotong langsung oleh sinar bias. Sebaliknya, pada pembiasan oleh permukaan cekung maka sumbu datar tidak dipotong oleh sinar bias, tetapi dipotong oleh perpanjangan sinar bias ke arah belakang. Untuk pembiasan oleh permukaan cembung maka pada titik potong tersebut terkumpul cahaya. Namun untuk pembiasan oleh permukaan cekung maka pada titik potong tersebut tidak ditemukan cahaya.

C. Pembiasan Cahaya Oleh Prisma

Selanjutnya kita tinjau kondisi yang sedikit lebih rumit, yaitu pembiasan oleh prisma. Walaupun rumit, namun fenomena ini sangat penting dalam teknologi spektroskopi untuk menguraikan cahaya putih atas spektrum warna yang berbeda.

Setelah melewati prisma maka spektrum warna yang berbeda tersebut merambat ke arah yang berbeda sehingga dapat dipilih salah satu warna yang diinginkan. Sekarang mari kita analisis fenomena pembiasan cahaya oleh prisma.



Gambar 7.14 Penguraian cahaya putih oleh prisma.

Setelah meninggalkan prisma maka cahaya yang memiliki panjang gelombang berbeda akan merambat dalam arah yang berbeda. Dengan demikian, cahaya yang memiliki panjang gelombang berbeda dapat dipisahkan atau kita dapat memilih cahaya dengan panjang gelombang tertentu saja (Eyclopedia Brittanica) dengan melihat bangun $abcd$ jelas bahwa:

$$S + \angle abc + \angle bcd + \angle cda = 2f$$

atau

$$S + f/2 + \angle bcd + f/2 = 2f$$

Yang menghasilkan:

$$\angle bcd = f - S \tag{7.14}$$

Selanjutnya perhatikan segitiga bcd . Hubungan antar sudut pada segitiga tersebut adalah:

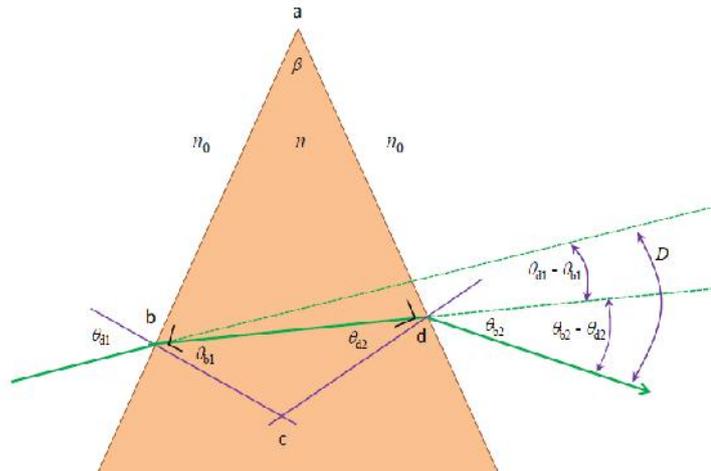
$$\angle bcd + \angle adb + \angle dbc = f \quad \text{atau}$$

$$\angle bcd + \theta_{d2} + \theta_{b1} = f \tag{7.15}$$

Dari Persamaan (7.14) dan (7.15) kita peroleh:

$$f - S + \theta_{d2} + \theta_{b1} = f \quad \text{atau} \tag{7.16}$$

$$\theta_{d2} + \theta_{b1} = S$$



Gambar 7.15 Ilustrasi arah rambat cahaya datang dan cahaya bias yang melewati prisma.

Sudut deviasi didefinisikan sebagai sudut antara sinar bias disisi kedua dengan sinar datang di sisi pertama. Jelas dari gambar 2.19 Bahwa sudut deviasi memenuhi

$$D = (\theta_{d1} - \theta_{b1}) + (\theta_{b2} - \theta_{d2})$$

$$= (\theta_{d1} + \theta_{b2}) - (\theta_{d2} + \theta_{b1})$$

$$= (\theta_{d1} + \theta_{b2}) - S \tag{7.17}$$

Agar lebih eksplisit menentukan sudut deviasi, dapat digunakan hukum Snell pada pembiasan dipermukaan pertama dan permukaan kedua. Pembiasan pada permukaan pertama memenuhi:

$$n_0 \sin \theta_{d1} = n \sin \theta_{b1}$$

atau

$$\theta_{b1} = \sin^{-1} \left(\frac{n_0}{n} \sin \theta_{d1} \right) \tag{7.18}$$

Kemudian digunakan hukum Snell untuk menjelaskan pembiasan pada sisi kedua, yaitu:

$$n \sin \theta_{d2} = n_0 \sin \theta_{b2}$$

Yang menghasilkan:

$$\theta_{b2} = \sin^{-1} \left(\frac{n}{n_0} \sin \theta_{d2} \right) \quad (7.19)$$

Sebelum menentukan persamaan untuk sudut deviasi, mari kita tentukan dulu hubungan berikut ini:

$$\begin{aligned} \sin \theta_{d2} &= \sin \left[S - \sin^{-1} \left(\frac{n_0}{n} \sin \theta_{d1} \right) \right] \\ &= \sin S \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_0}{n} \sin \theta_{d1} \right) \right] - \cos S \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_0}{n} \sin \theta_{d1} \right) \right] \end{aligned}$$

Kemudian digunakan sifat fungsi invers berikut ini, $\sin(\sin^{-1} x) = x$. Dengan demikian persamaan selanjutnya dapat ditulis:

$$\sin \theta_{d2} = \sin S \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_0}{n} \sin \theta_{d1} \right) \right] - \left(\frac{n_0}{n} \sin \theta_{d1} \right) \cos S \quad (7.20)$$

Dan sudut bias pada permukaan kedua menjadi:

$$\begin{aligned} \theta_{b2} &= \sin^{-1} \frac{n}{n_0} \left\{ \sin S \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_0}{n} \sin \theta_{d1} \right) \right] - \left(\frac{n_0}{n} \sin \theta_{d1} \right) \cos S \right\} \\ \theta_{b2} &= \sin^{-1} \left\{ \frac{n}{n_0} \sin S \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_0}{n} \sin \theta_{d1} \right) \right] - \sin \theta_{d1} \cos S \right\} \end{aligned} \quad (7.21)$$

Akhirnya didapatkan ungkapan yang lebih eksplisit untuk sudut deviasi sebagai berikut berikut:

$$D = \theta_{d1} - S + \sin^{-1} \left\{ \frac{n}{n_0} \sin S \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_0}{n} \sin \theta_{d1} \right) \right] - \sin \theta_{d1} \cos S \right\} \quad (7.22)$$

Menarik untuk menentukan sudut deviasi minimum. Tampak bahwa D hanya merupakan fungsi θ_{d1} . Untuk mencari minimum D kita lakukan diferensial terhadap θ_{d1} dan menentukan solusi yang menyelesaikan diferensial tersebut. Karena bentuk fungsi D cukup kompleks maka diferensial pun cukup kompleks. Untuk membuktikan bahwa ada θ_{d1} yang

membuat D minimum kita dapat membuat grafik D sebagai fungsi θ_{d1} grafik dapat dibuat secara sederhana menggunakan excel. gambar 7.15 adalah plot D sebagai fungsi θ_{d1} . Sebagai ilustrasi kita gunakan $n_0 = 1$ (udara), $n = 1,333$, dan $\beta = 30^\circ$. Tampak jelas adanya sudut deviasi minimum yang terjadi saat θ_{d1} sekitar 20° dengan sudut deviasi minimum sekitar $10,5^\circ$. Menarik untuk mengkaji bagaimana arah rambat sinar dalam prisma ketika deviasi minimum terjadi. Pada gambar 7.15 deviasi minimum terjadi ketika $\theta_{d1} \approx 20^\circ$. Sudut bias pada permukaan pertama adalah

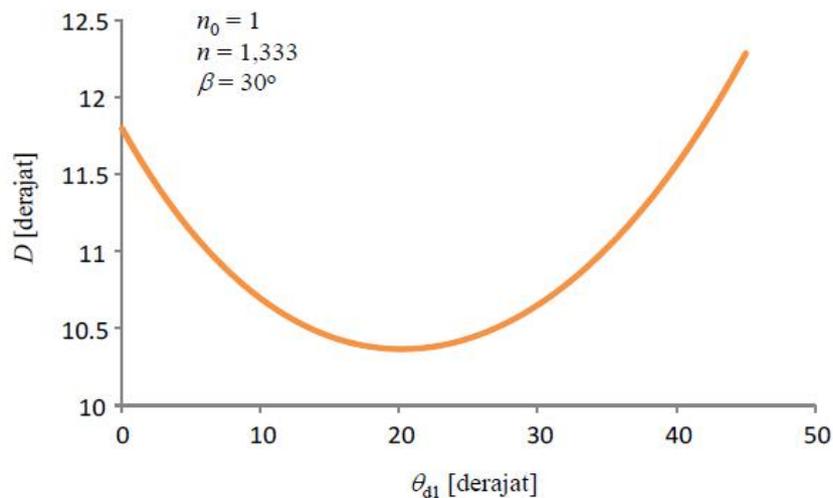
$$i_{d1} = \sin^{-1}\left(\frac{n_0}{n} \sin \theta_{d1}\right) = 14,9^\circ$$

Sudut datang pada bidang kedua adalah

$$i_{d2} = \beta - \sin^{-1}\left(\frac{n_0}{n} \sin i_{d1}\right) = 30^\circ - 14,9^\circ = 15,1^\circ$$

Tampak bahwa deviasi minimum terjadi ketika sudut bias pada bidang pertama sama dengan sudut datang pada bidang kedua. Ini artinya segitiga abd merupakan segitiga sama kaki.

$$i_{d2} = \beta - \sin^{-1}\left(\frac{n_0}{n} \sin i_{d1}\right) = 30^\circ - 14,9^\circ = 15,1^\circ$$



Gambar 7.16 Plot sudut deviasi sebagai fungsi sudut datang pada bidang pertama. Untuk keperluan perhitungan kita menggunakan $n_0 = 1$ (udara), $n = 1,333$, dan $\beta = 30^\circ$. Perhitungan dan pembuatan grafik dilakukan dengan excel

Karena pada kondisi deviasi minimum, $\theta_{b1} = \theta_{d2}$ maka dengan mengacu pada persamaan (7.16) maka di peroleh:

$$n_{b1} = n_{d2} = \frac{S}{2}$$

Lebih lanjut, karena $\theta_{b1} = \theta_{d2}$ maka $\theta_{d1} = \theta_{b2}$. Akibatnya, dari persamaan (7.17) sudut deviasi minimum memenuhi:

$$D = 2\theta_{d1} - S$$

Dengan menggunakan hukum Snell pada sisi kiri saat terjadi deviasi minimum maka $n_0 \sin \theta_{d1} = n \sin(S/2)$ atau $\sin \theta_{d1} = (n/n_0) \sin(S/2)$ jadi, sudut deviasi minimum dapat ditulis dalam persamaan berikut ini

$$D = 2 \sin^{-1} \left(\frac{n}{n_0} \sin \frac{S}{2} \right) - S \quad (7.23)$$

Untuk mengecek kebenaran persamaan (6.4.10), masukkan data yang telah digunakan dalam menentukan grafik pada gambar 6.1.8, yaitu $n_0 = 1$ (udara), $n = 1,333$, dan $\theta = 30^\circ$. Kita dapatkan $D = 20,27^\circ$, persis sama dengan yang ditunjukkan pada gambar 7.16

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang aplikasi pembiasan pada pelat sejajar, oleh permukaan bola dan oleh prisma
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh aplikasi pembiasan pada pelat sejajar, oleh permukaan bola dan oleh prisma yang sering kamu amati dalam kehidupan sehari-hari.

RANGKUMAN

1. Contoh lapisan sejajar adalah plat kaca di udara atau dalam air. Cahaya datang dari udara menuju sisi pertama pelat kaca sehingga mengalami pembiasan. Cahaya merambat dalam kaca menuju sisi kedua dan mengalami pembiasan kembali di sisi kedua hingga cahaya kembali ke udara.

2. Cahaya yang keluar pada bidang batas kedua ini merambat dalam arah persis sama dengan cahaya datang pada bidang batas pertama. Tetapi, arah rambat cahaya telah mengalami pergeseran.
3. Pergeseran arah rambat cahaya setelah melewati kaca. Setelah keluar dari kaca, arah rambat cahaya kembali sama dengan arah rambat sebelum memasuki kaca.
4. Pergeseran arah rambat cahaya adalah d . Misalkan tebal medium adalah t . Hubungan antara sudut datang dan sudut bias dibidang batas pertama adalah

$$d = \frac{t}{\cos \theta_{b1}} \sin(\theta_{d1} - \theta_{b1})$$

5. Pembiasan Cahaya Oleh Permukaan Bola dilakukan oleh permukaan cekung dan permukaan cembung. Persamaan yang diperoleh menjadi dasar perancangan lensa cekung dan lensa cembung.
6. Untuk kasus khusus jika sudut datang sinar kecil sekali maka kita dapat melakukan aprosimasi $\cos \theta_d \approx 1$ sehingga jarak titik potong sinar bias dengan sumbu datar diaproksimasi menjadi

$$f = \frac{n}{n - n_0} R$$

7. Jarak titik potong garis yang sejajar sinar bias dengan sumbu datar untuk pembiasan oleh permukaan cembung maupun permukaan cekung bola sama, yaitu diberikan oleh persamaan

$$f = \frac{n}{n_0} R + R(1 - \cos \theta_d)$$

8. Kalau pembiasan oleh permukaan cekung bola maka sumbu datar dipotong langsung oleh sinar bias. Sebaliknya, pada pembiasan oleh permukaan cembung maka sumbu datar tidak dipotong oleh sinar bias, tetapi dipotong oleh perpanjangan sinar bias ke arah belakang.
9. Untuk pembiasan oleh permukaan cembung maka pada titik potong tersebut terkumpul cahaya. Namun untuk pembiasan oleh permukaan cekung maka pada titik potong tersebut tidak ditemukan cahaya.
10. Setelah melewati prisma maka spektrum warna yang berbeda tersebut merambat ke arah yang berbeda sehingga dapat dipilih salah satu warna yang diinginkan.
11. Setelah meninggalkan prisma maka cahaya yang memiliki panjang gelombang berbeda akan merambat dalam arah yang berbeda. Dengan demikian, cahaya yang memiliki

panjang gelombang berbeda dapat dipisahkan atau kita dapat memilih cahaya dengan panjang gelombang tertentu saja.

12. Sudut deviasi minimum dapat ditulis dalam persamaan berikut ini

$$D = 2 \sin^{-1} \left(\frac{n}{n_0} \sin \frac{S}{2} \right) - S$$

EVALUASI FORMATIF 3

1. Jelaskanlah pembiasan pada plat sejajar !
2. Jelaskan pembiasan pada permukaan cembung dan cekung yang digunakan sebagai studi pembelajaran munculnya lensa cembung dan lensa cekung !
3. Jelaskan pembiasan pada prisma dan penurunan rumus sudut deviasi minimum !
4. Jelaskan aplikasi pembiasan pada pelat sejajar !
5. Jelaskan aplikasi pembiasan oleh prisma dalam penggunaan alat spektrometri !
6. Cahaya datang dari udara ke selambar silica yang tebalnya 10 cm. Jika indeks bias silica untuk cahaya tersebut 1,458 dan sudut datang cahaya adalah 30° , 45° dan 60° berapakah pergeseran arah rambat cahaya setelah meninggalkan silica?
7. Sebuah prisma terbuat dari kaca ($n = 1,5$) memiliki sudut pembias 60° . Jika seberkas sinar laser jatuh pada salah satu permukaannya dengan sudut datang 30° , berapakah sudut deviasi yang dialami oleh sinar laser tersebut setelah melewati prisma?

Lembar Kerja Praktek 3

Praktikum Pemantulan

Percobaan pembiasan pada kaca plan paralel dan prisma

Tujuan:

- Mengetahui bagaimana pembiasan pada kaca plan paralel dan prisma
- Dapat menghitung pembiasan pada kaca plan paralel dan prisma
- Mengetahui kegunaan sehari-hari kaca plan paralel dan kaca prisma
- Mengetahui dan menghitung pembelokan cahaya pada kaca plan paralel dan prisma

Alat dan bahan

- Kaca plan paralel
- Kertas putih polos
- Jarum pentul
- Busur derajat
- Pensil
- Pulpen
- Penggaris
- Sterofoam dan meja

Langkah kerja

- ✓ Menyiapkan peralatan yang dibutuhkan.
- ✓ Menggaris tepi-tepi kaca dengan menggunakan pensil sehingga ukuran kaca tercetak sama persis di atas kertas putih polos.
- ✓ Memosisikan mata kamu di depan kaca plan paralel.
- ✓ Meletakkan jarum pentul yang pertama di dekat tepi kertas putih polos, jarum pentul kedua letakkan pada satu garis lurus diantara jarum pertama dengan kaca plan paralel.
- ✓ Memosisikan mata kamu di belakang kaca plan paralel.
- ✓ Meletakkan jarum pantul yang ketiga sejajar dengan jarum pertama dan kedua di tepi kertas (*dekat dengan mata*). Meletakkan jarum ke empat di antara jarum ketiga dengan kaca plan paralel.
- ✓ Mencabut keempat jarum tadi setelah sejajar.
- ✓ Membuat garis lurus yang menghubungkan lubang jarum pertama dan kedua hingga mengenai pola kaca plan paralel garis ini dapat disebut sebagai garis berkas sinar

datang(i), dengan cara yang sama menghubungkan lubang jarum ketiga dan keempat sehingga mengenai pola kaca plan paralel, garis ini disebut garis berkas sinar pantul (r).

- ✓ Mengukur dan mencatat sudut sinar datang (i) dan sudut sinar pantul (r) pada tabel pengamatan.
- ✓ Mengulangi percobaan sebanyaklima kali, pada kertas berbeda untuk posisi jarum yang berbeda-beda (sudut kemiringannya terhadap kaca plan paralel).
- ✓ Catatlah hasil pengamatan ke dalam tabel data

No	D	$i (^{\circ})$	$r (^{\circ})$	$i-r(^{\circ})$	Sin ($i-r$)	Cos r	$t (cm)$
1	6	42	27				
2	6	36	21				
3	6	75	40				
4	6	33	22				
5	6	24	16				

Lembar Kerja Praktikum

RANGKUMAN MODUL

1. Pembiasan terjadi karena gelombang memasuki medium yang berbeda dan kecepatan gelombang pada medium awal dan medium yang dimasuki berbeda.
2. Jika arah datang gelombang tidak sejajar dengan garis normal maka pembiasan menyebabkan pembelokan arah rambat gelombang.
3. Gelombang air yang melalui daerah yang lebih dangkal mengalami perubahan kecepatan, sehingga terjadi pembiasan.
4. Misalkan gelombang datang dari medium pertama ke medium kedua, maka hubungan antara sudut datang dan sudut bias memenuhi :

$$\frac{\sin \theta_d}{v_1} = \frac{\sin \theta_b}{v_2}$$

5. Jika gelombang masuk ke medium dengan indeks bias lebih besar maka arah rambat mendekati garis normal, dan sebaliknya.
6. Cahaya merambat dalam lintasan garis lurus dari persamaan :

$$y = \frac{\sqrt{n_0^2 - K^2}}{K} x + (y_0 - x_0 / K)$$

7. Adapun syarat-syarat agar terjadi pembiasan menurut hukum Snellius adalah:
 - Cahaya melalui dua medium yang berbeda kerapatan optiknya
 - Cahaya datang tidak tegak lurus terhadap bidang batas (sudut datang lebih kecil dari 90°) karena jika cahaya tegak lurus terhadap bidang batas maka cahaya akan dipantulkan.
8. Pembiasan cahaya dapat terjadi dikarenakan perbedaan laju cahaya pada kedua medium. Laju cahaya pada medium yang rapat lebih kecil dibandingkan dengan laju cahaya pada medium yang kurang rapat.
9. Indeks bias (*Refractive Index*) itu sendiri tidak pernah bernilai lebih dari 1 atau $n \leq 1$ yang secara matematis dapat dirumuskan :

$$n = \frac{c}{v}$$

10. Peristiwa pembiasan adalah peristiwa ketika cahaya mengambil lintasan dengan waktu tempuh paling kecil.

11. Jika sinar datang dari medium lebih rapat menuju medium kurang rapat, maka sinar akan dibiaskan menjauhi garis normal. Jika sudut sinar datang kita perbesar, maka sudut bias akan makin besar pula.
12. Jika sudut datang diperbesar lagi melebihi sudut kritis, cahaya tidak akan dibiaskan melainkan akan dipantulkan sempurna (pemantulan internal total). Artinya, cahaya tidak akan keluar dari medium.
13. Contoh lapisan sejajar adalah plat kaca di udara atau dalam air. Cahaya datang dari udara menuju sisi pertama pelat kaca sehingga mengalami pembiasan. Cahaya merambat dalam kaca menuju sisi kedua dan mengalami pembiasan kembali di sisi kedua hingga cahaya kembali ke udara.
14. Cahaya yang keluar pada bidang batas kedua ini merambat dalam arah persis sama dengan cahaya datang pada bidang batas pertama. Tetapi, arah rambat cahaya telah mengalami pergeseran.
15. Pergeseran arah rambat cahaya setelah melewati kaca. Setelah keluar dari kaca, arah rambat cahaya kembali sama dengan arah rambat sebelum memasuki kaca.
16. Pergeseran arah rambat cahaya adalah d . Misalkan tebal medium adalah t . Hubungan antara sudut datang dan sudut bias di bidang batas pertama adalah

$$d = \frac{t}{\cos \theta_{b1}} \sin(\theta_{d1} - \theta_{b1})$$

17. Pembiasan Cahaya Oleh Permukaan Bola dilakukan oleh permukaan cekung dan permukaan cembung. Persamaan yang diperoleh menjadi dasar perancangan lensa cekung dan lensa cembung.
18. Untuk kasus khusus jika sudut datang sinar kecil sekali maka kita dapat melakukan aprosimasi $\cos \theta_d \approx 1$ sehingga jarak titik potong sinar bias dengan sumbu datar diaproksimasi menjadi

$$f = \frac{n}{n - n_0} R$$

19. Jarak titik potong garis yang sejajar sinar bias dengan sumbu datar untuk pembiasan oleh permukaan cembung maupun permukaan cekung bola sama, yaitu diberikan oleh persamaan

$$f = \frac{n}{n_0} R + R(1 - \cos \theta_d)$$

20. Kalau pembiasan oleh permukaan cekung bola maka sumbu datar dipotong langsung oleh sinar bias. Sebaliknya, pada pembiasan oleh permukaan cekung maka sumbu datar tidak dipotong oleh sinar bias, tetapi dipotong oleh perpanjangan sinar bias ke arah belakang.
21. Untuk pembiasan oleh permukaan cembung maka pada titik potong tersebut terkumpul cahaya. Namun untuk pembiasan oleh permukaan cekung maka pada titik potong tersebut tidak ditemukan cahaya.
22. Setelah melewati prisma maka spektrum warna yang berbeda tersebut merambat ke arah yang berbeda sehingga dapat dipilih salah satu warna yang diinginkan.
23. Setelah meninggalkan prisma maka cahaya yang memiliki panjang gelombang berbeda akan merambat dalam arah yang berbeda. Dengan demikian, cahaya yang memiliki panjang gelombang berbeda dapat dipisahkan atau kita dapat memilih cahaya dengan panjang gelombang tertentu saja.
24. Sudut deviasi minimum dapat ditulis dalam persamaan berikut ini

$$D = 2 \sin^{-1} \left(\frac{n}{n_0} \sin \frac{S}{2} \right) - S$$

DAFTAR PUSTAKA

Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi

Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing

Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I

Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.

<http://3.bp.blogspot.com/Reflektor+Bundar.jpg>

<https://www.google.com/pemantulan-cahaya-pada-cermin-cembung>

<https://belfis.wordpress.com/cermin-cekung-parabola>

Modul 8:

Indeks Bias dan Superposisi

Pendahuluan

Setiap medium mempunyai suatu indeks bias tertentu, yang merupakan suatu ukuran seberapa besar suatu bahan membiaskan cahaya. **Indeks bias** suatu zat adalah perbandingan kelajuan cahaya di udara dengan kelajuan cahaya di dalam zat tersebut. Kelajuan cahaya di udara selalu lebih besar daripada di dalam zat lain. Oleh karena itu, indeks bias zat lain selain udara selalu lebih besar dari 1. Semakin besar indeks bias suatu zat maka semakin besar cahaya dibelokkan oleh zat tersebut. Besarnya pembiasan juga bergantung pada panjang gelombang cahaya. Dalam spektrum cahaya tampak, panjang gelombang cahaya bervariasi dari gelombang merah yang terpanjang sampai gelombang ungu yang terpendek.

Kegiatan Pembelajaran 1: Indeks Bias

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai indeks bias
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan penggunaan aplikasi dalam kehidupan sehari-hari tentang mengetahui indeks bias suatu bahan

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Laju perambatan gelombang elektromagnetik terbesar tercapai ketika merambat dalam ruang hampa. Jika gelombang EM masuk ke dalam material, maka laju dan panjang gelombangnya berkurang, tetapi frekuensinya tidak berubah. Laju cahaya dalam es adalah $2,3 \times 10^8$ m/s sedangkan dalam intan adalah $1,24 \times 10^8$ m/s. Umumnya, laju cahaya berbeda jika memasuki material yang berbeda. Oleh karena itu, perlu didefinisikan suatu besaran yang menentukan laju cahaya dalam material. Besaran tersebut disebut **indeks bias**, yang memenuhi hubungan

$$n = \frac{c}{c_m} \quad (8.1)$$

dengan n indeks bias material, c laju cahaya dalam ruang hampa, dan c_m laju cahaya dalam material. Dengan menggunakan hubungan $c = \lambda f$, dan $c_m = \lambda_m f$, maka persamaan untuk indeks bias dapat juga ditulis sebagai

$$n = \frac{\lambda f}{\lambda_m f} = \frac{\lambda}{\lambda_m} \quad (8.2)$$

dengan

λ panjang gelombang dalam ruang hampa

λ_m panjang gelombang dalam material

Tampak dari Tabel 8.1 bahwa indeks bias udara atau gas sangat mendekati

Tabel 8.1 Indeks bias beberapa material

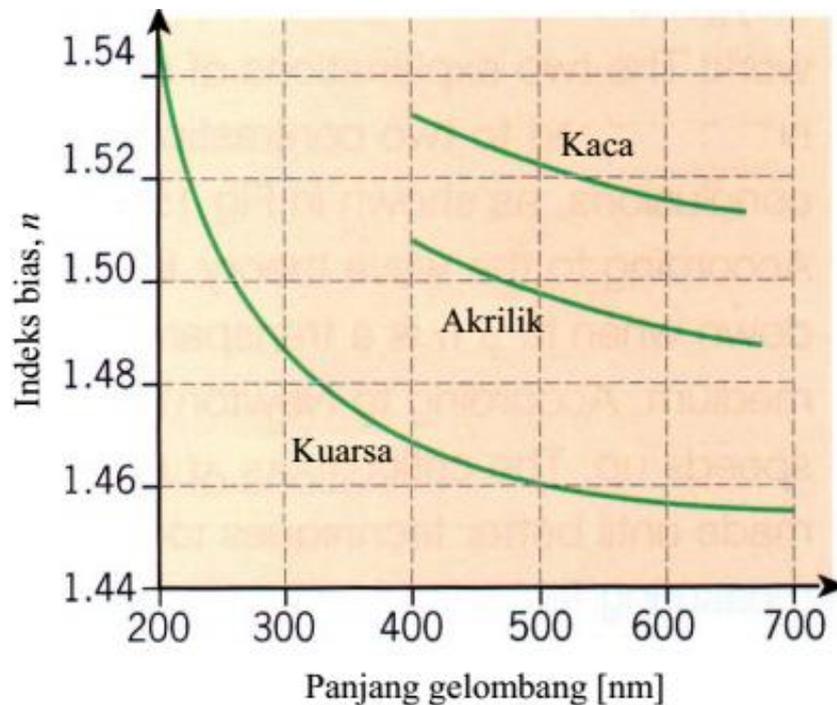
Material	Indeks bias
Intan	2,419
Kuarsa	1,458
Botol glas	1,520
Glas beker	1,474
Es	1,309
Polistiren	1,6

Akrilik	1,49
Etanol	1,361
Gliserol	1,473
Air	1,333
Udara	1,000293
Karbon dioksida	1,00045

A. Indeks bias bergantung pada panjang gelombang cahaya

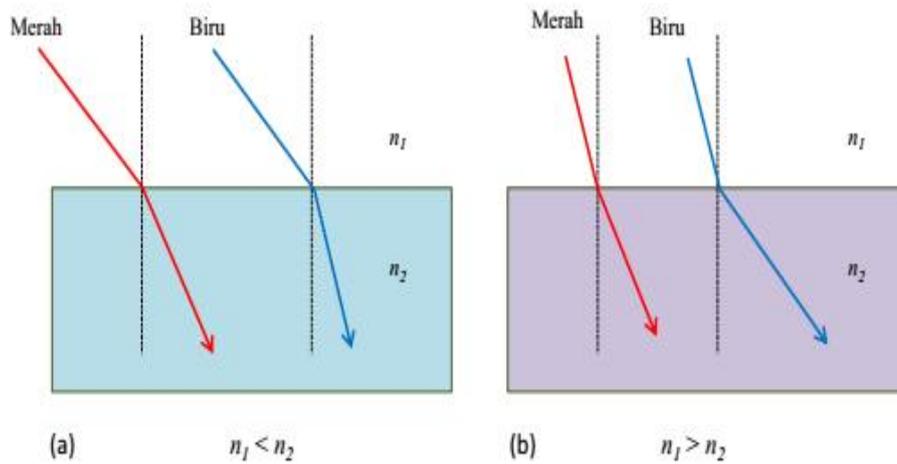
Sesungguhnya indeks bias material bergantung pada panjang gelombang cahaya. Makin kecil panjang gelombang cahaya maka makin besar indeks bias material untuk cahaya tersebut. Indeks bias untuk cahaya biru lebih besar daripada indeks bias untuk cahaya merah.

Gambar 8.1 adalah contoh kebergantungan indeks bias beberapa material terhadap panjang gelombang cahaya.

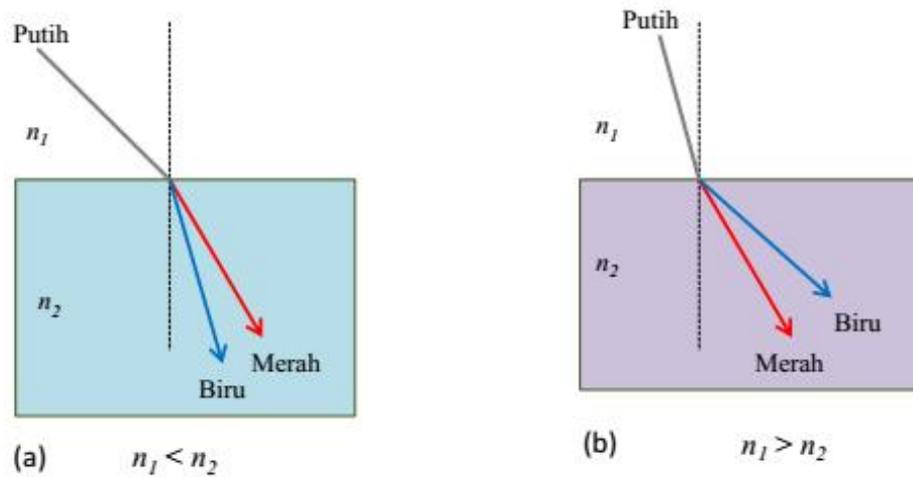


Gambar 8.1 Kebergantungan indeks bias terhadap panjang gelombang untuk beberapa material. Pada kebanyakan material, indeks bias makin kecil jika panjang gelombang makin

besar. Pada material yang sama cahaya ungu memiliki indeks bias lebih besar daripada cahaya merah.



Gambar 8.2 Karena perbedaan indeks bias material untuk cahaya dengan panjang gelombang berbeda maka cahaya biru dan cahaya merah dibiaskan dengan sudut berbeda.



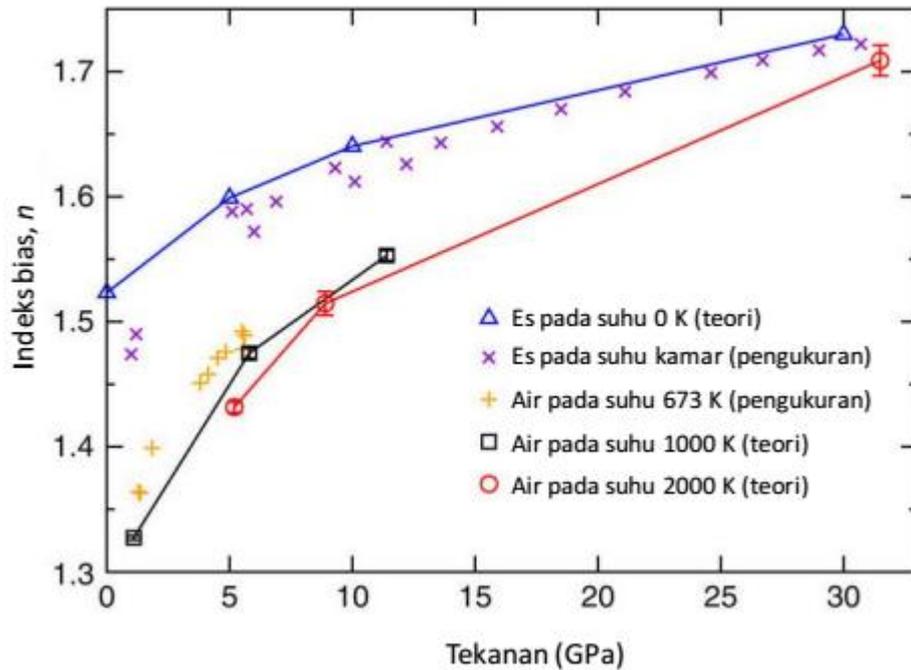
Gambar 8.3 Karena perbedaan indeks bias untuk spectrum cahaya dengan panjang gelombang berbeda maka setelah melewati material transparan, maka cahaya putih terurai atas berkas yang memiliki panjang gelombang berbeda.

Perbedaan indeks bias material untuk cahaya yang memiliki panjang gelombang berbeda-beda menimbulkan beberapa akibat:

- a) Makin pendek panjang gelombang cahaya maka makin kecil laju cahaya dalam material tersebut. Dalam material tertentu, cahaya biru merambat lebih lambat daripada cahaya merah.
- b) Jika jatuh pada bidang batas dua material dengan sudut datang yang sama, maka cahaya dengan panjang gelombang pendek mengalami pembelokan arah lebih besar (**Gambar 8.2**)
- c) Jika cahaya putih jatuh pada bidang batas dua material maka cahaya tersebut akan terurai atas berkas-berkas dengan panjang gelombang yang berbeda-beda karena masing-masing berkas memiliki sudut bias yang berbeda-beda (**Gambar 8.3**).

B. Indeks bias bergantung pada tekanan

Jika material diberi tekanan yang sangat besar (Giga Pascal) maka volume material sedikit mengecil. Jarak antar atom atau molekul pengukur material menjadi lebih kecil sehingga kerapatan atom atau molekul makin besar. Ini berakibat indeks bias material membesar. Fenomena ini hanya dapat diamati ketika memberikan tekanan yang sangat besar. Tekanan yang tidak terlalu besar tidak mengubah volum material secara berarti. Perubahan volum material mulai dapat dideteksi ketika tekanan yang diberikan berada dalam orde giga Pascal. **Gambar 8.4** adalah kebergantungan indeks bias es dan air pada tekanan yang sangat tinggi. Tampak bahwa indeks bias bertambah dengan naiknya tekanan, seperti yang kita duga.



Gambar 8.4 Kebergantungan indeks bias es dan air pada tekanan yang sangat tinggi (D. Pan, Q. Wan and G. Galli, Nature Communications 5, 3919 (2014)

C. Indeks bias zat cair

Indeks bias suatu zat dihasilkan oleh momen dipole atom atau molekul penyusun oleh zat tersebut. Indeks bias bergantung pada berapa nilai momen dipole dan berapa kerapatannya. Makin besar momen dipole dan makin besar kerapatan maka indeks bias makin besar. Kita mengetahui bahwa ketika suhu zat berubah maka zat tersebut akan memuai (jika suhu meningkat) atau mengkerut (jika suhu turun). Kecuali kasus khusus untuk zat dengan koefisien muai termal negative (negative thermal expansion) di mana terjadi kebalikannya, yaitu volume berkurang jika suhu meningkat dan volume bertambah jika suhu menurun. Pemuatan atau pengkerutan disebabkan oleh perubahan jarak antar atom. Ini berarti pula bahwa pemuatan atau pengkerutan menyebabkan perubahan jarak antar momen dipol penyusun zat, atau kerapatan momen dipole penyusun zat berbeda. Akibatnya, indeks bias zat tersebut seharusnya berubah. Benarkah demikian? Benarkah indeks bergantung pada suhu? Jawabannya iya. Khususnya untuk zat cair atau gas, indeks bias bergantung pada suhu. Mengapa demikian? Karena volume zat cair atau gas lebih sensitif terhadap perubahan suhu sehingga indeks bias pun sensitive terhadap perubahan suhu. Pada tekanan tetap, laju perubahan indeks bias zat cair terhadap perubahan suhu diberikan oleh persamaan berikut ini

[C.G. Murphy and S.S. Alpert, Dependence of refractive index temperature coefficient of the thermal expansivity of liquid, American Journal of Physics 39, 834 (1971))

$$\frac{dn}{dT} = -\frac{3}{2} \frac{n(n^2 - 1)}{2n^2 + 1} \beta \quad (8.3)$$

dengan

n adalah indeks bias

β koefisien muai panas volum.

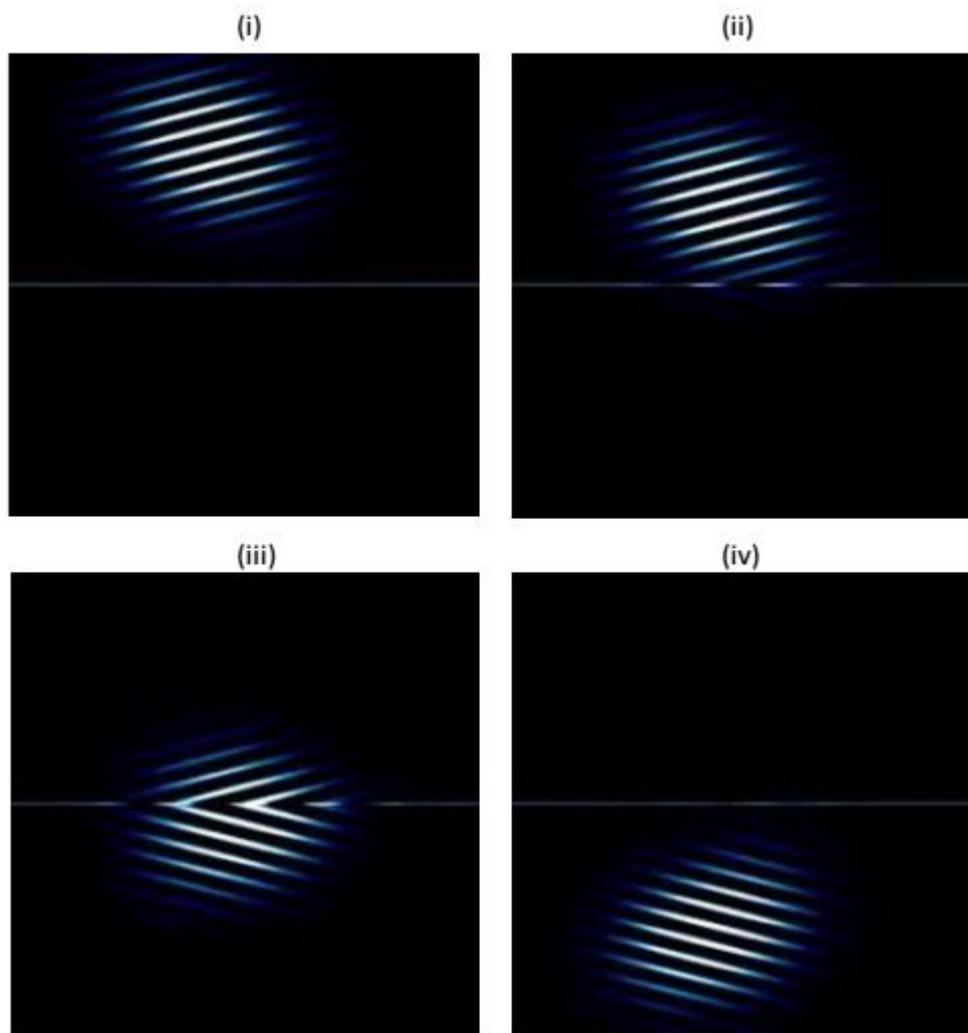
Sebagai contoh, benzene memiliki indeks bias pada suhu 23 °C sebesar 1,503. Koefisien muai termal volum benzene adalah $1,21 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$. Dengan demikian gradient perubahan indeks bias terhadap suhu adalah $-0,000622/^{\circ}\text{C}$.

D. Indeks bias negatif

Indeks bias yang kita kenal selalu bernilai positif dan lebih besar atau sama dengan satu. Indeks bias satu didefinisikan sebagai indeks bias vakuum. Indeks bias udara mendekati satu tapi sedikit lebih besar, seperti ditampilkan pada Tabel 8.1. Namun, para ilmuwan mengamati fenomena yang aneh pada sejumlah material baru yang berhasil dibuat. Fenomena tersebut dapat dijelaskan jika diasumsikan bahwa material tersebut memiliki indeks bias negatif. Material yang berhasil dibuat sering disebut negative-index metamaterial atau negative-index material (NIM). Material ini memiliki indeks bias negatif pada jangkauan frekuensi tertentu. Karena memiliki indeks bias negatif, maka pembiasan cahaya oleh material ini melawan hukum Snell. **Gambar 8.5** adalah ilustrasi pembelokan arah rambat cahaya oleh material yang memiliki indeks bias negatif. Dilustrasikan secara berurutan:

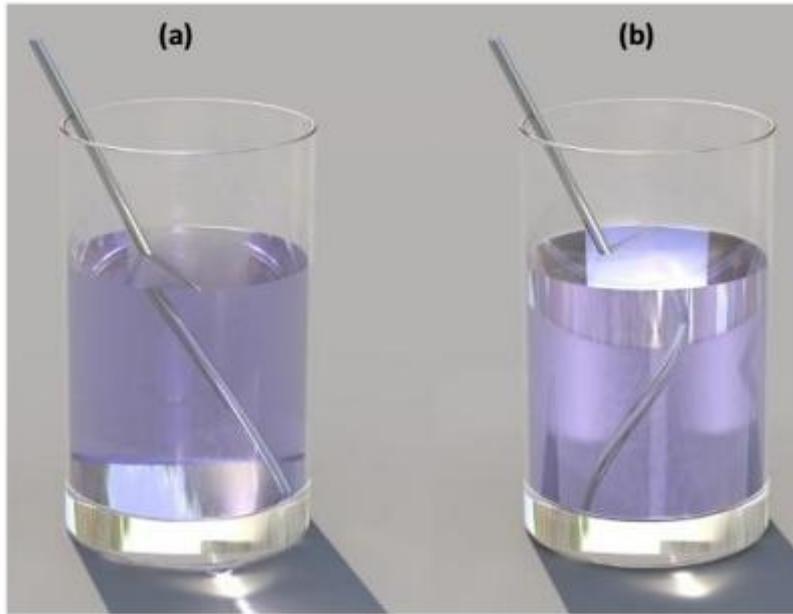
- (i) berkas cahaya datang dari udara,
- (ii) berkas cahaya memasuki bidang batas udara dan material yang memiliki indeks bias negatif,
- (iii) cahaya mengalami pembiasan, dan
- (iv) cahaya merambat dalam material dengan indeks bias negatif.

Tampak sekali perbedaan dengan prediksi hukum Snell. Bagi material dengan indeks bias positif maka arah rambat cahaya dalam material adalah ke arah kanan bawah. Tapi untuk material dengan indeks bias negatif, maka arahnya adalah kiri bawah.



Gambar 8.5 Ilustrasi pembiasan cahaya oleh material dengan indeks bias negatif: (i) berkas cahaya datang dari udara, (ii) berkas cahaya memasuki bidang batas udara dan material yang memiliki indeks bias negatif, (iii) berkas cahaya mengalami pembiasan, dan (iv) berkas cahaya merambat dalam material dengan indeks bias negatif (Wikipedia.org)

Ilustrasi lebih ekstrim lagi tampak pada **Gambar 8.5**. Material bentuk cair dengan indeks bias positif seperti air dan indeks bias negative diisikan ke dalam gelas. Kemudian batang kecil dicelupkan ke dalam material tersebut. Tampak dua batang patah pada bidang batas material dengan udara. Namun, pada material dengan indeks bias positif, orientasi patahan batang dalam material sama dengan orientasi semula (a). Sebaliknya, pada material dengan indeks bias negatif, orientasi patahan di dalam material mengalami pembalikan (b).



Gambar 8.6 Material dengan indeks bias positif dalam bentuk cair dan indeks bias negative dalam bentuk cair juga dimasukkan ke dalam gelas yang sama. Ke dalam dua material dicelupkan batang kecil. Karena mengalami pembiasan maka batang tampak patah di batas dua material. Namun, pada material dengan indeks bias positif, orientasi patahan batang dalam material sama dengan orientasi semula (a). Sebaliknya, pada material dengan indeks bias negatif, orientasi patahan di dalam material mengalami pembalikan (b).

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang bagaimana menentukan indeks bias
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh aplikasi penggunaan indeks bias suatu bahan dan apa manfaatnya diketahui.

RANGKUMAN

1. Umumnya, laju cahaya berbeda jika memasuki material yang berbeda. Oleh karena itu, perlu didefinisikan suatu besaran yang menentukan laju cahaya dalam material. Besaran tersebut disebut indeks bias.

2. Indeks bias, yang memenuhi hubungan

$$n = \frac{c}{c_m}$$

3. Sesungguhnya indeks bias material bergantung pada panjang gelombang cahaya. Makin kecil panjang gelombang cahaya maka makin besar indeks bias material untuk cahaya tersebut. Indeks bias untuk cahaya biru lebih besar daripada indeks bias untuk cahaya merah.
4. Jika material diberi tekanan yang sangat besar (Giga Pascal) maka volume materil sedikit mengecil.
5. Jarak antar atom atau molekul pengukur material menjadi lebih kecil sehingga kerapatan atom atau molekul makin besar.
6. Ini bearkibat indeks bias material membesar. Fenomena ini hanya dapat diamati ketika memberikan tekanan yang sangat besar. Tekanan yang tidak terlalu besar tidak mengubah volum material secara berarti.
7. Indeks bias suatu zat dihasilkan oleh momen dipole atom atau molekul penyusun oleh zat tersebut. Indeks bias bergantung pada berapa nilai momen dipole dan berapa kerapatannya. Makin besar momen dipole dan makin besar kerapatan maka indek bias makin besar. Kita mengetahui bahwa ketika suhu zat berubah maka zat tersebut akan memuai (jika suhu meningkat) atau mengkerut (jika suhu turun).
8. Indeks bias bergantung pada suhu karena volume zat zair atau gas lebih sensitif terhadap perubahan suhu sehingga indeks bias pun sensitive terhadap perubahan suhu.
9. Laju perubahan indeks bias zat cair terhadap perubahan suhu diberikan oleh persamaan berikut ini

$$\frac{dn}{dT} = -\frac{3}{2} \frac{n(n^2 - 1)}{2n^2 + 1} S$$

10. Fenomena yang aneh pada sejumlah material baru yang berhasil dibuat yaitu fenomena yang dapat dijelaskan jika diasumsikan bahwa material tersebut memiliki indeks bias negatif.
11. Material ini memiliki indeks bias negatif pada jangkauan frekuensi tertentu. Karena memiliki indeks bias negatif, maka pembiasan cahaya oleh material ini melawan hukum Snell.

12. Bagi material dengan indeks bias positif maka arah rambat cahaya dalam material adalah ke arah kanan bawah. Tapi untuk material dengan indeks bias negatif, maka arahnya adalah kiri bawah.

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan indeks bias !
2. Jelaskan bagaimana hubungan indeks bias dengan panjang gelombang cahaya!
3. Jelaskan bagaimana hubungan indeks bias dengan kuat tekan yang diberikan !
4. Jelaskan hubungan indeks bias dengan momen dipole atom dari sebuah material !
5. Jelaskan apakah memungkinkan jika indeks bias negatif, dan berikan contohnya !

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Superposisi

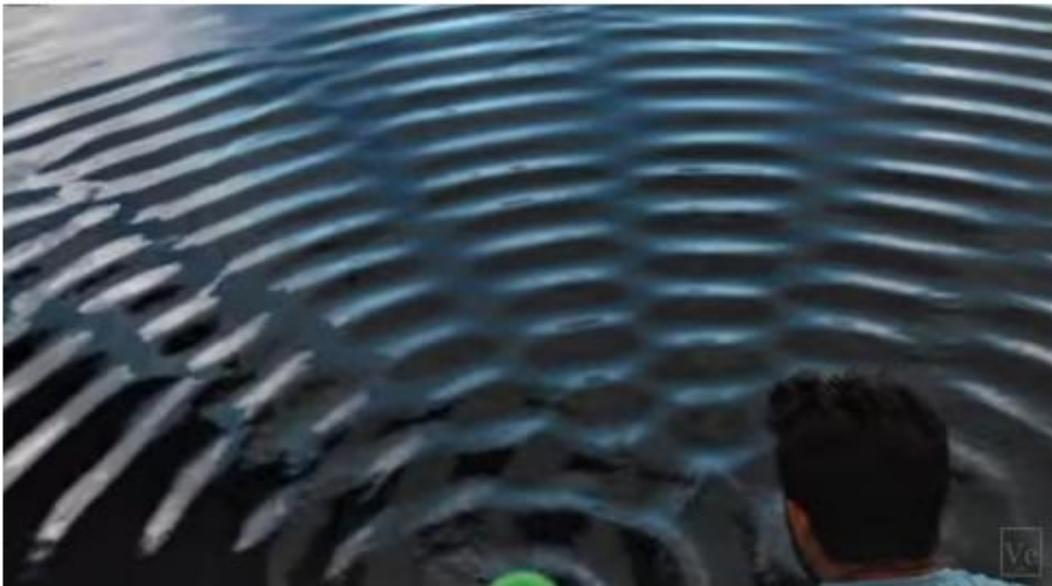
KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai superposisi
2. Mahasiswa mengetahui hubungan interferensi dengan superposisi

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Kita sudah memahami bahwa ketika gelombang merambat maka titik-titik dalam medium menyimpang dari posisi seimbang. Besarnya penyimpangan berubah-ubah antara $-A$ sampai $+A$ dengan A adalah amplitudo gelombang. Apa yang terjadi jika ada dua gelombang yang merambat bersamaan dalam medium tersebut?



Gambar 8.7 Contoh superposisi gelombang permukaan air (youtube.com).

Gelombang pertama akan menyimpangkan titik-titik dalam medium antara $-A$ sampai $+A$. Gelombang kedua juga akan menyimpangkan titik-titik dalam medium antara $-A$ sampai $+A$. Sehingga simpangan total titik-titik dalam medium ketika dua gelombang merambat

bersamaan merupakan jumlah dari simpangan yang dihasilkan oleh masing-masing gelombang. Fenomena ini dikenal dengan **superposisi gelombang**. **Gambar 8.7** adalah contoh hasil superposisi gelombang permukaan air. Jika hanya ada satu sumber gelombang maka gelombang yang dihasilkan memiliki pola lingkaran yang merambat menjauhi sumber. Namun, jika ada dua gelombang muncul bersamaan maka polanya tidak lagi seperti lingkaran sempurna. Ada sebagian lokasi di mana simpangan gelombang saling menguatkan dan ada sebagian lokasi di mana simpangan gelombang saling meniadakan.

A. Superposisi gelombang segaris

Kita mulai dengan pembahasan superposisi gelombang yang merambat pada lintasan yang sama. Contoh gelombang ini adalah gelombang pada tali. Arah rambat gelombang-gelombang segaris hanya ada dua kemungkinan yaitu searah atau berlawanan arah. Secara formal, superposisi gelombang dapat dirumuskan secara matematika berikut ini. Jika ada dua gelombang dengan simpangan $y_1(x,t)$ dan $y_2(x,t)$ merambat bersamaan dalam medium yang sama maka simpangan total titik-titik dalam medium memenuhi

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) \quad (8.4)$$

Jika ada N gelombang yang merambat bersamaan dalam medium yang sama maka simpangan total titik dalam medium memenuhi

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) + \dots + y_N(x,t)$$

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^N y_i(x,t) \quad (8.5)$$

Superposisi Gelombang Sinusoidal. Sekarang kita tinjau gelombang yang bentuknya sederhana, yaitu gelombang sinusoidal. Untuk mudahnya kita hanya batasi pada superposisi dua buah gelombang. Simpangan masing-masing gelombang adalah

$$y_1(x,t) = A_1 \cos(\omega t - kx + \phi_{01}) \quad (8.6)$$

$$y_2(x,t) = A_2 \cos(\omega t - kx + \phi_{02}) \quad (8.7)$$

Superposisi dua gelombang tersebut adalah

$$\begin{aligned}
 y(x,t) &= y_1(x,t) + y_2(x,t) \\
 &= A_1 \cos(\omega t - kx + \phi_{01}) + A_2 \cos(\omega t - kx + \phi_{02})
 \end{aligned}
 \tag{8.8}$$

Kita tinjau kasus sederhana di mana amplitudo, periode dan panjang gelombang kedua gelombang sama, $A_1 = A_2$, $\omega_1 = \omega_2$, dan $k_1 = k_2$. Persamaan (8.8) dapat ditulis

$$y(x,t) = A \{ \cos(\omega t - kx + \phi_{01}) + \cos(\omega t - kx + \phi_{02}) \}$$

Kita gunakan persamaan trigonometri

$$\cos r + \cos s = 2 \cos \frac{r+s}{2} \cos \frac{r-s}{2}$$

dimana

$$\alpha = \omega t - kx + \phi_{01}$$

dan

$$\beta = \omega t - kx + \phi_{02}$$

Maka

$$\begin{aligned}
 \frac{r+s}{2} &= \check{S}t - kx + \left(\frac{\phi_{01} + \phi_{02}}{2} \right) \\
 \frac{r-s}{2} &= \left(\frac{\phi_{01} - \phi_{02}}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Dengan demikian, kita dapat menulis

$$y(x,t) = 2A \cos\left(\frac{\phi_{01} - \phi_{02}}{2}\right) \cos \check{S}t - kx + \left(\frac{\phi_{01} + \phi_{02}}{2}\right) \tag{8.9}$$

Mari kita amati bagaimana bentuk pola gelombang pada berbagai posisi. Kita melakukan pengamatan pada saat tertentu. Untuk mudahnya kita amati pada saat $t = 0$. Pada saat $t = 0$ simpangan gelombang pada berbagai posisi memenuhi persamaan

$$y(x,t) = 2A \cos\left(\frac{\phi_{01} - \phi_{02}}{2}\right) \cos\left(-kx + \left[\frac{\phi_{01} + \phi_{02}}{2}\right]\right)$$

Gambar 8.8 adalah pola gelombang hasil superposisi yang “dipotret” pada saat $t = 0$. Tampak bahwa amplitudo gelombang yang dihasilkan sangat bergantung pada nilai $\phi_{01} - \phi_{02}$ seperti tertuang dalam persamaan di atas. Setelah superposisi, maka gelombang dihasilkan memiliki frekuensi yang sama dengan gelombang semula tetapi amplitudonya berubah menjadi

$$A' = 2A \cos\left(\frac{\phi_{01} - \phi_{02}}{2}\right) \quad (8.10)$$

Jadi, amplitudo gelombang superposisi bergantung pada $\phi_{01} - \phi_{02}$.

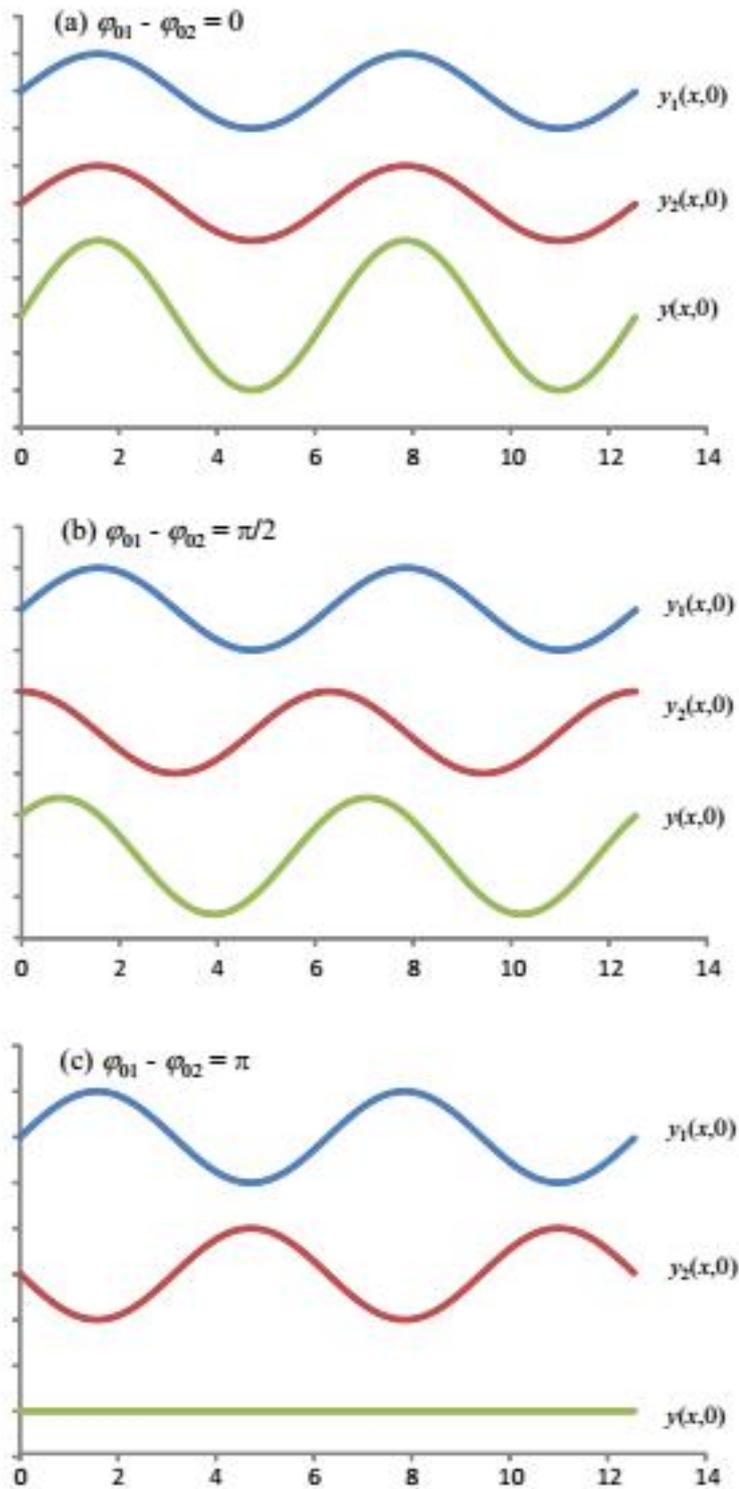
Suatu yang menarik terjadi jika

$$\frac{\phi_{01} - \phi_{02}}{2} = 0 \quad \text{atau} \quad \phi_{01} = \phi_{02}$$

Dengan demikian, $A' = 2A \cos(0) = 2A$. Jika kondisi ini dipenuhi maka amplitudo gelombang superposisi menjadi dua kali amplitudo gelombang semula. Jika kondisi ini dicapai maka dua gelombang dikatakan **sefasa** dan superposisi yang terjadi disebut **superposisi konstruktif**. Kasus menarik lain terjadi jika

$$\frac{\phi_{01} - \phi_{02}}{2} = \frac{f}{2} \quad \text{atau} \quad \phi_{01} = \phi_{02} + f$$

Dengan demikian, $A' = 2A \cos\left(\frac{f}{2}\right) = 0$. Jika kondisi ini dipenuhi maka amplitudo gelombang superposisi nol. Pada kondisi ini kedua gelombang dikatakan **berlawanan fasa** dan superposisi yang terjadi disebut **superposisi destruktif**. Jelas dari penjelasan di atas bahwa interferensi konstruktif atau destruktif sangat bergantung pada beda fasa dua gelombang yang mengalami superposisi. Tetapi perlu diingat bahwa interferensi destruktif hingga amplitudo total nol hanya terjadi jika dua gelombang memiliki amplitudo persis sama. Interferensi destruktif terjadi karena pengurangan simpangan dua gelombang. Pengurangan baru menjadi nol jika amplitudo yang dikurangkan memiliki besar yang sama. Jika amplitudo gelombang yang mengalami superposisi tidak sama maka tidak akan pernah diperoleh amplitudo total nol. Yang akan diamati hanya amplitudo maksimum (ketika fasa dua gelombang sama) dan amplitudo minimum tetapi tidak nol (ketika fasa dua gelombang berlawanan). Lebih lanjut, sebenarnya superposisi tidak hanya untuk dua gelombang, tetapi dapat melibatkan banyak sekali gelombang seperti yang akan kita bahas pada bagian selanjutnya.



Gambar 8.8 (a) adalah superposisi gelombang asal yang memiliki fase sama, (b) adalah superposisi gelombang asal yang memiliki beda fase $\pi/2$, dan (c) adalah superposisi gelombang asal yang memiliki beda fase π .

B. Superposisi Gelombang Umum

Sekarang kita akan bahas superposisi gelombang yang arahnya tidak harus segaris. Arah datang gelombang bebas (tidak harus dalam satu garis yang sama). Kita akan kaji penguatan atau pelemahan simpangan gelombang karena muncul gelombang yang lain pada tempat yang sama dan waktu yang sama. Pada suatu titik dalam medium, gelombang pertama memberikan simpangan pada medium tersebut. Jika ada gelombang kedua yang muncul pada titik yang sama dan pada tempat yang sama maka gelombang kedua juga memberikan simpangan pada medium. Dengan demikian, medium mengalami simpangan yang merupakan jumlah simpangan yang dihasilkan masing-masing gelombang. Inilah fenomena superposisi atau interferensi. Mungkin kita akan menggunakan kata superposisi atau interferensi secara bergiliran. Namun artinya sama. Berapa besar simpangan total medium akan sangat bergantung dari simpangan yang dihasilkan oleh gelombang-gelombang tersebut. Misalnya gelombang-gelombang yang tiba pada medium kebetulan menyimpang dalam arah yang sama maka medium akan mengalami penguatan simpangan. Sebaliknya, jika pada titik tersebut gelombang yang datang kebetulan memiliki arah simpangan yang berlawanan maka simpangan total medium menjadi minimum. Arah simpangan gelombang bergantung pada fase gelombang. Dengan demikian simpangan total yang dihasilkan gelombang-gelombang bergantung pada fase masing-masing gelombang. Jika di suatu titik gelombang-gelombang tersebut memiliki fase yang sama maka terjadi penguatan simpangan di titik tersebut. Sebaliknya jika dua gelombang memiliki fase berlawanan pada suatu titik maka simpangan gelombang tersebut saling melemahkan. Jika dua gelombang memiliki frekuensi, panjang gelombang, dan amplitudo yang sama maka dua gelombang yang memiliki fase berlawanan menghasilkan simpangan total nol. Untuk lebih memahami fenomena interferensi, mari kita lihat interferensi gelombang yang dihasilkan dua sumber seperti diilustrasikan pada **Gambar 8.9**. Dua sumber dengan frekuensi dan bilangan gelombang masing-masing, ω_1 , k_1 , ω_2 , dan k_2 dipancarkan ke segala arah. Kita akan mendeteksi gelombang tersebut pada titik P yang berjarak x_1 dari sumber pertama dan x_2 dari sumber kedua. Simpangan masing-masing gelombang di titik P adalah

$$y_1 = A_1 \cos(\omega_1 t - k_1 x_1 + \phi_1)$$

$$y_2 = A_2 \cos(\omega_2 t - k_2 x_2 + \phi_2)$$

dengan

A_1 adalah amplitude gelombang dari sumber pertama

A_2 adalah amplitude gelombang dari sumber kedua

ω_1 adalah frekuensi sudut gelombang dan sumber pertama

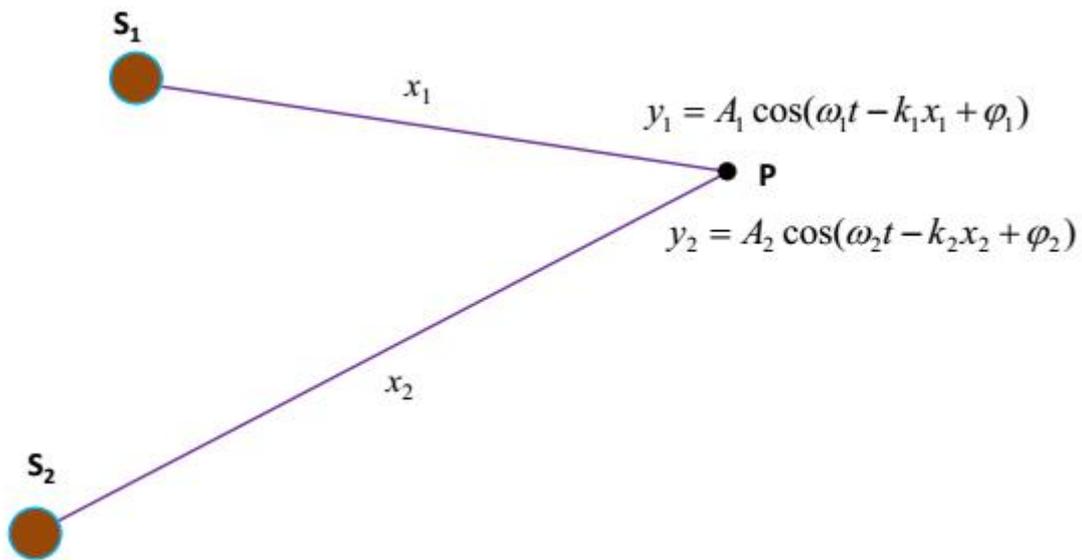
ω_2 adalah frekuensi sudut gelombang dari sumber kedua

k_1 adalah bilangan gelombang dari sumber pertama

k_2 adalah bilangan gelombang dari sumber kedua

φ_1 fase awal gelombang dari sumber pertama

φ_2 fase awal gelombang dari sumber kedua



Gambar 8.9 Gelombang dari dua sumber bertemu di suatu titik pengamatan.

Untuk gelombang yang merambat ke segala arah, amplitude biasanya makin kecil dengan makin jauhnya jaran. Atau amplitude merupakan fungsi jarak. Namun pada kasus ini kita asumsikan bahwa amplitude tidak bergantung pada jarak (selalu konstan) demi penyederhanaan. Asumsi ini dapat di terima jika gelombang yang dipancarkan sumber mendekati gelombang datar. Dengan adanya dua gelombang yang datang bersamaan maka simpangan di titik P menjadi

$$y_P = y_1 + y_2$$

$$= A_1 \cos(\omega_1 t - k_1 x_1 + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t - k_2 x_2 + \varphi_2)$$

Agar lebih sederhana, mari kita anggap dua sumber memiliki frekuensi, panjang gelombang, dan amplitudo yang sama. Yang berbeda hanya panjang lintasan yang ditempuh dan fase awal. Jika sifat ini dipenuhi maka simpangan total di titik P menjadi

$$y_p = A[\cos(\omega t - kx_1 + \phi_1) + \cos(\omega t - kx_2 + \phi_2)]$$

Dengan menggunakan aturan penjumlahan trigonometri maka kita dapat menulis menjadi

$$y_p = 2A \cos\left(\tilde{S}t - k \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{\xi_1 + \xi_2}{2}\right) \cos\left(-k \frac{x_1 - x_2}{2} + \frac{\xi_1 - \xi_2}{2}\right)$$

Yang dapat ditulis juga menjadi

$$y_p = A(x_1 - x_2, \xi_1 - \xi_2) \cos\left(\tilde{S}t - k \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{\xi_1 + \xi_2}{2}\right)$$

dengan

$$A(x_1 - x_2, \xi_1 - \xi_2) = 2A \cos\left(-k \frac{x_1 - x_2}{2} + \frac{\xi_1 - \xi_2}{2}\right)$$

adalah amplitude efektif di titik P. Amplitudo efektif ini bergantung pada selisih panjang lintasan dan selisih fase awal.

Kita akan dapatkan bahwa simpangan di titik P akan selalu maksimum jika amplitude lintasan maksimum dan akan selalu nol jika amplitude efektif nol. Amplitudo efektif di titik P mencapai maksimum jika

$$\cos\left(-k \frac{x_1 - x_2}{2} + \frac{\xi_1 - \xi_2}{2}\right) = \pm 1$$

Dan ini dipenuhi oleh

$$\left(-k \frac{x_1 - x_2}{2} + \frac{\xi_1 - \xi_2}{2}\right) = n\pi$$

dengan $n = 0, 1, 2, \dots$

Sebaliknya, amplitude efektif di titik P selalu nol jika terpenuhi

$$\cos\left(-k \frac{x_1 - x_2}{2} + \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) = 0$$

Atau

$$\cos\left(-k \frac{x_1 - x_2}{2} + \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) = \left(n + \frac{1}{2}\right)f$$

dengan $n = 0, 1, 2, \dots$

Selanjutnya mari kita tulis

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$$

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

$$k = \frac{2f}{\lambda}$$

Amplitudo efektif maksimum tercapai jika

$$\frac{2f}{\lambda} \frac{\Delta x}{2} - \frac{\Delta\phi}{2} = nf$$

Yang memberikan hasil

$$\Delta x = \left(n + \frac{\Delta\phi}{2f}\right)\lambda$$

Pada kondisi ini interferensi dikatakan **interferensi konstruktif**. Amplitudo efektif nol tercapai jika

$$\frac{2f}{\lambda} \frac{\Delta x}{2} - \frac{\Delta\phi}{2} = \left(n + \frac{1}{2}\right)f$$

Yang memberikan hasil

$$\Delta x = \left(n + \frac{1}{2} + \frac{\Delta\phi}{2f}\right)\lambda$$

Pada kondisi ini interferensi dikatakan **interferensi destruktif**. Intensitas gelombang yang dideteksi sebanding dengan kuadrat amplitudo. Dengan demikian, intensitas gelombang superposisi memenuhi $I \propto |A(x_1 - x_2, \{ \}_1 - \{ \}_2)|^2$ atau

$$I \propto A^2 \cos^2 \left(k \frac{\Delta x}{2} - \frac{\Delta \phi}{2} \right)$$

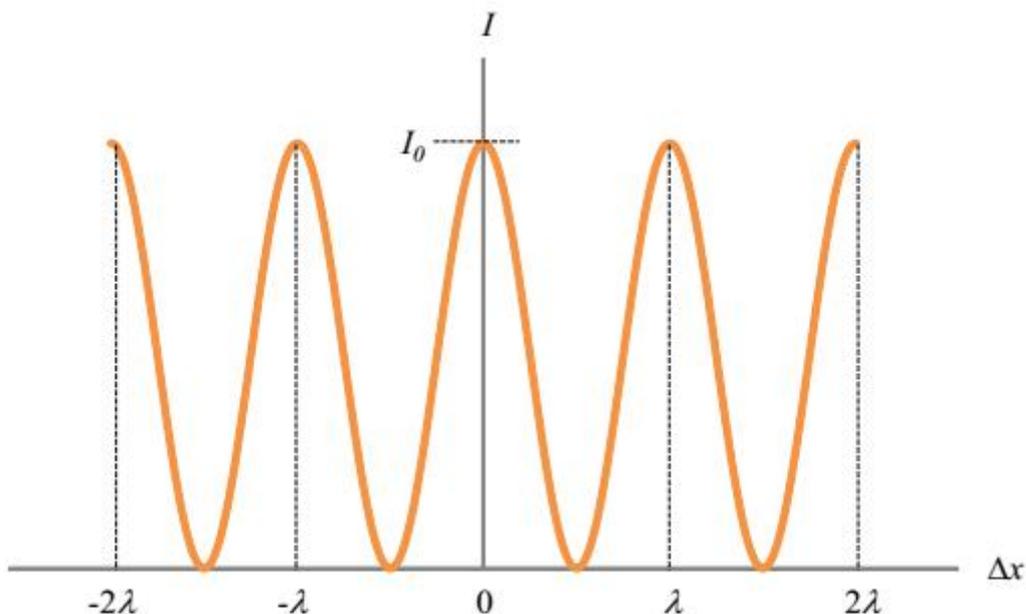
yang dapat ditulis

$$I = I_0 \cos^2 \left(k \frac{\Delta x}{2} - \frac{\Delta \phi}{2} \right)$$

Gambar 8.10 adalah plot intensitas sebagai fungsi Δx dengan mengambil kasus khusus $\Delta \phi = 0$ (fase awal dua gelombang sama). Kita juga mengganti $k = 2\pi/\lambda$ sehingga dapat menulis

$$I = I_0 \cos^2 \left(\pi \frac{\Delta x}{\lambda} \right)$$

Intensitas berubah maksimum dan minimum secara periodic dengan periode persis sama dengan panjang gelombang.



Gambar 8.10 Intensitas gelombang hasil superposisi dua gelombang yang memiliki amplitudo, frekuensi, dan panjang gelombang yang sama

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang superposisi dan jenis nya.
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang hubungan superposisi dengan interferensi.

RANGKUMAN

1. Simpangan total titik-titik dalam medium ketika dua gelombang merambat bersamaan merupakan jumlah dari simpangan yang dihasilkan oleh masing-masing gelombang. Fenomena ini dikenal dengan **superposisi gelombang**.
2. Jika hanya ada satu sumber gelombang maka gelombang yang dihasilkan memiliki pola lingkaran yang merambat menjauhi sumber. Namun, jika ada dua gelombang muncul bersamaan maka polanya tidak lagi seperti lingkaran sempurna.
3. Ada sebagian lokasi di mana simpangan gelombang saling menguatkan dan ada sebagian lokasi di mana simpangan gelombang saling meniadakan.
4. Superposisi gelombang yang merambat pada lintasan yang sama. Contoh gelombang ini adalah gelombang pada tali. Arah rambat gelombang-gelombang sejaris hanya ada dua kemungkinan yaitu searah atau berlawanan arah.
5. Interferensi konstruktif atau destruktif sangat bergantung pada beda fasa dua gelombang yang mengalami superposisi. Tetapi perlu diingat bahwa interferensi destruktif hingga amplitudo total nol hanya terjadi jika dua gelombang memiliki amplitudo persis sama.
6. Interferensi destruktif terjadi karena pengurangan simpangan dua gelombang. Pengurangan baru menjadi nol jika amplitudo yang dikurangkan memiliki besar yang sama.
7. Jika amplitudo gelombang yang mengalami superposisi tidak sama maka tidak akan pernah diperoleh amplitudo total nol. Yang akan diamati hanya amplitudo maksimum (ketika fasa dua gelombang sama) dan amplitudo minimum tetapi tidak nol (ketika fasa dua gelombang berlawanan).
8. Arah datang gelombang bebas (tidak harus dalam satu garis yang sama).

9. Jika ada gelombang kedua yang muncul pada titik yang sama dan pada tempat yang sama maka gelombang kedua juga memberikan simpangan pada medium. Dengan demikian, medium mengalami simpangan yang merupakan jumlah simpangan yang dihasilkan masing-masing gelombang. Inilah fenomena superposisi atau interferensi. Mungkin kita akan menggunakan kata superposisi atau interferensi secara bergiliran.
10. Jika pada titik tersebut gelombang yang datang kebetulan memiliki arah simpangan yang berlawanan maka simpangan total medium menjadi minimum.
11. Arah simpangan gelombang bergantung pada fase gelombang. Dengan demikian simpangan total yang dihasilkan gelombang-gelombang bergantung pada fase masing-masing gelombang.
12. Jika di suatu titik gelombang-gelombang tersebut memiliki fase yang sama maka terjadi penguatan simpangan di titik tersebut. Sebaliknya jika dua gelombang memiliki fase berlawanan pada suatu titik maka simpangan gelombang tersebut saling melemahkan.
13. Jika dua gelombang memiliki frekuensi, panjang gelombang, dan amplitudo yang sama maka dua gelombang yang memiliki fase berlawanan menghasilkan simpangan total nol.

EVALUASI FORMATIF 2

1. Jelaskan bagaimana fenomena superposisi !
2. Gambarkan contoh aplikasi fenomena superposisi dan jelaskan secara singkat !
3. Jelaskan superposisi pada gelombang tali !
4. Jelaskan superposisi dengan arah datang gelombang bebas !
5. Jelaskan bagaimana fenomena superposisi konstruktif dan gambarkan!
6. Jelaskan bagaimana fenomena superposisi destruktif dan gambarkan!
7. Jelaskan bagaimana fenomena interferensi destruktif dan gambarkan!
8. Jelaskan bagaimana fenomena interferensi konstruktif dan gambarkan!

Lembar Kerja Praktek 2

RANGKUMAN MODUL

1. Umumnya, laju cahaya berbeda jika memasuki material yang berbeda. Oleh karena itu, perlu didefinisikan suatu besaran yang menentukan laju cahaya dalam material. Besaran tersebut disebut indeks bias.
2. Indeks bias, yang memenuhi hubungan

$$n = \frac{c}{c_m}$$

3. Sesungguhnya indeks bias material bergantung pada panjang gelombang cahaya. Makin kecil panjang gelombang cahaya maka makin besar indeks bias material untuk cahaya tersebut. Indeks bias untuk cahaya biru lebih besar daripada indeks bias untuk cahaya merah.
4. Jika material diberi tekanan yang sangat besar (Giga Pascal) maka volume materil sedikit mengecil.
5. Jarak antar atom atau molekul pengukur material menjadi lebih kecil sehingga kerapatan atom atau molekul makin besar.
6. Ini bearkibat indeks bias material membesar. Fenomena ini hanya dapat diamati ketika memberikan tekanan yang sangat besar. Tekanan yang tidak terlalu besar tidak mengubah volum material secara berarti.
7. Indeks bias suatu zat dihasilkan oleh momen dipole atom atau molekul penyusun oleh zat tersebut. Indeks bias bergantung pada berapa nilai momen dipole dan berapa kerapatannya. Makin besar momen dipole dan makin besar kerapatan maka indek bias makin besar. Kita mengetahui bahwa ketika suhu zat berubah maka zat tersebut akan memuai (jika suhu meningkat) atau mengkerut (jika suhu turun).
8. Indeks bias bergantung pada suhu karena volume zat zair atau gas lebih sensitif terhadap perubahan suhu sehingga indeks bias pun sensitive terhadap perubahan suhu.
9. Laju perubahan indeks bias zat cair terhadap perubahan suhu diberikan oleh persamaan berikut ini

$$\frac{dn}{dT} = -\frac{3}{2} \frac{n(n^2 - 1)}{2n^2 + 1} S$$

10. Fenomena yang aneh pada sejumlah material baru yang berhasil dibuat yaitu fenomena yang dapat dijelaskan jika diasumsikan bahwa material tersebut memiliki indeks bias negatif.
11. Material ini memiliki indeks bias negatif pada jangkauan frekuensi tertentu. Karena memiliki indeks bias negatif, maka pembiasan cahaya oleh material ini melawan hukum Snell.
12. Bagi material dengan indeks bias positif maka arah rambat cahaya dalam material adalah ke arah kanan bawah. Tapi untuk material dengan indeks bias negatif, maka arahnya adalah kiri bawah.
13. Simpangan total titik-titik dalam medium ketika dua gelombang merambat bersamaan merupakan jumlah dari simpangan yang dihasilkan oleh masing-masing gelombang. Fenomena ini dikenal dengan **superposisi gelombang**.
14. Jika hanya ada satu sumber gelombang maka gelombang yang dihasilkan memiliki pola lingkaran yang merambat menjauhi sumber. Namun, jika ada dua gelombang muncul bersamaan maka polanya tidak lagi seperti lingkaran sempurna.
15. Ada sebagian lokasi di mana simpangan gelombang saling menguatkan dan ada sebagian lokasi di mana simpangan gelombang saling meniadakan.
16. Superposisi gelombang yang merambat pada lintasan yang sama. Contoh gelombang ini adalah gelombang pada tali. Arah rambat gelombang-gelombang sejaris hanya ada dua kemungkinan yaitu searah atau berlawanan arah.
17. Interferensi konstruktif atau destruktif sangat bergantung pada beda fasa dua gelombang yang mengalami superposisi. Tetapi perlu diingat bahwa interferensi destruktif hingga amplitudo total nol hanya terjadi jika dua gelombang memiliki amplitudo persis sama.
18. Interferensi destruktif terjadi karena pengurangan simpangan dua gelombang. Pengurangan baru menjadi nol jika amplitudo yang dikurangkan memiliki besar yang sama.
19. Jika amplitudo gelombang yang mengalami superposisi tidak sama maka tidak akan pernah diperoleh amplitudo total nol. Yang akan diamati hanya amplitudo maksimum (ketika fasa dua gelombang sama) dan amplitudo minimum tetapi tidak nol (ketika fasa dua gelombang berlawanan).
20. Arah datang gelombang bebas (tidak harus dalam satu garis yang sama).
21. Jika ada gelombang kedua yang muncul pada titik yang sama dan pada tempat yang sama maka gelombang kedua juga memberikan simpangan pada medium. Dengan demikian,

medium mengalami simpangan yang merupakan jumlah simpangan yang dihasilkan masing-masing gelombang. Inilah fenomena superposisi atau interferensi. Mungkin kita akan menggunakan kata superposisi atau interferensi secara bergiliran.

22. Jika pada titik tersebut gelombang yang datang kebetulan memiliki arah simpangan yang berlawanan maka simpangan total medium menjadi minimum.
23. Arah simpangan gelombang bergantung pada fase gelombang. Dengan demikian simpangan total yang dihasilkan gelombang-gelombang bergantung pada fase masing-masing gelombang.
24. Jika di suatu titik gelombang-gelombang tersebut memiliki fase yang sama maka terjadi penguatan simpangan di titik tersebut. Sebaliknya jika dua gelombang memiliki fase berlawanan pada suatu titik maka simpangan gelombang tersebut saling melemahkan.
25. Jika dua gelombang memiliki frekuensi, panjang gelombang, dan amplitudo yang sama maka dua gelombang yang memiliki fase berlawanan menghasilkan simpangan total nol.

DAFTAR PUSTAKA

Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi

Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing

Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I

Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.

<http://3.bp.blogspot.com/Reflektor+Bundar.jpg>

<https://www.google.com/pemantulan-cahaya-pada-cermin-cembung>

<https://belfis.wordpress.com/cermin-cekung-parabola>

Modul 9:

Interferensi Cahaya

PENDAHULUAN

Percobaan tentang interferensi celah ganda pada cahaya merupakan percobaan monumental yang dilakukan Thomas Young. Karena sejak saat itulah konsep tentang gelombang cahaya diterima secara utuh. Sebelum percobaan Young, konsep gelombang cahaya belum diterima oleh semua ilmuwan karena tidak ada eksperimen yang secara langsung membuktikan sifat gelombang cahaya. Akibatnya, teori partikel cahaya yang dirumuskan oleh Newton masih diterima sebagian orang.

Kesulitan dalam melakukan eksperimen tersebut muncul akibat panjang gelombang cahaya yang terlalu pendek dan peralatan yang ada saat itu tidak mendukung untuk mengukur panjang gelombang cahaya secara langsung. Saat ini, panjang gelombang cahaya bukan lagi nilai yang sangat kecil. Orang bahkan sudah mampu mengukur panjang hingga ribuan kali lebih kecil daripada panjang gelombang cahaya.

Kegiatan Pembelajaran 1: Interferensi Celah Ganda

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai Interferensi Celah Ganda
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman aplikasi Interferensi Celah Ganda dalam kehidupan sehari-hari dan mampu mengerjakan latihannya

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Skema percobaan interferensi celah ganda yang dilakukan Young diperlihatkan pada gambar 9.1. Young menggunakan sumber monokromatik S . Di depan sumber terdapat dua celah S_1 dan S_2 yang memiliki jarak persis sama dari sumber. Dengan demikian, fase gelombang pada S_1 dan pada S_2 tepat sama. Dengan prinsip Huygens, celah S_1 dan S_2 berperan sebagai sumber gelombang baru. Pola interferensi diamati pada layar yang berjarak L dari celah.

Seperti sudah kita bahas pada bab terdahulu, interferensi konstruktif terjadi jika selisih jarak tempuh gelombang dari dua sumber merupakan kelipatan bulat dari panjang gelombang. Sedangkan interferensi destruktif terjadi jika selisih jarak tempuh gelombang dari dua sumber merupakan kelipatan ganjil dari setengah panjang gelombang.

Berkas cahaya dari sumber S_1 dan S_2 memenuhi berbentuk sebagai berikut.

$$y_1 = A \cos (\check{S}t - kr_1 + \{_0)$$

$$y_2 = A \cos (\check{S}t - kr_1 + \{_0)$$

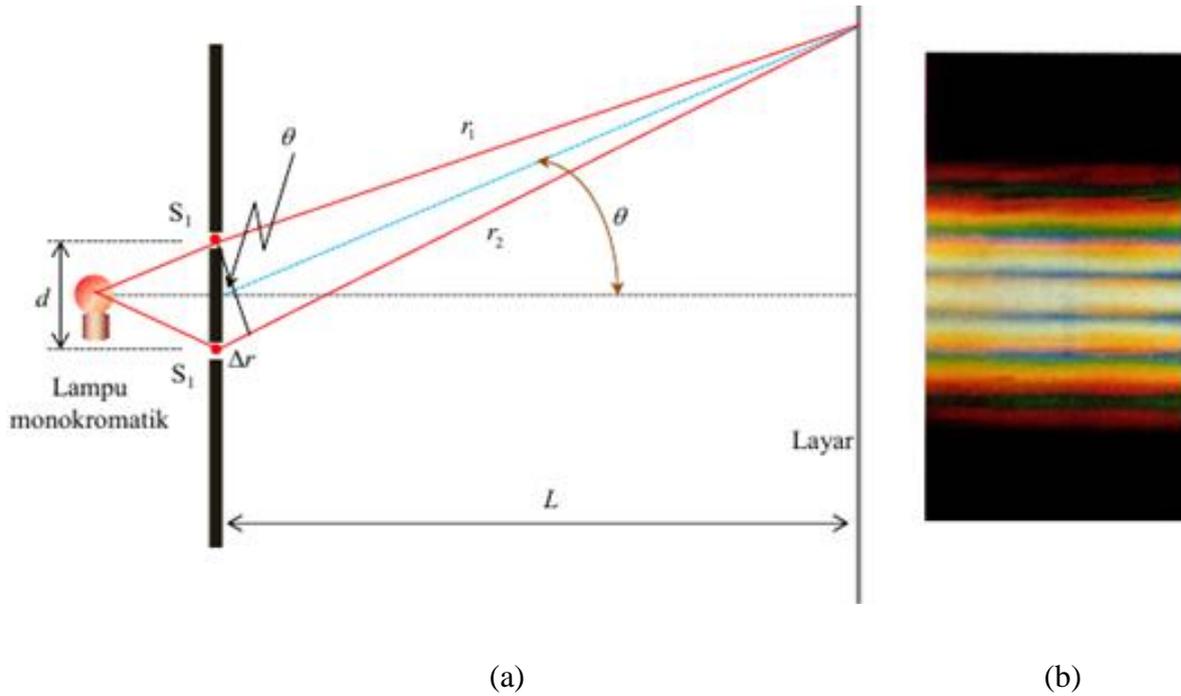
Kedua berkas memiliki fase awal yang sama karena berasal dari lampu yang sama. Dua berkas hanya berbeda dalam jarak tempuh. Kita dapat juga menulis gelombang dari sumber kedua sebagai berikut.

$$y_2 = A \cos (\check{S}t - kr_2 + \{_0 + k\Delta r)$$

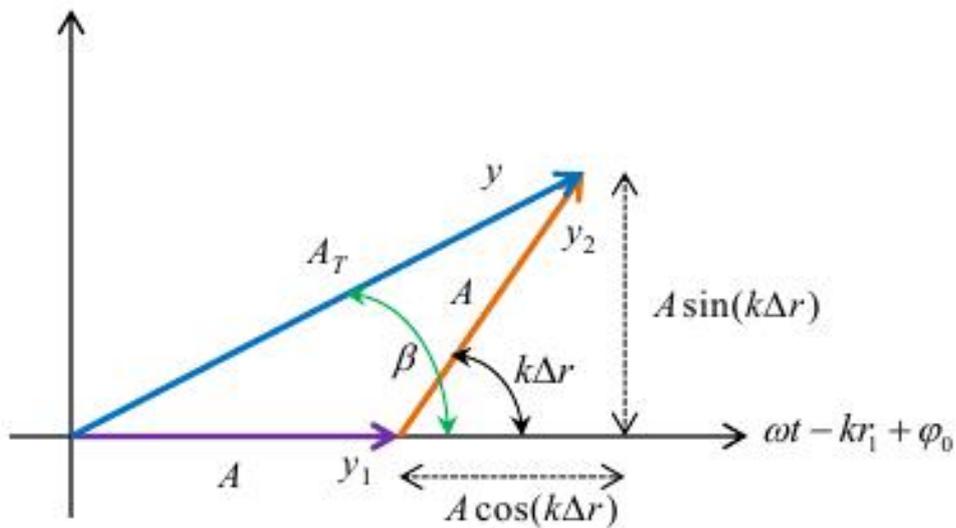
di mana

$$\Delta r = r_1 - r_2$$

Merupakan selisih jarak tempuh cahaya dari sumber S_1 dan sumber S_2 .



Gambar 9.1 (a) Skema eksperimen interferensi celah ganda oleh Young dan (b) contoh pola Gelap terang yang terbentuk pada layar.



Gambar 9.2 Diagram fasor untuk menjumlahkan dua gelombang pada persamaan 9.1

Sesampai di layar, gua gelombang mengalami superposisi sehingga menghasilkan simpangan total.

$$y = y_1 - y_2$$

$$y = A \cos(\check{S}t - kr_1 + \{\}_0) + A \cos(\check{S}t - kr_2 + \{\}_0 + k\Delta r) \quad (9.1)$$

Untuk melakukan penjumlahan ini kita gunakan diagram fasor seperti pada gambar 9.2. Kita pilih sumbu datar berkaitan dengan fase $\check{S}t - kr_1 + \{\}_0$. Dengan pemilihan ini maka gelombang y_1 mengarah ke sumbu datar dan gelombang y_2 menyimpang dari sumbu datar dengan sudut $k\Delta r$.

Mudah kita tunjukkan bahwa

$$\begin{aligned} A_T^2 &= (A + A \cos(k\Delta r))^2 + (A \sin(k\Delta r))^2 \\ A_T^2 &= A^2 + 2A^2 \cos(k\Delta r) + A^2 \cos^2(k\Delta r) + A^2 \sin^2(k\Delta r) \\ A_T^2 &= 2A^2 [1 + \cos(k\Delta r)] \\ A_T^2 &= 2A^2 \left[2 \cos^2\left(\frac{k\Delta r}{2}\right) \right] \\ 2A^2 &= 4A^2 \cos^2\left(\frac{k\Delta r}{2}\right) \end{aligned}$$

atau

$$A_T = 2A \cos\left(\frac{k\Delta r}{2}\right) \quad (9.2)$$

Bentuk umum gelombang yang dihasilkan adalah

$$y = A_T \cos(\check{S}t - kr_1 + \{\}_0 + S)$$

dan

$$\tan S = \frac{A \sin k\Delta r}{A + A \cos k\Delta r} = \frac{\sin k\Delta r}{1 + \cos k\Delta r}$$

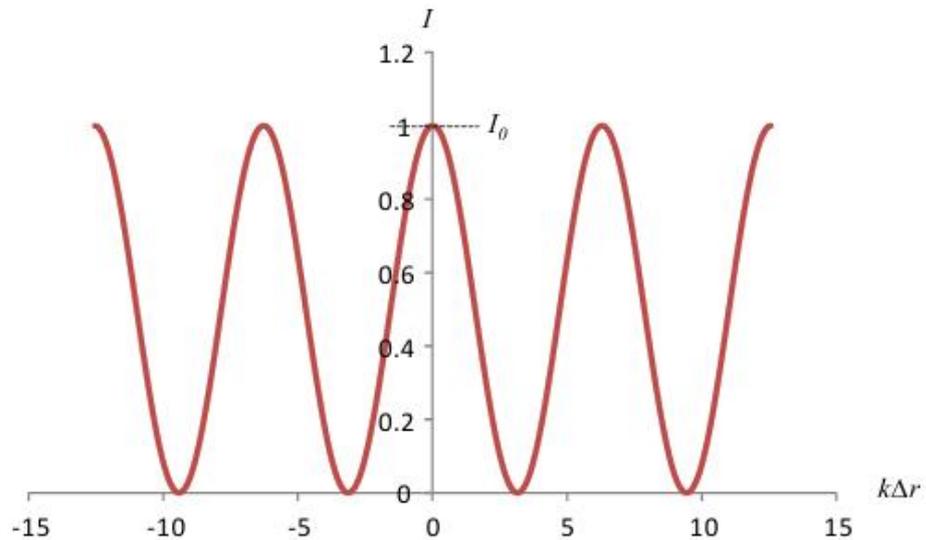
Intensitas cahaya yang dihasilkan pada layar sebanding dengan kuadrat amplitudo gelombang hasil superposisi, atau

$$I \propto |A_T|^2$$

Yang dapat ditulis

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{k\Delta r}{2}\right) \quad (9.3)$$

Gambar 9.3 adalah plot I sebagai fungsi $k\Delta r$. Tampak bahwa I mencapai maksimum saat $k\Delta r = 0$, dan maksimum serta minimum bergantian dengan spasi yang sama. Di manakah lokasi maksimum dan minimum?



Gambar 9.3 Plot I sebagai fungsi $k\Delta r$

Sekarang kita akan mencari lokasi maksimum dan minimum interferensi tersebut. Dengan mengaku pada persamaan (9.3), interferensi maksimum terjadi ketika

$$\cos^2\left(\frac{k\Delta r}{2}\right) = 1$$

atau

$$\cos\left(\frac{k\Delta r}{2}\right) = \pm 1$$

Hubungan ini dipenuhi oleh

$$\frac{k\Delta r}{2} = 0, f, 2f, 3f$$

Berdasarkan gambar 9.3 kita dapat menulis

$$\Delta r = d \sin \theta$$

Dengan mengingat definisi $k = 2\pi/\lambda$ maka syarat interferensi maksimum adalah

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \frac{d \sin \theta}{2} = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda$$

Yang menghasilkan

$$d \sin \theta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda, \dots \quad (9.4)$$

Dengan mengacu pada persamaan (3.3), interferensi minimum terjadi ketika

$$\cos^2\left(\frac{k\Delta r}{2}\right) = 0$$

Kesamaan ini dipenuhi oleh

$$\frac{k\Delta r}{2} = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$$

atau

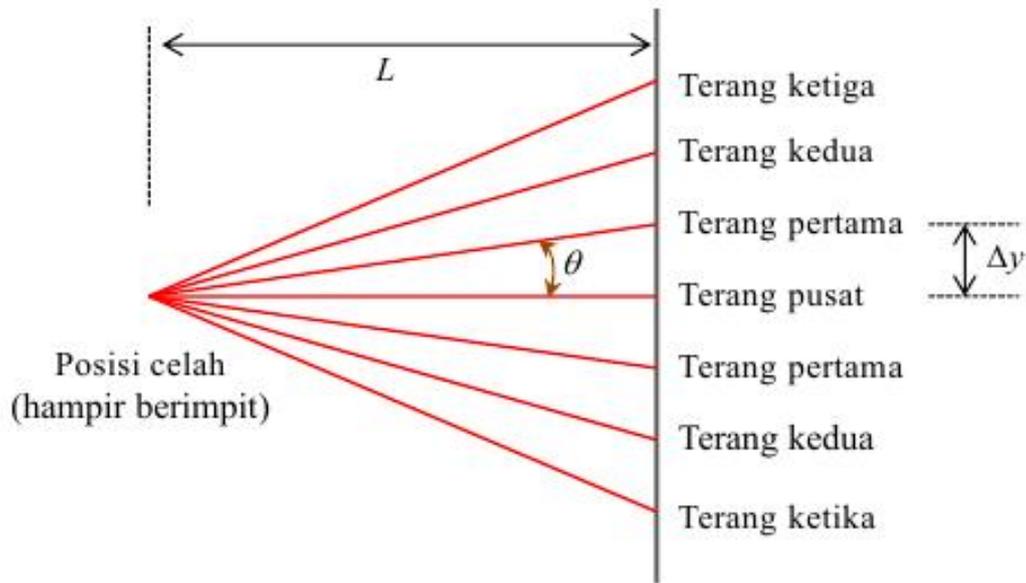
$$\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \frac{d \sin \theta}{2} = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$$

yang menghasilkan

$$d \sin \theta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots \quad (9.5)$$

Jarak antara dua garis berdekatan

Berapa jarak antara dua garis terang berdekatan atau dua garis gelap berdekatan yang terbentuk pada layar? Jarak dua garis terang berdekatan sama dengan jarak antara dua garis gelap berdekatan. Mari kita hitung jarak antara dua garis terang berdekatan.



Gambar 9.4 Lokasi garis terang dan gelap pada layar.

Perhatikan gambar 9.4. Garis terang pertama (yaitu garis terang pusat) berada pada sudut yang memenuhi

$$d \sin \theta = 0$$

atau

$$\theta = 0$$

Garis terang berikutnya berada pada sudut yang memenuhi

$$d \sin \theta = \lambda$$

atau

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{d} \quad (9.6)$$

$$\frac{\Delta y}{L} = \tan \theta$$

atau

$$\Delta y = L \tan \theta$$

Pada percobaan interferensi dua celah, umumnya nilai θ sangat kecil. Ini sesuai dengan kenyataan bahwa arah rambat cahaya menuju celah hampir sejajar garis datar. Memang ada sedikit penyimpangan dari arah datar tersebut, tetapi pembelokannya sangat kecil. Oleh karena itu jarak latar ke celah pada percobaan interferensi harus cukup jauh sehingga pembelokan arah rambat cahaya pada interferensi orde pertama, kedua, ketiga dan seterusnya masih menghasilkan perbedaan lokasi jatuh pada layar. Untuk θ yang sangat kecil berlaku hubungan

$$\tan \theta \cong \sin \theta$$

Dengan aproksimasi ini maka jarak antar dua garis terang berdekatan atau dua garis gelap berdekatan adalah

$$\Delta y \cong L \sin \theta$$

Substitusi persamaan (9.6) ke dalam persamaan di atas maka diperoleh

$$\Delta y \cong L \frac{\lambda}{d} \quad (9.7)$$

Contoh Soal 9.1:

Suatu pelat mengandung dua celah yang berjarak 0,1 mm. Pelat tersebut berjarak 1,2 m dari layar. Cahaya dengan panjang gelombang 500 nm jatuh pada celah dan membentuk pola interferensi pada layar. Berapakah jarak antar dua garis maksimum berdekatan pada layar?

Jawaban :

Dengan menggunakan persamaan (9.7) maka jarak antar dua garis terang adalah

$$\Delta y \cong L \frac{\lambda}{d} = 2,4 \times \frac{5 \times 10^{-7}}{10^{-4}} = 0,012 \text{ m} = 12 \text{ mm}$$

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang Interferensi Celah Ganda
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh soal Interferensi Celah Ganda

RANGKUMAN

1. Interferensi konstruktif terjadi jika selisih jarak tempuh gelombang dari dua sumber merupakan kelipatan bulat dari panjang gelombang.
2. Interferensi destruktif terjadi jika selisih jarak tempuh gelombang dari dua sumber merupakan kelipatan ganjil dari setengah panjang gelombang.
3. Syarat interferensi maksimum adalah $d \sin \theta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda, \dots$
4. Syarat interferensi minimum adalah $d \sin \theta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$
5. Jarak antar dua garis terang berdekatan atau dua garis gelap berdekatan adalah

$$\Delta y \cong L \frac{\lambda}{d}$$

6. Pada percobaan interferensi dua celah, umumnya nilai θ sangat kecil. Ini sesuai dengan kenyataan bahwa arah rambat cahaya menuju celah hampir sejajar garis datar.

EVALUASI FORMATIF 1

1. Apa yang di maksud Interferensi Konstruktif?
2. Apa yang di maksud Interferensi Destruktif?
3. Suatu pelat mengandung dua celah yang berjarak 0,1 mm. Pelat tersebut berjarak 1,5 m dari layar. Cahaya dengan panjang gelombang 300 nm jatuh pada celah dan membentuk pola interferensi pada layar. Berapakah jarak antar dua garis maksimum berdekatan pada layar?

4. Suatu pelat mengandung dua celah yang berjarak 10 mm. Pelat tersebut berjarak 1,2 m dari layar. Cahaya dengan panjang gelombang 500 nm jatuh pada celah dan membentuk pola interferensi pada layar. Berapakah jarak antar dua garis gelap berdekatan pada layar?

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Interferensi oleh Celah Banyak

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami tentang interferensi oleh celah banyak
2. Mahasiswa mampu menjelaskan aplikasi tentang interferensi oleh celah banyak dalam kehidupan sehari-hari

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Interferensi oleh celah banyak (kisi)

Garis terang-gelap yang terbentuk makin sempit jika dua celah diganti dengan kisi yang mengandung sejumlah celah. Makin banyak jumlah celah maka makin sempit garis gelap terang yang terbentuk. Kisi adalah goresan celah sempit sejajar yang jumlahnya banyak. Dengan menggunakan kisi maka cahaya yang memiliki beda panjang gelombang sedikit saja dapat dipisahkan. Itu sebabnya, kisi sering digunakan sebagai monokromator, yaitu alat yang digunakan untuk memisahkan warna tertentu dari cahaya putih.

Disamping garis-garis terang-gelap yang makin sempit, intensitas garis terang yang dihasilkan kisi lebih tajam. Jika jumlah celah N maka lebar garis terang memenuhi

$$\text{Lebar} \propto \frac{1}{N}$$

Sedangkan intensitas memenuhi

$$\text{Intensitas} \propto N^2$$

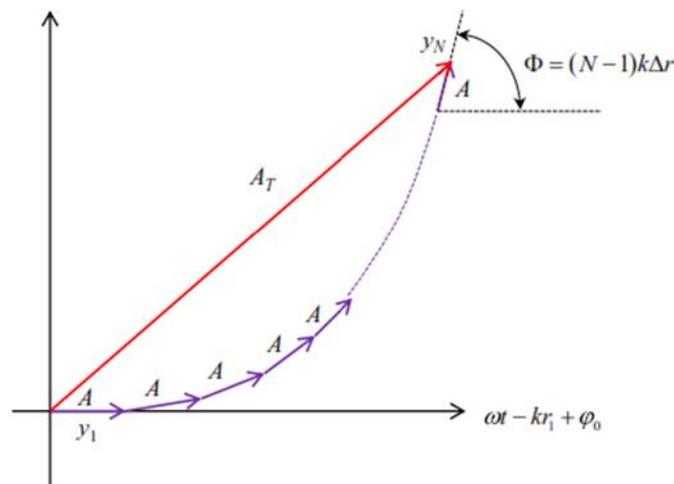
Secara matematik, pola intensitas yang dihasilkan akibat interferensi kisi. Diasumsikan bahwa semua celah memiliki spasi yang sama, d . Simpangan dititik pengamatan yang dihasilkan oleh masing – masing sumber adalah

$$\begin{aligned}
 y_1 &= A \cos (\check{S}t - kr_1 + \{_0) \\
 y_2 &= A \cos (\check{S}t - kr_2 + \{_0) = A \cos (\check{S}t - kr_1 + \{_0 + k\Delta r) \\
 y_3 &= A \cos (\check{S}t - kr_3 + \{_0) = A \cos (\check{S}t - kr_1 + \{_0 + 2k\Delta r) \\
 y_N &= A \cos (\check{S}t - kr_1 + \{_0 + (N - 1)k\Delta r)
 \end{aligned}$$

Simpangan total dititik pengamatan adalah

$$y = y_1 + y_2 + \dots + y_N$$

Untuk penentuan hasil penjumlahan N buah gelombang diatas, digunakan diagram fasor. Pilih sumbu datar berkaitan dengan fase $\check{S}t - kr_1$. Dengan pemilihan ini maka gelombang y_1 berarah vertikal, gelombang y_2 membentuk sudut $k\Delta r$ dengan arah vertikal, gelombang y_3 membentuk sudut $2k\Delta r$ terhadap arah vertikal. Dan seterusnya, hingga gelombang ke D membentuk sudut $(N - 1)k\Delta r$ terhadap arah vertikal. Panjang setiap segmen sama, yaitu A . Gambar 9.5 adalah penempatan gelombang-gelombang tersebut dalam diagram fasor. Amplitudo total adalah A_T . Kita perlu mencari amplitudo total ini karena amplitudo total berbanding lurus dengan intensitas interferensi.



Gambar 9.5 Diagram fasor untuk menentukan penjumlahan $y = y_1 + y_2 + \dots + y_N$

Pertama hitung panjang komponen horizontal dan vertikal dari amplitudo total. Disingkat $u = k\Delta r$. Jelas dari gambar 9.5, panjang komponen horizontal adalah

$$\begin{aligned}
 A_{Tx} &= A + A \cos u + A \cos 2u + A \cos 3u + \dots + A \cos (N-1)u \\
 A_{Ty} &= A (1 + \cos u + \cos 2u + \cos 3u + \dots + \cos (N-1)u)
 \end{aligned}
 \tag{9.8}$$

Panjang komponen vertikal adalah

$$\begin{aligned}
 A_{Ty} &= A \sin u + A \sin 2u + A \sin 3u + \dots + A \sin (N-1)u \\
 A_{Tx} &= A (\sin u + \sin 2u + \sin 3u + \dots + \sin (N-1)u)
 \end{aligned}
 \tag{9.9}$$

Yang dicari adalah $A_T^2 = A_{Tx}^2 + A_{Ty}^2$ karena besaran ini berbanding lurus dengan intensitas. Untuk mencari hasil penjumlahan persamaan (9.8) dan (9.9) dimulai dengan mendefinisikan variabel bilangan kompleks berikut ini

$$Z = A_{Tx} + i A_{Ty} \tag{9.10}$$

Dimana i adalah bilangan kompleks yang memenuhi $i = \sqrt{-1}$, atau $i^2 = -1$. Dengan menggunakan persamaan (7.8) dan (7.9) maka dapat ditulis

$$Z = A \left(\begin{array}{l} 1 + \cos u + i \sin u + \cos 2u + i \sin 2u + \cos 3u + i \sin 3u + \dots \\ + \cos (N-1)u + i \sin (N-1)u \end{array} \right) \tag{9.11}$$

Selanjutnya gunakan kesamaan bilangan kompleks, yaitu $\cos \theta + i \sin \theta = e^{i\theta}$. Dengan kesamaan ini maka didapat Z dalam bentuk berikut:

$$Z = A (1 + e^{iu} + e^{i2u} + e^{i3u} + \dots + e^{i(N-1)u}) \tag{9.12}$$

Bagian dalam kurung persamaan (9.12) merupakan deret geometri dengan suku awal 1, faktor pengali e^{iu} dan jumlah suku adalah N . Penjumlahan deret geometri adalah $1 + x + x^2 + \dots + x^{N-1} = (1 - x^N)/(1 - x)$. Dengan demikian, hasil penjumlahan Z adalah

$$\begin{aligned}
 Z &= A \frac{1 - e^{iNu}}{1 - e^{iu}} \\
 Z &= A \frac{e^{iNu/2}}{e^{iu/2}} \frac{e^{-iNu/2} - e^{-iNu/2}}{e^{-iu/2} - e^{-iu/2}} \\
 Z &= A \frac{e^{iNu/2}}{e^{iu/2}} \frac{\left(\frac{e^{iNu/2} - e^{-iNu/2}}{2i} \right)}{\left(\frac{e^{iu/2} - e^{-iu/2}}{2i} \right)} \\
 Z &= A \frac{e^{iNu/2}}{e^{iu/2}} \frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)}
 \end{aligned} \tag{9.13}$$

Intensitas pola yang dihasilkan dilayar menjadi

$$\begin{aligned}
 I &\propto |A_T|^2 \\
 I &\propto A^2 \left[\frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)} \right]^2 \\
 I &= I_0 \left[\frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)} \right]^2 \\
 I &= I_0 \left[\frac{\sin(\Phi/2)}{\sin(u/2)} \right]^2
 \end{aligned} \tag{9.14}$$

Dengan $\Phi = Nu$. Jika menggunakan defenisi sebelumnya maka

$$\begin{aligned}
 u &= k\Delta r \\
 u &= \frac{2fd \sin \theta}{\lambda}
 \end{aligned} \tag{9.15}$$

Intensitas Minimum

Berikutnya ditentukan lokasi intensitas minimum. Tampak dari persamaan (9.14) bahwa intensitas minimum terjadi jika

$$\sin(\Phi/2) = 0$$

Namun harus mengecualikan $\Phi = 0$ karena pada nilai ini pola berbentuk dipusat layar dan dipusat layar intensitas selalu maksimum. Jadi, nilai Φ yang menghasilkan intensitas minimum adalah

$$\frac{\Phi}{2} = f, 2f, 3f, 4f, \dots$$

Dengan menggunakan defenisi d dan menggunakan persamaan (9.15) maka diperoleh

$$\frac{Nu}{2} = f, 2f, 3f, 4f, \dots$$

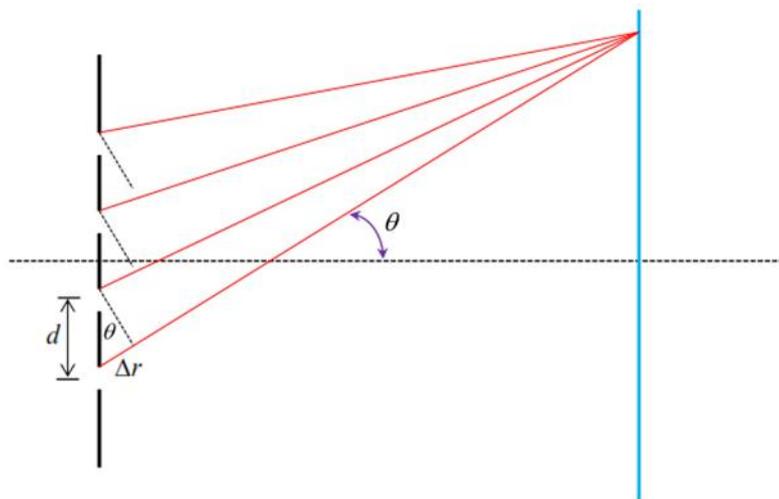
atau

$$u = \frac{2f}{N}, \frac{4f}{N}, \dots, \frac{2nf}{N} \quad (9.16)$$

Dengan $n = 1, 2, 3, \dots$

Intensitas Maksimum

Sebaliknya, posisi maksimum dapat diperoleh dengan melakukan diferensi $\sin(\Phi/2)/(\Phi/2)$ dan menyamakan sama dengan nol. Namun dapat dilakukan juga analisis berbeda sebagai berikut.



Gambar 9.6 Skema interferensi celah banyak. Jarak antar celah adalah d . Selisih panjang lintasan cahaya dari dua celah berdekatan adalah $\Delta r = d \sin \theta$

Sesuai dengan gambar 9.6, selisih panjang lintasan berkas dari dua celah berdekatan adalah Δr yang memenuhi

$$\Delta r = d \sin \theta$$

Interferensi konstruktif terjadi jika selisih lintasan tersebut merupakan kelipatan bulat dari panjang gelombang, yaitu $\Delta r = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, m\lambda$ atau

$$\begin{aligned} u &= k\Delta r = \frac{2\pi}{\lambda} x m \\ u &= 0, 2\pi, 4\pi, \dots, 2m\pi \end{aligned} \quad (9.17)$$

dengan m adalah bilangan bulat.

Kebergantungan intensitas terhadap sudut diberikan oleh persamaan (9.14) yang dapat juga ditulis dalam bentuk

$$I_r \left[\frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)} \right]^2$$

Dengan menggunakan syarat pada persamaan (9.17) maka baik penyebut yaitu $\sin(u/2) = \sin m\pi$ dan pembilang, yaitu $\sin(Nu/2) = \sin(Nm\pi)$ berharga nol. Pembagian bilangan nol dengan nol menghasilkan suatu nilai yang dapat diperoleh dengan metode perhitungan limit. Untuk menentukan nilai pembagian tersebut pada saat $u = 2m\pi$, mari kita lakukan perhitungan berikut ini. Kita menulis ulang persamaan intensitas sebagai berikut :

$$\sqrt{I_r} \frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)}$$

Karena ketika $u = 2m\pi$, penyebut dan pembilang bernilai nol maka kita menulis pembagian diatas dalam bentuk sebagai berikut

$$\sqrt{I_r} \lim_{u \rightarrow 2m\pi} \frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)}$$

Mengingat limit pembilang dan penyebut sama – sama nol maka limit diselesaikan dengan dalil L'Hopitals yaitu

$$\sqrt{I_r} \lim_{u \rightarrow 2m\pi} \frac{\frac{d}{du}(\sin Nu/2)}{\frac{d}{du}\sin(u/2)}$$

Diferensial dari $\sin(Nu/2)$ adalah $(N/2)\cos(Nu/2)$ dan diferensial dari $\sin(u/2)$ adalah $(1/2)\cos(u/2)$. Dengan demikian

$$\sqrt{I} r \lim_{u \rightarrow 2mf} \frac{(N/2)\cos(Nu/2)}{(1/2)\cos(u/2)}$$

$$r \frac{N \cos Nm f}{\cos mf} = \frac{N \times (\pm 1)}{\pm 1} = \pm N$$

Sehingga didapatkan intensitas maksimum memenuhi $I r N^2$.

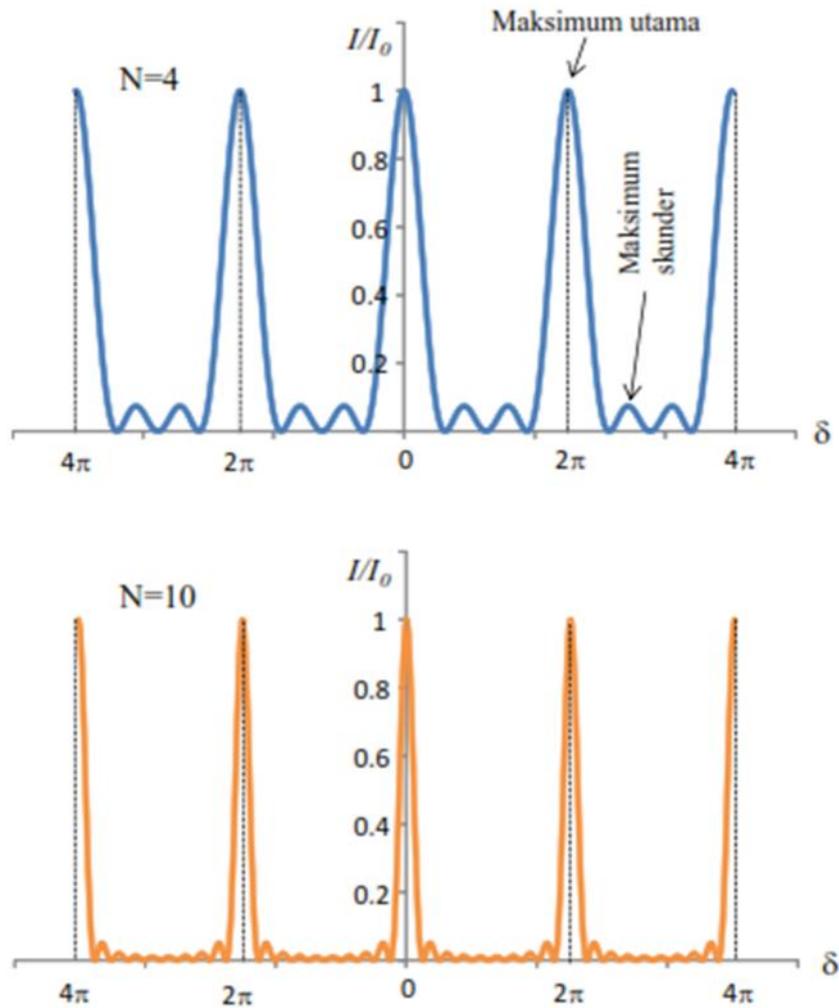
Intensitas maksimum sekunder (lebih lemah daripada intensitas maksimum utama yang berlokasi pada $u = 2mf$ terjadi ketika $\sin(Nu/2)$ maksimum. Ini terjadi jika dipenuhi

$$\frac{Nu}{2} = \left(n + \frac{1}{2}\right)f$$

dengan $n = 0, 1, 2, \dots$. Pada kondisi ini maka intensitas maksimum sekunder terjadi pada u yang memenuhi

$$u = \frac{2n+1}{N}f$$

Sebagai ilustrasi, pola interferensi yang dilakukan oleh 4 celah seperti tampak pada gambar 9.7 (a.) puncak utama terjadi pada $u = 0, 2f, 4f, 6f, 8f, \dots$. Lokasi minimum terjadi pada $u = \frac{2f}{4}, \frac{4f}{4}, \frac{6f}{4}, \frac{10f}{4}, \frac{12f}{4}, \dots$ pada saat menentukan lokasi minimum kita membuang $u = \frac{8f}{4} = 2f$ karena lokasi tersebut merupakan lokasi maksimum. Tampak disini bahwa jumlah minimum antara dua maksimum utama adalah 3 buah. Karena antara dua minimum terdapat satu maksimum sekunder maka terdapat 2 maksimum sekunder antara dua minimum utama.



Gambar 9.7 (a) Pola interferensi kisi yang dengan $N=4$ dan (b) kisi dengan $N=10$.

Gambar 9.7 (b.) adalah contoh intensitas interferensi dari kisi yang memiliki sepuluh celah.

Tampak bahwa intensitas maksimum terjadi ketika $u = 0, 2f, 4f, 6f, 8f, \dots$. Lokasi minimum adalah

$$u = \frac{2f}{4}, \frac{4f}{4}, \frac{6f}{4}, \frac{8f}{4}, \frac{10f}{4}, \frac{12f}{4}, \frac{14f}{4}, \frac{16f}{4}, \frac{18f}{4}, \frac{22f}{4}, \frac{24f}{4}, \dots$$

Kita membuang kondisi $\frac{20f}{4} = 2f$ karena merupakan lokasi maksimum. Tampak disini bahwa jumlah minimum antara dua maksimum utama adalah 9. Karena antara dua minimum terdapat satu maksimum sekunder maka terdapat 8 maksimum sekunder antara dua minimum utama.

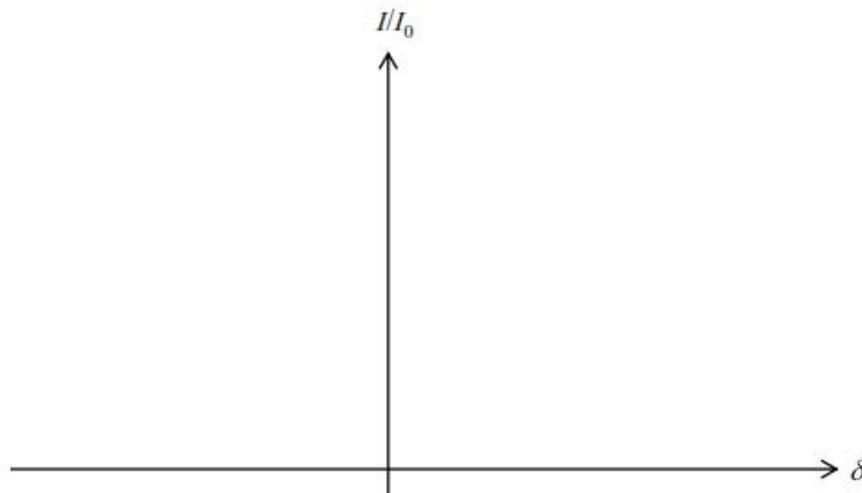
Jadi jelaslah bahwa untuk interferensi N celah maka antara dua maksimum utama terdapat $N - 1$ buah minimum dan terdapat $N - 2$ buah maksimum sekunder.

Tips menentukan pola interferensi N celah

Banyak mahasiswa yang kesulitan melakukan analisis interferensi N celah karena melihat persamaan yang begitu rumit dan sulit dipahami kecuali dengan mempelajari secara teliti. Berikut satu tip sederhana yang dapat digunakan. Misalkan kita akan menjelaskan interferensi 6 celah ($N = 6$). Langkah-langkahnya sebagai berikut.

Langkah 1

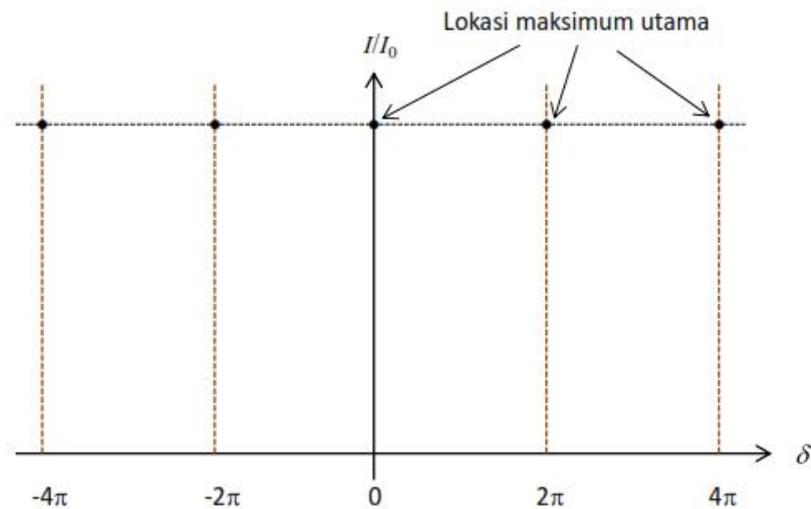
Buat sumbu koordinat kosong dimana sumbu datar adalah δ dan sumbu vertikal adalah I/I_0 (Gambar 9.8)



Gambar 9.8 Sumbu koordinat kosong

Langkah 2

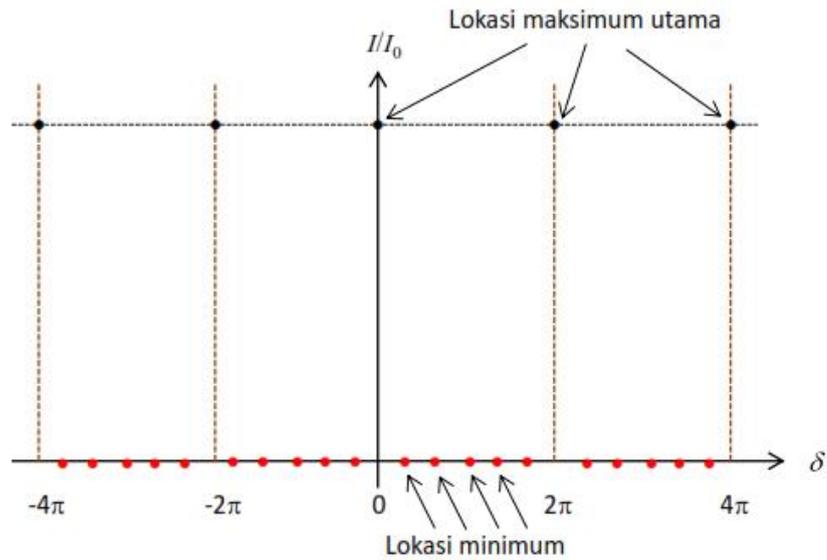
Tandai lokasi dengan $u = \pm 2f, \pm 4f, \pm 6f$, dan seterusnya dan beri pembatas untuk $I/I_0 = 1$ seperti pada gambar 9.9. Lokasi pada garis pembatas yang bersesuaian dengan u tersebut merupakan lokasi maksimum utama



Gambar 9.9 Lokasi maksimum utama

Langkah 3

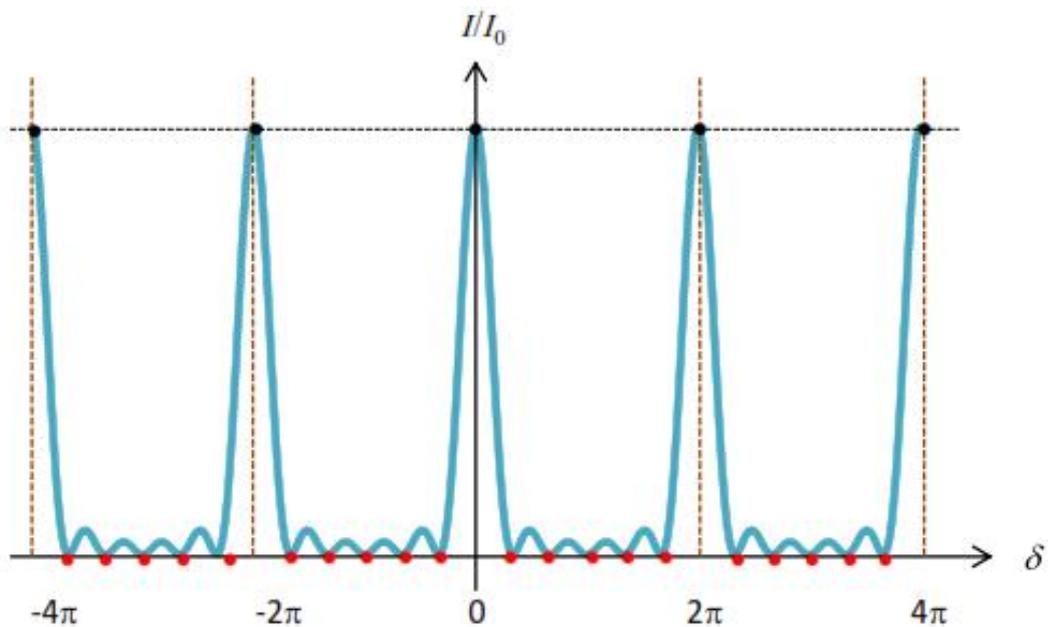
Karena ada 6 celah maka antara dua maksimum utama terdapat 5 minimum. Jadi, tandai lima lokasi pada sumbu datar antara dua maksimum utama yang jaraknya sama, seperti diilustrasikan pada gambar 7.10. Lokasi tersebut adalah tempat minimum terjadi.



Gambar 9.10 Lokasi minimum pada sumbu datar

Langkah 4

Sekarang buat kurva melewati titik-titik maksimum utama dan minimum dengan mengingat bahwa antara dua minimum berdekatan terdapat satu maksimum sekunder. Kurva yang diperoleh tampak pada gambar 9.11.



Gambar 9.11 Kurva yang diperoleh

Langkah 5

Setelah kita mendapat kurva pada gambar 9.11 maka kita dapat menentukan lokasi maksimum dan minimum di layar, dimulai dari persamaan (9.15). Berdasarkan gambar 9.11, maksimum utama di samping maksimum di pusat layar terjadi ketika $u = 2f$. Dengan menggunakan persamaan (9.15) maka sudut yang bersesuaian dengan maksimum tersebut adalah

$$2f = \frac{2fd \sin \theta}{\lambda}$$

atau

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{d}$$

Jika jarak celah kelayar adalah L maka jarak maksimum utama tersebut dari pusat layar memenuhi

$$\frac{\Delta y}{L} = \tan \theta$$

Untuk sudut yang kecil maka $\tan \theta \approx \sin \theta$ sehingga

$$\Delta y \approx L \sin \theta = \frac{L\lambda}{d}$$

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang Interferensi Interferensi Celah Banyak (kisi)
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh soal Interferensi Celah Banyak (kisi)

RANGKUMAN

1. Kisi adalah goresan celah sempit sejajar yang jumlahnya banyak.
2. Dengan menggunakan kisi maka cahaya yang memiliki beda panjang gelombang sedikit saja dapat dipisahkan.

3. Kisi sering digunakan sebagai monokromator, yaitu alat yang digunakan untuk memisahkan warna tertentu dari cahaya putih.

4. Jika jumlah celah N maka lebar garis terang memenuhi

$$\text{Lebar} \propto \frac{1}{N}$$

5. Amplitudo total berbanding lurus dengan intensitas interferensi.

6. Untuk interferensi N celah maka antara dua maksimum utama terdapat $N - 1$ buah minimum dan terdapat $N - 2$ buah maksimum sekunder.

EVALUASI FORMATIF 2

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan kisi!
2. Jelaskan mengapa kisi digunakan dalam interferensi, apa keuntungan penggunaannya!
3. Jelaskan hubungan intensitas gelombang dengan interferensi !
4. Jelaskan mengapa kisi sering digunakan sebagai monokromator!
5. Jelaskan langkah-langkah pada interferensi 6 celah ($N = 6$) !

Lembar Kerja Praktek 2

Kegiatan Pembelajaran 3: Penguraian Gelombang Cahaya

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami tentang Penguraian Gelombang Cahaya
2. Mahasiswa mampu menjelaskan aplikasi tentang Penguraian Gelombang Cahaya

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Interferensi celah banyak digunakan untuk menguraikan berkas yang mengandung sejumlah panjang gelombang atas gelombang-gelombang penyusunnya. Gelombang yang berbeda memiliki maksimum pada sudut yang berbeda. Kenapa hal tersebut bisa terjadi? Mari kita analisis.

Cahaya dengan panjang gelombang berapa pun yang mengalami interferensi N celah memiliki kurva I/I_0 terhadap u yang persis sama. Kurva tersebut tidak bergantung pada panjang gelombang. Jadi, semua panjang gelombang mengalami interferensi maksimum ketika $u = 2mf$. Misalkan ada dua gelombang λ_1 dan λ_2 mengalami interferensi celah banyak secara bersamaan, maka maksimum utama gelombang-gelombang tersebut sama-sama memenuhi $u = 2mf$. Namun, dengan menggunakan persamaan (9.15) maka masing-masing gelombang memenuhi

$$u = \frac{2fd \sin \theta_1}{\lambda_1}$$

dan

$$u = \frac{2fd \sin \theta_2}{\lambda_2}$$

Oleh karena itu, sudut yang menghasilkan intensitas maksimum untuk gelombang pertama dan kedua adalah

$$\sin \theta_1 = \frac{u_1}{2fd} = \frac{(2mf)_1}{2fd} = m \frac{\lambda_1}{d}$$

dan

$$\sin \theta_2 = m \frac{\lambda_2}{d}$$

Karena $\lambda_1 \neq \lambda_2$ maka spektrum dengan panjang gelombang berbeda akan meninggalkan celah dengan sudut rambat yang berbeda. Karena arah rambat yang berbeda tersebut cahaya awal sudah terurai menjadi spektrum-spektrum penyusunnya. Kita selanjutnya dapat menyeleksi hanya berkas dengan panjang tertentu yang diambil.

Jumlah maksimum garis yang dapat terbentuk. Kita kembali perhatikan bahwa maksimum utama terjadi ketika dipenuhi

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{d}$$

Mengingat nilai terbesar dari $\sin \theta$ adalah satu atau $\sin \theta \leq 1$ maka dari persamaan di atas kita dapatkan ketidaksamaan berikut ini

$$m \frac{\lambda}{d} \leq 1$$

yang menghasilkan

$$m \leq \frac{d}{\lambda}$$

Ketidaksamaan ini menyatakan bahwa ada jumlah maksimum puncak utama dapat terbentuk. Jika d/λ adalah bilangan bulat maka jumlah maksimum puncak utama ada $m = d/\lambda$ di sisi atas, ada $m = d/\lambda$ bawah ditambah satu di tengah. Dengan demikian, jumlah puncak maksimum adalah $2m + 1 = 2d/\lambda + 1$. Sebaliknya jika d/λ bukan bilangan bulat maka $m = \text{round}(d/\lambda)$ di mana $\text{round}()$ artinya pembulatan kebawah. Misalnya

$\text{round}(2,3) = 2$, $\text{round}(9,9) = 9$. Dalam kondisi ini jumlah maksimum utama yang dihasilkan adalah $2m + 1 = 2 \text{round}(d/\lambda) + 1$

Contoh Soal 9.1:

Hitunglah sudut maksimum orde pertama dan kedua untuk cahaya yang panjang gelombangnya 400 nm dan 700 nm yang mengalami interferensi 10.000 celah pada rentang sepanjang sentimeter.

Jawaban :

Diberikan pada soal bahwa jarak antar celah $d = 1 \text{ cm}/10.000 = 10^{-6} \text{ m}$. Sudut yang dibentuk oleh maksimum orde pertama adalah

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{d}$$

- ❖ Untuk gelombang 400 nm, posisi puncak orde pertama

$$\sin \theta = \frac{\lambda_1}{d} = \frac{4 \times 10^{-7}}{10^{-6}} = 0,4$$

atau

$$\theta = 24^\circ$$

- ❖ Posisi puncak orde kedua

$$\sin \theta = \frac{\lambda_1}{d} = \frac{2 \times (4 \times 10^{-7})}{10^{-6}} = 0,8$$

atau

$$\theta = 53^\circ$$

- ❖ Untuk gelombang 700 nm, posisi puncak orde pertama

$$\sin \theta = \frac{\lambda_2}{d} = \frac{7 \times 10^{-7}}{10^{-6}} = 0,7$$

atau

$$\theta = 44^\circ$$

- ❖ Posisi puncak orde kedua

$$\sin \theta = \frac{\lambda_1}{d} = \frac{2 \times (7 \times 10^{-7})}{10^{-6}} = 1,4$$

Karena tidak mungkin $\sin \theta > 1$ maka tidak ada θ yang memenuhi. Dengan demikian, garis orde kedua untuk gelombang 700 nm tidak ada.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang Penguraian Gelombang Cahaya
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang Penguraian Gelombang Cahaya

RANGKUMAN

1. Interferensi celah banyak digunakan untuk menguraikan berkas yang mengandung sejumlah panjang gelombang atas gelombang-gelombang penyusunnya.
2. Gelombang yang berbeda memiliki maksimum pada sudut yang berbeda.
3. Cahaya dengan panjang gelombang berapa pun yang mengalami interferensi N celah memiliki kurva I/I_0 terhadap u yang persis sama. Kurva tersebut tidak bergantung pada panjang gelombang.
4. Misalkan ada dua gelombang λ_1 dan λ_2 mengalami interferensi celah banyak secara bersamaan, maka maksimum utama gelombang-gelombang tersebut sama-sama memenuhi $u = 2mf$.
5. Sudut yang menghasilkan intensitas maksimum untuk gelombang pertama dan kedua

adalah $\sin \theta_1 = \frac{u\lambda_1}{2fd} = \frac{(2mf)\lambda_1}{2fd} = m\frac{\lambda_1}{d}$ dan

$$\sin \theta_2 = m\frac{\lambda_2}{d}$$

6. Maksimum utama terjadi ketika dipenuhi

$$\sin \theta = m\frac{\lambda}{d}$$

EVALUASI FORMATIF 3

1. Apa manfaat interferensi celah banyak pada panjang gelombang!
2. Mengapa gelombang yang berbeda memiliki maksimum pada sudut yang berbeda?

3. Hitunglah sudut maksimum orde pertama dan kedua untuk cahaya yang panjang gelombangnya 300 nm dan 200 nm yang mengalami interferensi 10.000 celah pada rentang sepanjang sentimeter!
4. Mengapa cahaya putih yang jatuh pada permukaan CD terurai atas warna yang berbeda-beda ?
5. Hitunglah sudut minimum orde pertama dan kedua untuk cahaya yang panjang gelombangnya 500 nm dan 800 nm yang mengalami interferensi 10.000 celah pada rentang sepanjang sentimeter!

Lembar Kerja Praktek 3

RANGKUMAN MODUL

1. Interferensi konstruktif terjadi jika selisih jarak tempuh gelombang dari dua sumber merupakan kelipatan bulat dari panjang gelombang.
2. Interferensi destruktif terjadi jika selisih jarak tempuh gelombang dari dua sumber merupakan kelipatan ganjil dari setengah panjang gelombang.
3. Syarat interferensi maksimum adalah $d \sin \theta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda, \dots$
4. Syarat interferensi minimum adalah $d \sin \theta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$
5. Jarak antar dua garis terang berdekatan atau dua garis gelap berdekatan adalah

$$\Delta y \cong L \frac{\lambda}{d}$$

6. Pada percobaan interferensi dua celah, umumnya nilai θ sangat kecil. Ini sesuai dengan kenyataan bahwa arah rambat cahaya menuju celah hampir sejajar garis datar.
7. Kisi adalah goresan celah sempit sejajar yang jumlahnya banyak.
8. Dengan menggunakan kisi maka cahaya yang memiliki beda panjang gelombang sedikit saja dapat dipisahkan.
9. Kisi sering digunakan sebagai monokromator, yaitu alat yang digunakan untuk memisahkan warna tertentu dari cahaya putih.
10. Jika jumlah celah N maka lebar garis terang memenuhi

$$\text{Lebar} \propto \frac{1}{N}$$

11. Amplitudo total berbanding lurus dengan intensitas interferensi.
12. Untuk interferensi N celah maka antara dua maksimum utama terdapat $N - 1$ buah minimum dan terdapat $N - 2$ buah maksimum sekunder.
13. Interferensi celah banyak digunakan untuk menguraikan berkas yang mengandung sejumlah panjang gelombang atas gelombang-gelombang penyusunnya.
14. Gelombang yang berbeda memiliki maksimum pada sudut yang berbeda.
15. Cahaya dengan panjang gelombang berapa pun yang mengalami interferensi N celah memiliki kurva I/I_0 terhadap θ yang persis sama. Kurva tersebut tidak bergantung pada panjang gelombang.
16. Misalkan ada dua gelombang λ_1 dan λ_2 mengalami interferensi celah banyak secara bersamaan, maka maksimum utama gelombang-gelombang tersebut sama-sama memenuhi $\theta = 2m\lambda$.

17. Sudut yang menghasilkan intensitas maksimum untuk gelombang pertama dan kedua

$$\text{adalah } \sin \theta_1 = \frac{u_1}{2fd} = \frac{(2mf)_1}{2fd} = m \frac{\lambda_1}{d} \text{ dan}$$

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{d}$$

18. Maksimum utama terjadi ketika dipenuhi

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{d}$$

DAFTAR PUSTAKA

Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi

Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing

Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I

Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.

Modul 10:

Difraksi

PENDAHULUAN

Sekarang kita akan memasuki bab yang baru yaitu tentang Difraksi Cahaya. Difraksi pada umumnya berkaitan dengan celah yang cukup lebar atau yang sempit yang jumlahnya tak berhingga. Satu celah lebar dipandang sebagai tak berhingga sumber gelombang titik. Interferensi sejumlah tak berhingga sumber gelombang titik pada satu celah tersebut menghasilkan pola gelap-terang di belakang layar. Berbeda dengan interferensi celah ganda yang telah kita pelajari sebelumnya, biasanya, interferensi berkaitan dengan celah yang sangat sempit dan jumlah celah berhingga. Satu celah hanya dipandang sebagai satu sumber gelombang dan jumlah sumber gelombang yang mengalami interferensi adalah berhingga.

Sebelum kita membahas lebih jauh kita akan mengulang lagi pemahaman kita tentang difraksi atau difraksi cahaya.

Kegiatan Pembelajaran 1: Difraksi Gelombang

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai Difraksi Cahaya
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan penggunaan aplikasi Difraksi cahaya dalam kehidupan sehari-hari

URAIAN MATERI

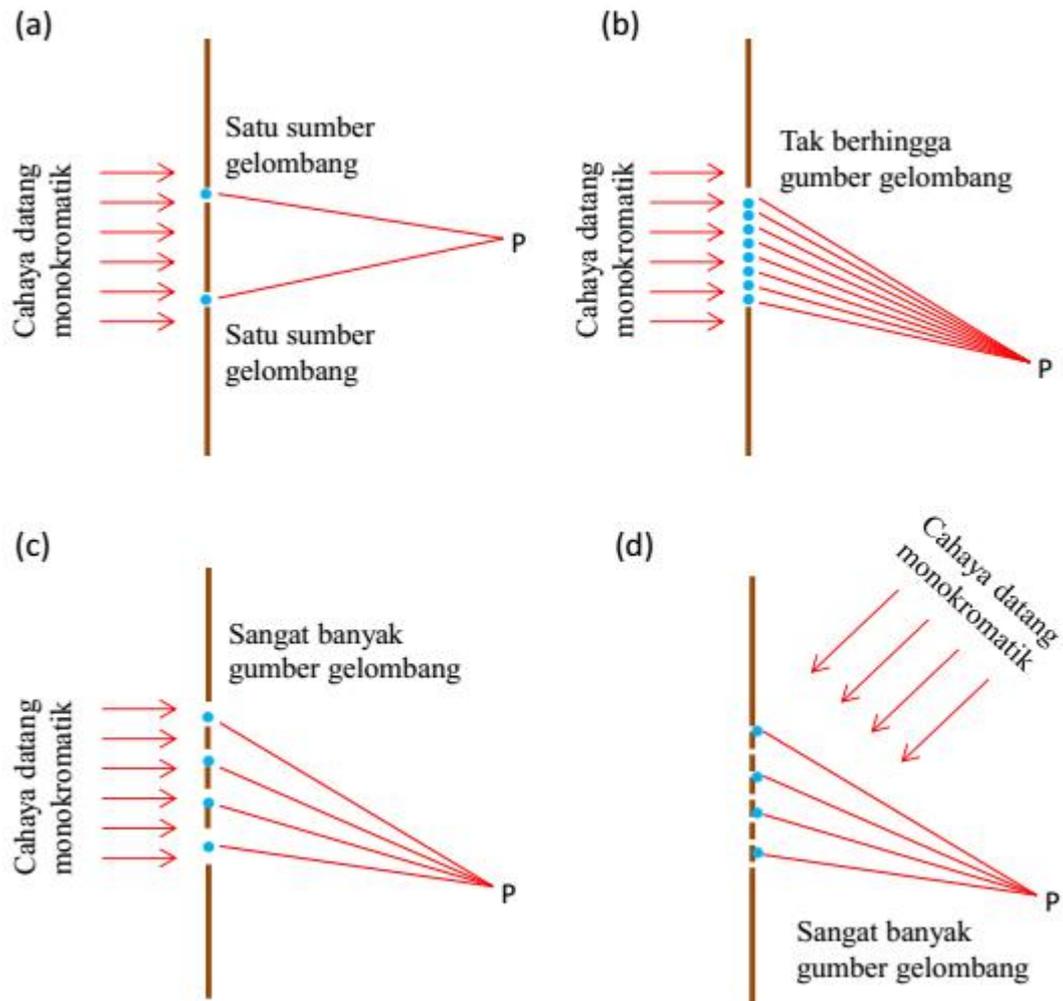
Konsep Dasar

Setelah mempelajari tentang fenomena interferensi, mari kita lanjutkan pembahasan kita pada fenomena serupa, yaitu difraksi. Difraksi sebenarnya adalah interferensi juga. Kalau fenomena intrferensi dikaitkan dengan superposisi sumber gelombang yang jumlahnya berhingga, pada fenomena difraksi dikaitkan dengan superposisi sumber gelombang yang

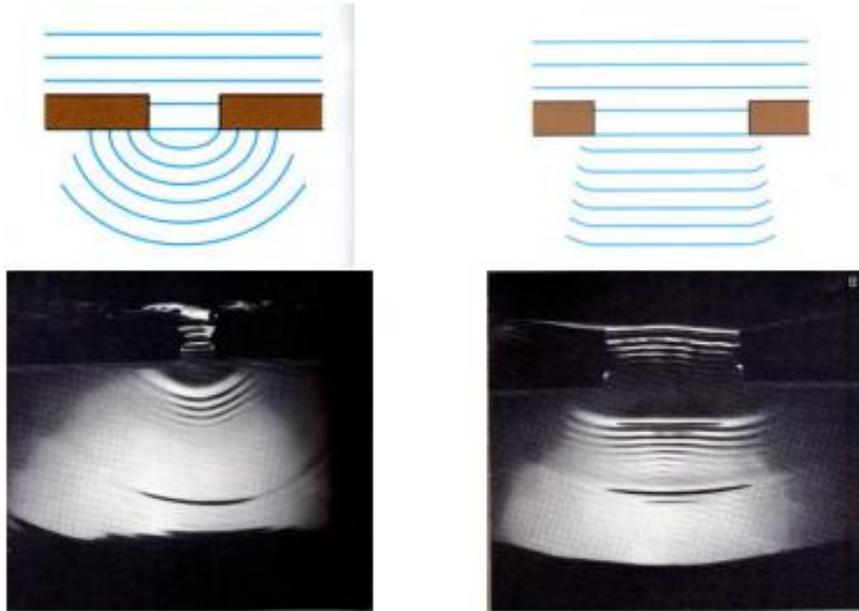
jumlahnya sangat banyak (mendekati tak berhingga). Dengan kata lain, difraksi adalah interferensi dengan jumlah sumber tak berhingga. Saat belajar tentang interferensi seringkali kita fokuskan pada interferensi dua celah sempit. Artinya kita membahas superposisi gelombang dari dua sumber. Satu celah sempit dipandang sebagai satu sumber gelombang titik (sesuai dengan prinsip Huygens) sehingga dua celah sempit merupakan dua sumber titik. Ketika mempelajari difraksi, maka kita bahas difraksi oleh satu celah. Cahaya yang melewati satu celah mengalami fenomena difraksi. Satu celah di sini adalah satu celah yang tidak terlalu sempit. Berdasarkan prinsip Huygens, setiap titik pada celah dapat dipandang sebagai sumber gelombang baru. Jadi, satu celah yang tidak terlalu sempit tersebut dapat dipandang sebagai banyak sekali sumber gelombang titik sehingga superposisinya menghasilkan fenomena difraksi. Ketika belajar tentang difraksi, kita juga membahas difraksi oleh kisi. Kisi adalah goresan pada permukaan datar. Jumlah goresan sangat banyak. Ada kisi yang goresannya merupakan celah sangat sempit sehingga cahaya menembus kisi dan ada kisi yang goresannya merupakan pemantul yang sangat sempit sehingga cahaya dipantulkan oleh kisi. Ketika cahaya jatuh pada kisi maka satu goresan sangat sempit tersebut dapat dipandang sebagai sumber gelombang baru. Dengan demikian, terjadi superposisi gelombang dari sumber yang jumlahnya sangat banyak dan dihasilkan fenomena difraksi. Untuk lebih memahami perbedaan interferensi dan difraksi, kita lihat ilustrasi pada **Gambar 10.1**. Gambar (a) adalah fenomena interferensi sedangkan gambar (b), (c), dan (d) adalah fenomena difraksi. Pada gambar (a) jumlah celah hanya dua sedangkan pada gambar (b), (c), dan (d) jumlah celah sangat banyak. Tiap celah merupakan sumber gelombang baru. Dengan demikian, pada gambar (a) hanya dua gelombang yang dijumlahkan sedangkan pada gambar (b), (c), dan (d) banyak sekali gelombang yang dijumlahkan. Contoh fenomena difraksi oleh celah ditunjukkan pada **Gambar 10.2**. Gelombang datar yang menuju celah mengalami perubahan arah dan bersifat menyebar setelah melewati celah. Pelebaran makin membesar jika ukuran celah makin sempit. Celah tersebut mengandung banyak sekali titik dan tiap titik berperan sebagai sumber gelombang baru seperti dinyatakan oleh prinsip Huygens. Dengan demikian, di belakang titik terjadi penjumlahan gelombang dari sumber yang sangat banyak.

Berapa besar ukuran celah sehingga dapat dipandang hanya sebagai satu sumber gelombang atau sebagai banyak sumber gelombang? Ini pertanyaan yang menarik, karena kita sering bingung apakah satu celah cukup sempit sehingga hanya menjadi satu sumber gelombang, atau cukup lebar sehingga dapat dipandang sebagai banyak sumber gelombang? Apakah kriterianya? Jika ukuran celah kira-kira sama dengan panjang gelombang yang

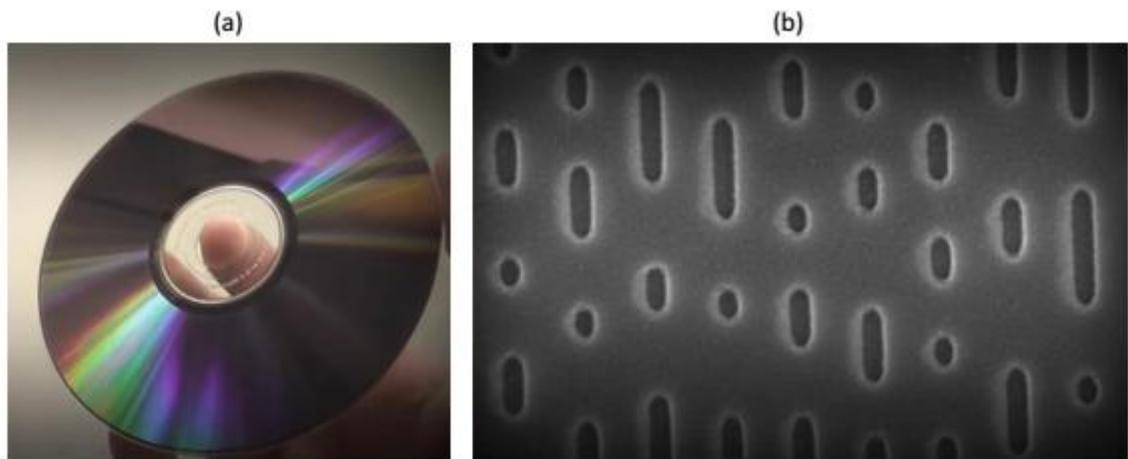
melewati celah tersebut maka kita dapat memandang celah tersebut sebagai satu sumber gelombang. Sebaliknya, jika ukuran celah jauh lebih besar dari panjang gelombang yang melewati celah tersebut maka kita pandang celah tersebut sebagai sumber banyak gelombang.



Gambar 10.1 (a) dua celah sangat sempit berperan sebagai dua sumber titik sehingga proses superposisinya adalah interferensi. (b) satu celah sempit berperan sebagai tak berhingga sumber titik sehingga proses superposisinya adalah difraksi. (c) kisi tembus berperan sebagai sumber titik yang jumlahnya sangat banyak sehingga proses superposisinya adalah difraksi. (d) kisi pantul berperan sebagai sumber titik yang jumlahnya sangat banyak sehingga proses superposisinya adalah difraksi.



Gambar 10.2 Difraksi gelombang permukaan air yang melewati celah: (a) Celah sempit dan (b) celah lebar.



Gambar 10.3 Difraksi yang dihasilkan oleh permukaan CD atau DVD. Cahaya yang dipancarkan oleh CD atau DVD tampak berwarna. Ketika data dituliskan pada CD atau DVD maka yang dilakukan adalah membuat goresan-goresan pada permukaan DC tersebut. Goresan tersebut berperilaku sebagai kisi pemantul.

Gambar 10.3 adalah contoh difraksi yang dihasilkan oleh permukaan CD atau DVD. Cahaya yang dipancarkan oleh CD atau DVD tampak berwarna. Penyebabnya adalah ada sebagian panjang gelombang yang hilang saat masuk ke mata. Gelombang yang hilang tersebut adalah yang mengalami superposisi destruktif ketika sampai ke mata. Ada sebagian warna yang terang. Warna yang berasal dari gelombang yang mengalami superposisi konstruktif saat masuk ke mata. Mengapa hal tersebut terjadi? Karena permukaan CD atau DVD berisi data. Ketika data dituliskan pada CD atau DVD maka yang dilakukan adalah membuat goresan-goresan pada permukaan DC tersebut. Goresan tersebut berperilaku sebagai kisi pemantul (**Gambar 10.3(b)**) sehingga terjadi peristiwa difraksi.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang Difraksi gelombang dan apa perbedaannya dengan fenomena interferensi
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh soal Difraksi Gelombang dalam kehidupan sehari-hari

RANGKUMAN

1. Fenomena interferensi dikaitkan dengan superposisi sumber gelombang yang jumlahnya berhingga, pada fenomena difraksi dikaitkan dengan superposisi sumber gelombang yang jumlahnya sangat banyak (mendekati tak berhingga).
2. Difraksi adalah interferensi dengan jumlah sumber tak berhingga.
3. Berdasarkan prinsip Huygens, setiap titik pada celah dapat dipandang sebagai sumber gelombang baru. Jadi, satu celah yang tidak terlalu sempit tersebut dapat dipandang sebagai banyak sekali sumber gelombang titik sehingga superposisinya menghasilkan fenomena difraksi.
4. Kisi adalah goresan pada permukaan datar. Jumlah goresan sangat banyak. Ada kisi yang goresannya merupakan celah sangat sempit sehingga cahaya menembus kisi dan ada kisi yang goresannya merupakan pemantul yang sangat sempit sehingga cahaya dipantulkan oleh kisi.

5. Ketika cahaya jatuh pada kisi maka satu goresan sangat sempit tersebut dapat dipandang sebagai sumber gelombang baru. Dengan demikian, terjadi superposisi gelombang dari sumber yang jumlahnya sangat banyak dan dihasilkan fenomena difraksi.
6. Jika ukuran celah kira-kira sama dengan panjang gelombang yang melewati celah tersebut maka kita dapat memandang celah tersebut sebagai satu sumber gelombang.
7. Jika ukuran celah jauh lebih besar dari panjang gelombang yang melewati celah tersebut maka kita pandang celah tersebut sebagai sumber banyak gelombang.

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskan apa perbedaan fenomena interferensi dan difraksi !
2. Jelaskan bagaimana munculnya fenomena difraksi !
3. Jelaskan bagaimana fenomena difraksi pada kisi
4. Jelaskan prinsip Huygens yang dipakai juga dalam fenomena difraksi !
5. Jelaskan apa saja fenomena difraksi dalam kehidupan sehari-hari !
6. Jelaskan fenomena difraksi yang terjadi pada CD atau DVD !

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Difraksi Cahaya

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai Difraksi Cahaya
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan penggunaan aplikasi Difraksi cahaya dalam kehidupan sehari-hari

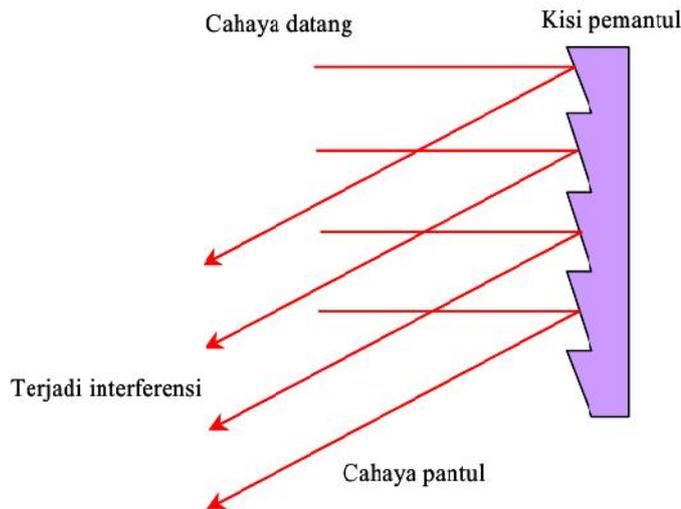
URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Kisi

Kisi adalah jumlah celah interferensi sangat banyak (tak berhingga). Interferensi oleh kisi yaitu difraksi. Dimana difraksi interferensi oleh sumber cahaya yang jumlahnya tak berhingga. Prinsip kerja kisi difraksi pada dasarnya adalah menciptakan sumber gelombang baru yang posisinya bersifat periodik. Dimana berkas dari sumber gelombang periodik tersebut berinterferensi di belakang kisi. Tetapi, interferensi juga terjadi di depan kisi jika sumber gelombang periodik memantulkan gelombang. Contohnya, kita membuat goresan-goresan periodik di suatu permukaan dan permukaan tersebut bersifat sebagai pemantul cahaya seperti diilustrasikan pada gambar 10.1. Cahaya yang dipantulkan memiliki beda fase yang teratur sehingga terjadi pola interferensi yang konstruktif dan destruktif pada cahaya pantul.

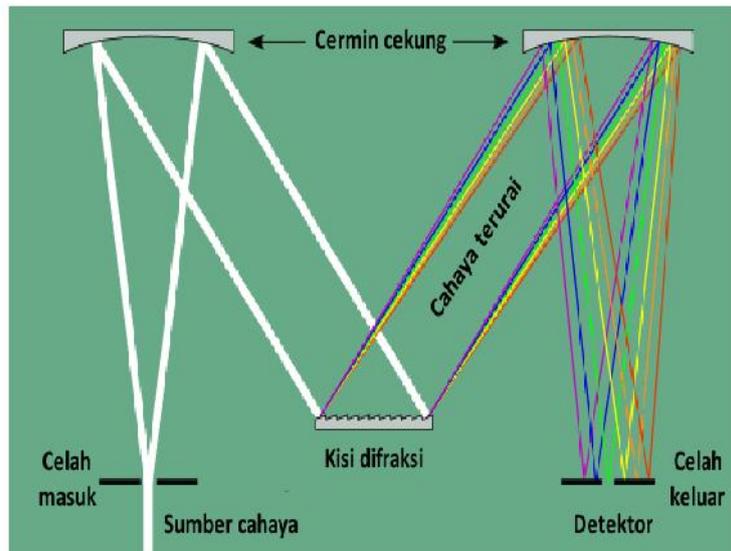
Secara visual, pola difraksi semacam ini dapat dilihat pada permukaan CD yang sudah berisi lagu atau film (bukan CD kosong). Dimana lagu-lagu atau film terekam pada permukaan CD sebagai titik-titik yang susunannya mendekati periodik. Dengan demikian, cahaya putih yang jatuh pada permukaan CD terurai atas warna yang berbeda-beda ketika dipantulkan



Gambar 10.4 Prinsip interferensi kisi pemantulan. Tiap goresan kisi berperan sebagai sumber gelombang baru

Kisi memiliki peranan sangat vital dalam pembuatan spektrometer. Spektrometer, seperti spektrometer inframerah atau spektrometer ultraviolet mengamati sifat material pada berbagai panjang gelombang. Berdasarkan gelombang sekunder yang dipancarkan material maka kita dapat mengetahui sifat material tersebut, seperti jenis materialnya apa, atom-atom penyusunnya apa, dan sebagainya. Jadi, yang kita butuhkan adalah sumber cahaya yang dapat menghasilkan semua panjang gelombang cahaya tersebut. Bagaimana cara mendapatkannya? Caranya adalah menggunakan kisi.

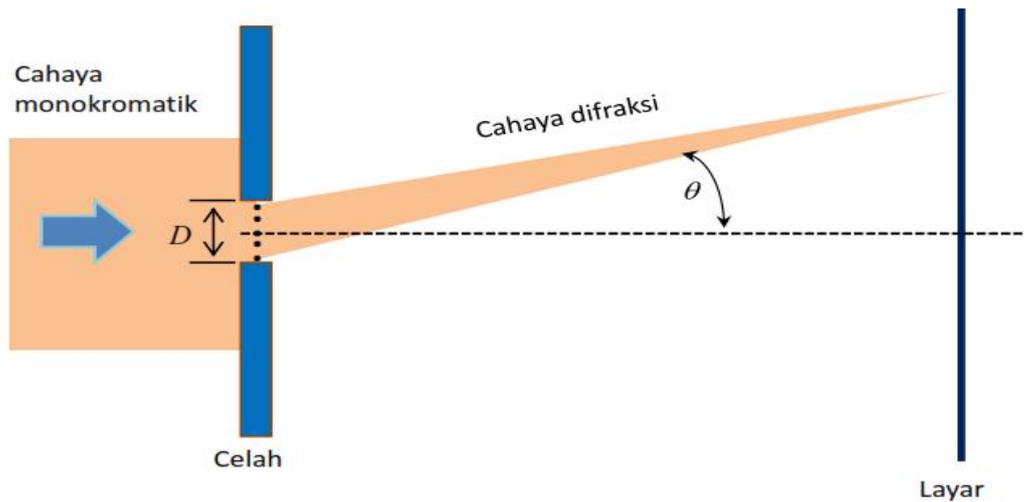
Gambar 10.5 memperlihatkan cara mendapatkan cahaya berbagai panjang gelombang menggunakan kisi. Sumber cahaya utama adalah cahaya putih. Cahaya putih dilewatkan pada kisi sehingga terurai menjadi cahaya dengan panjang gelombang berbeda. Dengan menggunakan dua cermin cekung yang tepat maka cahaya dengan panjang gelombang berbeda dapat diatur sehingga memiliki arah rambat yang berbeda. Kemudian di bagian akhir kita pasang celah yang cukup sempit untuk meloloskan cahaya dengan panjang gelombang tertentu saja. Dengan menggeser-geser posisi celah maka kita dapat memilih panjang gelombang yang diinginkan.



Gambar 10.5 Kisi dalam spektrometer yang digunakan untuk menghasilkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu dari satu sumber cahaya putih (Dunnivant and Ginsbach, 2008)

Difraksi Cahaya

Pengertian difraksi cahaya adalah peristiwa penyebaran atau pembelokan gelombang oleh celah sempit sebagai penghalang. Gelombang terdifraksi selanjutnya berinterferensi satu sama lain sehingga menghasilkan daerah penguatan atau pelemahan. Pada tahun 1665, Francesco Grimaldi memperlihatkan bahwa cahaya tampak berbelok dan memancar melebar jika melewati celah sempit. Kemudian ia menamakan pembelokan itu difraksi. Sekarang kita akan mencoba menurunkan persamaan difraksi dari persamaan interferensi celah banyak dengan mengambil limit $N \rightarrow \infty$. Untuk penjelasannya kita dapat melihat pada gambar 8.1 dibawah ini,



Gambar 10.6 Skema difraksi oleh celah yang lebarnya D .

Kita dapat mengetahui jika lebar celah difraksi adalah D , dan kita menganggap bahwa pada celah difraksi tersebut terdapat N buah sumber gelombang dimana jarak antar dua sumber berdekatan adalah

$$d = \frac{D}{N}$$

Jika kita ingin menentukan persamaan difraksi ini, kita akan memulainya dengan persamaan interferensi sebelumnya, dimana:

$$\begin{aligned} w &= Nu = N \left(\frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \\ &= 2\pi (Nd) \sin \theta \\ &= \left(\frac{2\pi D \sin \theta}{\lambda} \right) \end{aligned} \quad (10.1)$$

dan

$$u = \left(\frac{2\pi D \sin \theta}{\lambda} \right)$$

Sebelumnya kita pernah membahas di bab 3 tentang intensitas pola yang dihasilkan pada layar sebesar :

$$I = I_0 \left[\frac{\sin(w/2)}{\sin(u/2)} \right]^2 \quad (10.2)$$

Dengan memasukan nilai w di atas, maka persamaan 8.2 akan menjadi:

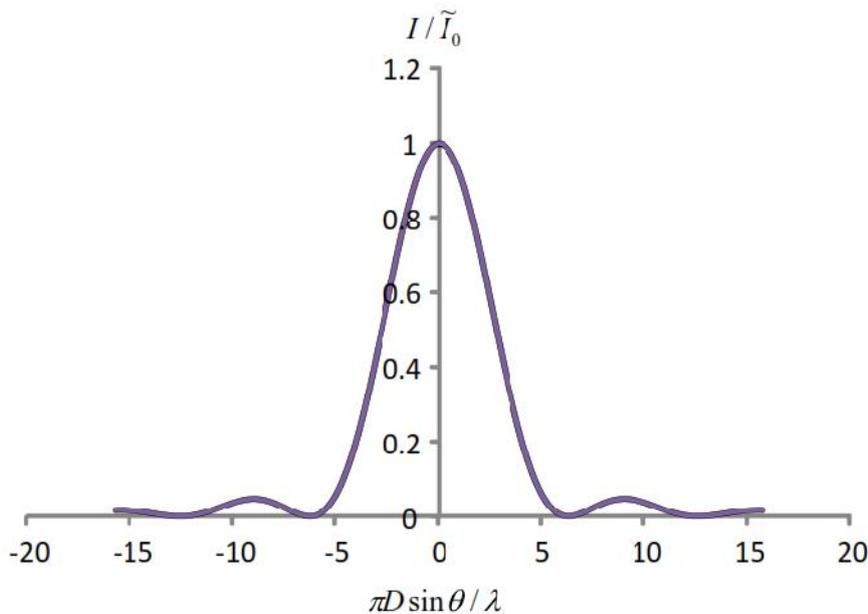
$$I = I_0 \left[\frac{\sin(\pi D \sin \theta / \lambda)}{\sin(\pi D \sin \theta / N \lambda)} \right]^2 \quad (10.3)$$

Oleh karena $N \gg 1$ maka $\sin(\pi D \sin \theta / N \lambda) \rightarrow 0$ sehingga dapat melakukan aproksimasi

$$\sin\left(\frac{\pi D \sin \theta}{N \lambda}\right) \approx \frac{\pi D \sin \theta}{N \lambda} \quad (10.4)$$

$$\begin{aligned} I &\approx I_0 \left[\frac{\sin(\pi D \sin \theta / \lambda)}{\pi D \sin \theta / N \lambda} \right]^2 \\ &= N^2 I_0 \left[\frac{\sin(\pi D \sin \theta / \lambda)}{\pi D \sin \theta / \lambda} \right]^2 \\ &= \tilde{I}_0 \left[\frac{\sin(\pi D \sin \theta / \lambda)}{\pi D \sin \theta / \lambda} \right]^2 \end{aligned} \quad (10.5)$$

Gambar 10. 7 adalah gambaran intensitas difraksi yang merupakan fungsi $\left[\frac{\sin(\pi D \sin \theta / \lambda)}{\pi D \sin \theta / \lambda} \right]^2$. Besaran ini ternyata sebanding dengan sudut arah sinar di belakang celah. Terlihat juga bahwa intensitas tertinggi terjadi pada maksimum utama di pusat. Sedangkan maksimum-minimum lainnya memiliki intensitas yang lebih rendah dan semakin lemah jika posisinya makin jauh dari pusat.



Gambar 10.7 Pola intensitas difraksi sebagai fungsi sinus sudut arah sinar di belakang celah.

Di antara dua maksimum terdapat minimum. Dari persamaan (10.5) kita dapat menentukan kondisi terjadinya minimum, yaitu:

$$\sin(\pi D \sin \theta) = 0$$

Sinus nol terjadi pada

$$\frac{\pi D \sin \theta}{\lambda} = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$$

atau

$$\sin \theta = 0, \frac{\lambda}{D}, \frac{2\lambda}{D}, \frac{3\lambda}{D}, \dots$$

Oleh karena $\sin \theta = 0$ adalah kondisi terjadinya maksimum utama, maka minimum-minimum hanya terjadi pada saat kondisi

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{D}, \frac{2\lambda}{D}, \frac{3\lambda}{D}, \dots \quad (10.6)$$

Lebar maksimum utama sama dengan jarak antar dua minimum pertama. Minimum pertama terjadi pada saat sudut θ memenuhi:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{D}$$

Jika θ sangat kecil maka kita dapat melakukan pendekatan $\sin \theta \approx \theta$, sehingga sudut tempat terjadinya minimum utama memenuhi:

$$\theta \approx \frac{\lambda}{D}$$

Lebar maksimum utama dalam (dalam sudut) adalah:

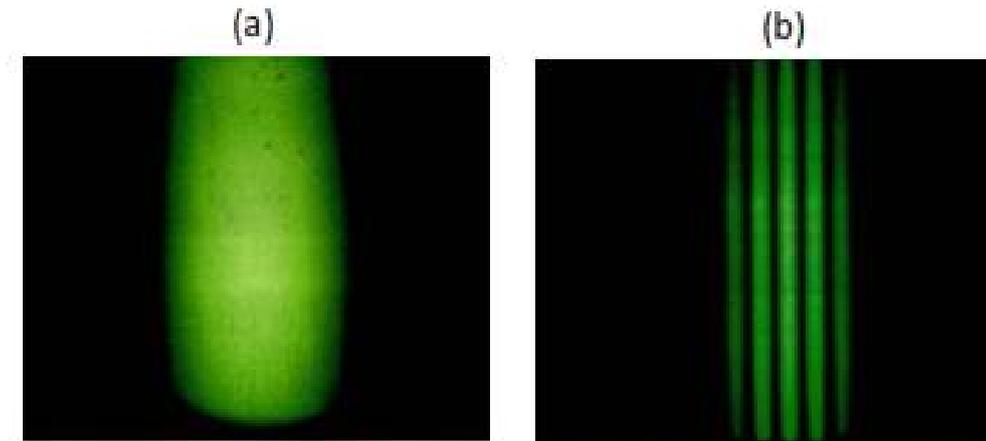
$$2\theta \approx \frac{2\lambda}{D}$$

Jika jarak dari celah ke layar adalah L maka lebar maksimum utama dalam satuan panjang adalah

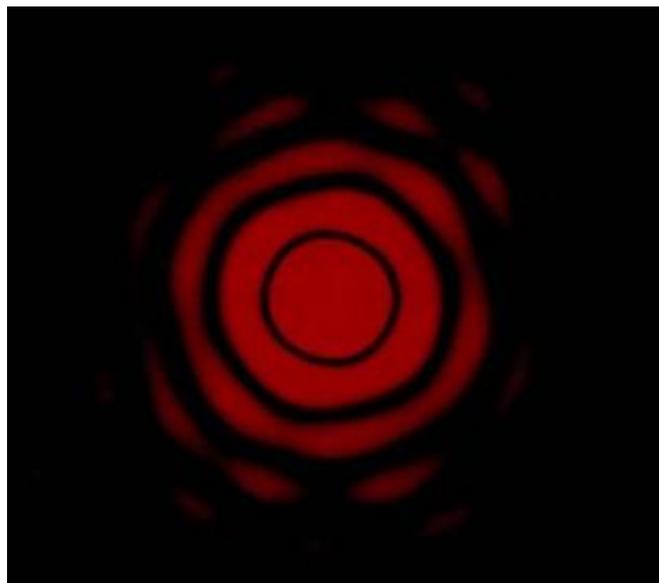
$$\Delta y = L \left(\frac{2\lambda}{D} \right)$$

$$\neq \frac{2\lambda L}{D} \quad (10.7)$$

Menurut persamaan (8.7) diatas kita mengetahui bahwa makin sempit celah maka makin lebar maksimum utama yang terbentuk. Gambar 8.3 dibawah ini merupakan foto pola yang terbentuk pada layar untuk celah yang memiliki lebar yang berbeda-beda. Jika celah berbentuk lingkaran, maka pola difraksi yang terbentuk akan berupa cincin-cincin seperti pada gambar 8.4.



Gambar 10.8 Pola difraksi cahaya dari celah yang memiliki lebar yang berbeda-beda (a) Sempit dan (b) lebar. Untuk celah sempit, maksimum utama sangat lebar. Sebaliknya untuk celah yang lebar, maksimum utama sangat sempit.



Gambar 10.9 Pola difraksi dari celah berbentuk lingkaran

Contoh Soal 10.1:

Cahaya dengan panjang gelombang 750 nm melewati sebuah celah yang lebarnya $1,0 \times 10^{-3}$ mm. Berapakah lebar maksimum utama? (a) dalam derajat dan (b) dalam centimeter pada layar yang berjarak 20 cm dari celah.

Jawaban :

(a) Minimum pertama terjadi pada sudut yang memenuhi

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{D} = \frac{7,5 \times 10^{-7}}{1,0 \times 10^{-6}} = 0,75$$

atau

$$\theta = 49^\circ$$

Dengan demikian lebar maksimum utama (dua kali jarak antara dua minimum utama karena minimum utama ada di dua sisi yang simetri) adalah

$$2\theta = 2 \times 49^\circ = 98^\circ$$

(b) Jarak dari pusat layar ke minimum utama, Δy , memenuhi

$$\frac{\Delta y}{L} = \tan \theta$$

atau

$$\Delta y = L \tan \theta = 20 \times \tan 49^\circ = 20 \times 1,15 = 23 \text{ cm}$$

Maka lebar maksimum utama adalah

$$\Delta y = 2 \times 23 = 46 \text{ cm}$$

Contoh Soal 10.2:

Celah tunggal mempunyai lebar 0,1 mm disinari cahaya monokromatik dan pada layar sejauh 4 meter dari celah, dapat diamati berbagai jalur, terang dan gelap hasil difraksi. Jika jarak antara garis gelap kedua dan garis terang utama adalah 16 mm, tentukan panjang gelombang cahaya tersebut!

Jawaban:

Diketahui :

$$d = 0,1 \text{ mm} = 0,0001 \text{ m} = 1 \times 10^{-4}$$

$$l = 4 \text{ m}$$

$$n = 2$$

$$y = 16 \text{ mm} = 16 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Ditanya : Panjang gelombang cahaya?

Jawab :

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{l} = \frac{16 \times 10^{-3}}{4} = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Panjang gelombang cahaya :

$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{n} = \frac{(1 \times 10^{-4})(\sin \theta)}{2} = \frac{(1 \times 10^{-4})(4 \times 10^{-3})}{2}$$

$$\lambda = \frac{4 \times 10^{-7}}{2} = 2 \times 10^{-7} \text{ m} = 200 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\lambda = 200 \text{ nm}$$

Panjang gelombang adalah 200 nm.

Contoh Soal 10.3:

Seberkas cahaya melewati celah tunggal yang sempit, menghasilkan interferensi minimum orde 3 dengan sudut deviasi 30° . Jika cahaya yang dipergunakan mempunyai panjang gelombang 6000 Å (Amstrong) maka lebar celahnya adalah...

Jawaban :

Diketahui :

$$n = 3$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$\lambda = 6000 \text{ Å} = 6000 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Contoh Soal 10.4:

Seberkas cahaya lewat celah sempit dan menghasilkan interferensi minimum orde ke dua dengan sudut deviasi 30° . Apabila lebar celah $2,4 \times 10^{-4}$ cm, maka panjang gelombang cahaya tersebut adalah...

Jawaban :

Diketahui :

$$n = 2$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$d = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Ditanyakan : } ...?

Jawab :

$$d \sin \theta = n \lambda$$

$$2,4 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \sin 30^\circ = 2 \cdot \lambda$$

$$2,4 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot 1/2 = 2 \cdot \lambda$$

$$\lambda = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0,6 \cdot 10^{-6} / 10^{-10} \text{ A} = 6000 \text{ A}$$

Contoh Soal 10.5:

Cahaya monokromatis dengan panjang gelombang 6×10^{-7} m datang tegak lurus pada suatu kisi difraksi yang memiliki tetapan 5×10^5 garis/meter. Spektra orde tertinggi yang diamati adalah...

Jawaban :

Diketahui :

$$\lambda = 6 \times 10^{-7}$$

Ditanya : n...?

Jawab :

$$d \sin \theta = n \lambda$$

$$(1 / 5 \times 10^5)(1) = n(6 \times 10^{-7})$$

$$n = 100 / 30$$

$$n = 3,3 = 3$$

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang Difraksi Cahaya dan kisi
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh soal Difraksi Cahaya dan aplikasinya

RANGKUMAN

1. Difraksi cahaya adalah peristiwa penyebaran atau pembelokan gelombang oleh celah sempit sebagai penghalang
2. Gambaran intensitas difraksi yang merupakan fungsi $\{ \Delta D \sin \theta \}$ sebanding dengan sudut arah sinar di belakang celah.
3. Pada tahun 1665, Francesco Grimaldi memperlihatkan bahwa cahaya tampak berbelok dan memancar melebar jika melewati celah sempit. Kemudian ia menamakan pembelokan itu difraksi.
4. Jarak dari pusat layar ke minimum utama, Δy , memenuhi

$$\frac{\Delta y}{L} = \tan \theta$$

5. Panjang gelombang cahaya memenuhi

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{l}$$

EVALUASI FORMATIF 2

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan Difraksi Cahaya?
2. Bagaimana gambaran intensitas difraksi yang merupakan fungsi $\{ \Delta D \sin \theta \}$?
3. Bagaimana Francesco Grimaldi memperlihatkan cahaya Difraksi?
4. Cahaya dengan panjang gelombang 250 nm melewati sebuah celah yang lebarnya $1,0 \times 10^{-3}$ mm. Berapakah lebar maksimum utama? (a) dalam derajat dan (b) dalam centimeter pada layar yang berjarak 50 cm dari celah!
5. Celah tunggal mempunyai lebar 0,5 mm disinari cahaya monokromatik dan pada layar sejauh 10 meter dari celah, dapat diamati berbagai jalur, terang dan gelap hasil difraksi.

Jika jarak antara garis gelap kedua dan garis terang utama adalah 10 mm, tentukan panjang gelombang cahaya tersebut!

6. Cahaya manokromatis dengan panjang gelombang 9×10^{-7} m datang tegak lurus pada suatu kisi difraksi yang memiliki tetapan 5×10^5 garis/meter. Spektra orde tertinggi yang diamati adalah...

Lembar Kerja Praktek 2

Kegiatan Pembelajaran 3: Daya Resolusi

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

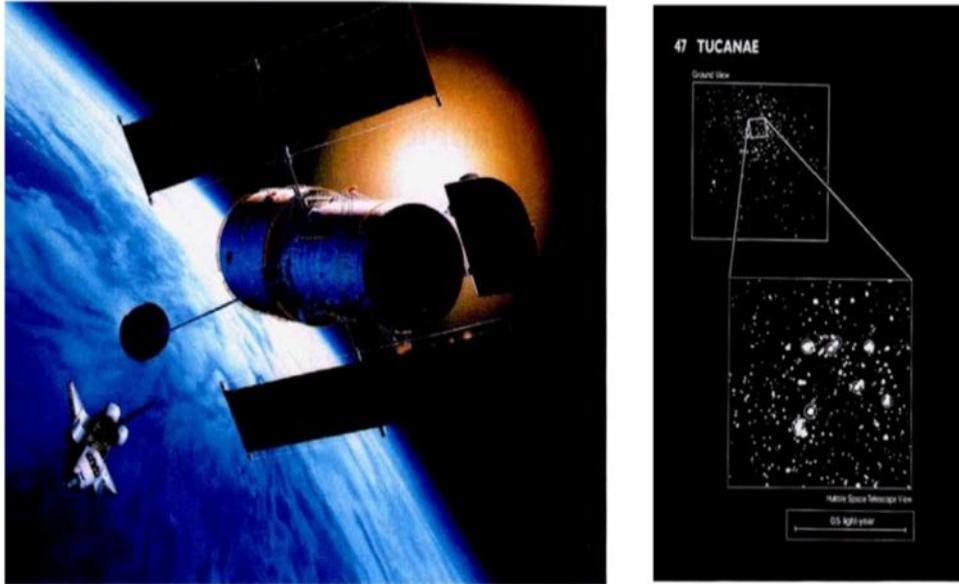
1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai pengaruh difraksi pada perbesaran maksimum alat optik
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan penggunaan aplikasi pengaruh difraksi pada perbesaran maksimum alat optik
3. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami tentang difraksi celah majemuk
4. Mahasiswa mampu menjelaskan aplikasi tentang difraksi celah majemuk

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Ketika teleskop-teleskop modern mengamati bintang, maka bayangan bintang-bintang direkam pada film atau perekam digital lainnya. Dulu teleskop biasanya ditempatkan di puncak gunung atau tempat lain yang sepi. Tujuannya adalah mencari lokasi yang atmosfernya bebas dari polusi sehingga cahaya bintang yang lemah sekali dapat direkam dengan teleskop. Namun, dengan makin berkembangnya industri atmosfer bumi tidak lagi bebas polusi seperti beberapa abad yang lalu. Atmosfer bumi sudah banyak diisi bahan polusi dari hasil aktivitas manusia sehingga pengamatan bintang dengan teleskop yang berada di permukaan bumi makin sulit. Di abad ini, sebagian teleskop telah ditempatkan di orbitnya di atas bumi. Karena lokasinya sudah berada di luar atmosfer maka tidak lagi ada pengaruh polusi atau kegiatan manusia terhadap pengamatan yang dilakukan. Gambar 10.10 (a) adalah contoh teleskop yang ditempatkan di salah satu orbit di luar bumi. Teleskop tersebut selalu mengelilingi bumi seperti satelit-satelit lainnya.

Hasil rekaman teleskop baik yang berada di bumi maupun yang berada di orbit di atas bumi terhadap bintang-bintang di jagad raya akan berupa titik-titik yang sangat berdekatan. Gambar 10.10 (b) adalah contoh hasil rekaman posisi bintang-bintang dengan teleskop.



(a)

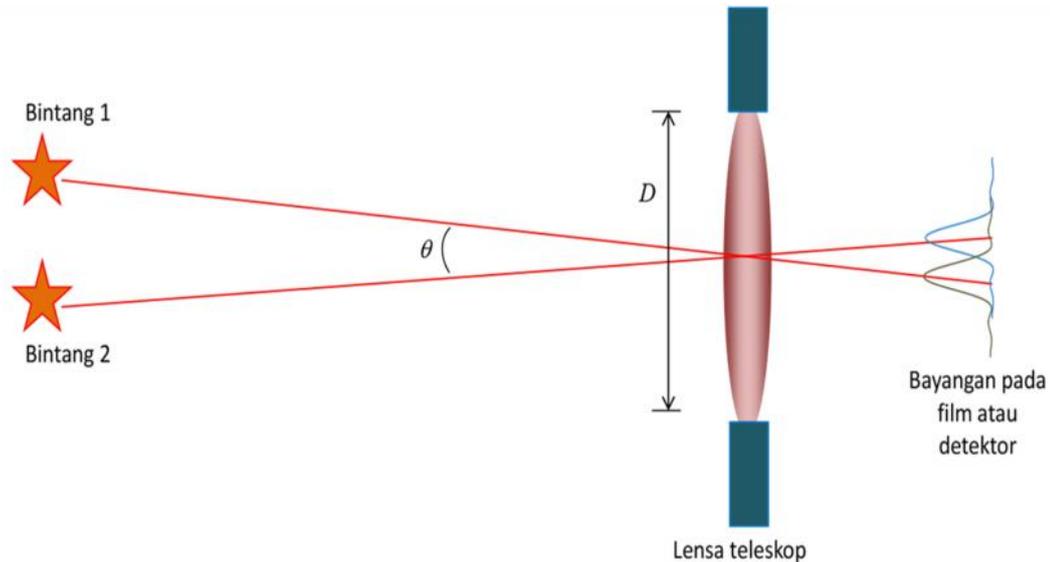
(b)

Gambar 10.10 (a) Teleskop merekam bayangan bintang-bintang (b) Bayangan bintang-bintang hasil rekaman teleskop

Pada perekam tersebut tampak bintik-bintik putih yang menunjukkan bintang-bintang. Ada yang terpisah cukup jelas, ada yang berdekatan hampir berimpit, bahkan ada yang berimpit sehingga sulit dibedakan apakah bintik tersebut merupakan rekaman satu bintang atau rekaman dua bintang yang sangat berdekatan. Kondisi seperti ini yang sering menyulitkan dalam analisis. Apakah titik tersebut merupakan sebuah bintang yang ukurannya besar atau dua bintang kecil yang lokasinya sangat berdekatan.

Rekaman bintang-bintang dihasilkan oleh cahaya yang masuk melalui lensa teleskop. Lensa teleskop yang berbentuk lingkaran berperan sebagai celah difraksi. Dengan demikian, gambar sebuah bintang yang tampak pada perekam adalah hasil difraksi oleh lensa teleskop seperti diilustrasikan pada gambar 9.2. Permasalahan timbul jika posisi dua bintang sangat berdekatan. Karena bayangan yang tampak pada perekam sangat berdekatan, bahkan dapat berimpit. Pertanyaan logis yang dapat kita munculkan adalah, adakah sudut datang minimum

cahaya dari dua bintang sehingga dua bintang tersebut dapat dibedakan setelah mengalami difraksi oleh teleskop? Jika ada, parameter apakah yang berperan mempengaruhi kemampuan teleskop mengamati dua bintang dalam bentuk bayangan yang terpisah? Dengan perkataan lain, bagaimana syaratnya agar bayangan dua bintang berdekatan tampak terpisah pada perekam?



Gambar 10.11 Ilustrasi pembentukan bayangan bintang pada film atau perekam yang ada dalam sistem teleskop. Cahaya bintang masuk ke lensa teleskop lalu menuju perekam. Lensa teleskop berperan sebagai celah difraksi sehingga bayangan yang terbentuk pada film merupakan bayangan fenomena difraksi.

Sir George Airy (1801 – 1892) adalah seorang astronom Inggris yang telah mempelajari pola cahaya yang melalui suatu bukaan optik (lubang bulat). Pola yang terjadi dinamakan **Cakram Airy**. Airy telah menjelaskan jarak terkecil dua sumber cahaya yang masih bisa dibedakan saat melalui bukaan optik. Syarat terpisahnya dua titik sumber cahaya yang masih bisa dibedakan harus memenuhi **sudut resolusi minimum**. Menurut Airy, sudut ini memenuhi pola interferensi minimum dengan memenuhi persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 D \sin \theta_m &= 1,22 \lambda \\
 \text{atau } \theta_m &= 1,22 \frac{\lambda}{D} \\
 \text{dan } \theta_m &= \frac{y_m}{\ell}
 \end{aligned}$$

dengan :

θ_m = sudut resolusi minimum (rad)

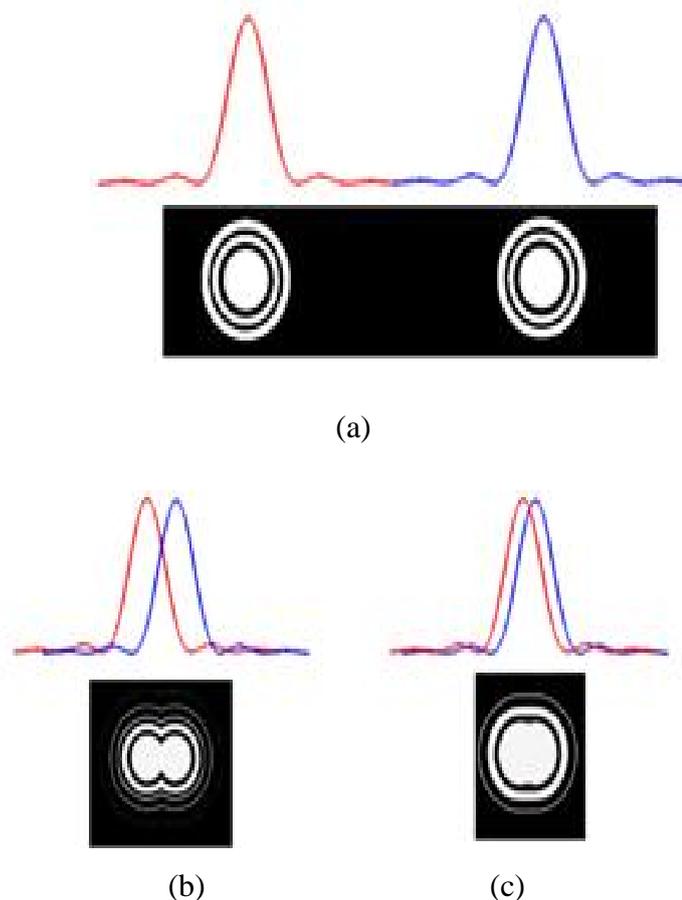
λ = panjang gelombang cahaya (m)

D = diameter bukaan alat optik (m)

y_m = daya urai (m)

1,22 = tetapan dari Airy

Rayleigh membuat sebuah kriteria, bahwa dua bayangan dikatakan terpisah jika jaraknya lebih besar dari suatu nilai minimum. Nilai minimum tersebut terjadi ketika puncak utama bayangan satu bintang berimpit dengan minimum bayangan bintang lainnya. Pada gambar 10.12 (a) puncak difraksi dua bintang sangat berjauhan dan kedua bintang dapat dibedakan dengan jelas. Pada gambar 10.12 (b), puncak difraksi yang dihasilkan satu bintang berimpit dengan intensitas minimum difraksi yang dihasilkan bintang lainnya. Pada kondisi ini kedua bintang masih dapat dibedakan.



Gambar 10.12 (a) Bayangan dua bintang terpisah, (b) Kondisi minimum ketika bayangan dua bintang masih dikatakan terpisah, (c) Bayangan dua bintang tidak dikatakan terpisah.

Pada gambar 10.12 (c) puncak difraksi dua bintang hampir berimpit dan dalam kondisi ini dikatakan dua bintang tidak dapat dibedakan. Kita akan kesulitan menyimpulkan apakah bayangan tersebut merupakan bayangan satu bintang atau bayangan dua bintang berdekatan. Kriteria Rayleigh bersesuaian dengan kondisi gambar 10.12 (b)

Lensa teleskop memiliki lebar celah D (diameter lensa). Bayangan dua bintang kelihatan terpisah jika sudut θ yang dibentuk oleh berkas yang berasal dari dua bintang, θ , memenuhi

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{D}$$

Untuk celah yang berbentuk lingkaran, rumus yang lebih tepat agar bayangan dua bintang kelihatan terpisah memenuhi

$$\sin \theta = \frac{1,22 \lambda}{D} \quad (10.8)$$

Biasanya θ sangat kecil sehingga $\sin \theta \cong \theta$. Dengan demikian, kita mendapatkan daya resolusi lensa sebagai

$$\theta = \frac{1,22 \lambda}{D} \quad (10.9)$$

Tampak bahwa, makin besar diameter lensa maka makin kecil θ yang diijinkan agar bayangan bintang masih tampak terpisah. Dengan perkataan lain, resolusi lensa teleskop makin tinggi jika diameter lensa makin besar.

Contoh Soal 10.6:

Diameter bukaan cermin teleskop Hubble adalah 2,4 m (a) berapakah daya resolusi cahaya hijau yang memiliki panjang gelombang $5,20 \times 10^{-7} \text{ m}$. (b) Ketika teleskop tersebut berada pada jarak terdekat dengan planet Mars sejauh $7,83 \times 10^{10} \text{ m}$, berapakah jarak terdekat dua benda kecil di permukaan Mars sehingga bayangan yang dibentuk oleh teleskop dapat dipisahkan?

Jawaban :

a) Daya resolusi

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{D} = \frac{1,22 \times (5,20 \times 10^{-7})}{2,4} = 2,6 \times 10^{-7} \text{ rad}$$

b) Jika jarak terdekat dua titik di permukaan Mars yang bisa dipisahkan oleh teleskop adalah Δy maka

$$\Delta y \cong R\theta = (7,83 \times 10^{10}) \times (2,6 \times 10^{-7}) = 2 \times 10^4 \text{ m} = 2 \text{ km}$$

Secara matematis dapat dilihat sebagai interferensi banyak titik sumber cahaya, pada kondisi yang paling sederhana, yaitu yang terjadi pada dua celah dengan pendekatan Fraunhofer, perbedaan jarak antara dua celah dapat dilihat pada bidang pengamatan sebagai berikut:

$$\Delta S = a \sin \theta$$

Dengan perhitungan maksimal

$$a \sin \theta = n\lambda$$

dengan :

n = urutan maksimal

λ = panjang gelombang

a = jarak antar celah

θ = sudut terjadinya interferensi konstruktif

Dan persamaan minimal

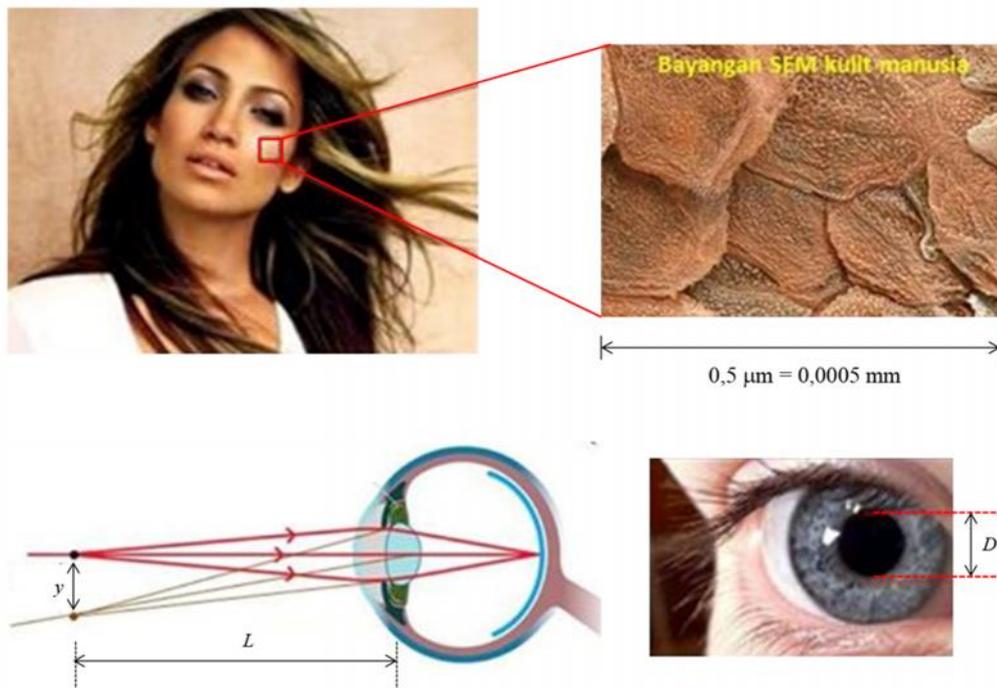
$$a \sin \theta_n = (n + 1/2) \lambda$$

Pada sinar insiden yang membentuk sudut θ_i terhadap bidang halangan, perhitungan maksimal menjadi:

$$a (\sin \theta_n + \sin \theta_i) = n \lambda$$

Cahaya yang terdifraksi dari celah majemuk dapat dihitung dengan penjumlahan difraksi yang terjadi pada setiap celah berupa konvolusi dari pola difraksi dan interferensi.

Beruntunglah indera kita tidak tajam. Kalau tidak maka dunia akan sangat mengerikan. Wajah orang yang kelihatan mulus dan cantik akan tampak sangat menakutkan. Sebagai contoh, kalau dilihat dengan *scanning electron microscope* (SEM) kulit manusia tampak bersisik seperti kulit buaya seperti diilustrasikan pada gambar 10.13. SEM adalah mikroskop elektron yang dapat melihat benda hingga ukuran 100 angstrom.



Gambar 10.13 Permukaan kulit manusia dilihat dengan mikroskop elektron tampak pada gambar kanan atas. Gambar bawah adalah proses cahaya masuk ke mata dan jarak dua titik didepan mata yang masih terlihat terpisah.

Ini semua terjadi karena mata kita hanya bisa mendeteksi cahaya tampak dengan panjang gelombang sekitar 500 nm. Lubang iris pada mata manusia berukuran sekitar 5 mm. Dengan menggunakan kriteria Rayleigh untuk difraksi celah berbentuk lingkaran maka sudut minimum yang dibentuk berkas cahaya yang masuk mata dari dua titik yang masih dilihat terpisah oleh mata sekitar $\theta \approx 1,22 \lambda / D \approx 0,000122 \text{ radian}$. Namun, kriteria Rayleigh bentuk umum tersebut berlaku untuk benda optik mati seperti lensa kamera, mikroskop, atau teleskop. Untuk mata manusia, sudut minimum yang masih dapat dipisahkan sekitar 4 kali nilai tersebut, yaitu sekitar 0,0005 radian.

Jika kita memandang wajah seseorang dari jarak 1 meter, maka jarak minimum dua titik di wajah yang masih dapat dibedakan mata sekitar $\Delta y \approx L \theta \approx 0,0005 \times 1 \text{ m} = 0,0005 \text{ m}$ atau 0,5 mm. Dua titik di wajah yang jaraknya kurang dari 0,5 mm tidak dapat dibedakan. Andaikan di wajah orang tersebut ada jerawat dengan ukuran 0,3 mm maka jerawat tidak kelihatan dari jarak 1 meter.

Kulit manusia sebenarnya bersisik dengan ukuran sekitar 0,0001 mm. Ukuran ini jauh di bawah kemampuan resolusi mata. Meskipun kulit manusia diamati pada jarak 10 cm, maka jarak minimum yang masih dapat dipisah sekitar 0,05 mm. Nilai ini masih jauh lebih besar dari pada ukuran sisik di kulit manusia. Dengan kekurangan ini kita harus bersyukur sehingga masih melihat kulit manusia tampak mulus. Kalau tidak, maka manusia tampak seperti buaya atau monster.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang pengaruh difraksi pada perbesaran maksimum alat optik
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh pengaruh difraksi pada perbesaran maksimum alat optik
3. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang difraksi celah majemuk!
4. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang Cahaya yang terdifraksi dari celah majemuk!

RANGKUMAN

1. **Sir George Airy** (1801 – 1892) adalah seorang astronom Inggris yang telah mempelajari pola cahaya yang melalui suatu bukaan optik (lubang bulat).
2. Pola yang terjadi dinamakan **Cakram Airy**.
3. Syarat terpisahnya dua titik sumber cahaya yang masih bisa dibedakan harus memenuhi **sudut resolusi minimum**.
4. Sudut resolusi minimum memenuhi

$$D \sin \theta = 1,22 \lambda$$
 atau $\theta_m = 1,22 \frac{\lambda}{D}$
 dan $\theta_m = \frac{y_m}{\ell}$
5. Rayleigh membuat sebuah kriteria, bahwa dua bayangan dikatakan terpisah jika jaraknya lebih besar dari suatu nilai minimum.
6. Daya resolusi memenuhi

$$\theta = \frac{1,22 \lambda}{D}$$
7. Sebagai interferensi banyak titik sumber cahaya, pada kondisi yang paling sederhana, yaitu yang terjadi pada dua celah dengan pendekatan Fraunhofer
8. Perbedaan jarak antara dua celah dapat dilihat pada bidang pengamatan memenuhi

$$\Delta S = a \sin \theta$$
9. Cahaya yang terdifraksi dari celah majemuk dapat dihitung dengan penjumlahan difraksi yang terjadi pada setiap celah berupa konvolusi dari pola difraksi dan interferensi.
10. Dengan menggunakan kriteria Rayleigh untuk difraksi celah berbentuk lingkaran maka sudut minimum yang dibentuk berkas cahaya yang masuk mata dari dua titik yang masih dilihat terpisah oleh mata sekitar $\theta \approx 1,22 \lambda / D \approx 0,000122 \text{ radian}$.
11. kriteria Rayleigh bentuk umum tersebut berlaku untuk benda optik mati seperti lensa kamera, mikroskop, atau teleskop.
12. Meskipun kulit manusia diamati pada jarak 10 cm, maka jarak minimum yang masih dapat dipisah sekitar 0,05 mm.

EVALUASI FORMATIF 3

1. Sebutkan nama pola cahaya menurut *Sir George Airy* !
2. Jelaskanlah sebuah kriteria dari Rayleigh !
3. Apakah Syarat terpisahnya dua titik sumber cahaya yang masih bisa dibedakan?
4. Diameter bukan cermin teleskop Hubble adalah 4,5 m (a) berapakah daya resolusi cahaya hijau yang memiliki panjang gelombang $7,20 \times 10^{-7} \text{ m}$.
5. Jelaskan terjadinya pada dua celah dengan pendekatan Fraunhofer!
6. Bagaimana cara menghitung Cahaya yang terdifraksi dari celah majemuk!
7. Sebutkan pada benda apakah kriteria Rayleigh bentuk umum berlaku!

Lembar Kerja Praktek 3

RANGKUMAN MODUL

1. Fenomena interferensi dikaitkan dengan superposisi sumber gelombang yang jumlahnya berhingga, pada fenomena difraksi dikaitkan dengan superposisi sumber gelombang yang jumlahnya sangat banyak (mendekati tak berhingga).
2. Difraksi adalah interferensi dengan jumlah sumber tak berhingga.
3. Berdasarkan prinsip Huygens, setiap titik pada celah dapat dipandang sebagai sumber gelombang baru. Jadi, satu celah yang tidak terlalu sempit tersebut dapat dipandang sebagai banyak sekali sumber gelombang titik sehingga superposisinya menghasilkan fenomena difraksi.
4. Kisi adalah goresan pada permukaan datar. Jumlah goresan sangat banyak. Ada kisi yang goresannya merupakan celah sangat sempit sehingga cahaya menembus kisi dan ada kisi yang goresannya merupakan pemantul yang sangat sempit sehingga cahaya dipantulkan oleh kisi.
5. Ketika cahaya jatuh pada kisi maka satu goresan sangat sempit tersebut dapat dipandang sebagai sumber gelombang baru. Dengan demikian, terjadi superposisi gelombang dari sumber yang jumlahnya sangat banyak dan dihasilkan fenomena difraksi.
6. Jika ukuran celah kira-kira sama dengan panjang gelombang yang melewati celah tersebut maka kita dapat memandang celah tersebut sebagai satu sumber gelombang.
7. Jika ukuran celah jauh lebih besar dari panjang gelombang yang melewati celah tersebut maka kita memandang celah tersebut sebagai sumber banyak gelombang.
8. Difraksi cahaya adalah peristiwa penyebaran atau pembelokan gelombang oleh celah sempit sebagai penghalang
9. Gambaran intensitas difraksi yang merupakan fungsi $\{ D \sin \theta / \lambda \}$ sebanding dengan sudut arah sinar di belakang celah.
10. Pada tahun 1665, Francesco Grimaldi memperlihatkan bahwa cahaya tampak berbelok dan memancar melebar jika melewati celah sempit. Kemudian ia menamakan pembelokan itu difraksi.
11. Jarak dari pusat layar ke minimum utama, Δy , memenuhi

$$\frac{\Delta y}{L} = \tan \theta$$

12. Panjang gelombang cahaya memenuhi

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{l}$$

13. **Sir George Airy** (1801 – 1892) adalah seorang astronom Inggris yang telah mempelajari pola cahaya yang melalui suatu bukaan optik (lubang bulat).

14. Pola yang terjadi dinamakan **Cakram Airy**.

15. Syarat terpisahnya dua titik sumber cahaya yang masih bisa dibedakan harus memenuhi **sudut resolusi minimum**.

16. Sudut resolusi minimum memenuhi

$$D \sin \theta = 1,22 \lambda$$

$$\text{atau } \theta_m = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

$$\text{dan } \theta_m = \frac{y_m}{\ell}$$

17. Rayleigh membuat sebuah kriteria, bahwa dua bayangan dikatakan terpisah jika jaraknya lebih besar dari suatu nilai minimum.

18. Daya resolusi memenuhi

$$\theta = \frac{1,22 \lambda}{D}$$

19. Sebagai interferensi banyak titik sumber cahaya, pada kondisi yang paling sederhana, yaitu yang terjadi pada dua celah dengan pendekatan Fraunhofer

20. Perbedaan jarak antara dua celah dapat dilihat pada bidang pengamatan memenuhi

$$\Delta S = a \sin \theta$$

21. Cahaya yang terdifraksi dari celah majemuk dapat dihitung dengan penjumlahan difraksi yang terjadi pada setiap celah berupa konvolusi dari pola difraksi dan interferensi.

22. Dengan menggunakan kriteria Rayleigh untuk difraksi celah berbentuk lingkaran maka sudut minimum yang dibentuk berkas cahaya yang masuk mata dari dua titik yang masih dilihat terpisah oleh mata sekitar $\theta \approx 1,22 \lambda / D \approx 0,000122 \text{ radian}$.

23. kriteria Rayleigh bentuk umum tersebut berlaku untuk benda optik mati seperti lensa kamera, mikroskop, atau teleskop.

24. Meskipun kulit manusia diamati pada jarak 10 cm, maka jarak minimum yang masih dapat dipisah sekitar 0,05 mm.

DAFTAR PUSTAKA

Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi

Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing

Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I

Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.

Modul 11:

Aplikasi Interferensi

PENDAHULUAN

Cahaya yang jatuh pada lapisan tipis juga dapat menimbulkan fenomena interferensi. Berkas cahaya yang dipantulkan pada permukaan atas selaput dan permukaan bawah selaput dapat berinterferensi. Posisi sudut interferensi destruktif dan konstruktif bergantung pada panjang gelombang cahaya. Akibatnya, jika cahaya putih dijatuhkan pada selaput tipis maka cahaya pantul tampak berwarna-warna seperti diilustrasikan pada gambar 11.1 (a) dan (b).

Kegiatan Pembelajaran 1: Interferensi Lapisan tipis

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

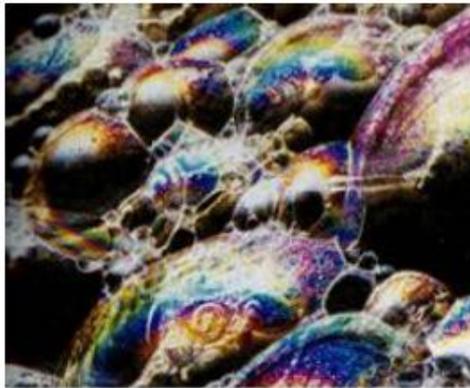
1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai lapisan tipis sejajar
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan penggunaan aplikasi lapisan tipis sejajar

URAIAN MATERI

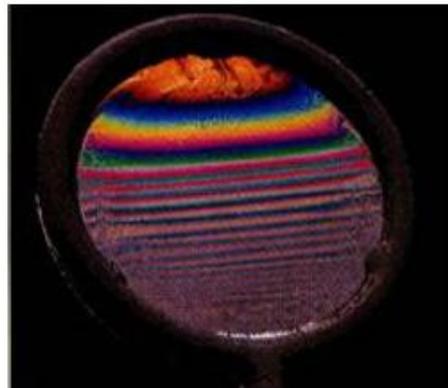
Konsep Dasar

Sekarang kita analisis secara matematis fenomena interferensi cahaya oleh lapisan tipis seragam. Untuk membantu pembahasan, kita lihat gambar 11.1 (c). Lapisan tipis dengan ketebalan d dan memiliki indeks bias n_2 berada di dalam medium dengan indeks bias n_1 . Medium dengan indeks bias n_1 misalnya udara sedangkan lapisan tipis dapat berupa lapisan sabun. Kita juga misalkan bahwa $n_2 > n_1$.

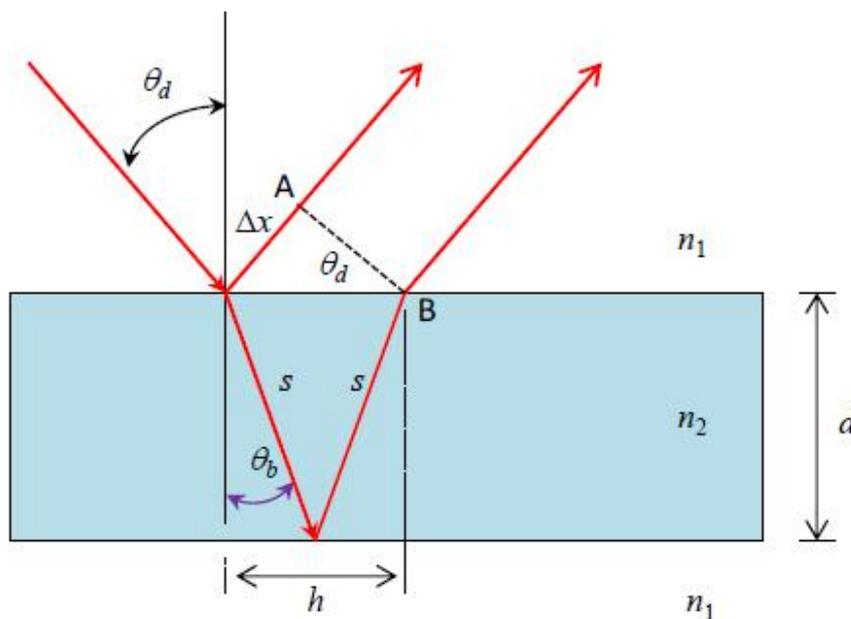
Cahaya datang dari medium n_1 menuju medium n_2 dengan sudut datang θ_d . Misalkan fase cahaya gelombang tepat saat menyentuh bidang atas dua medium adalah ϕ_0 . Pada bidang batas dua medium tersebut, sebagian cahaya mengalami pemantulan dan sebagian mengalami pembiasan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 11.1 Cahaya yang dipantulkan oleh dua permukaan lapisan tipis dapat mengalami interferensi. (a) dan (b) adalah interferensi cahaya oleh lapisan sabun sehingga tampak berwarna seperti pelangi. (c) perambatan cahaya pada lapisan tipis: sebagian ada yang langsung dipantulkan di permukaan pertama, sebagian ada yang diabiaskan ke dalam lapisan lalu dipantulkan di lapisan kedua kemudian kembali dibiaskan ke medium semula.

- i. Karena cahaya dipantulkan oleh medium dengan indeks bias lebih besar maka cahaya pantul mengalami pembalikan fase sebesar f . Akibatnya, fase cahaya tepat setelah dipantulkan menjadi $[_0 + f$.
- ii. Cahaya yang mengalami pembiasan tidak mengalami pembalikan fase. Cahaya bias kemudian dipantulkan oleh bias batas kedua. Namun, karena di sini cahaya dipantulkan oleh medium dengan indeks bias lebih kecil (indeks bias n_1) maka cahaya tidak mengalami pembalikan fase. Cahaya yang dipantulkan kemudian kembali mencapai bidang batas pertama (titik B) dan mengalami pembiasan. Dan saat pembiasan tidak terjadi pembalikan fase.
- iii. Perubahan fase cahaya yang masuk ke medium n_2 kemudian balik ke medium n_1 setelah menempuh lintasan $2s$ semata-mata karena jarak tempuh tersebut. Jarak tempuh geometri adalah $2s$. Karena panjang gelombang cahaya dalam medium n_2 adalah λ_0/n_2 maka perubahan fase cahaya selama merambat dalam medium n_2 hingga tepat kembali ke medium n_1 (titik B) adalah

$$\begin{aligned}\Delta w_2 &= \left(\frac{2f}{\lambda_0/n_2} \right) \\ &= \frac{4f n_2}{\lambda_0}\end{aligned}$$

Dengan demikian, fase cahaya yang dibiaskan dan tepat sampai kembali di bidang batas pertama (titik B) menjadi

$$\begin{aligned}w_2 &= [_0 + \Delta w_2 \\ &= [_0 + \frac{4f n_2}{\lambda_0}\end{aligned}$$

Jelas dari gambar 11.1 (c) bahwa $d/s = \cos \theta_b$, atau

$$s = \frac{d}{\cos \theta_b}$$

Dan fase gelombang kedua saat mencapai titik B menjadi

$$w_2 = \left[\lambda_0 + \frac{4f dn_2}{\cos \theta_b} \right] \quad (11.1)$$

- iv. Cahaya hasil pembiasan saat di titik B akan berinterferensi dengan cahaya yang langsung mengalami pemantulan saat berada di titik A (kedua titik tersebut berada pada satu garis yang tegak lurus arah rambat cahaya). Pada titik A , cahaya yang langsung mengalami pemantulan telah menempuh jarak sebesar.

$$\Delta x = h \sin \theta_b$$

Tetapi $(h/2)/d = \tan \theta_b$ atau $h = 2d \tan \theta_b$ sehingga panjang gelombang cahaya di dalam medium pertama adalah λ_0/n_1 sehingga perubahan fase cahaya selama menempuh lintasan Δx adalah

$$\begin{aligned} \Delta w_1 &= \frac{2f}{(\lambda_0/n_1)} \Delta x \\ &= \frac{2f}{(\lambda_0/n_1)} \times (2d \tan \theta_b) \sin \theta_b \\ &= \frac{4f n_1 d \tan \theta_b \sin \theta_b}{\lambda_0} \end{aligned}$$

Dengan demikian, fase cahaya yang langsung dipantulkan oleh bidang batas pertama saat mencapai titik A adalah

$$\begin{aligned} w_1 &= \left[\lambda_0 + f + \Delta w_1 \right] \\ &= \left[\lambda_0 + f + \frac{4f n_1 d \tan \theta_b \sin \theta_b}{\lambda_0} \right] \end{aligned} \quad (11.2)$$

Dari persamaan (11.1) dan (11.2) maka beda fase dua gelombang menjadi

$$\begin{aligned} \Delta w &= w_2 - w_1 \\ &= \left(\left[\lambda_0 + \frac{4f dn_2}{\cos \theta_b} \right] \right) - \left(\left[\lambda_0 + f + \frac{4f n_1 d \tan \theta_b \sin \theta_b}{\lambda_0} \right] \right) \\ &= \frac{4f dn_2}{\cos \theta_b} (n_2 - n_1 \sin^2 \theta_b) - f \end{aligned} \quad (11.3)$$

Dari persamaan (11.3) kita akan menentukan kondisi terjadinya interferensi konstruktif dan destruktif.

Interferensi konstruktif

Berdasarkan persamaan (11.3) maka interferensi konstruktif terjadi jika beda fase merupakan kelipatan bulat dari $2f$, atau

$$\frac{4fdn_2}{\cos \theta_b} (n_2 - n_1 \sin^2 \theta_b) - f = 2mf$$

atau

$$\frac{4fdn_2}{\cos \theta_b} (n_2 - n_1 \sin^2 \theta_b) = 2m + 1 \quad (11.4)$$

di mana m adalah bilangan bulat positif atau negatif. Interferensi konstruktif menyebabkan warna tampak pada film. Jadi, warna yang kelihatan pada film adalah gelombang yang mengalami interferensi konstruktif.

Interferensi destruktif

Berdasarkan persamaan (11.3) maka interferensi destruktif terjadi jika beda fase merupakan kelipatan ganjil dari f , atau

$$\frac{4fd}{\cos \theta_b} (n_2 - n_1 \sin^2 \theta_b) - f = (2m - 1)f$$

atau

$$\frac{4d}{\cos \theta_b} (n_2 - n_1 \sin^2 \theta_b) = 2m \quad (11.5)$$

di mana m adalah bilangan bulat positif atau negatif. Interferensi destruktif menyebabkan warna hilang dari pancaran film. Jadi, warna yang tidak kelihatan pada film adalah gelombang yang mengalami interferensi destruktif.

Gelombang datang sejajar normal. Kita tinjau kasus khusus di mana gelombang datang tegak lurus permukaan selaput. Gelombang datang sejajar normal tidak bermakna bahwa arah datang gelombang benar-benar sejajar dengan garis normal pada permukaan film, namun bisa juga gelombang yang arahnya hampir sejajar dengan garis normal. Dalam kondisi

demikian maka kita dapat melakukan pendekatan $\theta_d = 0$ dan $\theta_b = 0$. Dengan demikian $\sin \theta_b = 0$ dan $\cos \theta_d = 1$. Dengan demikian, interferensi konstruktif terjadi jika

$$\frac{4d n_2}{\lambda_0} = 2m + 1$$

Jadi, spektrum yang mengalami interferensi konstruktif adalah yang memiliki panjang gelombang

$$\lambda_0 = \frac{4d n_2}{2m + 1} \quad (11.6)$$

dan interferensi destruktif terjadi jika

$$\frac{4d n_2}{\lambda_0} = 2m$$

Jadi, spektrum yang mengalami interferensi destruktif adalah yang memiliki panjang gelombang

$$\lambda_0 = \frac{4d n_2}{2m + 1}$$

dan interferensi destruktif terjadi jika

$$\frac{4d n_2}{\lambda_0} = 2m$$

Jadi, spektrum yang mengalami interferensi destruktif adalah yang memiliki panjang gelombang

$$\lambda_0 = \frac{4d n_2}{2m} \quad (11.7)$$

Contoh Soal 11.1:

Gelombang sabun tampak berwarna hijau ($\lambda = 540\text{nm}$) ketika diamati dari depan. Berapakah ketebalan minimum selaput sabun? Indeks bias selaput adalah $n_2 = 1,35$

Jawaban :

Terjadi interferensi konstruktif untuk cahaya hijau. Berdasarkan persamaan (10.6), kita dapat menulis

$$d = \frac{(2m+1)\lambda_0}{4n_2}$$

Ketebalan minimum bersesuaian dengan $m = 0$, yaitu

$$d_{\min} = \frac{\lambda_0}{4n_2}$$

$$d_{\min} = \frac{540}{4 \times 1,35} = \frac{540}{5,4} = 100 \text{ nm}$$

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang lapisan tipis sejajar
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang contoh soal lapisan tipis sejajar

RANGKUMAN

1. Fenomena interferensi cahaya oleh lapisan tipis seragam. Lapisan tipis dengan ketebalan d dan memiliki indeks bias n_2 berada di dalam medium dengan indeks bias n_1 . Medium dengan indeks bias n_1 misalnya udara sedangkan lapisan tipis dapat berupa lapisan sabun. Kita juga misalkan bahwa $n_2 > n_1$. Cahaya datang dari medium n_1 menuju medium n_2 dengan sudut datang θ_i . Misalkan fase cahaya gelombang tepat saat

menyentuh bidang atas dua medium adalah λ_0 . Pada bidang batas dua medium tersebut, sebagian cahaya mengalami pemantulan dan sebagian mengalami pembiasan.

2. Karena cahaya dipantulkan oleh medium dengan indeks bias lebih besar maka cahaya pantul mengalami pembalikan fase sebesar π . Akibatnya, fase cahaya tepat setelah dipantulkan menjadi $\phi_0 + \pi$.
3. Cahaya yang mengalami pembiasan tidak mengalami pembalikan fase. Cahaya bias kemudian dipantulkan oleh bias batas kedua.
4. Perubahan fase cahaya yang masuk ke medium n_2 kemudian balik ke medium n_1 setelah menempuh lintasan $2s$ semata-mata karena jarak tempuh tersebut. Jarak tempuh geometri adalah $2s$. Karena panjang gelombang cahaya dalam medium n_2 adalah λ_0/n_2 maka perubahan fase cahaya selama merambat dalam medium n_2 hingga tepat kembali ke medium n_1 (titik B) adalah

$$\begin{aligned}\Delta\phi_2 &= \left(\frac{2\pi}{\lambda_0/n_2} \right) \\ &= \frac{4\pi n_2 s}{\lambda_0}\end{aligned}$$

5. Cahaya hasil pembiasan saat di titik B akan berinterferensi dengan cahaya yang langsung mengalami pemantulan saat berada di titik A (kedua titik tersebut berada pada satu garis yang tegak lurus arah rambat cahaya).
6. Pada lapisan tipis, warna yang kelihatan pada film adalah gelombang yang mengalami interferensi konstruktif.
7. Jadi, warna yang tidak kelihatan pada film adalah gelombang yang mengalami interferensi destruktif.
8. Gelombang datang sejajar normal tidak bermakna bahwa arah datang gelombang benar-benar sejajar dengan garis normal pada permukaan film, namun bisa juga gelombang yang arahnya hampir sejajar dengan garis normal.
9. Spektrum yang mengalami interferensi konstruktif dengan panjang gelombang memenuhi $\lambda_0 = \frac{4d n_2}{2m + 1}$

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskan fenomena interferensi pada lapisan tipis seragam secara ringkas!
2. Gambarkan fenomena interferensi pada lapisan tipis seragam secara ringkas!
3. Jelaskanlah kapan interferensi destruktif terjadi pada lapisan tipis seragam !
4. Jelaskanlah kapan interferensi konstruktif terjadi pada lapisan tipis seragam !
5. Jelaskan mengapa pada lapisan tipis seragam medium mengalami pembiasan dan pemantulan!
6. Jelaskan tentang Gelombang datang sejajar normal!
7. Gelombang sabun tampak berwarna hijau ($\lambda = 550nm$) ketika diamati dari depan. Berapakah ketebalan minimum selaput sabun ? Indeks bias selaput adalah $n_2 = 1,25$

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Cincin Newton

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami tentang cincin Newton
2. Mahasiswa mampu menjelaskan aplikasi tentang cincin Newton

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

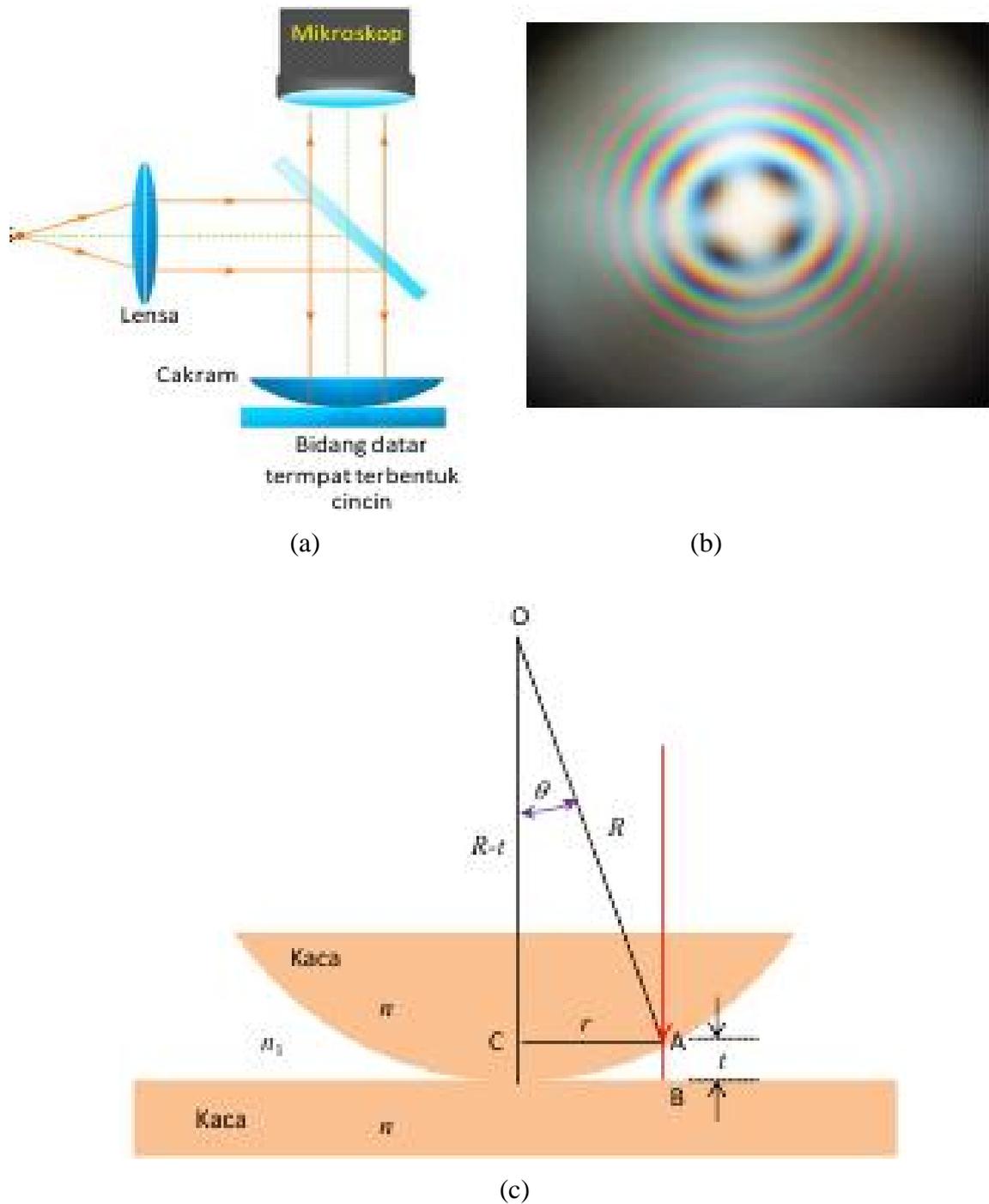
Salah satu pengamatan yang terkenal terkait dengan interferensi lapisan tipis adalah pengamatan cincin Newton. Interferensi dalam bentuk cincin-cincin tersebut pertama kali diamati oleh Newton. Jika kita memiliki juring-juring bola yang terbuat dari kaca dan diletakkan di atas kaca datar maka antara permukaan bola terbentuk ruang udara yang ketebalannya nol pada titik kontak lalu ketebalan bertambah ketika bergerak makin keluar. Pada posisi dekat titik kontak maka ketebalan lapisan udara tersebut sangat tipis sehingga lapisan udara dapat dipandang sebagai film tipis. Dengan demikian, lapisan udara tersebut dapat menghasilkan interferensi. Namun, karena ketebalan lapisan bergantung pada jarak dari pusat bola, maka pola interferensi yang dihasilkan akan berbentuk cincin-cincin dengan jari-jari yang berbeda.

Cincin Newton sangat tipis dan sangat rapat sehingga sulit diamati dengan mata langsung. Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop dengan mengarahkan lensa objektif mikroskop ke titik sentuh juring-juring bola dengan kaca datar. Gambar 11.2 (a) adalah skema percobaan cincin Newton dan gambar 11.2 (b) adalah cincin Newton yang teramati. Mari kita lakukan analisis secara matematis terbentuknya cincin Newton.

Fenomena cincin Newton bersifat terbalik dengan lapisan tipis yang diilustrasikan pada gambar 11.2 (c). Pada gambar 11.2 (c) lapisan tipis memiliki indeks bias lebih besar daripada sekelilingnya (udara). Pada cincin Newton, justru lapisan tipis (udara) memiliki indeks bias lebih kecil dari pada sekelilingnya (kaca). Kita akan fokuskan pada cahaya yang datang tegak lurus lapisan (sudut datang nol).

Perhatikan cahaya yang jatuh di titik A pada gambar 11.2 (c). Sebagian cahaya dipantulkan dan sebagian dibiaskan. Jika kita hanya mengamati lokasi di sekitar sumbu

maka sudut datang cahaya terhadap normal mendekati nol dan sudut bias pun mendekati nol. Dengan asumsi ini maka cahaya yang datang vertikal akan masuk ke lapisan udara secara vertikal juga dan kembali ke posisi semula dalam arah vertikal.



Gambar 11.2 (a) Percobaan untuk mengamati cincin Newton dan (b) Pola cincin Newton yang diamati dengan mikroskop (c) Ilustrasi interferensi yang menghasilkan cincin Newton.

Pada titik A cahaya mengalami pemantulan dan pembiasan. Misalnya fase cahaya saat mencapai titik A adalah $[\]_0$. Karena pemantulan cahaya di titik A dilakukan oleh medium dengan indeks bias lebih kecil (udara atau zat cair lain) maka cahaya yang dipantulkan di titik A tidak mengalami pembalikan fase. Cahaya yang dibiaskan merambat ke titik B dan mengalami pemantulan. Pada titik B pemantulan dilakukan oleh medium yang memiliki indeks bias lebih besar sehingga mengalami pembalikan fase. Dengan demikian, ketika kembali ke titik A , maka cahaya yang dipantulkan di titik B mengalami perubahan fase karena menempuh lintasan sepanjang $2t$ dan mengalami pembalikan fase di titik B . Fase cahaya yang dipantulkan di titik B ketika sampai kembali ke titik A menjadi

$$\begin{aligned} & [\]_0 + f + \left(\frac{2f}{\} _0 / n_1 \right) (2t) \\ \Delta W &= \left[[\]_0 + f + \left(\frac{2f}{\} _0 / n_1 \right) (2t) \right] - [\]_0 \\ &= f + \left(\frac{4f n_1 t}{\} _0} \right) \end{aligned}$$

Sekarang kita terapkan teorema Phitagoras pada segitiga OAC , yaitu

$$\begin{aligned} R^2 &= r^2 + (R - t)^2 \\ \text{atau} \\ R^2 &= r^2 + R^2 - 2Rt + t^2 \\ \text{atau} \\ 2Rt &= r^2 + t^2 \end{aligned}$$

Ketebalan lapisan antara dua kaca sangat kecil sehingga suku t^2 pada persamaan di atas dapat dibuang. Dengan demikian kita mendapatkan $t = r^2 / 2R$ perbedaan fase sebagai dinyatakan dalam r sebagai berikut:

$$\Delta W = f + \left(\frac{2f n_1 r^2}{\} _0 R} \right)$$

Interferensi tersebut terjadi jika perbedaan fase merupakan kelipatan bulat dari $2f$, atau

$$2mf = \left(\frac{2f n_1 r^2}{\} R} \right) \quad \text{dengan}$$

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

Dengan demikian kita dapatkan jari-jari pola interferensi konstruktif ke- m adalah

$$r_m = \sqrt{(2m-1) \frac{\} R}{2 n_1}} \quad (11.8)$$

Kemudian kita lihat kondisi terbentuknya interferensi destruktif. Interferensi tersebut terjadi jika perbedaan fase merupakan kelipatan ganjil dari λ , atau

$$(2m+1)\lambda = \left(\frac{2f n_1 r^2}{\} R} \right)$$

Dengan

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

Dengan demikian kita dapatkan jari-jari pola interferensi konstruktif ke- m adalah

$$r_m = \sqrt{(2m-2) \frac{\} R}{2 n_1}} \quad (11.9)$$

Dari hasil uraian di atas kita peroleh bahwa jari-jari cincin terang mulai dari posisi

$$\text{paling dalam adalah: } \sqrt{\frac{\} R}{2 n_1}}, \sqrt{\frac{3 \} R}{2 n_1}}, \sqrt{\frac{5 \} R}{2 n_1}} \dots$$

Jari-jari cincin gelap mulai dari posisi paling dalam adalah 0,

$$\sqrt{\frac{\} R}{n_1}}, \sqrt{\frac{3 \} R}{n_1}}, \sqrt{\frac{4 \} R}{n_1}} \dots$$

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang cincin Newton!
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang cincin Newton!

RANGKUMAN

1. Salah satu pengamatan yang terkenal terkait dengan interferensi lapisan tipis adalah pengamatan cincin Newton
2. Cincin Newton sangat tipis dan sangat rapat sehingga sulit diamati dengan mata langsung.
3. Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop dengan mengarahkan lensa objektif mikroskop ke titik sentuh juring-juring bola dengan kaca datar.
4. Pada cincin Newton, justru lapisan tipis (udara) memiliki indeks bias lebih kecil dari pada sekelilingnya (kaca).
5. Fenomena cincin Newton bersifat terbalik dengan lapisan tipis.
6. Jari-jari pola interferensi konstruktif memenuhi

$$r_{\infty} = \sqrt{(2m - 2) \frac{\lambda_0 R}{2n_1}}$$

EVALUASI FORMATIF 2

1. Sebutkan ciri-ciri dari cincin Newton!
2. Jelaskan sifat fenomena cincin Newton !
3. Jelaskan perbedaan fenomena cincin newton dengan lapisan tipis!
4. Jelaskan indeks bias pada fenomena cincin newton
5. Jelaskan interferensi apa yang terjadi pada fenomena cincin newton!

Lembar Kerja Praktek 2

Kegiatan Pembelajaran 3: Lapisan Anti Pantul

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

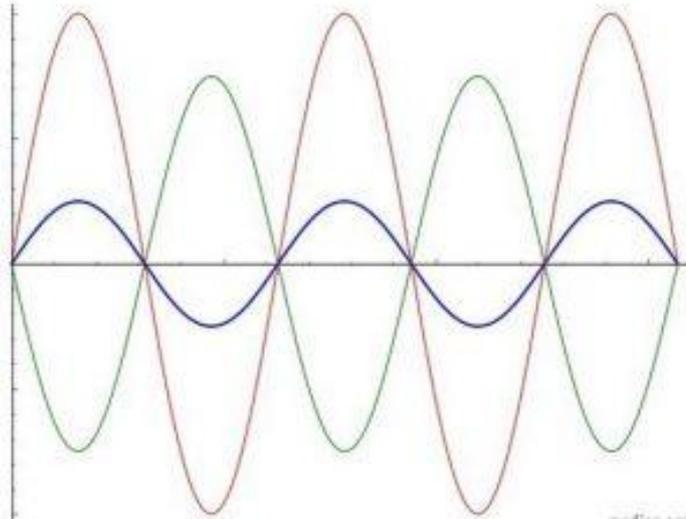
1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami tentang lapisan anti pantul
2. Mahasiswa mampu menjelaskan aplikasi tentang penggunaan lapisan anti pantul pada lensa

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Seperti yang sudah umum terjadi, suatu produk yang menjadi pionir atau pun sangat sukses dipasaran, akan membangkitkan *brand image* yang tertanam kuat dalam hati masyarakat konsumen. *Sunglasses* atau kacamata hitam sudah menjadi kebutuhan sehari-hari, terutama di daerah-daerah tropis seperti Indonesia. Sebagian memilih toko-toko *brand* yang mematok harga selangit untuk koleksi *sunglasses* yang menawarkan berbagai macam kelebihan. *Sunglasses* yang baik umumnya memiliki lapisan-lapisan yang terdiri dari lapisan anti pantul yang diletakkan dibawah lensa. Lapisan anti pantul yang diletakkan dibawah lensa berfungsi untuk melindungi mata dari cahaya yang berhasil masuk lewat sisi-sisi yang tidak terlindungi kacamata.

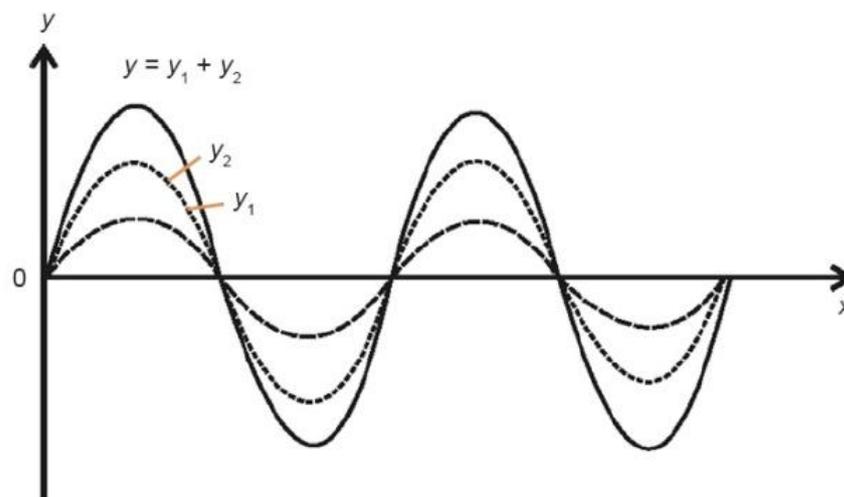
Kasus menarik terjadi jika cahaya yang dipantulkan dari dua permukaan selaput tipis mengalami interferensi destruktif. Interferensi ini terjadi ketika gelombang yang sama memiliki perpindahan di arah yang berlawanan 180° . Sehingga gelombang resultan yang dihasilkan memiliki amplitudo yang lebih rendah.



Gambar 11.3 Diagram Interferensi Destruktif

Gambar 11.3 adalah diagram getaran gelombang (ditampilkan dalam warna merah dan hijau) yang antifase satu sama lain, bergabung untuk membentuk gelombang yang dihasilkan (biru). Jika amplitudo gelombang telah sama, keduanya akan membatalkan satu sama lain, dan tidak akan ada gelombang resultan (yaitu gelombang yang dihasilkan akan memiliki “nol amplitudo”)

Berbeda dengan interferensi konstruktif. Interferensi konstruktif terjadi ketika gelombang bertemu, masing-masing memiliki perpindahan kearah yang sama. Hasilnya adalah perpindahan saling menguatkan, membentuk gelombang resultan dengan amplitudo lebih tinggi dari amplitudo setiap getaran gelombang yang bergabung untuk menghasilkan itu.



Gambar 11.4 Diagram Interferensi Konstruktif

Gambar 11.4 adalah simpangan getaran di suatu titik yang disebabkan oleh gelombang satu dan dua yaitu Y_1 dan Y_2 . Kedua gelombang mempunyai amplitudo A dan frekuensi sudut S yang sama dan merambat dari titik yang sama dengan arah yang sama juga.

INGAT, YA!

Interferensi destruktif terjadi jika beda fase kedua gelombang 180° .

Interferensi konstruktif terjadi jika kedua gelombang memiliki fase yang sama (sefase).

Dengan pemanfaatan interferensi destruktif ini, semua cahaya yang jatuh pada permukaan selaput akan diteruskan, tanpa ada yang dipantulkan. Fenomena ini yang dipakai dalam merancang lensa-lensa kualitas tinggi. Gambar 11.5 adalah contoh lensa yang dilapisi selaput tipis untuk mengurangi pemantulan. Cahaya yang jatuh pada permukaan lensa semuanya diteruskan, tanpa ada yang dipantulkan. Akibatnya, bayangan yang dihasilkan lensa menjadi sangat tajam. Hampir semua lensa peralatan optik modern memiliki lapisan tipis anti pantul pada permukaannya.



Gambar 11.5 Lensa kamera canggih dilapisi dengan lapisan tipis anti pantul

Cahaya yang datang dari udara ke permukaan atas lapisan tipis mengalami pemantulan disertai dengan pembalikan fase (pemantulan dari medium kurang rapat ke medium rapat). Indeks bias lensa umumnya lebih besar dari pada indeks bias lapisan tipis. Dengan demikian, cahaya yang dipantulkan pada sisi bawah lapisan tipis (bidang batas antara lapisan tipis dan lensa) juga mengalami pembalikan fase (pemantulan dari medium kurang rapat ke medium rapat). Akibatnya, fase gelombang yang langsung dipantulkan dan yang menembus lapisan

tipis kemudian dipantulkan di sisi bawah lapisan tipis masing-masing, yaitu dirumuskan dengan penurunan rumus yang dijabarkan dibawah.

$$w_1 = \left[\lambda_0 + f + \frac{4fn_1 \tan \theta_b \sin \theta_b}{\cos \theta_b} \right] \quad (11.10)$$

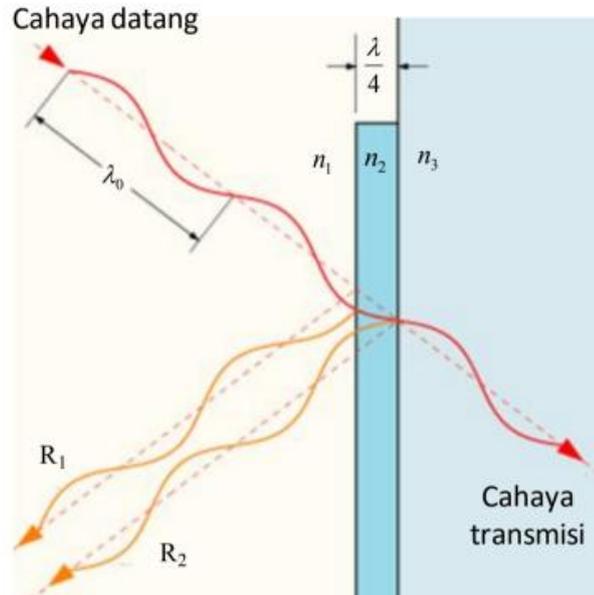
$$w_2 = \left[\lambda_0 + f + \frac{4fdn_2}{\cos \theta_b} \right] \quad (11.11)$$

Dengan demikian, beda fasenya menjadi,

$$\Delta w = w_2 - w_1 \quad (11.12)$$

$$\begin{aligned} &= \left(\left[\lambda_0 + f + \frac{4fdn_2}{\cos \theta_b} \right] \right) - \left(\left[\lambda_0 + f + \frac{4fn_1 \tan \theta_b \sin \theta_b}{\cos \theta_b} \right] \right) \\ &= \frac{4fd}{\cos \theta_b} (n_2 - n_1 \sin^2 \theta_b) \end{aligned} \quad (11.13)$$

Anti pemantulan artinya terjadi interferensi destruktif pada cahaya pantul seperti yang diilustrasikan pada gambar 11.6.



Gambar 11.6 Interferensi dua cahaya pantul akibat pelapisan benda dengan selaput tipis.

Interferensi destruktif terjadi jika beda fase merupakan kelipatan ganjil dari \$\pi\$, atau

$$\frac{4fd}{\cos \theta_b} = (n_2 - n_1 \sin^2 \theta_b) = (2m + 1)\lambda \quad (11.14)$$

atau

$$\frac{4fd}{\lambda_0 \cos \theta_b} = (n_2 - n_1 \sin^2 \theta_b) = (2m + 1) \quad (11.5)$$

dengan m adalah bilangan bulat.

Untuk cahaya yang datang dengan sudut mendekati nol maka kita akan mendapatkan persamaan aproksimasi untuk interferensi cahaya pantul berikut ini

$$\frac{4dn_2}{\lambda_0} = (2m + 1) \quad (11.6)$$

Dari persamaan (7.6) kita juga dapat menarik kesimpulan bahwa ketebalan lapisan agar interferensi destruktif terjadi adalah

$$d = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{4fn_2} \quad (11.7)$$

Nilai terkecil bilangan m adalah 0 . Ini bermakna bahwa ketebalan minimum lapisan tipis yang masih memungkinkan interferensi destruktif (terjadi peristiwa pantul) adalah

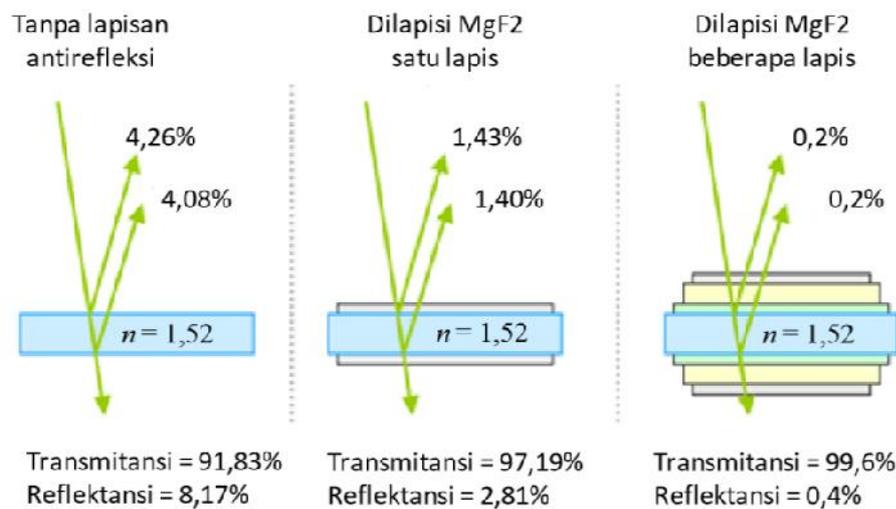
$$d_{\min} = \frac{\lambda_0}{4n_2} \quad (11.8)$$



Gambar 11.7 (kiri) lensaacamata tanpa anti pantul dan (kanan) lensaacamata yang dilapisi anti pantul

Mengingat λ_0 / n_2 adalah panjang gelombang dalam lapisan tipis (panjang gelombang di vakum dibagi indeks bias) maka ketebalan minimum lapisan tipis yang masih memungkinkan peristiwa anti refleksi sama dengan seperempat panjang gelombang cahaya dalam lapisan tersebut. Gambar 11.7 adalah contoh kebeningan lensa kaca mata tanpa lapisan anti pantul dan yang menggunakan lapisan anti pantul.

Reduksi cahaya pantul dapat dilakukan dengan melapisi lensa beberapa lapis. Tiap lapis mereduksi cahaya pantul beberapa persen. Dengan menambah lapisan anti pantul dengan indeks bias dan ketebalan yang sesuai maka cahaya pantul dapat direduksi mendekati nol. Atau cahaya yang diteruskan mendekati **100%**.



Gambar 11.8 Efek pelapisan antipantul pada pemantulan dan penerusan cahaya. (kiri) lensa antipantul, (tengah) lensa yang dengan satu lapis antipantul, dan (kanan) lensa dengan beberapa lapis antipantul.

Gambar 11.8 adalah contoh perubahan intensitas cahaya pantul dengan melapisi lensa menggunakan satu lapis anti pantul dan beberapa lapis anti pantul. Tanpa anti pantul (gambar kiri) intensitas cahaya pantul dapat mencapai **8,17%**. Dengan penambahan satu lapis anti pantul maka intensitas cahaya turun menjadi **2,81%**. Dengan menggunakan beberapa lapis anti pantul maka intensitas cahaya pantul dapat ditekan hingga **0,4%**.

Contoh Soal 11.1:

Berapakah ketebalan lapisan koating MgF_2 pada sebuah lensa agar dihasilkan interferensi destruktif pada panjang gelombang 550 nm yang jatuh tegak lurus pada lensa? Indeks bias MgF_2 adalah $1,38$ dan indeks bias lensa adalah $1,50$.

Jawaban :

Tampak bahwa indeks bias lensa lebih besar daripada lapisan antipantul. Maka syarat terjadinya interferensi destruktif pada cahaya pantul adalah

$$d = \frac{\lambda}{4n_2}, \frac{3\lambda}{4n_2}, \frac{5\lambda}{4n_2}, \dots$$

$$= \frac{550}{4 \times 1,38}, \frac{3 \times 550}{4 \times 1,38}, \frac{5 \times 550}{4 \times 1,38}, \dots$$

$$= 99,6 \text{ nm}; 298,9 \text{ nm}, 498,2 \text{ nm}, \dots$$

“ Mengapa ada lensa murah dan lensa sangat mahal???

Saat membeli kacamata kita ditunjukkan lensa pada berbagai harga. Mulai dari yang cukup murah hingga yang amat mahal. Apa yang membuat harga lensa bervariasi? ”

Ya jelas, lensa harus melewatkan cahaya yang jatuh pada satu permukaan dan keluar di permukaan sebaliknya. Secara fisika, apabila cahaya jatuh dari satu medium ke medium lain yang memiliki indeks bias berbeda, maka pasti ada sebagian cahaya yang dipantulkan. Jumlah cahaya yang dipantulkan bergantung pada perbedaan indeks bias dua medium: makin besar jumlah cahaya yang dipantulkan apabila selisih indeks bias dua medium berbeda. Dengan adanya pemantulan tersebut maka cahaya yang melewati lensa berkurang. Apabila lensa tersebut adalah lensa kacamata, maka pandangan pada objek menjadi sedikit redup.

Yang dilakukan pengusaha lensa adalah menekan sekecil mungkin cahaya yang dipantulkan dan meneruskan sebanyak mungkin cahaya yang diloloskan. *Apa yang harus dilakukan?* Tidak lain adalah memahami dan menerapkan konsep persamaan-persamaan

fisika tentang pemantulan dan interferensi cahaya. Cahaya bisa dihilangkan dengan mekanisme interferensi. Jika dua berkas cahaya memiliki panjang gelombang sama dan merambat dalam arah yang sama tetapi berbeda fase 180° maka yang terjadi adalah interferensi destruktif. Ini berarti simpangan total yang dihasilkan setiap saat selalu nol. *Apa artinya?* Artinya tidak ada cahaya yang terbentuk maupun dipantulkan.

INGAT, YA!

Jadi, kalau mau meniadakan cahaya yang dipantulkan permukaan lensa maka harus ada berkas cahaya lain yang merambat dalam arah yang sama dengan cahaya pantul tetapi memiliki fase 180° .

Untuk mencapai tujuan ini, para ahli lensa membuat lapisan tipis dipermukaan lensa. *Mengapa lapisan tipis?* Dengan adanya lapisan tipis maka akan terjadi dua kali pemantulan. ***Pemantulan pertama*** dilakukan oleh permukaan lapisan tipis ketika cahaya datang udara mengenai permukaan lapisan tipis tersebut. ***Pemantulan kedua*** terjadi pada permukaan antara lapisan tipis dan lensa. Jadi ada dua berkas yang dipantulkan. *Bagaimana agar dua berkas pantul tersebut memiliki beda fase 180° ?* Hal ini dapat dicapai dengan memilih indeks bias yang sesuai untuk material lapisan tipis dan mengatur ketebalan lapisan tipis.

Dari persamaan pemantulan oleh permukaan benda diperoleh bahwa interferensi destruktif dapat dicapai jika ketebalan lapisan tipis sama dengan seperempat panjang gelombang cahaya dan indeks biasnya sama dengan akar perkalian indeks bias udara dan indeks bias lensa. Jika panjang gelombang cahaya diambil rata-rata 500 nm maka tebal lapisan tipis untuk menekan pemantulan adalah 125 nm . Lapisan ini yang disebut lapisan antirefleksi dan tampak berwarna kalau kita lihat didepan lensa.

Satu lapisan hanya menghasilkan interferensi destruktif untuk satu panjang gelombang. Karena cahaya tampak memiliki sejumlah panjang gelombang maka tidak terjadi interferensi destruktif untuk semua panjang gelombang tersebut jika hanya diberikan satu lapisan. Dengan demikian akan dibuat lapisan pada lensa sejumlah range panjang gelombang cahaya yang dipantulkan sehingga akan mengalami interferensi destruktif di semua panjang gelombang

cahaya maka hampir semua gelombang dalam spektrum cahaya tampak diloloskan oleh lensa. Lensa semacam inilah yang sangat mahal.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang lapisan anti pantul!
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang prinsip kerja dan aplikasi lapisan anti pantul dalam kehidupan sehari-hari!
3. Diskusikanlah dalam kelompok kecil bagaimana mendesign lensa paling baik !

RANGKUMAN

1. *Sunglasses* yang baik umumnya memiliki lapisan-lapisan yang terdiri dari lapisan anti pantul yang diletakkan dibawah lensa.
2. Lapisan anti pantul yang diletakkan dibawah lensa berfungsi untuk melindungi mata dari cahaya yang berhasil masuk lewat sisi-sisi yang tidak terlindungi kaca mata.
3. Jika cahaya yang dipantulkan dari dua permukaan selaput tipis mengalami interferensi destruktif. Interferensi ini terjadi ketika gelombang yang sama memiliki perpindahan di arah yang berlawanan 180° . Sehingga gelombang resultan yang dihasilkan memiliki amplitudo yang lebih rendah.
4. Interferensi konstruktif terjadi ketika gelombang bertemu, masing-masing memiliki perpindahan kearah yang sama. Hasilnya adalah pemindahan saling menguatkan, membentuk gelombang resultan dengan amplitudo lebih tinggi dari amplitudo setiap getaran gelombang yang bergabung untuk menghasilkan itu.
5. Dengan pemanfaatan interferensi destruktif ini, semua cahaya yang jatuh pada permukaan selaput akan diteruskan, tanpa ada yang dipantulkan. Fenomena ini yang dipakai dalam merancang lensa-lensa kualitas tinggi.

6. Cahaya yang jatuh pada permukaan lensa semuanya diteruskan, tanpa ada yang dipantulkan. Akibatnya, bayangan yang dihasilkan lensa menjadi sangat tajam. Hampir semua lensa peralatan optik modern memiliki lapisan tipis anti pantul pada permukaannya.
7. Cahaya yang datang dari udara ke permukaan atas lapisan tipis mengalami pemantulan disertai dengan pembalikan fase (pemantulan dari medium kurang rapat ke medium rapat). Indeks bias lensa umumnya lebih besar dari pada indeks bias lapisan tipis. Dengan demikian, cahaya yang dipantulkan pada sisi bawah lapisan tipis (bidang batas antara lapisan tipis dan lensa) juga mengalami pembalikan fase (pemantulan dari medium kurang rapat ke medium rapat). Akibatnya, fase gelombang yang langsung dipantulkan dan yang menembus lapisan tipis kemudian dipantulkan di sisi bawah lapisan tipis masing-masing.
8. Reduksi cahaya pantul dapat dilakukan dengan melapisi lensa beberapa lapis. Tiap lapis mereduksi cahaya pantul beberapa persen. Dengan menambah lapisan anti pantul dengan indeks bias dan ketebalan yang sesuai maka cahaya pantul dapat direduksi mendekati nol. Atau cahaya yang diteruskan mendekati **100%**.
9. Interferensi destruktif dapat dicapai jika ketebalan lapisan tipis sama dengan seperempat panjang gelombang cahaya dan indeks biasnya sama dengan akar perkalian indeks bias udara dan indeks bias lensa.

EVALUASI FORMATIF 3

1. Jelaskan apa yang dimaksud lapisan anti pantul!
2. Jelaskan hubungan interferensi dengan lapisan anti pantul !
3. Jelaskan bagaimana menghasilkan lensa terbaik dengan mempertimbangkan fenomena interferensi !
4. Jelaskan bagaimana mereduksi cahaya pantul !
5. Jelaskan apa hubungan indeks bias dengan aplikasi lapisan anti pantul pada lensa!
6. Jelaskan apa yang dimaksud lapisan antirefleksi!
7. Bagaimana mencapai supaya terjadi fenomena interferensi destruktif?

Lembar Kerja Praktek 3

RANGKUMAN MODUL

1. Fenomena interferensi cahaya oleh lapisan tipis seragam. Lapisan tipis dengan ketebalan d dan memiliki indeks bias n_2 berada di dalam medium dengan indeks bias n_1 . Medium dengan indeks bias n_1 misalnya udara sedangkan lapisan tipis dapat berupa lapisan sabun. Kita juga misalkan bahwa $n_2 > n_1$. Cahaya datang dari medium n_1 menuju medium n_2 dengan sudut datang θ_i . Misalkan fase cahaya gelombang tepat saat menyentuh bidang atas dua medium adalah ϕ_0 . Pada bidang batas dua medium tersebut, sebagian cahaya mengalami pemantulan dan sebagian mengalami pembiasan.
2. Ketika cahaya dipantulkan oleh medium dengan indeks bias lebih besar maka cahaya pantul mengalami pembalikan fase sebesar π . Akibatnya, fase cahaya tepat setelah dipantulkan menjadi $\phi_0 + \pi$.
3. Cahaya yang mengalami pembiasan tidak mengalami pembalikan fase. Cahaya bias kemudian dipantulkan oleh bias batas kedua.
4. Perubahan fase cahaya yang masuk ke medium n_2 kemudian balik ke medium n_1 setelah menempuh lintasan $2s$ semata-mata karena jarak tempuh tersebut. Jarak tempuh geometri adalah $2s$. Karena panjang gelombang cahaya dalam medium n_2 adalah λ_0/n_2 maka perubahan fase cahaya selama merambat dalam medium n_2 hingga tepat kembali ke medium n_1 (titik B) adalah

$$\begin{aligned}\Delta\phi_2 &= \left(\frac{2\pi}{\lambda_0/n_2} \right) \\ &= \frac{4\pi s n_2}{\lambda_0}\end{aligned}$$

5. Cahaya hasil pembiasan saat di titik B akan berinterferensi dengan cahaya yang langsung mengalami pemantulan saat berada di titik A (kedua titik tersebut berada pada satu garis yang tegak lurus arah rambat cahaya).
6. Pada lapisan tipis, warna yang kelihatan pada film adalah gelombang yang mengalami interferensi konstruktif.
7. Jadi, warna yang tidak kelihatan pada film adalah gelombang yang mengalami interferensi destruktif.

8. Gelombang datang sejajar normal tidak bermakna bahwa arah datang gelombang benar-benar sejajar dengan garis normal pada permukaan film, namun bisa juga gelombang yang arahnya hampir sejajar dengan garis normal.
9. Spektrum yang mengalami interferensi konstruktif dengan panjang gelombang memenuhi
$$\lambda_0 = \frac{4d n_2}{2m + 1}$$
10. Salah satu pengamatan yang terkenal terkait dengan interferensi lapisan tipis adalah pengamatan cincin Newton
11. Cincin Newton sangat tipis dan sangat rapat sehingga sulit diamati dengan mata langsung.
12. Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop dengan mengarahkan lensa objektif mikroskop ke titik sentuh juring-juring bola dengan kaca datar.
13. Pada cincin Newton, justru lapisan tipis (udara) memiliki indeks bias lebih kecil dari pada sekelilingnya (kaca).
14. Fenomena cincin Newton bersifat terbalik dengan lapisan tipis.
15. Jari-jari pola interferensi konstruktif memenuhi
$$r_m = \sqrt{(2m - 2) \frac{\lambda_0 R}{2 n_1}}$$
16. *Sunglasses* yang baik umumnya memiliki lapisan-lapisan yang terdiri dari lapisan anti pantul yang diletakkan dibawah lensa.
17. Lapisan anti pantul yang diletakkan dibawah lensa berfungsi untuk melindungi mata dari cahaya yang berhasil masuk lewat sisi-sisi yang tidak terlindungi kaca mata.
18. Jika cahaya yang dipantulkan dari dua permukaan selaput tipis mengalami interferensi destruktif. Interferensi ini terjadi ketika gelombang yang sama memiliki perpindahan di arah yang berlawanan 180° . Sehingga gelombang resultan yang dihasilkan memiliki amplitudo yang lebih rendah.
19. Interferensi konstruktif terjadi ketika gelombang bertemu, masing-masing memiliki perpindahan kearah yang sama. Hasilnya adalah pemindahan saling menguatkan, membentuk gelombang resultan dengan amplitudo lebih tinggi dari amplitudo setiap getaran gelombang yang bergabung untuk menghasilkan itu.
20. Dengan pemanfaatan interferensi destruktif ini, semua cahaya yang jatuh pada permukaan selaput akan diteruskan, tanpa ada yang dipantulkan. Fenomena ini yang dipakai dalam merancang lensa-lensa kualitas tinggi.

21. Cahaya yang jatuh pada permukaan lensa semuanya diteruskan, tanpa ada yang dipantulkan. Akibatnya, bayangan yang dihasilkan lensa menjadi sangat tajam. Hampir semua lensa peralatan optik modern memiliki lapisan tipis anti pantul pada permukaannya.
22. Cahaya yang datang dari udara ke permukaan atas lapisan tipis mengalami pemantulan disertai dengan pembalikan fase (pemantulan dari medium kurang rapat ke medium rapat). Indeks bias lensa umumnya lebih besar dari pada indeks bias lapisan tipis. Dengan demikian, cahaya yang dipantulkan pada sisi bawah lapisan tipis (bidang batas antara lapisan tipis dan lensa) juga mengalami pembalikan fase (pemantulan dari medium kurang rapat ke medium rapat). Akibatnya, fase gelombang yang langsung dipantulkan dan yang menembus lapisan tipis kemudian dipantulkan di sisi bawah lapisan tipis masing-masing.
23. Reduksi cahaya pantul dapat dilakukan dengan melapisi lensa beberapa lapis. Tiap lapis mereduksi cahaya pantul beberapa persen. Dengan menambah lapisan anti pantul dengan indeks bias dan ketebalan yang sesuai maka cahaya pantul dapat direduksi mendekati nol. Atau cahaya yang diteruskan mendekati **100%**.
24. Interferensi destruktif dapat dicapai jika ketebalan lapisan tipis sama dengan seperempat panjang gelombang cahaya dan indeks biasnya sama dengan akar perkalian indeks bias udara dan indeks bias lensa.

DAFTAR PUSTAKA

- Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing
- Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I
- Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.

Modul 12:

Polarisasi

PENDAHULUAN

Jika kita keluar pada siang hari kita akan merasa silau oleh terik matahari. Itu tidak akan terjadi jika kita memakai kacamata hitam karena gelombang dari sinar matahari tersebut akan terserap oleh kacamata hitam. Disini kita mengkaji lebih jauh tentang salah satu sifat gelombang, yakni polarisasi.

Kegiatan Pembelajaran 1: Polarisasi Gelombang

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai polarisasi pada gelombang
2. Mahasiswa memiliki mampu menyampaikan contoh polarisasi gelombang yang terdapat dalam kehidupan sehari-hari.

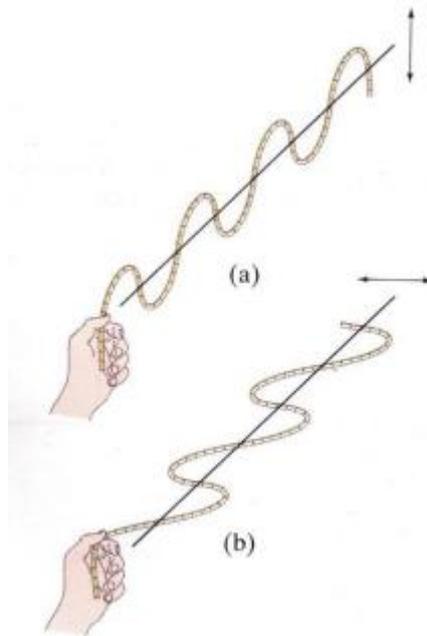
URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Ketika gelombang merambat maka titik-titik pada medium mengalami penyimpangan. Untuk gelombang transversal, arah penyimpangan titik-titik tersebut tegak lurus arah rambat gelombang. Jika selama gelombang merambat arah penyimpangan selalu sama, misalnya selalu berarah dari atas ke bawah, maka kita katakan gelombang tersebut mengalami **polarisasi linier**. Contoh simpangan gelombang terpolarisasi tampak pada **Gambar 12.1**. Sebaliknya, jika selama gelombang merambat, arah penyimpangan titik-titik pada medium selalu berubah-ubah secara acak maka kita katakan gelombang tersebut **tidak terpolarisasi**.

Ada jenis polarisasi lain seperti berikut ini. Jika selama perambatan gelombang arah penyimpangan selalu berubah-ubah secara teratur, misalnya:

- i. Mula-mula ke atas setelah berlangsung Δt , aranya ke kiri
- ii. Setelah berlangsung Δt berikutnya, aranya ke bawah
- iii. Setelah berlangsung Δt berikutnya lagi, arahnya ke kanan
- iv. Dan setelah berlangsung Δt berikutnya lagi, aranya kembali ke atas
- v. Untuk kondisi di atas kita katakan gelombang mengalami **polarisasi lingkaran**.



Gambar 12.1 Gelombang tali memiliki polarisasi linier: (a) arah simpangan selalu vertical dan (b) arah simpangan selalu horizontal.

Pada polarisasi lingkaran, amplitudo simpangan selalu sama ke manapun arah simpangan tersebut. Namun, jika amplitudo saat simpangan mengarah ke atas-bawah dan saat simpangan mengarah ke kiri-kanan tidak sama maka gelombang dikatakan mengalami **polarisasi ellips**.

Gambar 12.2 adalah ilustrasi arah osilasi gelombang yang memiliki jenis polarisasi berbeda pada berbagai waktu.

Waktu	Tidak terpolarisasi	Polarisasi linier	Polarisasi lingkaran	Polarisasi ellips
$t = 0$				
$t = \Delta t$				
$t = 2\Delta t$				
$t = 3\Delta t$				
$t = 4\Delta t$				
$t = 5\Delta t$				
$t = 6\Delta t$				

Gambar 12.2 Amplitudo gelombang pada berbagai waktu dilihat dari depan (gelombang bergerak menuju mata kalian) untuk (a) gelombang tidak terpolarisasi, (b) gelombang terpolarisasi linier, (c) gelombang terpolarisasi lingkaran, dan (d) gelombang terpolarisasi ellips.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang polarisasi gelombang
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang jenis polarisasi dan tujuan polarisasi serta aplikasi polarisasi pada gelombang

RANGKUMAN

1. Ketika gelombang merambat maka titik-titik pada medium mengalami penyimpangan
2. Untuk gelombang transversal, arah penyimpangan titik-titik tersebut tegak lurus arah rambat gelombang.
3. Jika selama gelombang merambat arah penyimpangan selalu sama, misalnya selalu berarah dari atas ke bawah, maka kita katakan gelombang tersebut mengalami **polarisasi linier**.
4. Jika selama gelombang merambat, arah penyimpangan titik-titik pada medium selalu berubah-ubah secara acak maka kita katakan gelombang tersebut **tidak terpolarisasi**.
5. Jika selama perambatan gelombang arah penyimpangan selalu berubah-ubah secara teratur, kita katakan gelombang mengalami **polarisasi lingkaran**
6. Pada polarisasi lingkaran, amplitudo simpangan selalu sama ke manapun arah simpangan tersebut.
7. Jika amplitudo saat simpangan mengarah ke atas-bawah dan saat simpangan mengarah ke kiri-kanan tidak sama maka gelombang dikatakan mengalami **polarisasi elips**.

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskan fenomena terjadinya polarisasi !
2. Jelaskan kenapa terjadi suatu gelombang tidak mengalami polarisasi !
3. Jelaskan bagaimana suatu gelombang dikatakan mengalami polarisasi linier!
4. Jelaskan bagaimana suatu gelombang dikatakan mengalami polarisasi lingkaran!
5. Jelaskan bagaimana suatu gelombang dikatakan mengalami polarisasi elips!
6. Gambarkan bagaimana arah osilasi gelombang yang memiliki jenis polarisasi berbeda pada berbagai waktu, untuk gelombang yang tidak terpolarisasi, yang mengalami polarisasi linier, polarisasi lingkaran dan polarisasi elips!

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Polarisasi Cahaya

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami tentang polarisasi Cahaya
2. Mahasiswa mampu menjelaskan aplikasi tentang polarisasi cahaya dalam kehidupan sehari-hari

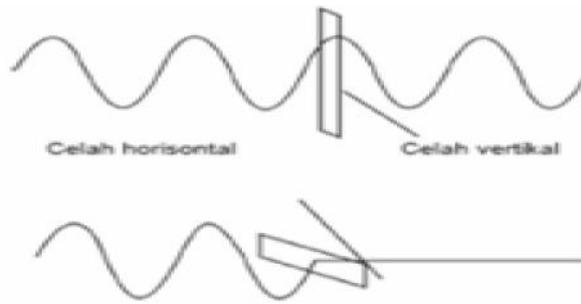
URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Gelombang elektromagnetik merupakan gelombang transversal. Arah osilasi medan magnet maupun medan listrik tegak lurus pada arah perambatan gelombang. Jika arah osilasi medan selalu mempertahankan arahnya selama gelombang merambat maka gelombang tersebut memiliki polarisasi bidang. Dikatakan polarisasi bidang karena arah osilasi medan selama gelombang merambat selalu berada pada suatu bidang.

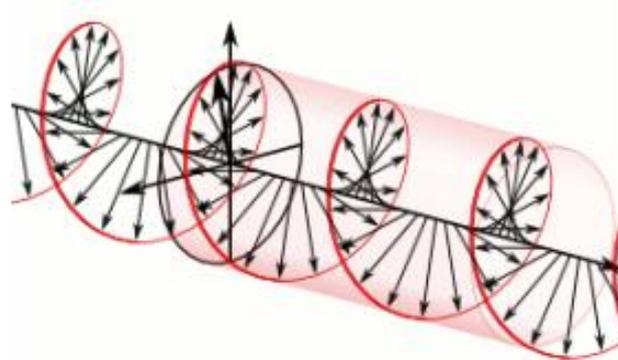
Polarisasi adalah suatu peristiwa perubahan arah getar gelombang pada cahaya yang acak menjadi satu arah getar. Polarisasi merupakan parameter penting yang menentukan kualitas gelombang elektromagnetik. Karena cahaya termasuk gelombang elektromagnetik, maka cahaya ini mempunyai medan listrik, dan juga medan magnet yang keduanya saling berosilasi dan saling tegak lurus satu sama lain, serta tegak lurus terhadap arah rambatan.

Gejala polarisasi dapat digambarkan dengan gelombang yang terjadi pada tali yang dilewatkan pada celah. Apabila tali digetarkan searah dengan celah maka gelombang pada tali dapat melewati celah tersebut. Sebaliknya jika tali digetarkan dengan arah tegak lurus celah maka gelombang pada tali tidak bisa melewati celah tersebut. Sinar alami seperti sinar matahari pada umumnya adalah sinar yang tak terpolarisasi. Cahaya dapat mengalami polarisasi dengan berbagai cara, antara lain karena peristiwa pemantulan, pembiasan, bias kembar, absorpsi selektif, dan hamburan.

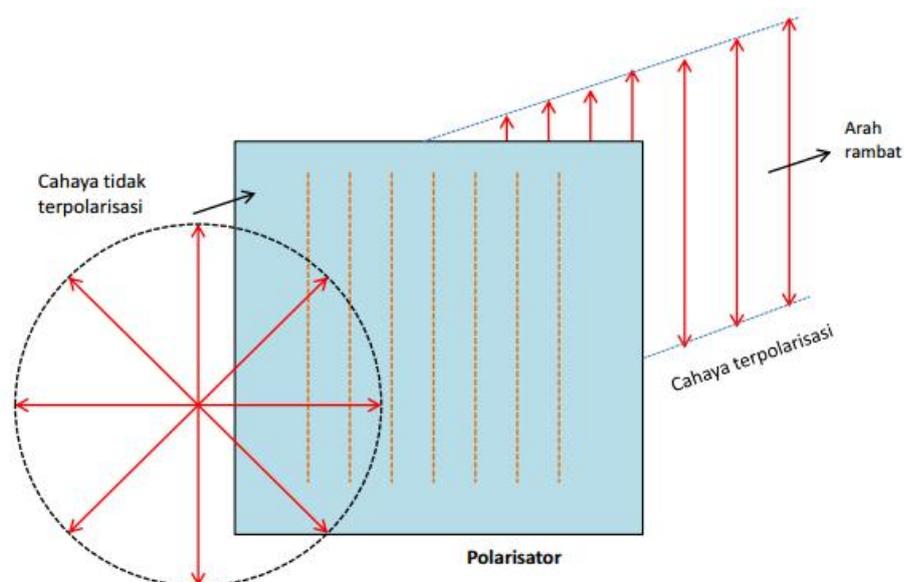


Gambar 12.3 Gelombang transversal

Umumnya, gelombang yang dihasilkan suatu sumber memiliki arah osilasi medan yang berubah-ubah secara acak. Gelombang dengan arah osilasi demikian dikatakan gelombang yang *tidak terpolarisasi*. Gambar 12.4 adalah ilustrasi gelombang merambat, orientasi medan listrik maupun medan magnet selalu berubah.



Gambar 12.4 Contoh gelombang dengan arah polarisasi berubah-ubah



Gambar 12.5 Intensitas cahaya yang lewat polarisator dari cahaya tidak terpolarisasi yang jatuh sama dengan setengah intensitas semula

Gelombang yang tidak terpolarisasi dapat diubah menjadi gelombang yang dinamakan *film Polaroid*. Film ini mengandung molekul-molekul berantai panjang yang tersusun pada film tersebut.

Cahaya tidak terpolarisasi yang jatuh pada polarisator

Misalkan cahaya tidak terpolarisasi memiliki intensitas I_0 . Berkas cahaya tersebut jatuh pada sebuah polarisator. Berapakah intensitas cahaya setelah melewati polarisasi, maka intensitas cahaya setelah melewati polarisator selalu setengah dari intensitas cahaya datang.

Cahaya terpolarisasi yang jatuh pada polarisator

Namun, jika cahaya yang jatuh pada polarisator sudah terpolarisasi maka intensitas cahaya yang lolos bergantung pada sudut antara arah osilasi cahaya datang dengan sumbu mudah polarisator. Intensitas cahaya yang dilewatkan memenuhi

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (12.1)$$

dengan

I_0 : Intensitas cahaya datang,

I : Intensitas cahaya terlewatkan,

θ : Sudut antara arah osilasi cahaya datang dengan sumbu mudah polarisator

Contoh Soal 12.1:

Cahaya tak terpolarisasi jatuh pada susunan dua polarisator. Satu polarisator memiliki sumbu mudah arah atas-bawah sedangkan polarisator kedua memiliki sumbu mudah membentuk sudut 60° terhadap arah atas-bawah. Intensitas cahaya yang keluar dari polarisator kedua serta arah osilasi medan. Intensitas cahaya tidak terpolarisasi adalah I_0

Jawaban :

Karena polarisator pertama dimasuki cahaya tak terpolarisasi maka intensitas cahaya yang keluar polarisator pertama adalah

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

Cahaya yang keluar polarisator pertama menjadi cahaya yang masuk polarisator kedua. Arah osilasi gelombang yang keluar polarisator pertama sama dengan arah sumbu mudah polarisator pertama. Dengan demikian, arah osilasi medan yang masuk medan yang masuk polarisator kedua membentuk sudut 60° dengan sumbu mudah polarisator kedua. Dengan demikian, intensitas cahaya keluar polarisator kedua adalah

$$I_2 = I_1 \cos^2 60^\circ = \frac{I_0}{2} \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{8} I_0$$

Arah osilasi gelombang yang keluar dari polarisator kedua .

Polarisasi oleh permukaan

Ada satu sifat yang menarik yang dimiliki gelombang elektromagnetik ketika jatuh pada satu permukaan. Saat jatuh dibidang batas dua medium, sebagian gelombang dipantulkan dan sebagian dibiaskan. Jika cahaya yang jatuh merupakan cahaya yang tidak terpolarisasi, maka cahaya yang dibiaskan dan yang dipantulkan umumnya tidak terpolarisasi juga. Namun, khusus untuk cahaya yang dipantulkan, komponen medan yang berada pada bidang normal bergantung pada sudut datang. Bidang normal adalah bidang yang dibentuk oleh cahaya datang, cahaya bias, dan cahaya pantul. Jika sudut datang diubah-ubah maka komponen

medan yang berada pada bidang tersebut berubah-ubah besarnya. Dan ada satu sudut, dimana komponen medan dalam arah bidang tersebut tepat menjadi nol. Sudut ini bergantung pada indeks bias medium pertama dan kedua.

Secara matematik dapat ditunjukkan bahwa, ketika jumlah sudut datang dan sudut bias sama dengan 90° maka cahaya yang dipantulkan tidak memiliki komponen osilasi sejajar bidang normal. Cahaya yang dipantulkan hanya memiliki komponen osilasi tegak lurus bidang normal. Artinya, cahaya yang dipantulkan terpolarisasi bidang.

Jika sudut datang dalam keadaan ini adalah Q_B maka terpenuhi

$$Q_B + r = 90^\circ$$

dengan r adalah sudut bias. Kita dapat menulis

$$r = 90^\circ - Q_B$$

Dengan menggunakan hukum Snell $n_1 \sin Q_B = n_2 \sin r$ maka

$$n_1 \sin Q_B = n_2 \sin(90^\circ - Q_B) = n_2 \cos Q_B$$

atau

$$\tan Q_B = \frac{n_2}{n_1} \quad (12.2)$$

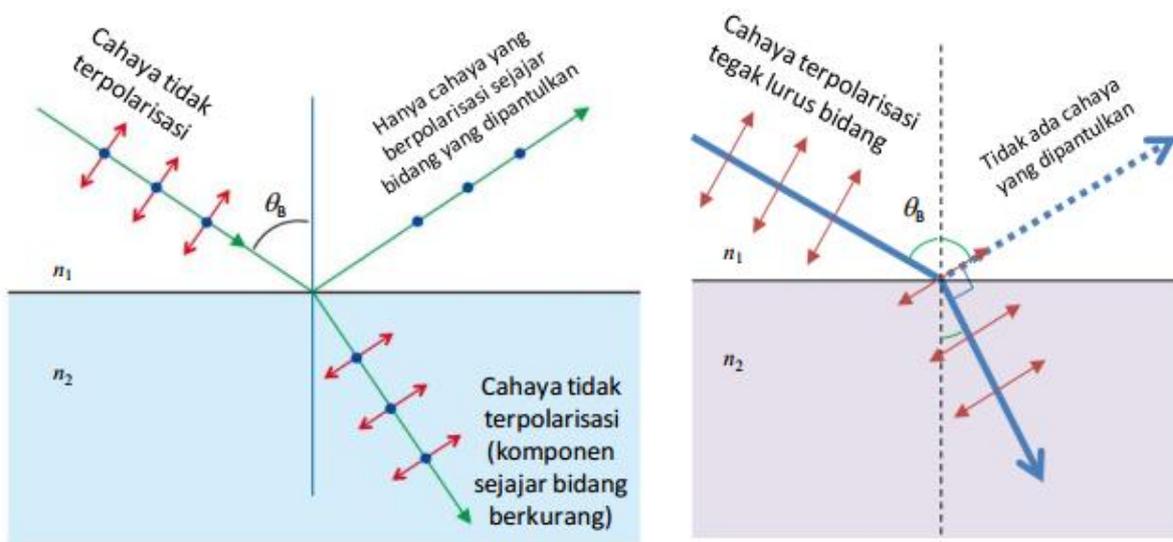
Sudut Q_B dikenal dengan **sudut Brewster**.

Mengilustrasikan pemantulan dan pembiasan cahaya ketika sudut datang sama dengan sudut Brewster. Jika cahaya datang mengandung komponen osilasi sejajar dan tegak lurus bidang normal maka cahaya bias mengandung osilasi yang sejajar dan tegak lurus bidang normal. Namun cahaya yang dibiaskan hanya mengandung arah osilasi tegak lurus bidang normal. Komponen osilasi yang tegak lurus bidang pada cahaya bias menjadi lebih kecil karena sebagian sudah dipantulkan. Sedangkan komponen osilasi yang sejajar bidang normal pada cahaya bias hampir tidak berubah. Fenomena ini diilustrasikan pada gambar 12.6 (a)

Kondisi lainnya adalah jika cahaya datang hanya memiliki komponen osilasi sejajar bidang normal. Karena yang dipantulkan saat sudut datang sama dengan sudut Brwster hanya

komponen yang tegak lurus bidang normal, maka pada kasus ini tidak ada cahaya yang dipantulkan. Hanya cahaya bias yang ada pada seperti diilustrasikan pada gambar 12.6 (b).

Fenomena pemantulan oleh permukaan dapat digunakan untuk mendapatkan cahaya terpolarisasi. Dengan mengarahkan cahaya tidak terpolarisasi pada bidang batas dan mengatur sudut datang sama dengan sudut Brewster maka cahaya pantul menjadi cahaya terpolarisasi.



Gambar 12.6 Sifat pembiasan dan pemantulan ketika cahaya jatuh dengan sudut sama dengan sudut Brewster.

Sifat pembiasan dan pemantulan ketika cahaya jatuh dengan sudut sama dengan sudut Brewster, (a) jika cahaya datang merupakan cahaya yang tidak terpolarisasi maka cahaya pantul merupakan cahaya terpolarisasi dengan arah osilasi tegak lurus bidang normal. Cahaya yang dibiaskan tidak terpolarisasi, namun komponen osilasi yang tegak lurus bidang normal lebih lemah. (b) jika cahaya datang sudah terpolarisasi dengan arah polarisasi sejajar bidang normal maka tidak ada cahaya pantul, yang ada hanya pembiasan.

Contoh Soal 12.2:

- (a) Dengan sudut datang berapakah agar cahaya matahari yang dipantulkan danau terpolarisasi linier?
- (b) Berapakah sudut bias cahaya pada saat itu? Indeks bias udara $n_1 = 1$ dan indeks bias air $n_2 = 1,33$.

Jawaban :

- (a) Cahaya pantul terpolarisasi jika sudut datang sama dengan sudut Brewster yang memenuhi

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,33}{1} = 1,33$$

atau

$$\theta_B = 53^\circ$$

- (b) Saat terjadi polarisasi pada cahaya pantul, maka jumlah sudut datang dan sudut bias 90° . Jika sudut bias r maka $\theta_B + r = 90^\circ$ atau $r = 90^\circ - \theta_B = 90^\circ - 53^\circ = 37^\circ$

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang fenomena terjadinya polarisasi cahaya
2. Diskusikan dengan kelompokmu bagaimana mengubah gelombang cahaya agar terpolarisasi
3. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang polarisasi akibat permukaan

RANGKUMAN

1. Jika arah osilasi medan selalu mempertahankan arahnya selama gelombang merambat maka gelombang tersebut memiliki polarisasi bidang.
2. Polarisasi adalah suatu peristiwa perubahan arah getar gelombang pada cahaya yang acak menjadi satu arah getar.
3. Polarisasi merupakan parameter penting yang menentukan kualitas gelombang elektromagnetik.
4. Gejala polarisasi dapat digambarkan dengan gelombang yang terjadi pada tali yang dilewatkan pada celah. Apabila tali digetarkan searah dengan celah maka gelombang pada tali dapat melewati celah tersebut. Sebaliknya jika tali digetarkan dengan arah tegak lurus celah maka gelombang pada tali tidak bisa melewati celah tersebut.
5. Sinar alami seperti sinar matahari pada umumnya adalah sinar yang tak terpolarisasi.
6. Cahaya dapat mengalami polarisasi dengan berbagai cara, antara lain karena peristiwa pemantulan, pembiasan, bias kembar, absorpsi selektif, dan hamburan.
7. Gelombang yang dihasilkan suatu sumber memiliki arah osilasi medan yang berubah-ubah secara acak dikatakan gelombang yang *tidak terpolarisasi*.
8. Gelombang yang tidak terpolarisasi dapat diubah menjadi gelombang yang dinamakan *film Polaroid*. Film ini mengandung molekul-molekul berantai panjang yang tersusun pada film tersebut.
9. Misalkan cahaya tidak terpolarisasi memiliki intensitas I_0 . Intesitas cahaya setelah melewati polarisator selalu setengah dari intensitas cahaya datang.
10. Jika cahaya yang jatuh pada polarisator sudah terpolarisasi maka intensitas cahaya yang lolos bergantung pada sudut antara arah osilasi cahaya datang dengan sumbu mudah polarisator. Intensitas cahaya yang dilewatkan memenuhi

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

11. Jika cahaya yang jatuh merupakan cahaya yang tidak terpolarisasi, maka cahaya yang dibiaskan dan yang dipantulkan umumnya tidak terpolarisasi juga.
12. Ketika jumlah sudut datang dan sudut bias sama dengan 90° maka cahaya yang dipantulkan tidak memiliki komponen osilasi sejajar bidang normal. Cahaya yang

dipantulkan hanya memiliki komponen osilasi tegak lurus bidang normal. Artinya, cahaya yang dipantulkan terpolarisasi bidang.

13. Fenomena pemantulan oleh permukaan dapat digunakan untuk mendapatkan cahaya terpolarisasi. Dengan mengarahkan cahaya tidak terpolarisasi pada bidang batas dan mengatur sudut datang sama dengan sudut Brewster maka cahaya pantul menjadi cahaya terpolarisasi.
14. Jika cahaya datang merupakan cahaya yang tidak terpolarisasi maka cahaya pantul merupakan cahaya terpolarisasi dengan arah osilasi tegak lurus bidang normal.

EVALUASI FORMATIF 2

1. Jelaskan bagaimana fenomena polarisasi gelombang cahaya!
2. Jelaskan syarat suatu gelombang memiliki polarisasi bidang !
3. Jelaskan apakah sinar matahari adalah gelombang cahaya yang terpolarisasi? Mengapa !
4. Jelaskan bagaimana cara mengubah gelombang yang tidak terpolarisasi menjadi terpolarisasi !
5. Jelaskan hukum brewster dan hubungannya dengan fenomena polarisasi!
6. Cahaya tak terpolarisasi jatuh pada susunan dua polarisator. Satu polarisator memiliki sumbu mudah arah atas-bawah sedangkan polarisator kedua memiliki sumbu mudah membentuk sudut 30^0 terhadap arah atas-bawah. Intensitas cahaya yang keluar dari polarisator kedua serta arah osilasi medan. Intensitas cahaya tidak terpolarisasi adalah I_0 !
7. Jelaskan dengan ringkas bagaimana sifat pembiasan dan pemantulan ketika cahaya jatuh pada permukaan dengan sudut sama dengan sudut Brewster !

Lembar Kerja Praktek 2

Kegiatan Pembelajaran 3: Aplikasi Polarisasi

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai aplikasi polarisasi
2. Mahasiswa memiliki mampu menjelaskan penggunaan polarisasi dalam kehidupan sehari-hari dan prinsip kerjanya

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

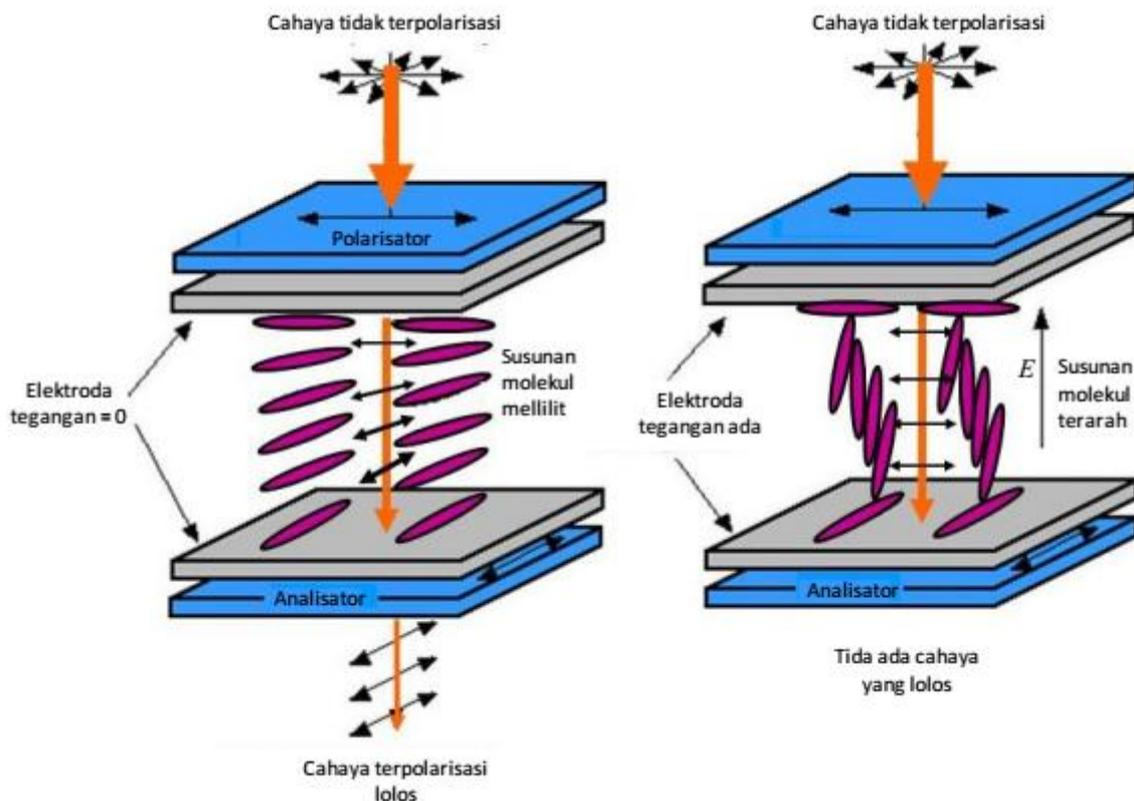
Kristal cair (*liquid crystal*, LC)

LC adalah sejenis molekul yang dapat mempengaruhi arah polarisasi cahaya. Arah polarisasi cahaya yang dihasilkan bergantung pada orientasi molekul tersebut. Dan orientasi molekul dapat diatur dengan memberikan medan listrik.

Jika cahaya terpolarisasi melewati molekul LC yang berada dalam keadaan acak (tidak diberikan medan listrik) maka arah polarisasi cahaya memutar. Arah polarisasi cahaya bisa memutar 90° (menjadi tegak lurus dengan arah polarisasi cahaya datang) dengan mengatur ketebalan lapisan LC. Sebaliknya, jika pada LC diberikan medan listrik sehingga molekul berorientasi secara sempurna maka arah polarisasi cahaya tidak terpengaruh (sama dengan arah polarisasi cahaya datang). Yang menarik adalah, jika LC ditempatkan antara dua polarisator dengan arah orientasi tegak lurus. Cahaya yang masuk LC memiliki polarisasi yang sama dengan arah sumbu polarisator pertama. Jika LC tidak dikenai medan listrik maka arah orientasi cahaya berputar 90° dan ketika keluar dari LC dan masuk ke polarisator kedua, maka arah polarisasi 90° cahaya persis sama dengan arah sumbu polarisator kedua. Akibatnya cahaya lolos di polarisator kedua.

Tetapi jika LCD dikenai medan listrik maka orientasi molekul menjadi terarah sehingga arah polarisasi cahaya tidak terpengaruh. Ketika cahaya masuk ke polarisator kedua, cahaya ditahan karena arah orientasinya tegak lurus sumbu polarisator kedua. Prinsip inilah yang digunakan pada pembuatan monitor LCD atau TV LCD.

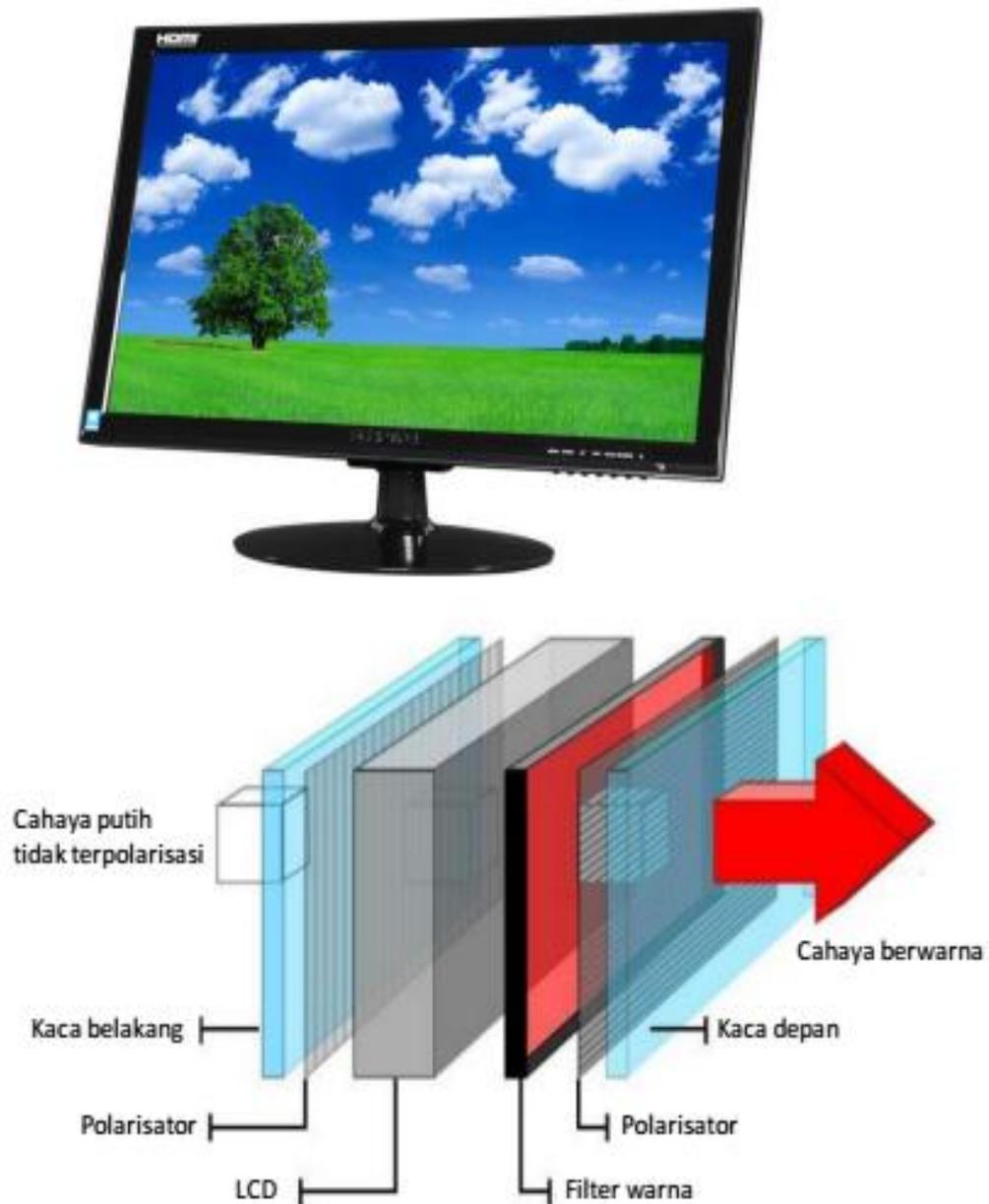
Arah orientasi molekul LC dapat diatur dengan menerapkan medan listrik yang berbeda. Dengan demikian arah polarisasi cahaya yang meninggalkan LC dan masuk ke polarisator kedua juga dapat diatur. Intensitas cahaya yang dilewatkan polarisator kedua bergantung pada sudut antara arah polarisasi cahaya yang meninggalkan molekul LC dan sumbu polarisator kedua. Dengan demikian, intensitas cahaya yang diloloskan polarisator kedua dapat diatur dengan mengatur kuat medan listrik. Ini berakibat, intensitas pixel di layar dapat diatur dengan menerapkan medan listrik yang berbeda.



Gambar 12.7 Orientasi molekul pada (*liquid crystal*)LC

Gambar 12.7 (kiri) Orientasi molekul LC jika tidak diberikan medan listrik akan menggulung. Orientasi ini akan menyebabkan arah polarisasi cahaya diputar sedikit demi

sedikit. Jika cahaya datang berupa cahaya yang sudah terpolarisasi dan ketebalan LC diatur sedemikian rupa sehingga selama merambat dalam LC cahaya mengubah polarisasi sebesar 90° , kemudian di sisi belakang LC dipasang analisator yang membentuk sudut 90° dengan polarisator maka cahaya dapat lolos pada analisator, (kanan) jika diberikan medan listrik maka orientasi molekul LC akan menyearah dan orientasi tersebut tidak mengubah arah polarisasi cahaya. Ketika mengenai analisator maka cahaya tidak dapat lolos.



Gambar 12.8 Contoh monitor LCD (kiri) dan susunan material penyusun (kanan) LCD (Lon Kloning)

Jika setelah polarisator kedua dipasang filter cahaya (merah, hijau, biru), maka cahaya yang lolos polarisator kedua akan menghasilkan warna sesuai dengan warna filter yang dipasang. Pada perancangan LC, satu pixel dibentuk oleh tiga filter cahaya. Dengan mengatur intensitas cahaya yang mengenai masing-masing filter (mengatur kuat medan yang mengenai LC) maka semua warna dapat diperoleh (kombinasi intensitas tiga warna dasar).

Dengan memanfaatkan sifat ini maka LC telah digunakan untuk membuat display yang kita kenal dengan *Liquid Crystal Display* (LCD). Gambar 12.8 (atas) adalah contoh monitor LCD yang cukup terkenal beberapa tahun lalu sebelum digantikan oleh monitor *light emitting diode* (LED). Monitor tersebut sebenarnya terdiri dari beberapa lapis material yang sangat tipis dan komponen utamanya adalah polarisator, LC dan analisator.

Kaca (*sunglasses*) Polaroid

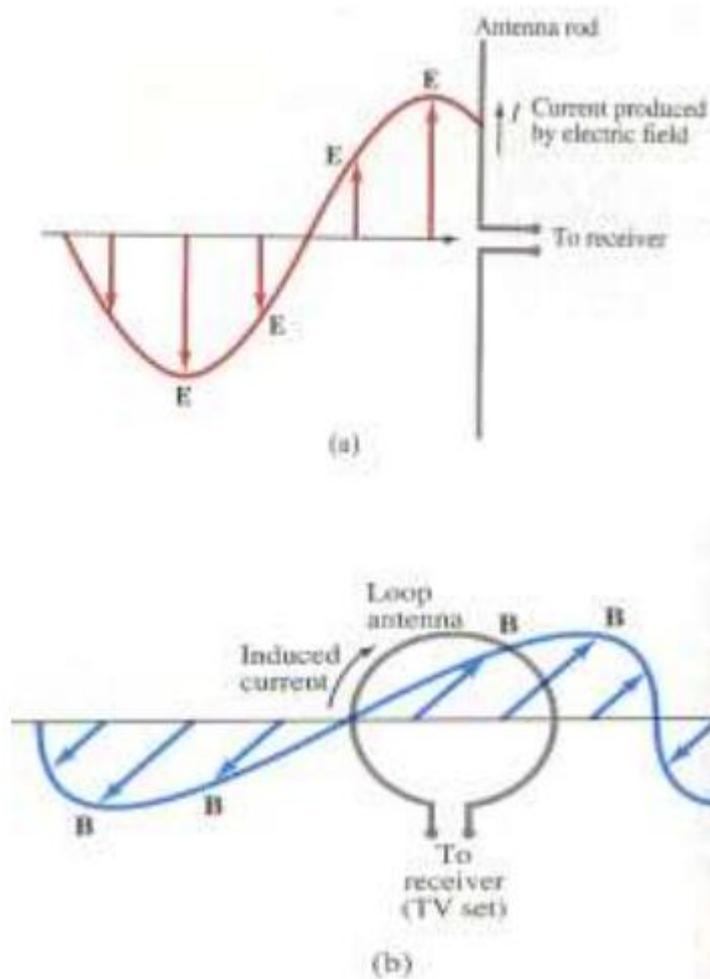
Pantulan dari suatu permukaan obyek yang menyebabkan silau (*glare*) dapat diminimalisir menggunakan kaca polaroid. Sumbu polarisasi lensanya vertikal yang mana pantulan dari permukaan-permukaan horizontal sebagian besar menyebabkan silau. Hal yang sama juga terdapat pada beberapa kacamata yang dilapisi oleh lapisan polaroid yang berfungsi mereduksi silau (*glare*).



Gambar 12.9 Contoh kaca polaroid mobil

Antena VHF dan UHF (aerial)

Gelombang-gelombang radio dapat dideteksi melalui medan listrik E maupun medan magnet B . Stasiun mentransmisikan gelombang-gelombang radio yang terpolarisasi linier/ bidang. Medan listrik gelombang elektromagnetik E yang menghasilkan arus dalam antenna terdapat pada kawat/ batang besi antenna, kemudian disambungkan ke *receiver* (Gambar a). Antena mengubah medan magnet B menginduksi ggl dan arus dalam loop antenna (Gambar b).



Gambar 12.10 Contoh polarisasi pada a). Antena mengubah medan magnet B menginduksi ggl b). arus dalam loop antenna

Warna Biru langit

Sebelum sampai ke bumi, cahaya matahari telah melalui partikel – partikel udara di atmosfer sehingga mengalami hamburan oleh partikel – partikel di atmosfer itu. Fenomena menarik dari peristiwa polarisasi hamburan adalah langit yang tampak berwarna biru. Fenomena ini terjadi karena kuantitas cahaya yang dihamburkan bergantung pada panjang gelombang cahaya tersebut. Semakin besar panjang gelombang cahaya maka semakin sedikit cahaya yang dihamburkan oleh molekul udara. Cahaya merah dan jingga memiliki panjang gelombang lebih besar daripada cahaya biru dan ungu sehingga cahaya merah dan jingga dihamburkan lebih sedikit daripada cahaya biru dan ungu. Itulah sebabnya mengapa langit tampak berwarna biru.

Kacamata ryben

Kacamata ryben adalah kacamata yang digunakan saat terik matahari, seperti di pantai atau sedang naik sepeda motor. Tujuannya supaya sinar yang keluar dari kaca ryben sudah terpolarisasi dan intensitas cahaya mengecil tidak menyebabkan silau

Filter pada fotografi

Penggunaan filter pada fotografi memungkinkan memperoleh gambar yang lebih jelas dengan mereduksi cahaya-cahaya yang tidak diperlukan.

Filter Polaroid

Digunakan untuk melakukan analisis tegangan (stress) pada plastic transparan. Saat cahaya melewati plastic, tiap warna cahaya tampak akan dipolarisasi dengan arahnya masing – masing. Jika plastic semacam itu diletakkan di antara dua pelat polarisasi, akan tampak pola warna – warni. Jika salah satu pelat diputar, pola warna akan berubah karena warna yang semula dihambat sekarang diteruskan.

Pertunjukan Film 3 Dimensi

Film ini dibuat dengan menggunakan dua buah kamera atau kamera khusus dengan dua lensa. Film 3 dimensi sebenarnya terdiri atas dua film yang dipertunjukkan pada saat yang sama oleh dua proyektor film. Di dalam gedung bioskop, kedua film diproyeksikan pada layar secara simultan. Kedua film berasal dari dua proyektor yang ditempatkan pada lokasi berbeda. Tiap film kemudian diproyeksikan dari dua sisi yang berbeda ke dalam layar logam.

Sebuah filter polarisasi yang diletakkan di depan lensa proyektor sebelah kiri akan meneruskan gelombang cahaya dari gambar pada suatu arah getar tertentu. Bersamaan dengan itu filter lain di bagian kanan akan meneruskan gelombang cahaya tegak lurus arah getar yang dihasilkan oleh filter pertama. Film diproyeksikan melalui filter polarisasi. Sumbu filter polarisasi untuk proyektor sebelah kiri dan sumbu filter polarisasi untuk proyektor sebelah kanan saling tegak lurus. Akibatnya, dua film yang sedikit berbeda diproyeksikan ke layar. Tiap film dipancarkan oleh cahaya yang terpolarisasi dengan arah tegak lurus terhadap film yang satunya. Penonton mengenakan kacamata khusus yang berfungsi sebagai filter. Filter ini akan menyebabkan kesan gambar yang diterima oleh mata kiri dan kanan akan berbeda. Sehingga kesan gambar tiga dimensi akan terasa.

Kacamata 3 Dimensi

Kacamata ini memiliki dua filter Polaroid. Tiap filter memiliki sumbu polarisasi yang berbeda, satu horizontal dan satunya vertical. Hasil penyusunan proyektor dan filter itu adalah bahwa mata kiri menonton film dari proyektor sebelah kanan, sedangkan mata kanan menonton film dari proyektor sebelah kiri. Hal ini memberi kesan adanya kedalaman gambar 3 dimensi.

Sacharimeter

Sacharimeter adalah polarimeter yang khusus untuk menentukan konsentrasi larutan gula. Larutan gula disebut larutan optik aktif. Larutan tersebut ada yang dapat memutar bidang getar polarisasi ke kiri dan ada juga yang ke kanan. Dengan alat semacam ini, orang dapat menentukan konsentrasi larutan optik aktif.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang aplikasi polarisasi !
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang masing-masing prinsip kerja pada aplikasi polarisasi yang kamu ketahui !

RANGKUMAN

1. LC adalah sejenis molekul yang dapat mempengaruhi arah polarisasi cahaya. Arah polarisasi cahaya yang dihasilkan bergantung pada orientasi molekul tersebut. Dan orientasi molekul dapat diatur dengan memberikan medan listrik.
2. Jika cahaya terpolarisasi melewati molekul LC yang berada dalam keadaan acak (tidak diberikan medan listrik) maka arah polarisasi cahaya memutar. Arah polarisasi cahaya bisa memutar 90^0 (menjadi tegak lurus dengan arah polarisasi cahaya datang) dengan mengatur ketebalan lapisan LC. Sebaliknya, jika pada LC diberikan medan listrik sehingga molekul berorientasi secara sempurna maka arah polarisasi cahaya tidak terpengaruh (sama dengan arah polarisasi cahaya datang).
3. Jika LC tidak dikenai medan listrik maka arah orientasi cahaya berputar 90^0 dan ketika keluar dari LC dan masuk ke polarisator kedua, maka arah polarisasi 90^0 cahaya persis sama dengan arah sumbu polarisator kedua. Akibatnya cahaya lolos di polarisator kedua.
4. Jika LCD dikenai medan listrik maka orientasi molekul menjadi terarah sehingga arah polarisasi cahaya tidak terpengaruh. Ketika cahaya masuk ke polarisator kedua, cahaya ditahan karena arah orientasinya tegak lurus sumbu polarisator kedua. Prinsip inilah yang digunakan pada pembuatan monitor LCD atau TV LCD.
5. Intensitas cahaya yang dilewatkan polarisator kedua bergantung pada sudut antara arah polarisasi cahaya yang meninggalkan molekul LC dan sumbu polarisator kedua. Dengan demikian, intensitas cahaya yang diloloskan polarisator kedua dapat diatur dengan mengatur kuat medan listrik. Ini berakibat, intensitas pixel di layar dapat diatur dengan menerapkan medan listrik yang berbeda.
6. Pantulan dari suatu permukaan obyek yang menyebabkan silau (*glare*) dapat diminimalisir menggunakan kaca polaroid. Sumbu polarisasi lensanya vertikal yang mana pantulan dari permukaan-permukaan horizontal sebagian besar menyebabkan silau.
7. Gelombang-gelombang radio dapat dideteksi melalui medan listrik E maupun medan magnet B. Stasiun mentransmisikan gelombang-gelombang radio yang terpolarisasi linier/ bidang.
8. Semakin besar panjang gelombang cahaya maka semakin sedikit cahaya yang dihamburkan oleh molekul udara. Cahaya merah dan jingga memiliki panjang gelombang lebih besar daripada cahaya biru dan ungu sehingga cahaya merah dan jingga

dihamburkan lebih sedikit daripada cahaya biru dan ungu. Itulah sebabnya mengapa langit tampak berwarna biru.

9. Sinar yang keluar dari kaca ryben sudah terpolarisasi dan intensitas cahaya mengecil tidak menyebabkan silau
10. Sacharimeter adalah polarimeter yang khusus untuk menentukan konsentrasi larutan gula.
11. Kacamata 3 Dimensi memiliki dua filter Polaroid. Tiap filter memiliki sumbu polarisasi yang berbeda, satu horizontal dan satunya vertical.
12. Pada film 3 dimensi, sebuah filter polarisasi yang diletakkan di depan lensa proyektor sebelah kiri akan meneruskan gelombang cahaya dari gambar pada suatu arah getar tertentu. Bersamaan dengan itu filter lain di bagian kanan akan meneruskan gelombang cahaya tegak lurus arah getar yang dihasilkan oleh filter pertama. Film diproyeksikan melalui filter polarisasi.

EVALUASI FORMATIF 3

1. Jelaskan prinsip kerja aplikasi polarisasi pada LCD!
2. Jelaskan fenomena langit berwarna biru pada siang hari dengan polarisasi !
3. Jelaskan fenomena langit berwarna orange pada sore hari dengan polarisasi !
4. Jelaskan fenomena polarisasi pada pertunjukan film 3 dimensi!
5. Jelaskan prinsip kerja aplikasi polarisasi pada Sacharimeter!
6. Jelaskan prinsip kerja aplikasi polarisasi pada Kacamata ryben!

Lembar Kerja Praktek 3

RANGKUMAN MODUL

1. Ketika gelombang merambat maka titik-titik pada medium mengalami penyimpangan
2. Untuk gelombang transversal, arah penyimpangan titik-titik tersebut tegak lurus arah rambat gelombang.
3. Jika selama gelombang merambat arah penyimpangan selalu sama, misalnya selalu berarah dari atas ke bawah, maka kita katakan gelombang tersebut mengalami **polarisasi linier**.
4. Jika selama gelombang merambat, arah penyimpangan titik-titik pada medium selalu berubah-ubah secara acak maka kita katakan gelombang tersebut **tidak terpolarisasi**.
5. Jika selama perambatan gelombang arah penyimpangan selalu berubah-ubah secara teratur, kita katakan gelombang mengalami **polarisasi lingkaran**
6. Pada polarisasi lingkaran, amplitudo simpangan selalu sama ke manapun arah simpangan tersebut.
7. Jika amplitudo saat simpangan mengarah ke atas-bawah dan saat simpangan mengarah ke kiri-kanan tidak sama maka gelombang dikatakan mengalami **polarisasi ellips**.
8. Jika arah osilasi medan selalu mempertahankan arahnya selama gelombang merambat maka gelombang tersebut memiliki polarisasi bidang.
9. Polarisasi adalah suatu peristiwa perubahan arah getar gelombang pada cahaya yang acak menjadi satu arah getar.
10. Polarisasi merupakan parameter penting yang menentukan kualitas gelombang elektromagnetik.
11. Gejala polarisasi dapat digambarkan dengan gelombang yang terjadi pada tali yang dilewatkan pada celah. Apabila tali digetarkan searah dengan celah maka gelombang pada tali dapat melewati celah tersebut. Sebaliknya jika tali digetarkan dengan arah tegak lurus celah maka gelombang pada tali tidak bisa melewati celah tersebut.
12. Sinar alami seperti sinar matahari pada umumnya adalah sinar yang tak terpolarisasi.
13. Cahaya dapat mengalami polarisasi dengan berbagai cara, antara lain karena peristiwa pemantulan, pembiasan, bias kembar, absorpsi selektif, dan hamburan.
14. Gelombang yang dihasilkan suatu sumber memiliki arah osilasi medan yang berubah-ubah secara acak dikatakan gelombang yang **tidak terpolarisasi**.

15. Gelombang yang tidak terpolarisasi dapat diubah menjadi gelombang yang dinamakan *film Polaroid*. Film ini mengandung molekul-molekul berantai panjang yang tersusun pada film tersebut.
16. Misalkan cahaya tidak terpolarisasi memiliki intensitas I_0 . Intesitas cahaya setelah melewati polarisator selalu setengah dari intensitas cahaya datang.
17. Jika cahaya yang jatuh pada polarisator sudah terpolarisasi maka intensitas cahaya yang lolos bergantung pada sudut antara arah osilasi cahaya datang dengan sumbu mudah polarisator. Intensitas cahaya yang dilewatkan memenuhi

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

18. Jika cahaya yang jatuh merupakan cahaya yang tidak terpolarisasi, maka cahaya yang dibiarkan dan yang dipantulkan umumnya tidak terpolarisasi juga.
19. Ketika jumlah sudut datang dan sudut bias sama dengan 90° maka cahaya yang dipantulkan tidak memiliki komponen osilasi sejajar bidang normal. Cahaya yang dipantulkan hanya memiliki komponen osilasi tegak lurus bidang normal. Artinya, cahaya yang dipantulkan terpolarisasi bidang.
20. Fenomena pemantulan oleh permukaan dapat digunakan untuk mendapatkan cahaya terpolarisasi. Dengan mengarahkan cahaya tidak terpolarisasi pada bidang batas dan mengatur sudut datang sama dengan sudut Brewster maka cahaya pantul menjadi cahaya terpolarisasi.
21. Jika cahaya datang merupakan cahaya yang tidak terpolarisasi maka cahaya pantul merupakan cahaya terpolarisasi dengan arah osilasi tegak lurus bidang normal.
22. LC adalah sejenis molekul yang dapat mempengaruhi arah polarisasi cahaya. Arah polarisasi cahaya yang dihasilkan bergantung pada orientasi molekul tersebut. Dan orientasi molekul dapat diatur dengan memberikan medan listrik.
23. Jika cahaya terpolarisasi melewati molekul LC yang berada dalam keadaan acak (tidak diberikan medan listrik) maka arah polarisasi cahaya memutar. Arah polarisasi cahaya bisa memutar 90° (menjadi tegak lurus dengan arah polarisasi cahaya datang) dengan mengatur ketebalan lapisan LC. Sebaliknya, jika pada LC diberikan medan listrik sehingga molekul berorientasi secara sempurna maka arah polarisasi cahaya tidak terpengaruh (sama dengan arah polarisasi cahaya datang).

24. Jika LC tidak dikenai medan listrik maka arah orientasi cahaya berputar 90^0 dan ketika keluar dari LC dan masuk ke polarisator kedua, maka arah polarisasi 90^0 cahaya persis sama dengan arah sumbu polarisator kedua. Akibatnya cahaya lolos di polarisator kedua.
25. Jika LCD dikenai medan listrik maka orientasi molekul menjadi terarah sehingga arah polarisasi cahaya tidak terpengaruh. Ketika cahaya masuk ke polarisator kedua, cahaya ditahan karena arah orientasinya tegak lurus sumbu polarisator kedua. Prinsip inilah yang digunakan pada pembuatan monitor LCD atau TV LCD.
26. Intensitas cahaya yang dilewatkan polarisator kedua bergantung pada sudut antara arah polarisasi cahaya yang meninggalkan molekul LC dan sumbu polarisator kedua. Dengan demikian, intensitas cahaya yang diloloskan polarisator kedua dapat diatur dengan mengatur kuat medan listrik. Ini berakibat, intensitas pixel di layar dapat diatur dengan menerapkan medan listrik yang berbeda.
27. Pantulan dari suatu permukaan obyek yang menyebabkan silau (*glare*) dapat diminimalisir menggunakan kaca polaroid. Sumbu polarisasi lensanya vertikal yang mana pantulan dari permukaan-permukaan horizontal sebagian besar menyebabkan silau.
28. Gelombang-gelombang radio dapat dideteksi melalui medan listrik E maupun medan magnet B. Stasiun mentransmisikan gelombang-gelombang radio yang terpolarisasi linier/ bidang.
29. Semakin besar panjang gelombang cahaya maka semakin sedikit cahaya yang dihamburkan oleh molekul udara. Cahaya merah dan jingga memiliki panjang gelombang lebih besar daripada cahaya biru dan ungu sehingga cahaya merah dan jingga dihamburkan lebih sedikit daripada cahaya biru dan ungu. Itulah sebabnya mengapa langit tampak berwarna biru.
30. Sinar yang keluar dari kaca ryben sudah terpolarisasi dan intensitas cahaya mengecil tidak menyebabkan silau.
31. Sacharimeter adalah polarimeter yang khusus untuk menentukan konsentrasi larutan gula.
32. Kacamata 3 Dimensi memiliki dua filter Polaroid. Tiap filter memiliki sumbu polarisasi yang berbeda, satu horizontal dan satunya vertical.
33. Pada film 3 dimensi, sebuah filter polarisasi yang diletakkan di depan lensa proyektor sebelah kiri akan meneruskan gelombang cahaya dari gambar pada suatu arah getar tertentu. Bersamaan dengan itu filter lain di bagian kanan akan meneruskan gelombang

cahaya tegak lurus arah getar yang dihasilkan oleh filter pertama. Film diproyeksikan melalui filter polarisasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi,
- Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing
- Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I
- Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.

Modul 13:

Efek Doppler

PENDAHULUAN

Ketika pesawat tempur sedang latihan dan kebetulan kalian menontonya, kalian akan mengalami fenomena berikut ini.

- i. Suara pesawat menggemuruh kencang ketika pesawat bergerak dari jauh mendekati ke arah kalian. Bunyi gelegar luar biasa kalian dengar bukan?
- ii. Tetapi ketika pesawat telah melintas di atas kepala kalian dan terbang menjauh, suara pesawat terdengar pelan walalupun lokasinya belum terlalu jauh dari kalian.

Mengapa bisa terjadi perbedaan suara tersaebut? Bukankah mesin penghasil suara tetap itu-itu juga? Jadi, ada efek arah gerak terhadap suara yang dihasilkan mesin pesawat. Dan memang benar, gerakan sumber suara atau gerak pendengar memiliki efek pada frekuensi yang didengar. Fenomena ini disebut **efek Doppler**.

Kegiatan Pembelajaran 1: Pengantar Efek Doppler

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai efek doppler
2. Mahasiswa memiliki mampu menyampaikan contoh efek doppler gelombang yang terdapat dalam kehidupan sehari-hari.

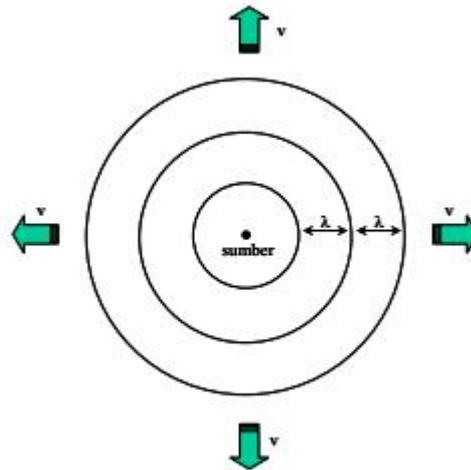
URAIAN MATERI

Konsep Dasar**a) Kasus I: Sumber suara dan pengamat tidak bergerak**

Sumber mengeluarkan suara dengan panjang gelombang λ ke segala arah. Di sekeliling sumber terbentuk pola kompresi udara dengan jarak λ satu dengan lainnya (**Gambar 13.1**). Pendengar yang diam di sekitar sumber akan mendengar bunyi dengan panjang gelombang λ . Jika kecepatan rambat gelombang di udara adalah v maka frekuensi yang didengar pendengar adalah

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (13.1)$$

yang persis sama dengan frekuensi yang dihasilkan sumber bunyi.



Gambar 13.1 Pola kompresi udara yang dihasilkan di sekitar sumber yang diam.

b) Kasus II: Pengamat mendekati sumber gelombang yang tidak bergerak

Gambar 13.2 mengilustrasikan kondisi ini. Sumber mengeluarkan suara dengan panjang gelombang λ ke segala arah. Di sekeliling sumber terbentuk pola kompresi udara dengan jarak λ satu dengan lainnya. Jika pendengar diam maka ia menangkap dua puncak gelombang dalam selang waktu T . Namun, jika pengamat bergerak mendekati sumber dengan laju u , maka setelah menerima satu puncak, pengamat tidak perlu menunggu waktu T untuk menerima puncak berikutnya. Pendengar menerima puncak berikutnya setelah selang waktu T' yang lebih pendek dari T . Berapa besar T' ? Mari kita cari.

- i. Mula-mula pendengar menerima puncak gelombang.
- ii. Gelombang bergerak ke kanan dan pengamatan bergerak ke kiri.

- iii. Puncak berikutnya diterima pengamat setelah selang waktu T' .
- iv. Selama selang waktu T'
 - (a) Gelombang sudah berpindah sejauh: vT'
 - (b) Pengamat sudah berpindah sejauh : uT'
- v. Lihat **Gambar 13.2** Pengamat menerima puncak berikutnya jika terpenuhi

$$vT' + uT' = \lambda$$

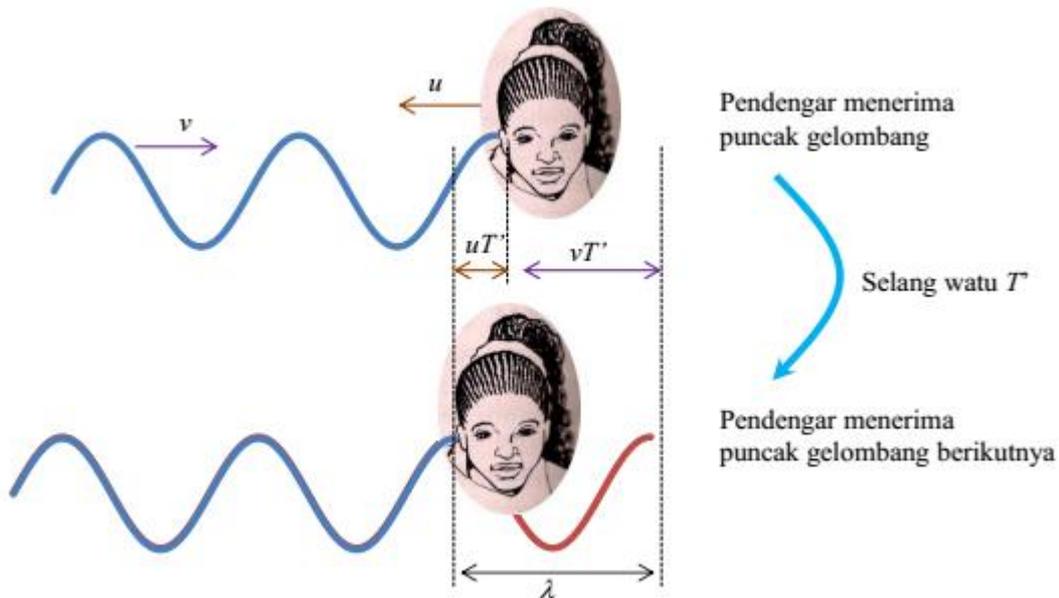
$$T' = \frac{\lambda}{v + u}$$

Tetapi $T' = \frac{1}{f'}$ dan $\lambda = \frac{v}{f}$ sehingga

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{v + u} \frac{v}{f}$$

Atau

$$f' = \frac{v + u}{v} f \tag{13.2}$$

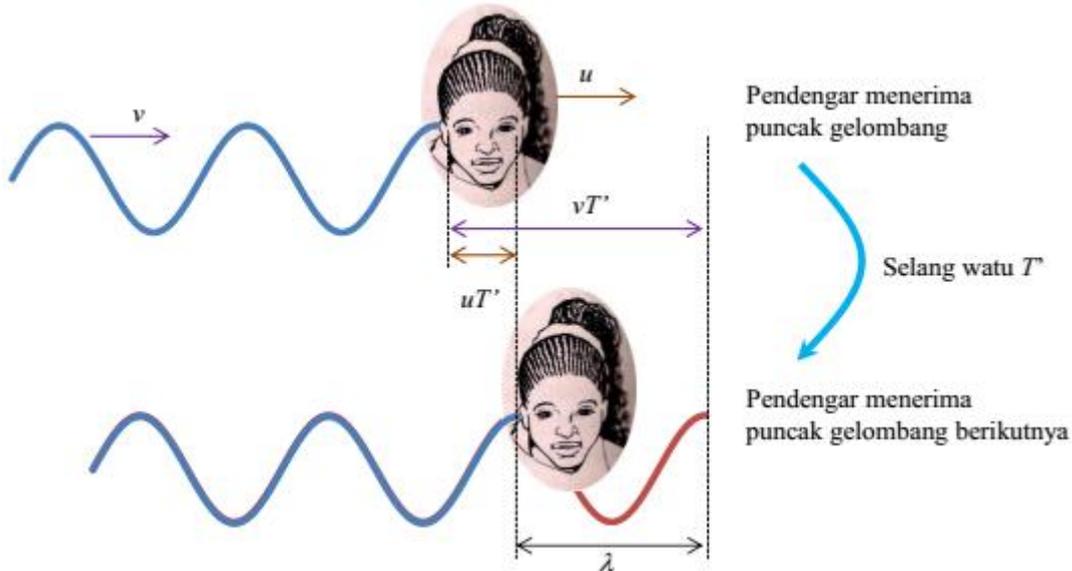


Gambar 13.2 Pendengar menerima puncak gelombang berikutnya setelah bergerak menuju ke arah sumber bunyi

c) Kasus III: Pengamat menjauhi sumber gelombang yang tidak bergerak

Gambar 13.2 mengilustrasikan kondisi ini. Sumber mengeluarkan suara dengan panjang gelombang λ ke segala arah. Di sekeliling sumber terbentuk pola kompresi udara dengan

jarak λ satu dengan lainnya. Jika pendengar diam maka ia menangkap dua puncak gelombang dalam selang waktu T . Namun, jika pengamat bergerak menjauhi sumber dengan laju u , maka setelah menerima satu puncak, pengamat harus menunggu selama waktu T' untuk menerima puncak berikutnya. Selang waktu T' lebih panjang dari T karena gelombang mengejar pengamat. Berapa besar T' ?



Gambar 13.3 Pendengar menerima puncak gelombang berikutnya setelah bergerak menjauhi arah sumber bunyi.

- i. Mula-mula pendengar menerima puncak gelombang.
- ii. Gelombang bergerak ke kanan dan pengamatan juga bergerak ke kanan.
- iii. Puncak berikutnya diterima pengamat setelah selang waktu T' .
- iv. Selama selang waktu T'
 - a) Gelombang sudah berpindah sejauh: vT'
 - b) Pengamat sudah berpindah sejauh : uT'
- v. Lihat **Gambar 13.3**. Pengamat menerima puncak berikutnya jika terpenuhi $vT' - uT' = \lambda$

$$T' = \frac{1}{v - u} \}$$

Tetapi $T' = \frac{1}{f'}$ dan $\lambda = \frac{v}{f}$ sehingga

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{v-u} \frac{v}{f}$$

Atau

$$f' = \frac{v-u}{v} f \quad (13.3)$$

d) Kasus IV: Sumber gelombang bergerak mendekati pengamat yang diam

Gambar 13.4 mengilustrasikan kondisi ini. Misalkan sumber bunyi bergerak ke kanan dengan laju w . Lalu sumber bunyi mengeluarkan puncak pertama. Jika sumber tidak bergerak maka puncak kedua dilepaskan setelah puncak pertama meninggalkan sumber bunyi sejauh λ . Tetapi karena sumber bunyi bergerak, maka puncak pertama dikejar oleh sumber bunyi. Oleh karena itu saat mengeluarkan puncak kedua, jarak sumber bunyi ke puncak pertama yang telah dilepaskan sebelumnya lebih pendek daripada λ . Dengan demikian, panjang gelombang di depan sumber bunyi menjadi lebih pendek, yaitu λ' dengan $\lambda' < \lambda$. Berapa besar λ' ? Perhatikan **Gambar 13.4(a)**. Mula-mula sumber bunyi mengeluarkan puncak gelombang. Gelombang menjauhi sumber bunyi dengan laju v dan pada saat bersamaan sumber bumi mengejar gelombang tersebut dengan laju w . Setelah selang waktu satu periode (T), sumber bumi mengeluarkan puncak berikutnya. Selama selang waktu tersenut, puncak pertama telah bergerak sejauh vT , namun sumber bunyi telah bergerak dalam arah yang sama sejauh wT . Akibatnya, jarak antara puncak pertama dan puncak kedua bukan lagi λ tetapi berubah menjadi λ' yang memenuhi

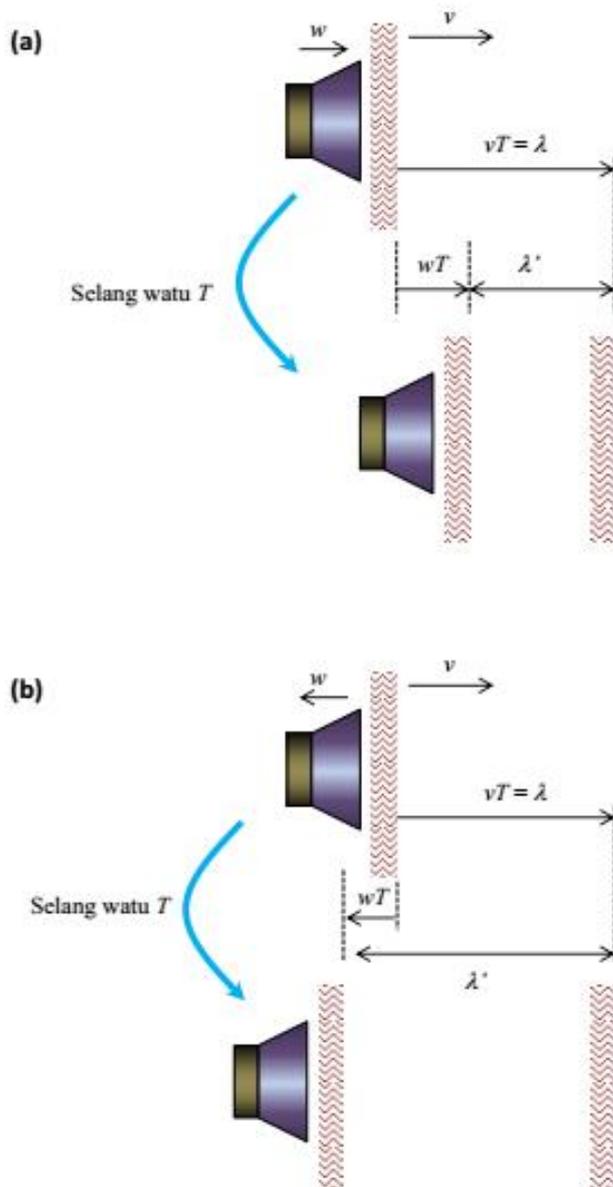
$$\lambda' = vT - wT$$

Dengan menggunakan hubungan $\lambda' = v / f'$ dan $T = 1 / f$ maka kita dapat menulis persamaan di atas menjadi

$$\frac{v}{f'} = \frac{v-w}{f}$$

Atau, frekuensi yang dideteksi pengamatan yang diam menjadi

$$f' = \frac{v}{v-w} f \quad (13.4)$$



Gambar 13.4 (a) Sumber bunyi mendekati pengamatan yang diam dan (b) sumber bunyi menjauhi pengamatan yang diam. Jarak puncak gelombang yang dihasilkan sumber bunyi yang mendekati rapat dan yang menjauhi pengamat lebih renggang.

e) Kasus V: Sumber gelombang bergerak menjauhi pengamat yang diam

Sumber bunyi mengeluarkan puncak pertama. Lalu sumber tidak bergerak maka puncak kedua dilepaskan setelah puncak pertama meninggalkan sumber bunyi sejauh λ . Tetapi karena sumber bunyi bergerak menjauhi pengamat, maka puncak kedua dilepaskan setelah sumber bunyi bergerak berlawanan dengan arah gerak sumber pertama. Oleh karena itu saat mengeluarkan puncak kedua, jarak sumber bunyi ke puncak pertama yang telah

dilepaskan sebelumnya lebih jauh daripada λ . Dengan demikian, panjang gelombang di belakang sumber bunyi menjadi lebih panjang, yaitu λ' dengan $\lambda' > \lambda$. Berapa besar λ' ? Perhatikan **Gambar 13.4(b)**. Mula-mula sumber bunyi mengeluarkan puncak gelombang. Gelombang menjauhi sumber bunyi dengan laju v dan pada saat bersamaan sumber bunyi menjauhi gelombang tersebut dengan laju w . Setelah selang waktu satu periode (T), sumber bunyi mengeluarkan puncak berikutnya. Selama selang waktu tersebut, puncak pertama telah bergerak sejauh vT , namun sumber bunyi telah bergerak dalam arah berlawanan sejauh wT . Akibatnya, jarak antara puncak pertama dan puncak kedua bukan lagi λ tetapi berubah menjadi λ' yang memenuhi $\lambda' = vT + wT$. Dengan menggunakan hubungan $\lambda' = v / f'$ dan $T = 1/f$ maka kita dapat menulis persamaan di atas menjadi

$$\frac{v}{f'} = \frac{v + w}{f}$$

Atau, frekuensi yang dideteksi pengamat yang diam menjadi

$$f' = \frac{v}{v + w} f \quad (13.5)$$

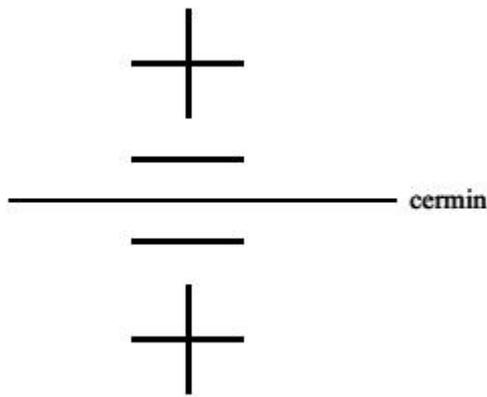
f) Kasus VI: Sumber bunyi beserta pengamat bergerak

Dalam kondisi umum di mana sumber gelombang dan pengamat bergerak maka frekuensi yang didengar pengamat adalah

$$f' = \frac{v \pm u}{v \mp w} f \quad (13.6)$$

dengan f frekuensi yang dikeluarkan sumber bunyi, f' frekuensi yang dideteksi pengamat, v kecepatan rambat gelombang, u kecepatan pengamat, w kecepatan sumber gelombang. Yang perlu kalian ingat

- i. Suku di pembilang adalah untuk pengamat
- ii. Suku di penyebut adalah untuk sumber gelombang
- iii. Urutan tanda sebagai berikut



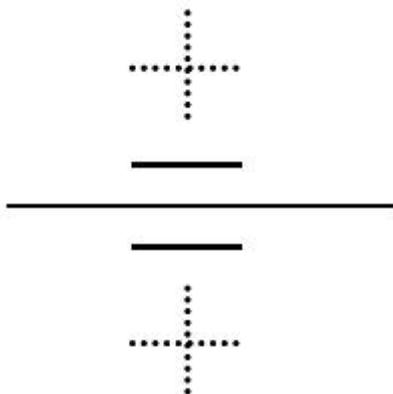
Gambar 13.5 Urutan tanda pada persamaan frekuensi gelombang adalah pencerminan (plus, minus, minus, plus)

Pada **Gambar 13.5**, tanda-tanda sebelah atas pada tiap sisi cermin adalah untuk kondisi mendekati dan tanda-tanda sebelah bawah pada tiap sisi cermin adalah untuk kondisi saling menjauhi. Contohnya adalah jika sumber mendekati pengamat dan pengamat menjauhi sumber. Maka tandanya seperti pada **Gambar 13.6**. Jadi persamaannya adalah

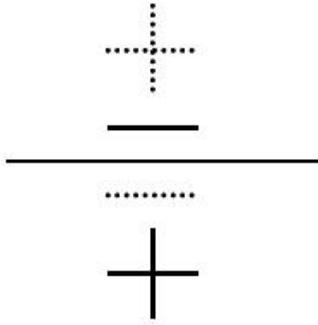
$$f' = \frac{v-u}{v-w} f$$

Contoh berikutnya adalah ketika sumber dan pengamat saling menjauhi. Pada kasus ini tandanya seperti pada **Gambar 13.7**. Jadi persamaannya adalah

$$f' = \frac{v-u}{v+w} f$$



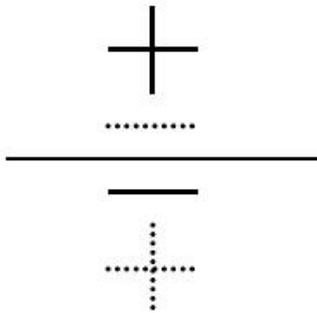
Gambar 13.6 Tanda yang digunakan ketika sumber mendekati pengamat dan pengamat menjauhi sumber



Gambar 13.7 Tanda yang digunakan ketika sumber dan pengamat saling menjauhi

Contoh berikutnya adalah ketika sumber dan pengamat saling mendekati. Pada kasus ini tandanya seperti pada **Gambar 13.8**. Jadi persamaannya adalah

$$f' = \frac{v + u}{v - w} f$$



Gambar 13.8 Tanda yang digunakan ketika sumber dan pengamat saling mendekati

Contoh Soal 13.1:

Kereta api mendekati kemudian melewati stasion sambil membunyikan sirine dengan frekuensi 500 Hz. Laju kereta api konstan, yaitu 30 m/s. Bagaimana perubahan frekuensi sirine kereta api yang didengar oleh orang yang sedang duduk di stasiun? Anggaplah laju perambatan bunyi 330 m/s.

Jawaban :

Di sini pengamat diam dan sumber bunyi yan bergerak. Saat kereta api sedang mendekati stasiun maka sumber bunyi bergerak mendekati pengamat yang diam sehingga frekuensi yang didengar pengamat adalah

$$f' = \frac{v}{v - w} f = \frac{330}{330 - 30} \times 500 = 550 \text{ Hz}$$

Saat kereta api tepat sejajar stasiun maka tidak ada gerak relative sumber bunyi terhadap pengamat. Dalam kondisi ini, baik pengamat maupun sumber bunyi dapat dianggap diam. Frekuensi yang didengar pengamat sama dengan frekuensi yang dihasilkan sumber bunyi, yaitu 500 Hz. Saat kereta api sedang menjauhi stasiun maka sumber bunyi bergerak menjauhi pengamat yang diam sehingga frekuensi yang didengar pengamat adalah

$$f' = \frac{v}{v + w} f = \frac{330}{330 + 30} \times 500 = 458 \text{ Hz}$$

g) Kasus VII : Medium perambatan gelombang bergerak menuju pendengar

Pada kasus ini kita anggap sumber gelombang dan pendengar diam, tetapi medium tempat perambatan gelombang bergerak dari arah sumber menuju pendengar. Jika medium tidak bergerak, maka pengamat mendeteksi dua puncak dalam selang waktu T (sama dengan periode sumber gelombang). Karena medium bergerak ke arah pengamat, maka selang waktu terdeteksinya dua puncak menurut pengamat menjadi lebih pendek. Selang waktu tersebut adalah T' yang memenuhi

$$(v + 0)T' = \lambda$$

$$\frac{1}{T'} = \frac{v + 0}{\lambda}$$

Dengan menggunakan hubungan $f' = 1/T'$ dan $\lambda = v / f$ maka frekuensi gelombang yang dideteksi pendengar adalah

$$f' = \frac{v + 0}{v} f \tag{13.7}$$

h) Kasus VIII : Medium perambatan gelombang bergerak menjauhi pendengar

Jika medium tidak bergerak, maka pengamat mendeteksi dua puncak dalam selang waktu T (sama dengan periode sumber gelombang). Karena medium bergerak menjauhi pengamat,

maka selang waktu terdeteksinya dua puncak menurut pengamat menjadi lebih panjang karena gerakan gelombang dilawan oleh gerakan medium. Selang waktu tersebut adalah T' yang memenuhi

$$(v - 0)T' = \lambda$$

$$\frac{1}{T'} = \frac{v - 0}{\lambda}$$

Dengan menggunakan hubungan $f' = 1/T'$ dan $\lambda = v / f$ maka frekuensi gelombang yang dideteksi pendengar adalah

$$f' = \frac{v - 0}{v} f \quad (13.8)$$

i) Kasus IX: Sumber gelombang, pengamat, dan medium perambatan gelombang bergerak

Dalam kondisi umum di mana sumber gelombang, pengamat, maupun medium bergerak maka frekuensi yang didengar pengamat adalah

$$f' = \frac{v \pm u \pm 0}{v \mp w} f \quad (13.9)$$

dengan f frekuensi yang dikeluarkan sumber bunyi, f' frekuensi yang dideteksi pengamat, v kecepatan rambat gelombang, u kecepatan pengamat, w kecepatan sumber gelombang, dan o kecepatan medium.

Efek Doppler pada gelombang elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik, termasuk cahaya, merambat dalam ruang hampa dengan laju $c = 3 \times 10^8$ m/s. Berdasarkan teori relativitas khusus yang akan kita pelajari di semester dua, laju perambatan cahaya selalu sama menurut pengamat yang diam maupun pengamat yang bergerak. Jadi, misalkan ada cahaya yang sedang merambat di udara/ruang hampa. Jika kalian deteksi kecepatan cahaya tersebut dalam keadaan diam, kalian dapatkan kecepatan $c = 3 \times 10^8$ m/s. Jika kalian deteksi cahaya sambil bergerak mendekati cahaya maka kalian juga dapatkan kecepatan $c = 3 \times 10^8$ m/s. Dan jika kalian deteksi kecepatan cahaya sambil bergerak menjauhi cahaya, maka kalian tetap mengukur kecepatan cahaya sebesar $c = 3 \times 10^8$ m/s. Hal

ini tidak bergantung, berapapun kecepatan kalian. Meskipun kalian bergerak mendekati arah datang cahaya dengan laju $u = 0,9c$ (yaitu 0,9 kali kecepatan cahaya), maka laju perambatan cahaya yang kalian ukur tetap $c = 3 \times 10^8$ m/s, bukan $1,9c$. Dengan sifat ini, maka efek Doppler pada gelombang elektromagnetik semata-mata hanya dipengaruhi oleh gerak sumber dan sama sekali tidak dipengaruhi oleh gerak pengamat. Dengan demikian, frekuensi gelombang elektromagnetik yang dideteksi akan memenuhi

$$f' = \frac{c}{c \mp w} f \quad (13.10)$$

dengan w laju sumber dan f adalah frekuensi yang dipancarkan sumber. Tanda minus dipakai untuk sumber yang mendekati pengamat dan tanda plus dipakai untuk sumber yang menjauhi pengamat. Jika laju sumber sangat kecil dibandingkan dengan laju cahaya, maka kita dapat melakukan pendekatan sebagai berikut

$$\begin{aligned} \frac{c}{c \mp w} &= \frac{1}{1 \mp \frac{w}{c}} \\ &= \left(1 \mp \frac{w}{c}\right)^{-1} \approx 1 \mp \frac{w}{c} \end{aligned}$$

Dengan demikian diperoleh

$$f' \approx \left(1 \mp \frac{w}{c}\right) f \quad (13.11)$$

Di mana tanda positif dipakai jika sumber mendekati pengamat (kebalikan dari persamaan (13.12)). Dari persamaan ini maka diperoleh pergeseran frekuensi gelombang adalah

$$\Delta f = f' - f$$

$$f' \approx \pm \frac{w}{c} f$$

Contoh Soal 13.2:

Perkirakan perubahan frekuensi garis natrium-D yang memiliki panjang gelombang 589 m akibat rotasi permukaan matahari. Jari-jari matahari adalah $7,0 \times 10^8$ m dan periode rotasinya 27 hari.

Jawaban :

Periode rotasi matahari $T = 27$ hari = 27 hari \times 24 jam/hari \times 60 menit/jam \times 60 s/menit = $2,3 \times 10^6$ s. Keliling matahari $s = 2\pi r = 2 \times 3,14 \times 7,0 \times 10^8 = 4,4 \times 10^9$ m. Laju tangensial permukaan matahari di khatulistiwa

$$w = \frac{s}{T} = \frac{4,4 \times 10^9}{2,3 \times 10^6} \text{ m/s}$$

Panjang gelombang natrium $\lambda = 589$ nm = $5,89 \times 10^{-7}$ m. Pergeseran frekuensi gelombang natrium akibat rotasi matahari adalah

$$\Delta f \approx \pm \frac{w}{c} f = \pm \frac{w}{c} \times \frac{c}{\lambda} = \pm \frac{w}{\lambda} = \pm \frac{1900}{5,89 \times 10^{-7}} = \pm 3,2 \times 10^9 \text{ Hz}$$

Bagian permukaan matahari yang sedang bergerak ke arah bumi diamati menghasilkan frekuensi yang bertambah sebesar $3,2 \times 10^9$ Hz, sedangkan bagian permukaan matahari yang sedang bergerak menjauhi bumi diamati menghasilkan frekuensi yang berkurang sebesar $3,2 \times 10^9$ Hz.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang efek dopler
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang bagaimana fenomena efek doppler terjadi serta aplikasi pada kehidupan sehari-hari

RANGKUMAN

1. Sumber suara dan pengamat tidak bergerak maka jika kecepatan rambat gelombang di udara adalah v maka frekuensi yang didengar pendengar adalah $f = \frac{v}{\lambda}$ yang persis sama dengan frekuensi yang dihasilkan sumber bunyi.
2. Pengamat mendekati sumber gelombang yang tidak bergerak, maka frekuensi yang didengar pengamat adalah $f' = \frac{v+u}{v} f$
3. Sumber gelombang bergerak menjauhi pengamat yang diam maka frekuensi yang dideteksi pengamatan yang diam menjadi $f' = \frac{v}{v+w} f$
4. Sumber bunyi beserta pengamat bergerak
 - a. Jika sumber mendekati pengamat dan pengamat menjauhi sumber. Maka frekuensi pengamat adalah $f' = \frac{v-u}{v-w} f$
 - b. Ketika sumber dan pengamat saling menjauhi. Maka frekuensi pengamat adalah $f' = \frac{v-u}{v+w} f$
 - c. Ketika sumber dan pengamat saling mendekati. Maka frekuensi pengamat adalah $f' = \frac{v+u}{v-w} f$
5. Medium perambatan gelombang bergerak menuju pendengar. Frekuensi gelombang yang dideteksi pendengar adalah $f' = \frac{v+0}{v} f$
6. Medium perambatan gelombang bergerak menjauhi pendengar. Maka frekuensi gelombang yang dideteksi pendengar adalah $f' = \frac{v-0}{v} f$
7. Sumber gelombang, pengamat, dan medium perambatan gelombang bergerak maka frekuensi yang didengar pengamat adalah $f' = \frac{v \pm u \pm 0}{v \mp w} f$

8. Efek Doppler pada gelombang elektromagnetik semata-mata hanya dipengaruhi oleh gerak sumber dan sama sekali tidak dipengaruhi oleh gerak pengamat. Dengan demikian, frekuensi gelombang elektromagnetik yang dideteksi akan memenuhi $f' = \frac{c}{c \mp w} f$
9. Jika laju sumber sangat kecil dibandingkan dengan laju cahaya, maka frekuensi menjadi $f' \approx \left(1 \mp \frac{w}{c}\right) f$
10. Pergeseran frekuensi gelombang adalah $\Delta f = f' - f$ sehingga $f' \approx \pm \frac{w}{c} f$

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskan fenomena efek doppler pada pengamat yang mendekati sumber gelombang yang tidak bergerak !
2. Jelaskan fenomena efek doppler pada sumber gelombang bergerak menjauhi pengamat yang diam !
3. Jelaskan fenomena efek doppler pada sumber bunyi beserta pengamat bergerak !
4. Jelaskan fenomena efek doppler pada medium perambatan gelombang bergerak menuju pendengar !
5. Jelaskan fenomena efek doppler pada medium perambatan gelombang bergerak menjauhi pendengar !
6. Jelaskan fenomena efek doppler pada sumber gelombang, pengamat, dan medium perambatan gelombang bergerak !
7. Jelaskan fenomena efek doppler pada gelombang elektromagnetik !

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Aplikasi Efek Doppler

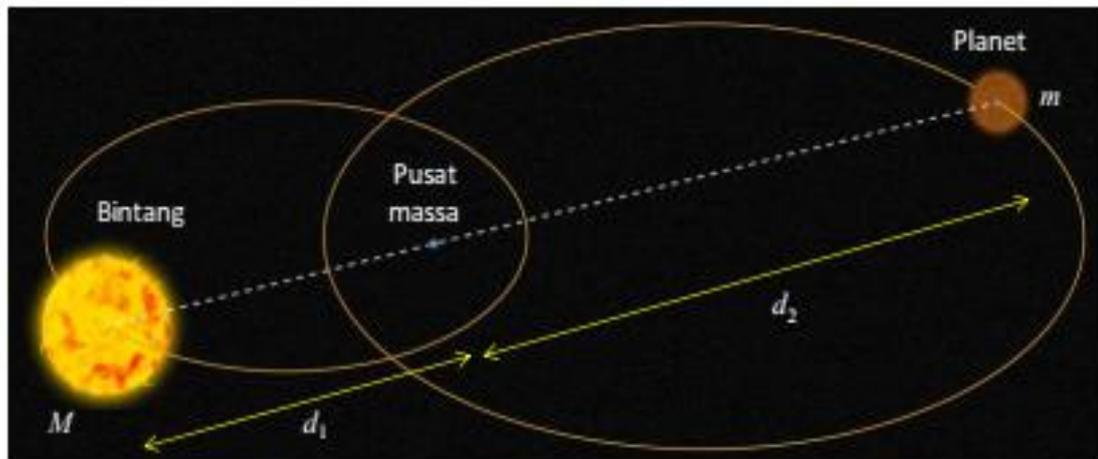
KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami tentang aplikasi efek doppler
2. Mahasiswa mampu menjelaskan aplikasi efek doppler dalam kehidupan sehari-hari

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Salah satu kegunaan penting efek Doppler dalam riset astronomi terkini adalah pencarian planet lain di luar tata surya kita, yang sering disebut Extrasolar planet atau Exoplanet. Yang diamati adalah perubahan frekuensi gelombang cahaya yang dipancarkan oleh bintang yang dikelilingi oleh planet tersebut. Bagaimana prinsipnya? Dengan teleskop yang ada di bumi, kita tidak mungkin mendeteksi keberadaan planet lain di luar planet-planet yang ada di tata surya. Penyebabnya adalah ukuran planet yang sangat kecil dan planet tidak memancarkan cahaya sendiri. Yang dapat kita deteksi di bumi hanyalah bintang-bintang berdasarkan cahaya yang dipancarkannya. Lalu bagaimana kita mendeteksi keberadaan planet di luar tata surya? Caranya adalah mengamati pengaruh gerak planet tersebut terhadap gerak bintang yang dikelilinginya. Kita sudah belajar bahwa matahari kita menempati pusat tata surya. Dalam pelajaran selama ini kita sering mengansumsikan bahwa matahari tidak bergerak. Yang bergerak hanyalah planet-planet mengorbit matahari. Untuk kemudahan pembahasan memang asumsi ini dapat diterima. Namun, kalau kita ingin lebih teliti maka asumsi ini tidak terlalu tepat. Matahari juga berevolusi seperti planet. Planet dan matahari berevolusi mengelilingi titik pusat massa. Namun karena massa matahari sangat besar dibanding dengan massa planet-planet maka titik pusat massa tata surya hampir berimpit dengan pusat matahari sehingga dapat dikatakan matahari hampir tidak bergerak. Kalau kita ingin masuk ke pengukuran yang lebih teliti maka revolusi bintang atau matahari terhadap titik pusat masa dengan planet harus diperhitungkan. Sebagai contoh perhatikan Gambar 13.9



Gambar 13.9 Planet dan bintang berevolusi mengelilingi titik pusat massa.

Jarak antara planet ke bintang adalah $D = (d_1 + d_2)$. Jarak bintang dan planet ke titik pusat massa masing-masing

$$d_1 = \frac{m}{M + m} D$$

$$d_2 = \frac{m}{M + m} D$$

Kecepatan sudut orbit planet maupun bintang terhadap pusat massa sama. Kita misalkan kecepatan sudut tersebut adalah ω . Dengan demikian, kecepatan tangensial bintang dan planet terhadap pusat massa adalah

$$v_1 = \omega d_1 = \frac{m}{M + m} \omega D \quad (13.12)$$

$$v_2 = \omega d_2 = \frac{m}{M + m} \omega D \quad (13.13)$$

Untuk menghitung kecepatan sudut astronom mengukur frekuensi cahaya yang dipancarkan bintang dalam waktu yang lama. Waktu yang diperlukan untuk mendeteksi kembali panjang gelombang yang persis sama dengan sebelumnya sama dengan periode revolusi planet. Dengan demikian, kecepatan sudut revolusi memenuhi $\omega = 2\pi / T$. Ini berarti kecepatan sudut revolusi diperoleh dari pengukuran. Untuk menentukan jarak planet ke bintang, kita gunakan persamaan Newton. Gaya gravitasi pada planet yang dilakukan bintang ke planet adalah gaya sentripetal, atau

$$G \frac{Mn}{D^2} = m\check{S}^2 D$$

$$D = \left(\frac{GM}{\check{S}^2} \right)^{1/3} \quad (13.14)$$

Ketika diamati dari bumi, kecepatan maksimum bintang menjauhi bumi adalah

$$u_+ = \check{S}d_1$$

$$= \frac{m}{m+M} \check{S} \left(\frac{GM}{\check{S}^2} \right)^{1/3}$$

$$= \frac{m}{m+M} \check{S} (GM\check{S})^{1/3}$$

dan kecepatan maksimum mendekati bumi adalah

$$u_- = \check{S}d_2$$

$$= \frac{m}{m+M} (GM\check{S})^{1/3}$$

Astronom membandingkan pergeseran Doppler pada cahaya yang dipancarkan bintang saat bintang bergerak menjauhi bumi dan saat bintang sedang mendekati bumi seperti diilustrasikan pada Gambar 13.10. Dengan menggunakan persamaan (13.12) maka pergeseran frekuensi ketika bintang menjauhi bumi dengan kecepatan maksimum dan mendekati bumi dengan kecepatan maksimum adalah

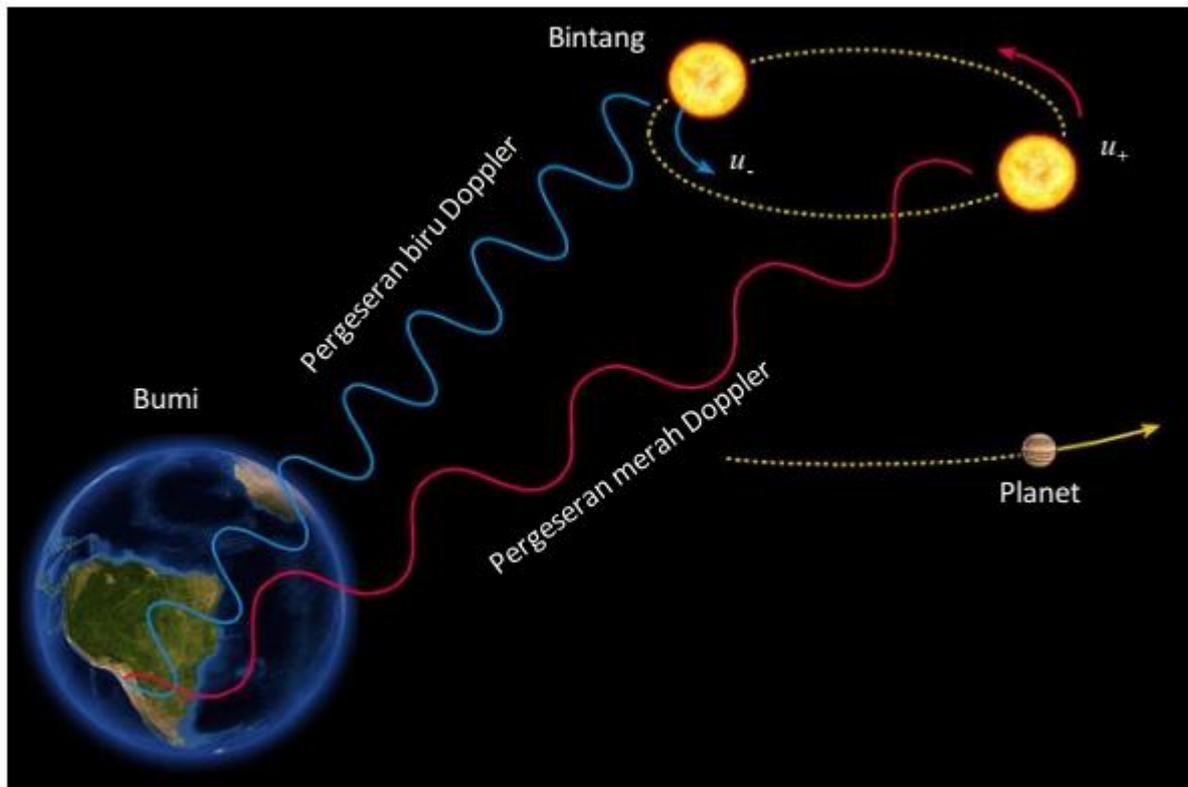
$$\Delta f_- \approx -\frac{u_+}{c} f$$

$$= -\frac{m}{M+m} (GM\check{S})^{1/3} \frac{f}{c} \quad (13.15)$$

Dan

$$\Delta f_+ \approx -\frac{u_-}{c} f$$

$$= + \frac{m}{M + m} (GM\dot{S})^{1/3} \frac{f}{c} \quad (13.16)$$



Gambar 13.10 Revolusi bintang terhadap pusat massa menyebabkan adanya gerak relative terhadap bumi. Pengaruh gerak ini terhadap frekuensi cahaya yang dipancarkan paling besar saat bintang mendekati dan menjauhi bumi.

Pada persamaan (13.15) atau (13.16) pergeseran frekuensi diukur berdasarkan pergeseran Doppler. Frekuensi sudut revolusi bintang atau planet ditentukan berdasarkan pengukuran frekuensi munculnya pergeseran maksimum dari efek Doppler. Massa bintang dapat diukur dengan cara lain yang diajarkan di astronomi. Massa bintang biasanya ditentukan dari spektrum warna bintang. Ada keterkaitan antara massa bintang dan warna cahaya yang dipancarkan. Jadi, kecuali massa planet, semua parameter dapat pada persamaan (13.15) atau (13.16) diukur. Dengan melakukan analisis pergeseran frekuensi tersebut maka dapat diduga keberadaan planet yang mengelilingi suatu bintang. Salah satu extrasolar planet yang ditemukan dengan metode ini adalah 51 Pegasi b yang berjarak 50 tahun cahaya dari bumi

dan berada dalam konstelasi Pegassus. Planet ini mengelilingi bintang yang memiliki massa kira-kira sama dengan massa matahari kita.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang fenomena efek doppler dalam mencari planet lain di luar tata surya !
2. Diskusikan dengan kelompokmu tentang bagaimana pergeseran Doppler pada cahaya yang dipancarkan bintang saat bintang bergerak menjauhi bumi dan saat bintang sedang mendekati bumi !

RANGKUMAN

1. Salah satu kegunaan penting efek Doppler dalam riset astronomi terkini adalah pencarian planet lain di luar tata surya kita, yang sering disebut Extrasolar planet atau Exoplanet.
2. Yang diamati pada pencarian planet lain di luar tata surya adalah perubahan frekuensi gelombang cahaya yang dipancarkan oleh bintang yang dikelilingi oleh planet tersebut.
3. Cara mendeteksi keberadaan planet di luar tata surya adalah dengan mengamati pengaruh gerak planet tersebut terhadap gerak bintang yang dikelilinginya.
4. Matahari juga berevolusi seperti planet.
5. Planet dan matahari berevolusi mengelilingi titik pusat massa. Namun karena massa matahari sangat besar dibanding dengan massa planet-planet maka titik pusat massa tata surya hampir berimpit dengan pusat matahari sehingga dapat dikatakan matahari hampir tidak bergerak.
6. Frekuensi sudut revolusi bintang atau planet ditentukan berdasarkan pengukuran frekuensi munculnya pergeseran maksimum dari efek Doppler
7. Massa bintang dapat diukur dengan cara lain yang diajarkan di astronomi. Massa bintang biasanya ditentukan dari spektrum warna bintang. Ada keterkaitan antara massa bintang dan warna cahaya yang dipancarkan.

8. Salah satu extrasolar planet yang ditemukan dengan metode ini adalah 51 Pegasi b yang berjarak 50 tahun cahaya dari bumi dan berada dalam konstelasi Pegassus. Planet ini mengelilingi bintang yang memiliki massa kira-kira sama dengan massa matahari kita.

EVALUASI FORMATIF 2

1. Jelaskan bagaimana penting efek Doppler dalam riset astronomi terkini adalah pencarian planet lain di luar tata surya !
2. Jelaskan prinsip kerja efek doppler dalam pencarian planet lain di luar tata surya!
3. Jelaskan bagaimana hubungan menghitung frekuensi sudut revolusi bintang atau planet menggunakan efek doppler!
4. Jelaskan bagaimana cara untuk mengukur massa bintang!
5. Jelaskan planet apa yang sudah ditemukan menggunakan fenomena efek doppler !

Lembar Kerja Praktek 2

Project

Diskusikan dan tuliskan serta presentasikan hasil karya ilmiah kalian!

Kita semua* tahu bahwa matahari kita merupakan sebuah bintang yang dikelilingi oleh delapan planet. Pernahkah kalian melamun ~~ingat mantan~~ gabut lalu bertanya-tanya, apakah bintang lain juga punya planet? Apakah ada tata surya selain Tata Surya kita? Jawabannya ya ada. Biasanya disebut sebagai *Exoplanet*.

Apa itu *exoplanet*?

Bagaimana astronom menemukan *exoplanet*?

Apa sih pentingnya mencari *exoplanet*?

Selama ini, pengetahuan astronom tentang fisika planet didapatkan hanya dari planet-planet di tata surya kita. Dengan penemuan *exoplanets* dengan variasi properti yang dimilikinya, para astronom dapat mempelajari fisika planet dalam konteks yang lebih universal. Astronom juga dapat mempelajari evolusi sistem keplanetan dari sistem-sistem yang telah ditemukan, sehingga juga dapat lebih memahami evolusi tasya surya kita sendiri.

Dan tentu saja, kita ingin mencari ‘kembaran Bumi’.

Oke, ini salah satu pertanyaan yang sering ditanyakan kepada astronom (dan calon astronom alias mahasiswa astronomi): **Apakah ada bumi-bumi lain di luar sana?**

Lalu dampak ditemukannya *exoplanet* bagi kehidupan manusia apa?

Kalau manusia masih eksis 5 miliar tahun lagi, maka mereka harus bermigrasi karena evolusi matahari akan membuat Bumi tidak lagi mendukung kehidupan. Kalau.

Tetapi kalau di planet tujuan migrasi itu sudah ada kehidupan, bukankah kita akan menjadi penjajah?

Lembar Kerja Project

RANGKUMAN MODUL

1. Sumber suara dan pengamat tidak bergerak maka jika kecepatan rambat gelombang di udara adalah v maka frekuensi yang didengar pendengar adalah $f = \frac{v}{\lambda}$ yang persis sama dengan frekuensi yang dihasilkan sumber bunyi.
2. Pengamat mendekati sumber gelombang yang tidak bergerak, maka frekuensi yang didengar pengamat adalah $f' = \frac{v+u}{v} f$
3. Sumber gelombang bergerak menjauhi pengamat yang diam maka frekuensi yang dideteksi pengamatan yang diam menjadi $f' = \frac{v}{v+w} f$
4. Sumber bunyi beserta pengamat bergerak
 - d. Jika sumber mendekati pengamat dan pengamat menjauhi sumber. Maka frekuensi pengamat adalah $f' = \frac{v-u}{v-w} f$
 - e. Ketika sumber dan pengamat saling menjauhi. Maka frekuensi pengamat adalah $f' = \frac{v-u}{v+w} f$
 - f. Ketika sumber dan pengamat saling mendekati. Maka frekuensi pengamat adalah $f' = \frac{v+u}{v-w} f$
5. Medium perambatan gelombang bergerak menuju pendengar. Frekuensi gelombang yang dideteksi pendengar adalah $f' = \frac{v+0}{v} f$
6. Medium perambatan gelombang bergerak menjauhi pendengar. Maka frekuensi gelombang yang dideteksi pendengar adalah $f' = \frac{v-0}{v} f$
7. Sumber gelombang, pengamat, dan medium perambatan gelombang bergerak maka frekuensi yang didengar pengamat adalah $f' = \frac{v \pm u \pm 0}{v \mp w} f$

8. Efek Doppler pada gelombang elektromagnetik semata-mata hanya dipengaruhi oleh gerak sumber dan sama sekali tidak dipengaruhi oleh gerak pengamat. Dengan demikian, frekuensi gelombang elektromagnetik yang dideteksi akan memenuhi $f' = \frac{c}{c \mp w} f$
9. Jika laju sumber sangat kecil dibandingkan dengan laju cahaya, maka frekuensi menjadi $f' \approx \left(1 \mp \frac{w}{c}\right) f$
10. Pergeseran frekuensi gelombang adalah $\Delta f = f' - f$ sehingga $f' \approx \pm \frac{w}{c} f$
11. Salah satu kegunaan penting efek Doppler dalam riset astronomi terkini adalah pencarian planet lain di luar tata surya kita, yang sering disebut Extrasolar planet atau Exoplanet.
12. Yang diamati pada pencarian planet lain di luar tata surya adalah perubahan frekuensi gelombang cahaya yang dipancarkan oleh bintang yang dikelilingi oleh planet tersebut.
13. Cara mendeteksi keberadaan planet di luar tata surya adalah dengan mengamati pengaruh gerak planet tersebut terhadap gerak bintang yang dikelilinginya.
14. Matahari juga berevolusi seperti planet.
15. Planet dan matahari berevolusi mengelilingi titik pusat massa. Namun karena massa matahari sangat besar dibanding dengan massa planet-planet maka titik pusat massa tata surya hampir berimpit dengan pusat matahari sehingga dapat dikatakan matahari hampir tidak bergerak.
16. Frekuensi sudut revolusi bintang atau planet ditentukan berdasarkan pengukuran frekuensi munculnya pergeseran maksimum dari efek Doppler
17. Massa bintang dapat diukur dengan cara lain yang diajarkan di astronomi. Massa bintang biasanya ditentukan dari spektrum warna bintang. Ada keterkaitan antara massa bintang dan warna cahaya yang dipancarkan.
18. Salah satu extrasolar planet yang ditemukan dengan metode ini adalah 51 Pegasi b yang berjarak 50 tahun cahaya dari bumi dan berada dalam konstelasi Pegassus. Planet ini mengelilingi bintang yang memiliki massa kira-kira sama dengan massa matahari kita.

DAFTAR PUSTAKA

- Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Serway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing
- Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I
- Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.

Modul 14:

Serat Optik

PENDAHULUAN

Apakah itu Rekayasa Optik ? Untuk apa kita mempelajari rekayasa optik ? Apa hubungan dengan dunia sehari-sehari kita ? Dan apa saja manfaat dari mempelajari rekayasa optik ?

Rekayasa optik adalah bidang studi yang fokus pada aplikasi optik. Para ahli rekayasa optik mendesain komponen dari instrumen optik seperti lensa, mikroskop, teleskop, dan peralatan lainnya yang mendukung sifat cahaya. Peralatan lain meliputi sensor optik dan sistem pengukuran, laser, sistem komunikasi *fiber optics*, sistem cakram optik dan sebagainya.

Sejak ahli rekayasa ingin mendesain dan membangun alat yang membuat cahaya menjadi sesuatu yang berguna, mereka harus mengerti dan mengaplikasikan sains optik secara detail, bertujuan untuk mengetahui apa kemungkinan fisis yang akan dicapai. Namun, mereka juga harus mengerti apa yang bisa dipraktekkan dengan teknologi, material, biaya, metode desain, dan sebagainya yang tersedia. Sama seperti bidang ilmu rekayasa lainnya, komputer penting sekali bagi sebagian besar rekayasa optik. Komputer digunakan bersama dengan instrumen optik, simulasi, desain dan aplikasi lainnya.



Gambar 14.1 Contoh truk yang difoto dan menghasilkan foto ilusi optik

Kegiatan Pembelajaran 1: Pengantar Serat Optik

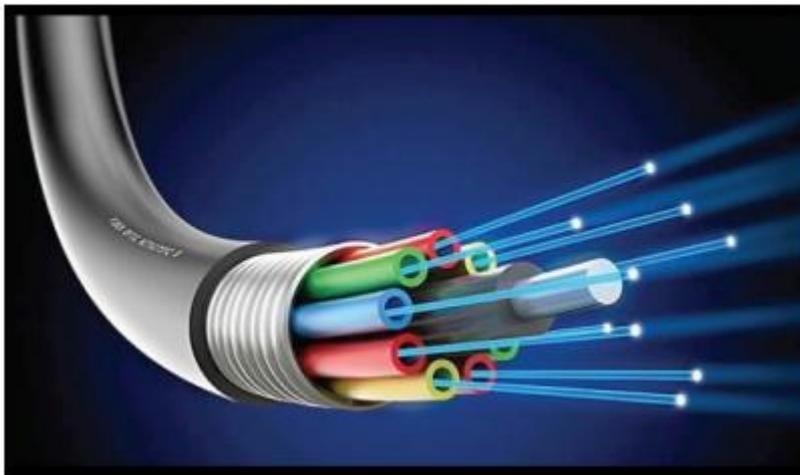
KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

- Mahasiswa mampu menjelaskan, menuliskan dan mempresentasikan tentang serat optik.
- Mahasiswa mampu menjelaskan, menuliskan dan mempresentasikan tentang aplikasi dalam kehidupan sehari-hari serat optik.

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

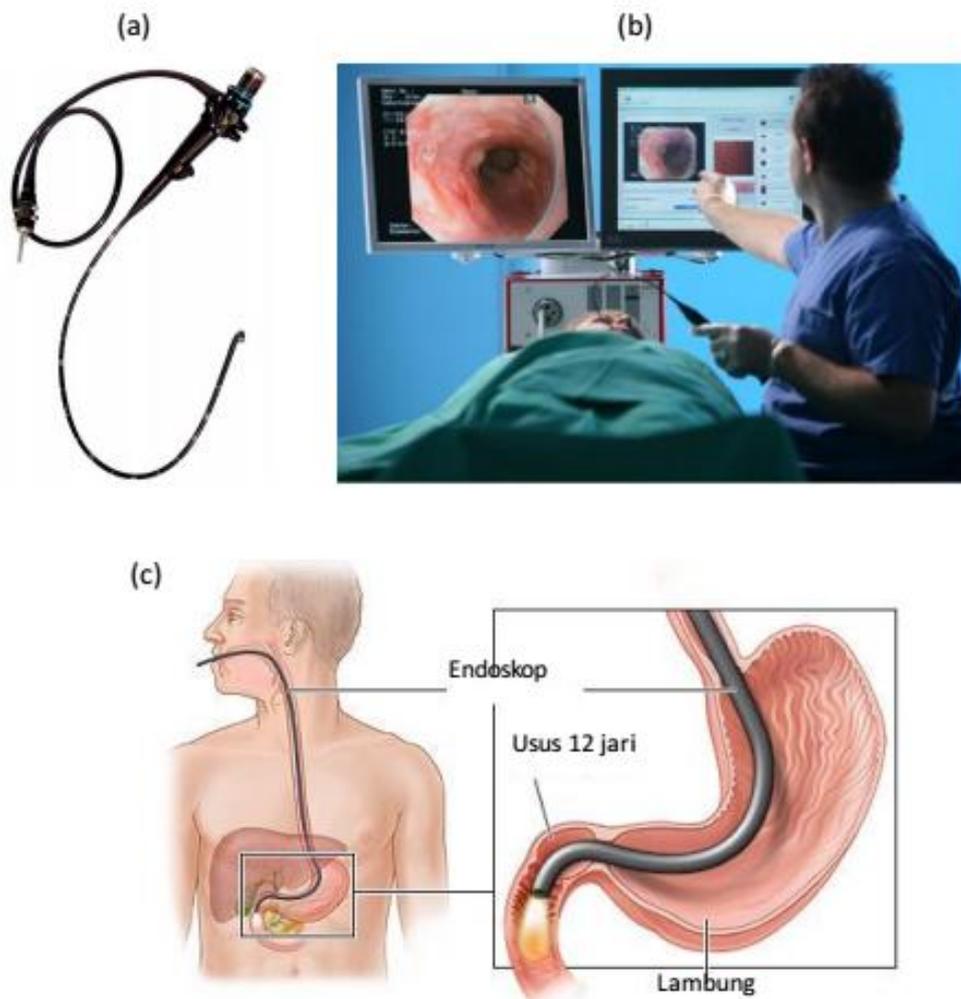
Salah satu aplikasi penting fenomena pemantulan total internal adalah pengiriman berkas cahaya melalui fiber optik. Fiber optik merupakan material transparan yang berbentuk silinder sangat kecil. **Gambar 14.1** adalah contoh fiber optik yang digunakan dalam komunikasi. Fiber optic umumnya telah dibungkus dalam satu bundelan di mana tiap bundelan mengandung sejumlah fiber optik.



Gambar 14.2 Contoh fiber optik yang digabung dalam satu bundelan (www.muniversity.mobi)

Pemakaian utama fiber optik dijumpai dalam dunia telekomunikasi. Karena cahaya memiliki frekuensi di atas 10^{14} Hz maka jumlah data yang dapat dikirim melalui fiber optik per detik

sangat besar. Ingat, makin besar frekuensi gelombang yang digunakan untuk mengirim data maka makin banyak data yang dapat dikirim per detik. Sistem fiber optik dapat membawa percakapan telepon, TV kabel, sambungan internet, sinyal video telekonferensi, dan lain-lain. Fiber optik dapat membawa sejumlah sinyal percakapan telepon secara serentak. Fiber optik juga menjadi komponen penting dari peralatan kedokteran yang bernama endoskopi. **Gambar 14.3(a)** adalah contoh endoskop. Alat tersebut digunakan untuk mengambil gambar bagian sistem pencernaan. **Gambar 14.3(b)** adalah dokter yang sedang mengamati sistem pencernaan pasien menggunakan endoskop.



Gambar 14.3 (a) Contoh endoskop (Medical Resource Endoscopy). (b) Dokter sedang mengamati bagian dalam tubuh pasien dengan metode endoskopi (open access book). Bundelan fiber optik yang mengandung kamera kecil dan panjangnya beberapa puluh centimeter dimasukkan ke dalam usus pasien melalui mulut atau hidung. (c) Prinsip operasi endoskop

Gambar bagian pencernaan pasien dapat langsung diamati di monitor. Yang ditampilkan di monitor adalah bayangan bagian pencernaan yang berada di ujung endoskopi karena di situ ada sumber cahaya dan kamera kecil. Endoskopi mengandung kamera dan sumber cahaya kecil serta fiber optik yang ditempatkan pada bundelan fleksibel. Bayangan organ tubuh bagian dalam dapat dilihat dengan mengirim berkas cahaya ke organ tersebut dan menangkap kembali cahaya yang dipantulkannya dengan kamera. Cahaya yang ditangkap kamera dikirim melalui fiber optik ke monitor sehingga dokter dapat melihat atau merekam gambar bagian tubuh tersebut. Cahaya dikirim ke organ dan cahaya pantulan organ ditangkap kembali melalui sistem fiber optik. Prinsip kerja endoskopi diilustrasikan pada **Gambar 14.3(c)**.

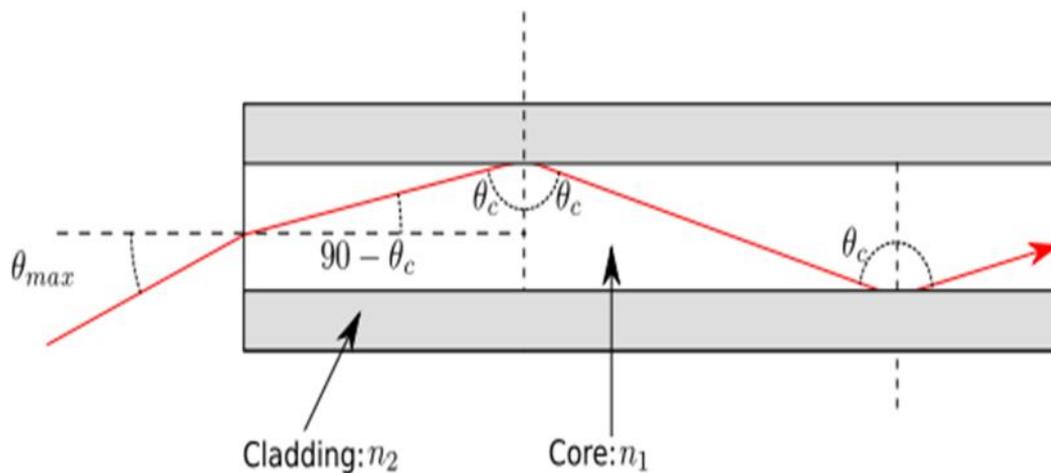
Serat optik adalah saluran transmisi yang terbuat dari kaca atau plastik yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal cahaya dari suatu tempat ke tempat lain. Cahaya yang ada di dalam serat optik sulit keluar karena indeks bias dari kaca lebih besar daripada indeks bias dari udara. Sumber cahaya yang digunakan adalah laser karena laser mempunyai spektrum yang sangat sempit. Kecepatan transmisi serat optik sangat tinggi sehingga sangat bagus digunakan sebagai saluran komunikasi. Serat optik umumnya digunakan dalam sistem telekomunikasi serta dalam pencahayaan, sensor, dan optik pencitraan. Efisiensi dari serat optik ditentukan oleh kemurnian dari bahan penyusun gelas. Semakin murni bahan gelas, semakin sedikit cahaya yang diserap oleh serat optik.

Serat optik mulai diteliti sejak Alexander Graham Bell menemukan telepon. Pada tahun 1880 Alexander Graham Bell menciptakan sebuah sistem komunikasi cahaya yang disebut *photo-phone* dengan menggunakan cahaya matahari yang dipantulkan dari sebuah cermin suara-termodulasi tipis untuk membawa percakapan, pada penerima cahaya matahari termodulasi mengenai sebuah foto-konduktif selselenium, yang merubahnya menjadi arus listrik, sebuah penerima telepon melengkapi sistem. *Photo-phone* tidak pernah mencapai sukses komersial, walaupun sistem tersebut bekerja cukup baik.

Penerobosan besar yang membawa pada teknologi komunikasi serat optik dengan kapasitas tinggi adalah penemuan Laser pada tahun 1960, namun pada tahun tersebut kunci utama di dalam sistem serat praktis belum ditemukan yaitu serat yang efisien. Baru pada tahun 1970 serat dengan *loss* yang rendah dikembangkan dan komunikasi serat optik menjadi praktis dengan serat optik yang digunakan berbentuk silinder seperti kawat pada umumnya, terdiri dari inti serat (*core*) yang dibungkus oleh kulit (*cladding*) dan keduanya dilindungi oleh jaket pelindung (*buffer coating*).

Ini terjadi hanya 100 tahun setelah John Tyndall, seorang fisikawan Inggris, mendemonstrasikan kepada *Royal Society* bahwa cahaya dapat dipandu sepanjang kurva aliran air. Dipandunya cahaya oleh sebuah serat optik dan oleh aliran air adalah peristiwa dari fenomena yang sama yaitu *total internal reflection*.

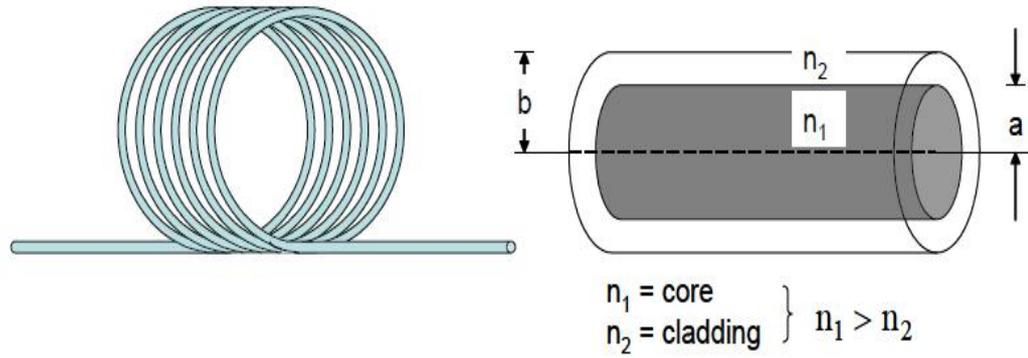
Jadi serat optik atau *fiber optics* adalah pandu gelombang dielektrik silinder yang terbuat dari material *low-loss* seperti gelas silika. Ia memiliki suatu pusat (*core*) dimana cahaya dipandu yang disisipkan dalam suatu selubung/*cladding* dengan indeks bias yang lebih rendah. Berkas cahaya yang datang pada batas *core/cladding* dengan sudut datang lebih besar dari sudut kritis akan mengalami pemantulan total internal dan dipandu dalam *fiber* tanpa mengalami pembiasan. Berkas cahaya dengan sudut inklinasi pada sumbu optik yang besar, dayanya akan hilang dalam *cladding* dan karenanya tidak dipandu.



Gambar 14.4 Pemantulan internal total dalam serat optik (*Fiber Optics*)

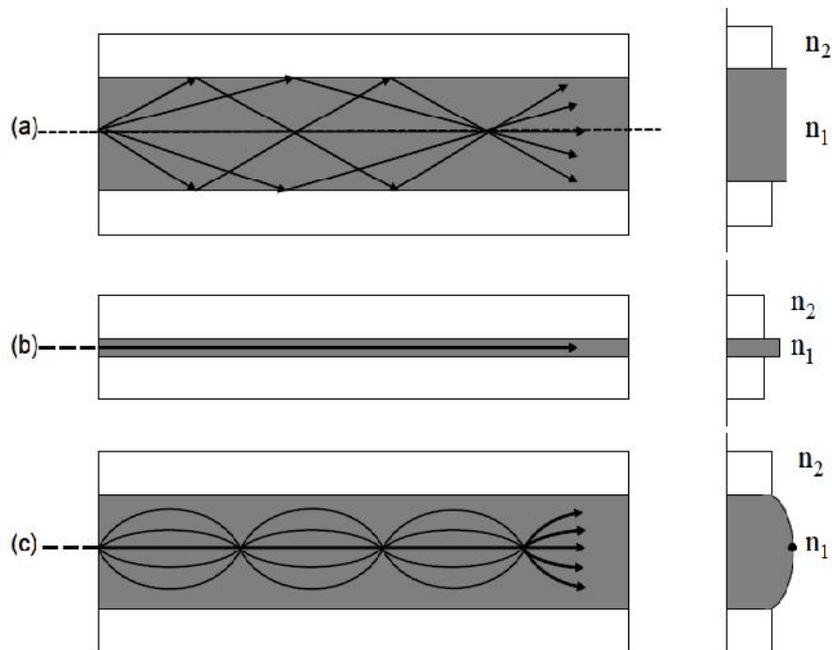
Pada prinsipnya, transmisi cahaya dalam *fiber* sama dengan pada pandu gelombang dielektrik planar, kecuali bentuk geometrinya. Dalam kedua jenis pandu gelombang, cahaya merambat dalam bentuk modus-modus. Masing-masing modus menjalar sepanjang sumbu pandu gelombang dengan suatu konstanta perambatan dan kecepatan grup, dengan mempertahankan distribusi ruang transversalnya dan polarisasinya. Bila diameter *core*-nya kecil, maka hanya satu modus yang diperbolehkan dan *fiber* disebut dengan *single-mode fiber* (fiber modus tunggal). *Fiber* dengan diameter *core* yang besar disebut *multimode fiber*.

Salah satu masalah yang berkaitan dengan perambatan cahaya dalam *fiber multimode* adalah ditimbulkan dari perbedaan kecepatan grup dari masing-masing modus. Akibatnya pulsa akan melebar sepanjang *fiber*.



Gambar 14.5 Pandu gelombang dielektrik silinder atau *fiber*

Efek ini dikenal sebagai *modal dispersion* (dispersi modus), yaitu batas kecepatan dimana pulsa-pulsa dapat dikirim tanpa saling tumpang tindih (*overlapping*).



Gambar 14.6 Geometri, profil indeks bias dan tipikal berkas-berkas dalam : (a) *multimode step-index fiber*, (b) *single-mode step-index fiber* dan (c) *multimode graded-index fiber*

Modal dispersion dapat dikurangi dengan gradien indeks bias dari *core*, yang mempunyai nilai maksimum pada pusatnya dan nilai minimum pada batas *core/cladding*. *Fiber* tersebut dikenal sebagai *graded-index fiber*, dimana pada *fiber* konvensional indeks bias *core* dan *cladding* adalah konstan (*step-index fiber*). Dari berbagai penjelasan dan ringkasan diatas dapat disimpulkan beberapa hal tentang serat optik yaitu sebagai berikut :

- 1) Susunan utama serat optik ialah sebagai berikut :
 - a. *Core* merupakan serabut kaca mikroskopis yang berdiameter beberapa *mikron* hingga beberapa puluh *mikron*. Dibagian inilah cahaya ditransmisikan. *Core* dibuat dari kaca murni untuk membuat daya serapnya menjadi sekecil mungkin dan ukurannya dibuat setipis mungkin agar tak mudah patah/retak.
 - b. *Cladding* adalah serat kaca yang membungkus *core*. Seperti halnya *core*, *cladding* juga terbuat dari kaca murni dan indeks biasanya lebih kecil daripada *core* agar dapat memantulkan kembali cahaya yang mengarah keluar dari *core* kembali kedalam *core* lagi.
 - c. *Buffer* terbuat dari resin atau plastik untuk menambah kekuatan untuk kabel serat optik, walaupun tidak memberikan peningkatan terhadap sifat gelombang pandu optik pada kabel tersebut. Namun lapisan resin ini dapat menyerap cahaya dan mencegah kemungkinan terjadinya kebocoran cahaya yang keluar dari selubung inti. Serta hal ini dapat juga mengurangi *cross talk* yang mungkin terjadi.
 - d. *Jacket* atau pembungkus terluar, terbuat dari karet kuat yang membungkus *buffer* (bisa lebih dari satu) untuk melindungi serat optik dari kelembaban dan gangguan luar.

- 2) Pembagian serat optik dapat dilihat dari 2 macam perbedaan yaitu :
 - a) Berdasarkan mode yang dirambatkan
 1. *Single mode* : serat optik dengan inti (*core*) yang sangat kecil (biasanya sekitar 8,3 *mikron*), diameter intinya sangat sempit mendekati panjang gelombang cahaya yang masuk ke dalamnya tidak terpantul-pantul ke dinding selongsong (*cladding*). Bagian inti serat optik *single-mode* terbuat dari bahan kaca silika (SiO_2) dengan sejumlah kecil kaca Germania (GeO_2) untuk meningkatkan indeks biasnya. Untuk mendapatkan performa yang baik pada kabel ini, biasanya untuk ukuran selongsongnya adalah sekitar 15 kali dari ukuran inti (sekitar 125 *mikron*). Kabel untuk jenis ini paling mahal, tetapi memiliki kelemahan (kurang dari 0.35dB per kilometer), sehingga memungkinkan kecepatan yang sangat tinggi dari jarak yang sangat jauh. Jenis *single mode* digunakan untuk mentransmisikan sinar laser (1.300 *nm* - 1.550 *nm*)
 2. *Multimode* : serat optik dengan diameter *core* yang agak besar (sekitar 62,5 *mikron*) yang membuat laser di dalamnya akan terpantul-pantul di dinding *cladding* yang dapat menyebabkan berkurangnya *bandwidth* dari serat optik jenis ini. *Multimode* dapat mentransmisikan sinar inframerah dari LED dengan panjang gelombang 850 *nm* hingga 1.300 *nm*

b) Berdasarkan indeks bias *core*

1. *Step index* : pada serat optik step indeks, *core* memiliki indeks bias yang homogen.
2. *Graded index* : indeks bias *core* semakin mendekati ke arah *cladding* semakin kecil. Jadi pada *graded index*, pusat *core* memiliki nilai indeks bias yang paling besar. Serat *graded index* memungkinkan untuk membawa *bandwidth* yang lebih besar, karena pelebaran pulsa yang terjadi dapat diminimalkan

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang prinsip kerja serat optik dan presentasikan didepan kelas
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang bagaimana penggunaan serat optik pada kehidupan sehari-hari

RANGKUMAN

1. Salah satu aplikasi penting fenomena pemantulan total internal adalah pengiriman berkas cahaya melalui fiber optik. Fiber optik merupakan material transparan yang berbentuk silinder sangat kecil
2. Pemakaian utama fiber optik dijumpai dalam dunia telekomunikasi. Sistem fiber optik dapat membawa percakapan telepon, TV kabel, sambungan internet, sinyal video telekonferensi, dan lain-lain.
3. Fiber optik juga menjadi komponen penting dari peralatan kedokteran yang bernama endoskopi.
4. Endoskop mengandung kamera dan sumber cahaya kecil serta fiber optik yang ditempatkan pada bundelan fleksibel. Cahaya yang ditangkap kamera dikirim melalui fiber optik ke monitor sehingga dokter dapat melihat atau merekam gambar bagian tubuh tersebut. Cahaya dikirim ke organ dan cahaya pantulan organ ditangkap kembali melalui sistem fiber optic

5. Serat optik adalah saluran transmisi yang terbuat dari kaca atau plastik yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal cahaya dari suatu tempat ke tempat lain
6. Sumber cahaya yang digunakan adalah laser karena laser mempunyai spektrum yang sangat sempit.
7. Kecepatan transmisi serat optik sangat tinggi sehingga sangat bagus digunakan sebagai saluran komunikasi.
8. Efisiensi dari serat optik ditentukan oleh kemurnian dari bahan penyusun gelas. Semakin murni bahan gelas, semakin sedikit cahaya yang diserap oleh serat optik.
9. Serat optik mulai diteliti sejak Alexander Graham Bell menemukan telepon
10. Serat optik terdiri dari inti serat (*core*) yang dibungkus oleh kulit (*cladding*) dan keduanya dilindungi oleh jaket pelindung (*buffer coating*).
11. Dipandunya cahaya oleh sebuah serat optik dan oleh aliran air adalah peristiwa dari fenomena yang sama yaitu *total internal reflection*.
12. Serat optik atau *fiber optics* adalah pandu gelombang dielektrik silinder yang terbuat dari material *low-loss* seperti gelas silika. Ia memiliki suatu pusat (*core*) dimana cahaya dipandu yang disisipkan dalam suatu selubung/*cladding* dengan indeks bias yang lebih rendah.
13. *Fiber* dengan diameter *core* yang besar disebut *multimode fiber* sedangkan bila diameter *core*-nya kecil, disebut dengan *single-mode fiber*
14. Salah satu masalah yang berkaitan dengan perambatan cahaya dalam *fiber multimode* adalah ditimbulkan dari perbedaan kecepatan grup dari masing-masing modus. Akibatnya pulsa akan melebar sepanjang *fiber*.
15. *Modal dispersion* dapat dikurangi dengan gradien indeks bias dari *core*, yang mempunyai nilai maksimum pada pusatnya dan nilai minimum pada batas *core/cladding*

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskan prinsip kerja dari serat optik!
2. Jelaskan fenomena pemantulan sempurna pada serat optik!
3. Jelaskan prinsip kerja endoskopi yang menggunakan serat optik!
4. Jelaskan sejarah penemuan serat optik!
5. Jelaskan bagian-bagian penyusun sebuah serat optik dan fungsinya masing-masing!
6. Jelaskan jenis-jenis serat optik berdasarkan perbedaan indeks bias core!

7. Jelaskan pembagian serat optik berdasarkan mode yang dirambatkan!
8. Jelaskan apa yang terjadi jika pada suatu serat optik terdapat core yang kecil dan yang besar, apa perbedaannya ketika keduanya diaplikasikan!

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: *Step – Index Fiber*

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan, menuliskan dan mempresentasikan tentang *Step – Index Fiber*
2. Mahasiswa mampu menjelaskan, menuliskan dan mempresentasikan tentang aplikasi dalam kehidupan sehari-hari *Step – Index Fiber*

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Suatu *step-index fiber* dispesifikasikan oleh indeks bias *core* n_1 dan *cladding* n_2 dengan jari-jari a dan b (lihat gambar 14.5). Contoh-contoh diameter *core/cladding* $\left[\frac{2a}{2b} \right]$ dalam satuan micrometer ($\sim m$) adalah $62.5/125 \sim m$, $85/125 \sim m$, $100/140 \sim m$. Perbedaan nilai indeks bias *core* dan *cladding* sangat kecil sehingga fraksi perubahan indeks bias sangat kecil:

$$\Delta = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \ll 1 \quad (14.1)$$

Kebanyakan *fiber* yang digunakan dalam sistem komunikasi optik terbuat dari bahan gelas silika (SiO_2) dengan kemurnian kimiawi yang tinggi. Perubahan kecil dari indeks bias dapat dibuat dengan penambahan konsentrasi material *dopping* yang rendah (seperti titanium, germanium atau boron). Indeks bias n_1 berada dalam rentang 1,44 sampai 1,46 bergantung pada panjang gelombang. Tipikal nilai dari Δ adalah antara 0,001 dan 0,02.

Berkas – Berkas Terpandu

Suatu berkas cahaya datang dari udara kedalam *fiber* menjadi suatu berkas yang terpandu, jika datang dengan sudut θ terhadap sumbu *fiber* lebih kecil dari

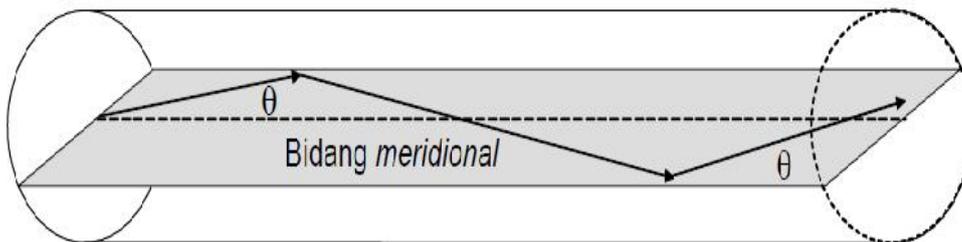
$$n_c = \cos^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (14.2)$$

Berkas – Berkas Meridional

Keadaan bagaimana cahaya dipandu dapat dilihat untuk berkas-berkas meridional (berkas-berkas di dalam bidang yang memotong sumbu serat optik) seperti yang diilustrasikan dalam gambar 14.7. Berkas-berkas ini memotong sumbu serat optik dan memantul dalam bidang yang sama tanpa adanya perubahan sudut datang (seperti dalam kasus pandu gelombang planar). Berkas-berkas meridional dipandu jika sudut n_c didalam serat optik lebih kecil dari sudut kritis tambahan :

$$\bar{n}_c = \frac{f}{2} - n_c = \cos^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (14.3)$$

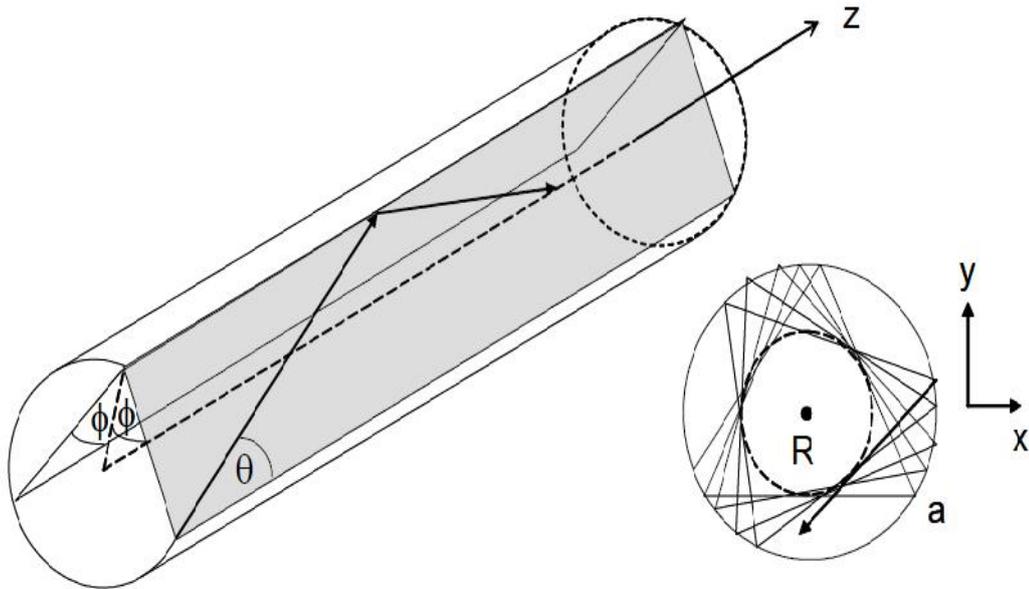
Karena $n_1 \approx n_2$ maka sudut \bar{n}_c kecil.



Gambar 14.7 Trayektori berkas-berkas meridional yang terletak didalam bidang yang memotong sumbu serat optik

Berkas - Berkas yang Terpelintir (skewed)

Suatu berkas sembarang dicirikan oleh bidang datangnya, yaitu suatu bidang yang sejajar dengan sumbu serat optik dan melewati berkas tersebut dengan membentuk sudut terhadap sumbu *fiber*. Bidang datang memotong batas silinder *core-cladding* dengan membentuk sudut w dengan normal pada bidang batas dan terletak pada jarak R dari sumbu *fiber*.



Gambar 14.8 Suatu berkas terpelintir (*skewed ray*) terletak dalam suatu bidang *offset* dari sumbu *fiber* dengan jarak R . Berkas dicirikan oleh sudut-sudut θ dan ϕ . Berkas ini mengikuti trajektori heliks didalam suatu kulit silinder dengan jari-jari R dan a

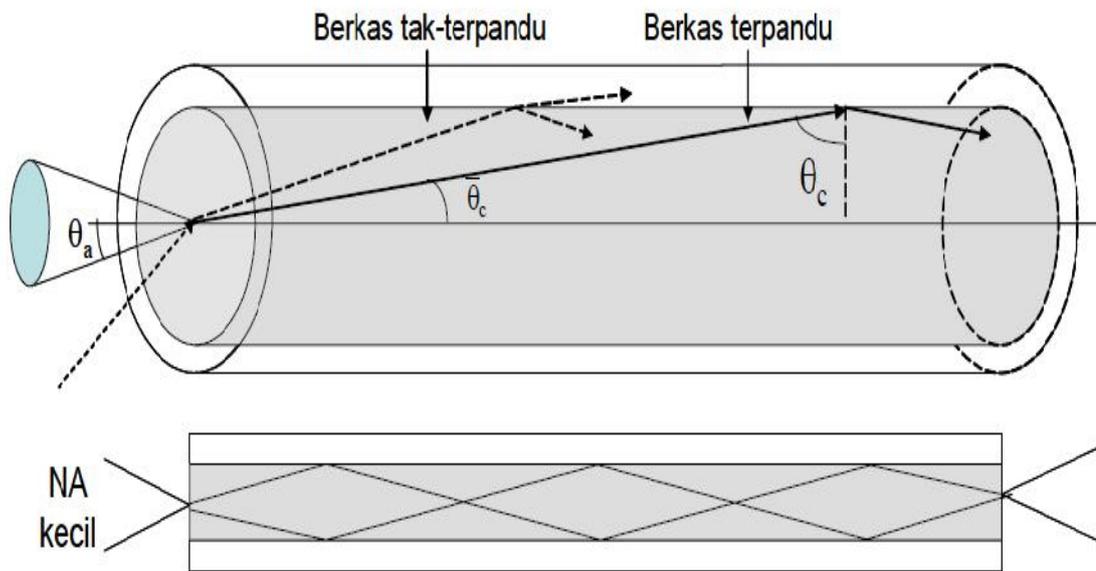
Berkas ini dicirikan oleh sudut θ dengan sumbu *fiber* dan sudut ϕ dengan bidanganya. Jika $\phi \neq 0$ dan $R \neq 0$ berkas dikatakan terpelintir (*skewed*). Untuk berkas-berkas meridional $\phi = 0$ dan $R = 0$. Suatu berkas yang terpelintir memantul secara berulang kedalam bidang-bidang yang membentuk sudut ϕ dengan batas *core-cladding* dan mengikuti lintasan (trajektori) heliks didalam suatu kulit silinder dengan jari-jari R dan a (lihat gambar 14.8)

Numerical Aperture (NA)

Suatu berkas datang dari udara ke dalam *fiber* menjadi berkas yang terpandu jika ia membentuk sudut θ_a ke dalam *core* yang lebih kecil dari θ_c . Dengan menerapkan hukum Snell pada batas udara (*core*), sudut θ_a dalam udara berkaitan dengan θ_c didalam *core* adalah:

$$\theta_a = \sin^{-1}(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \sin^{-1} NA \tag{14.4}$$

dimana $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx n_1(2\Delta)^{1/2}$ adalah *numerical aperture* dari *fiber*. Berkas yang datang dengan sudut lebih besar dari θ_a akan dibiaskan ke dalam *fiber* dan hanya dipandu dalam jarak yang pendek. *Numerical Aperture* menggambarkan kapasitas cahaya yang terkumpul ke dalam *fiber*. Jika berkas terpandu tiba di ujung *fiber*, maka akan dibiaskan dengan membentuk sudut θ_a . Karenanya sudut luar (*acceptance angle* θ_a) merupakan suatu parameter yang krusial dalam mendesain suatu sistem untuk mengkopling cahaya kedalam atau keluar dari *fiber*.



Gambar 14.9 (a) Sudut θ_a dari *fiber*. Berkas dengan sudut tersebut dipandu dengan *TIR*.

NA adalah *numerical aperture* dari *fiber*. (b) Kapasitas cahaya yang dikumpulkan ke dalam *fiber* dengan *NA* yang besar lebih banyak daripada oleh *NA* yang kecil.

Gelombang – Gelombang Terpandu (Guided Waves)

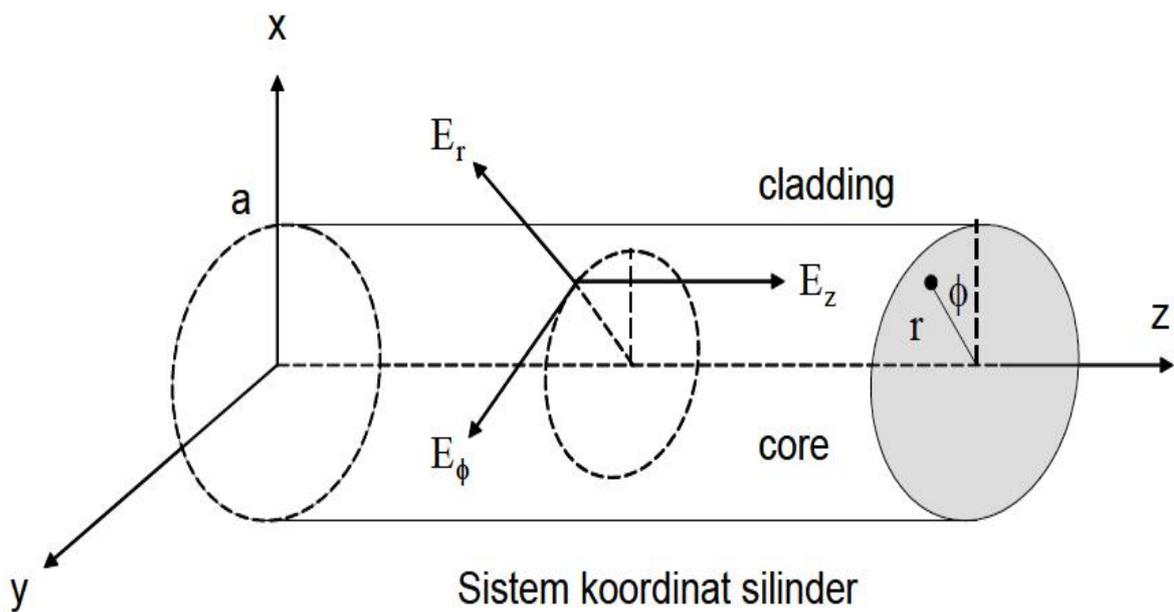
Distribusi Ruang/Spatial

Masing-masing komponen dari medan listrik dan medan magnet harus memenuhi persamaan Helmholtz, $\nabla^2 U + n^2 k_0^2 U = 0$, dimana $n = n_1$ didalam *core* ($r < a$) dan $n = n_2$ didalam *cladding* ($r > a$) dan $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$. Dengan asumsi jari-jari *cladding* b cukup besar,

sehingga dapat dianggap tak hingga dalam perhitungan cahaya terpandu didalam *core* dan didekat batas *core-cladding*. Dalam koordinat silinder, persamaan Helmholtz diberikan oleh :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 U = 0 \tag{14.5}$$

dimana amplitudo kompleks $U = U(r, \phi, z)$ menggambarkan komponen-komponen kartesian dari medan listrik dan medan magnet atau komponen-komponen E_z dan H_z dalam koordinat silinder.



Gambar 14.10 Sistem koordinat silinder

Bentuk solusi dari gelombang harmonik yang menjalar dalam arah sumbu z dengan konstanta perambatan S , diberikan oleh :

$$U = U(r, \phi, z) = u(r) \exp(-i\ell\phi) \exp(-iSz), \quad \ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{14.6}$$

Substitusi persamaan (14.5) kedalam persamaan (14.6) diperoleh :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \left(n^2 k_0^2 - S^2 - \frac{\ell^2}{r^2} \right) u = 0 \tag{14.7}$$

Gelombang akan dipandu, jika konstanta perambatan lebih kecil daripada bilangan gelombang dalam *core* ($S < n_1 k_0$) dan lebih besar daripada bilangan gelombang dalam *cladding* ($S > n_1 k_0$). Dengan mendefinisikan :

$$k_T^2 = n_1^2 k_0^2 - S^2 \quad (14.8)$$

$$\chi^2 = S^2 - n_1^2 k_0^2$$

sehingga untuk gelombang terpandu, k_T^2 dan χ^2 positif maka k_T dan χ adalah riil. Persamaan (14.7) dapat dipisahkan untuk *core* dan *cladding* :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \left(k_T^2 - \frac{\ell^2}{r^2} \right) u = 0 \quad r < a \quad (\text{core}) \quad (14.9a)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \left(\chi^2 + \frac{\ell^2}{r^2} \right) u = 0 \quad r > a \quad (\text{cladding}) \quad (14.9b)$$

Persamaan (14.9) dikenal sebagai persamaan diferensial dengan solusinya adalah fungsi Bessel.

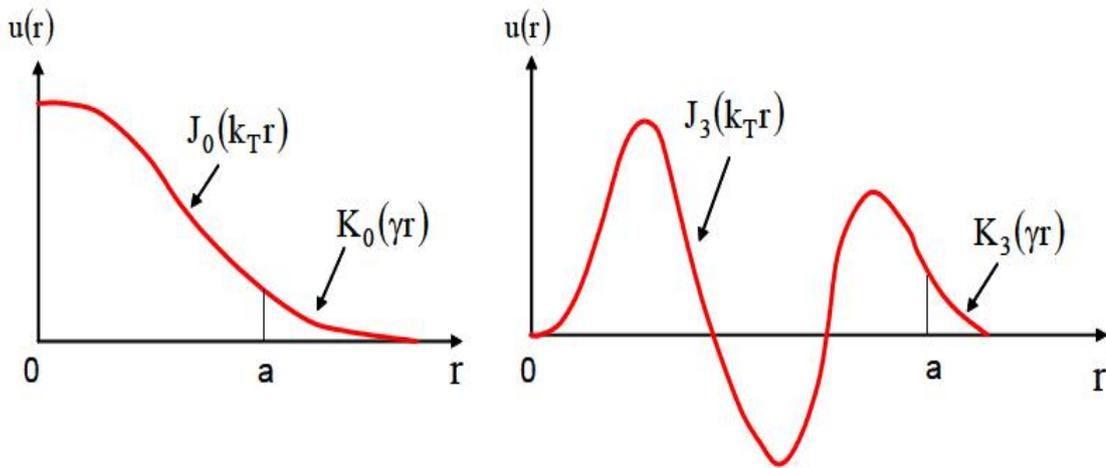
Solusi persamaan diatas adalah :

$$u(r) \propto \begin{cases} J_\ell(k_T r), & \text{core} \\ K_\ell(\chi r), & \text{cladding} \end{cases} \quad (14.10)$$

dimana $J_\ell(x)$ adalah fungsi Bessel jenis pertama dan orde ke- ℓ , sedangkan $K_\ell(x)$ adalah fungsi Bessel jenis kedua dan orde ke- ℓ . Fungsi $J_\ell(x)$ berosilasi seperti fungsi *sinus* atau *cosinus* tetapi dengan amplitudo yang meluruh. Dalam batas $x \ll 1$:

$$J_\ell(x) \approx \left(\frac{2}{fx} \right)^{\frac{1}{2}} \cos \left[x - \left(\ell + \frac{1}{2} \right) \frac{f}{2} \right] \quad (14.11a)$$

$$K_\ell(x) \approx \left(\frac{f}{2x} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{4\ell^2 - 1}{8x} \right) \right] \exp(-x) \quad (14.11b)$$



Gambar 14.11 Contoh distribusi radial $u(r)$ yang diberikan oleh persamaan (14.11)

untuk $\ell = 0$ dan $\ell = 1$

Parameter-parameter k_T dan χ berturut-turut menentukan laju perubahan $u(r)$ dalam *core* dan dalam *cladding*. Harga k_T yang besar berarti distribusi radial dalam *core* berosilasi dengan cepat. Nilai χ yang besar berarti lebih cepat meluruh dan penetrasi gelombang ke dalam *cladding* kecil. Penjumlahan kuadrat dari k_T dan χ adalah konstan :

$$k_T^2 - \chi^2 = (n_1^2 - n_2^2)k_0^2 = NA^2 \cdot k_0^2 \tag{14.12}$$

sehingga bila k_T meningkat, χ menurun dan medan berpenetrasi lebih dalam kedalam *cladding*.

Parameter Fiber (V)

Parameter *fiber (V)* merupakan parameter penting yang membentuk jumlah modus dan konstanta perambatan dalam *fiber*. Parameter ini diperoleh dari :

$$k_T^2 a^2 + \chi^2 a^2 = (NA)^2 \cdot k_0^2 a^2 = V^2 \tag{14.13}$$

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} \cdot NA$$

Agar cahaya atau gelombang terpandu, maka $k_T \cdot a < V$

Jumlah Modus

Untuk *fiber* dengan parameter (V) besar ($V \gg 1$) jumlah modus yang dapat disalurkan dalam *step-index fiber* diberikan oleh :

$$M \approx \frac{4}{f^2} V^2 \quad (14.14)$$

Konstanta Perambatan

Untuk *fiber* dengan parameter (V) yang besar, konstanta perambatan diberikan :

$$S_{\ell,m} \approx \left[n_1^2 k_0^2 - (\ell + 2m)^2 \frac{f^2}{4a^2} \right]^{1/2} \quad (14.15)$$

Karena jumlah modus, seperti yang digambarkan dalam persamaan (14.14) dapat ditulis dalam bentuk :

$$M \approx \frac{4}{f^2} (2n_1^2 \Delta) k_0^2 a^2 \quad (14.16)$$

maka

$$S_{\ell,m} \approx n_1 k_0 \left[1 - 2 \frac{(\ell + 2m)^2}{M} \Delta \right]^{1/2} \quad (14.17)$$

Karena nilai $\Delta \ll 1$, maka dengan aproksimasi, $(1 + \Delta)^{1/2} \approx 1 + \frac{\Delta}{2}$ maka konstanta perambatan diberikan oleh :

$$S_{\ell,m} \approx n_1 k_0 \left[1 - \frac{(\ell + 2m)^2}{M} \Delta \right] \quad (14.18)$$

Kecepatan Grup (Untuk V besar)

Untuk menentukan kecepatan grup, $V_{\ell,m} = \frac{d\tilde{S}}{dS_{\ell,m}}$ dari modus (ℓ, m) substitusikan $n_1 k_0 = \tilde{S}/c_1$

dan $M = \left(\frac{8}{f^2} \right) a^2 \tilde{S}^2 \frac{\Delta}{c_1^2}$ maka :

$$V_{\ell,m} \approx c_1 \left[1 + \frac{(\ell + 2m)^2}{M} \Delta \right]^{-1} \quad (14.19)$$

Dengan menggunakan aproksimasi $(1 + \Delta)^{-1} \approx 1 - \Delta$ jika $\Delta \ll 1$, maka :

$$V_{\ell,m} \approx c_1 \left[1 - \frac{(\ell + 2m)^2}{M} \Delta \right] \quad (14.20)$$

Sehingga kecepatan grup bervariasi antara c_1 dan $c_1(1 - \Delta) = c_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang *step index fiber* !
2. Diskusikan dengan kelompokmu dan presentasikan tentang bagaimana memandu gelombang dan gelombang-gelombang terpandu dalam fiber optik!

RANGKUMAN

1. Perbedaan nilai indeks bias *core* dan *cladding* sangat kecil sehingga fraksi perubahan indeks bias sangat kecil:

$$\Delta = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \ll 1$$

2. Tipikal nilai dari Δ adalah antara 0,001 dan 0,02.
3. Suatu berkas cahaya datang dari udara kedalam *fiber* menjadi suatu berkas yang terpandu, jika datang dengan sudut θ terhadap sumbu *fiber* lebih kecil dari

$$\theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

4. Berkas-berkas meridional dipandu jika sudut θ didalam serat optik lebih kecil dari sudut kritis tambahan :

$$\theta_c = \frac{f}{2} - \theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

5. Suatu berkas yang terpelintir memantul secara berulang kedalam bidang-bidang yang membentuk sudut θ dengan batas *core-cladding* dan mengikuti lintasan (trayektori) heliks didalam suatu kulit silinder dengan jari-jari R dan a
6. Suatu berkas datang dari udara ke dalam *fiber* menjadi berkas yang terpandu jika ia membentuk sudut θ ke dalam *core* yang lebih kecil dari θ_c . Dengan menerapkan hukum Snell pada batas udara (*core*), sudut θ_a dalam udara berkaitan dengan θ_c didalam *core* adalah:

$$\theta_a = \sin^{-1} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \sin^{-1} NA$$

7. Persamaan Helmholtz diberikan oleh :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 U = 0$$

8. Parameter *fiber* (V) merupakan parameter penting yang membentuk jumlah modus dan konstanta perambatan dalam *fiber*. Parameter ini diperoleh dari :

$$k_r^2 a^2 + \chi^2 a^2 = (NA)^2 \cdot k_0^2 a^2 = V^2$$

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} \cdot NA$$

9. Untuk *fiber* dengan parameter (V) besar ($V \gg 1$) jumlah modus yang dapat disalurkan dalam *step-index fiber* diberikan oleh :

$$M \approx \frac{4}{f^2} V^2$$

10. Untuk *fiber* dengan parameter (V) yang besar, konstanta perambatan diberikan :

$$S_{\ell, m} \approx \left[n_1^2 k_0^2 - (\ell + 2m)^2 \frac{f^2}{4a^2} \right]^{1/2}$$

11. Kecepatan grup bervariasi antara c_1 dan $c_1(1 - \Delta) = c_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$.

EVALUASI FORMATIF 2

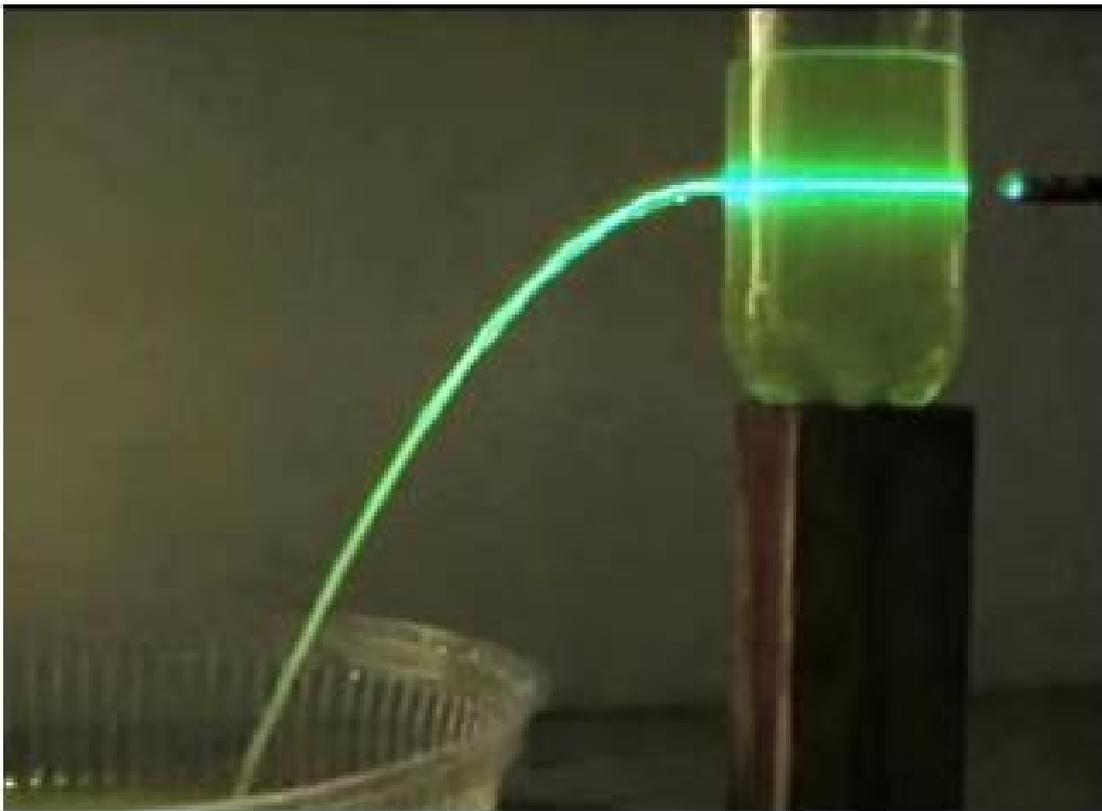
1. Jelaskan bagaimana prinsip kerja fiber dengan step index fiber!
2. Jelaskan indeks bias core dan indeks bias cladding dan bagaimana mendesain fiber yang terbaik dengan mempertimbangkan harga indeks biasnya!
3. Jelaskan berkas-berkas yang terpandu untuk fiber optik!
4. Jelaskan perbedaan berkas-berkas meridional dan berkas-berkas yang terpelintir !
5. Jelaskan apa yang dimaksud *numerical aperture* pada fiber optik!
6. Jelaskan gelombang-gelombang terpandu dalam fiber optik!

Lembar Kerja Praktek 2

Project

Diskusikan dan tuliskan serta presentasikan hasil demonstrasi kalian !

Demonstrasi Fiber Optik. Kalian dapat melakukan demonstrasi sederhana perambatan cahaya dalam fiber optik. Kalian gunakan air pancuran dan laser pointer. Ambil botol transparan bekas dan buat pancuran di sekitar dasarnya. Kalau bias tambahkan pipa kecil sehingga pancuran air tidak bergamburan. Ambil juga sebuah laser pointer yang cukup murah. Isi air ke dalam botol tersebut sehingga air memancar di di dasarnya. Kemudian arahnya laser pointer dari sisi belakang sehingga tepat mengarah ke mulut pancuran. Kalian akan perhatikan pancuran air berwarna seperti warna cahaya laser pointer. Ini menunjukkan bahwa cahaya dalam pancuran mengalami pemantulan internal total internal seperti yang terjadi pada fiber optik. Percobaan yang kalian lakukan diilustrasikan pada **Gambar 14.12**



Gambar 14.12 Pemantulan total internal oleh air dalam pancuran. Fenomena ini menyerupai perambatan cahaya dalam fiber optik (youtube.com)

Lembar Kerja Project

RANGKUMAN MODUL

1. Salah satu aplikasi penting fenomena pemantulan total internal adalah pengiriman berkas cahaya melalui fiber optik. Fiber optik merupakan material transparan yang berbentuk silinder sangat kecil
2. Pemakaian utama fiber optik dijumpai dalam dunia telekomunikasi. Sistem fiber optik dapat membawa percakapan telepon, TV kabel, sambungan internet, sinyal video telekonferensi, dan lain-lain.
3. Fiber optik juga menjadi komponen penting dari peralatan kedokteran yang bernama endoskopi.
4. Endoskop mengandung kamera dan sumber cahaya kecil serta fiber optik yang ditempatkan pada bundelan fleksibel. Cahaya yang ditangkap kamera dikirim melalui fiber optik ke monitor sehingga dokter dapat melihat atau merekam gambar bagian tubuh tersebut. Cahaya dikirim ke organ dan cahaya pantulan organ ditangkap kembali melalui sistem fiber optik
5. Serat optik adalah saluran transmisi yang terbuat dari kaca atau plastik yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal cahaya dari suatu tempat ke tempat lain
6. Sumber cahaya yang digunakan adalah laser karena laser mempunyai spektrum yang sangat sempit.
7. Kecepatan transmisi serat optik sangat tinggi sehingga sangat bagus digunakan sebagai saluran komunikasi.
8. Efisiensi dari serat optik ditentukan oleh kemurnian dari bahan penyusun gelas. Semakin murni bahan gelas, semakin sedikit cahaya yang diserap oleh serat optik.
9. Serat optik mulai diteliti sejak Alexander Graham Bell menemukan telepon
10. Serat optik terdiri dari inti serat (*core*) yang dibungkus oleh kulit (*cladding*) dan keduanya dilindungi oleh jaket pelindung (*buffer coating*).
11. Dipandunya cahaya oleh sebuah serat optik dan oleh aliran air adalah peristiwa dari fenomena yang sama yaitu *total internal reflection*.
12. Serat optik atau *fiber optics* adalah pandu gelombang dielektrik silinder yang terbuat dari material *low-loss* seperti gelas silika. Ia memiliki suatu pusat (*core*) dimana cahaya dipandu yang disisipkan dalam suatu selubung/*cladding* dengan indeks bias yang lebih rendah.

13. *Fiber* dengan diameter *core* yang besar disebut *multimode fiber* sedangkan bila diameter *core*-nya kecil, disebut dengan *single-mode fiber*
14. Salah satu masalah yang berkaitan dengan perambatan cahaya dalam *fiber multimode* adalah ditimbulkan dari perbedaan kecepatan grup dari masing-masing modus. Akibatnya pulsa akan melebar sepanjang *fiber*.
15. *Modal dispersion* dapat dikurangi dengan gradien indeks bias dari *core*, yang mempunyai nilai maksimum pada pusatnya dan nilai minimum pada batas *core/cladding*
16. Perbedaan nilai indeks bias *core* dan *cladding* sangat kecil sehingga fraksi perubahan indeks bias sangat kecil:

$$\Delta = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \ll 1$$

17. Tipikal nilai dari Δ adalah antara 0,001 dan 0,02.
18. Suatu berkas cahaya datang dari udara kedalam *fiber* menjadi suatu berkas yang terpandu, jika datang dengan sudut θ_i terhadap sumbu *fiber* lebih kecil dari

$$\theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

19. Berkas-berkas meridional dipandu jika sudut θ_i didalam serat optik lebih kecil dari sudut kritis tambahan :

$$\theta_c = \frac{f}{2} - \theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

20. Suatu berkas yang terpelintir memantul secara berulang kedalam bidang-bidang yang membentuk sudut θ dengan batas *core-cladding* dan mengikuti lintasan (trayektori) heliks didalam suatu kulit silinder dengan jari-jari R dan a
21. Suatu berkas datang dari udara ke dalam *fiber* menjadi berkas yang terpandu jika ia membentuk sudut θ_i ke dalam *core* yang lebih kecil dari θ_c . Dengan menerapkan hukum Snell pada batas udara (*core*), sudut θ_a dalam udara berkaitan dengan θ_c didalam *core* adalah:

$$\theta_a = \sin^{-1} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \sin^{-1} NA$$

22. Persamaan Helmholtz diberikan oleh :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \omega^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 U = 0$$

23. Parameter *fiber* (V) merupakan parameter penting yang membentuk jumlah modus dan konstanta perambatan dalam *fiber*. Parameter ini diperoleh dari :

$$k_r^2 a^2 + \kappa^2 a^2 = (NA)^2 \cdot k_0^2 a^2 = V^2$$

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} \cdot NA$$

24. Untuk *fiber* dengan parameter (V) besar ($V \gg 1$) jumlah modus yang dapat disalurkan dalam *step-index fiber* diberikan oleh :

$$M \approx \frac{4}{\pi^2} V^2$$

25. Untuk *fiber* dengan parameter (V) yang besar, konstanta perambatan diberikan :

$$S_{\ell,m} \approx \left[n_1^2 k_0^2 - (\ell + 2m)^2 \frac{f^2}{4a^2} \right]^{1/2}$$

26. Kecepatan grup bervariasi antara c_1 dan $c_1(1 - \Delta) = c_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$.

DAFTAR PUSTAKA

- Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I
- Abdullah, Mikrajuddin. 2016. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.
- Bahtiar, Ayi. 2008. *Rekayasa Optik*. Bandung : E-Book.

Modul 15:

Kristal Fotonik dan Laser

PENDAHULUAN

Kristal Fotonik merupakan Kristal yang dapat mempropagasikan cahaya pada arah dan gap frekuensi tertentu, Kristal fotonik pada umumnya terbagi menjadi Kristal fotonik 1 dimensi, 2 dimesi dan 3 dimensi berdasarkan arah perambatan gelombangnya. Kristal fotonik digunakan sebagai material device optik yang sekarang ini menjadi bahan utama pembuatan semua alat optic, pada fabrikasi Kristal fotonik ini dapat digunakan dari beberapa material organik dan anorganik.

Kegiatan Pembelajaran 1: Fotonik Kristal

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

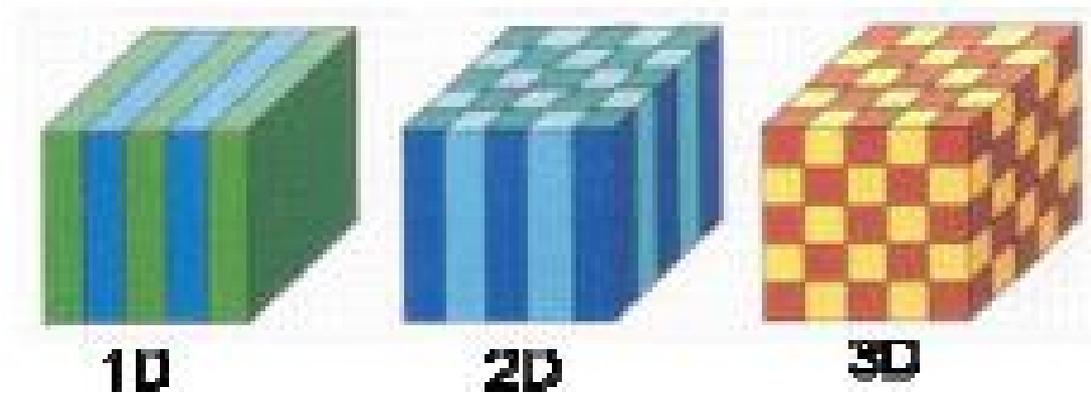
1. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahaman mengenai prinsip dasar fotonik kristal
2. Mahasiswa memiliki pengertian dan pemahanam mengenai jenis – jenis Kristal fotonik dan aplikasi Kristal fotonik

URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Kristal fotonik (*photonic crystal, PhC*) atau material *Photonic Bandgap* (PBG) adalah struktur periodik dari material dielektrik dengan permitivitas (ϵ) atau indeks bias (n) yang berbeda, sehingga dapat menghambat perambatan gelombang dengan frekuensi dan arah tertentu. Periodisitas dapat berupa satu, dua dan tiga dimensi, sehingga *PhC* disebut kristal fotonik *1D*, *2D* dan *3D*, seperti ditunjukkan pada gambar (15.1) *PhC* pertama kali diusulkan

oleh Sajeev John dan Eli Yablonovitch pada tahun 1987 yang bertujuan untuk merancang suatu material yang dapat mempengaruhi sifat-sifat foton seperti halnya kristal semikonduktor yang dapat mempengaruhi sifat-sifat elektron.



Gambar 15.1 Kristal fotonik 1D, 2D dan 3D. Warna menggambarkan material dielektrik dengan permitivitas atau indeks bias yang berbeda.

Jika gelombang elektromagnetik menjalar ke dalam struktur *PhC*, maka akan dihamburkan akibat perbedaan indeks bias didalam struktur. Jika panjang gelombang jauh lebih besar daripada konstanta kisi dari *PhC*, struktur berperilaku seperti suatu medium efektif, namun jika panjang gelombang sebanding atau lebih kecil daripada konstanta kisi *PhC*, maka akan terjadi refleksi Bragg, sehingga membentuk PBG. Pada setiap bidang batas dua material dielektrik yang berbeda. Proses pembentukan PBG digambarkan oleh persamaan Maxwell yang akan menghasilkan nilai eigen seperti halnya pada persamaan Schroedinger pada kasus elektron. Solusi persamaan tersebut disebut dengan persamaan dispersi, dimana nilai eigen untuk vektor-gelombang tertentu berkaitan dengan energi elektromagnetik dan fungsi eigennya disebut moda/modus. Jika tidak ada moda pada rentang spektra tertentu, maka disebut *Photonic Bandgap* (PBG).

Suatu PBG dapat berupa *stop gap*, *bandgap* atau *bandgap* sempurna. *Stop gap* berkaitan dengan tidak adanya moda fotonik dalam suatu frekuensi tertentu untuk satu arah tertentu. *Bandgap* adalah tidak adanya modus fotonik dalam suatu rentang frekuensi tertentu untuk segala arah tetapi hanya satu polarisasi saja, yang hanya ada pada *PhC 2D*. Sedangkan *bandgap* sempurna berarti tidak ada moda dalam semua arah dan polarisasi.

Konsep dasar dari *PhC* mirip dengan konsep dasar perambatan elektron dalam kristal, hanya pembawanya adalah foton, sehingga bentuk interaksi antara foton dan *PhC* digambarkan oleh persamaan Maxwell. Perbandingan konsep kristal fotonik dan kristal biasa,

ditunjukkan pada tabel 15.1 Karena keduanya periodik, maka digunakan fungsi Bloch untuk menggambarkan fungsi gelombangnya.

Tabel 15.1 Perbandingan konsep kristal fotonik dan kristal biasa

Kristal fotonik	Kristal Biasa
Pembawa adalah foton	Pembawa adalah elektron
Interaksi pembawa dengan $PhCj$ digambarkan oleh persamaan Maxwell	Interaksi pembawa dengan kristal digambarkan oleh persamaan Schrodinger
$\vec{\nabla} \times \frac{1}{v(\vec{r})} \vec{\nabla} \times \vec{H}_k(\vec{r}) = \left(\frac{\tilde{S}}{c}\right)^2 \vec{H}_k(\vec{r})$	$\left(\frac{p^2}{2m} + V(\vec{r})\right) \mathbb{E}_k(\vec{r}) = E \mathbb{E}_k(\vec{r})$
Hamburan foton terjadi akibat perbedaan permitivitas struktur	Hamburan elektron terjadi karena potensial inti atom $V(r)$
Permitivitas bersifat periodik $v(\vec{r}) = v(\vec{r} + \vec{R})$	Potensial Permitivitas bersifat periodik $V(\vec{r}) = V(\vec{r} + \vec{R})$
Fungsi medan H memenuhi fungsi Bloch $\vec{H}_k(\vec{r}) = \vec{u}(\vec{r}) \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r})]$	Fungsi gelombang memenuhi fungsi Bloch $\mathbb{E}_k(\vec{r}) = \vec{u}(\vec{r}) \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r})]$
Struktur pita/dispersi $\tilde{S}_n(k)$	Struktur pita $E_n(k)$
Mengatur sifat-sifat foton	Mengatur sifat-sifat elektron

Pembentukan PBG (Dispersi Relation)

Salah satu metoda untuk kalkulasi PBG adalah menggunakan ekspansi gelombang bidang. Analisis medan radiasi/ perambatan gelombang EM dalam kristal fotonik, diawali dengan memformulasikan persamaan nilai eigen dari persamaan Maxwell. Diasumsikan bahwa tak ada sumber muatan-muatan bebas ($\rho = 0$) dan tak ada sumber arus listrik ($J = 0$) maka bentuk persamaan Maxwell menjadi:

$$\begin{aligned}
\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) &= 0 \\
\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) &= 0 \\
\vec{\nabla}_x \vec{E}(\vec{r}, t) &= -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \\
\vec{\nabla}_x \vec{H}(\vec{r}, t) &= -\frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t}
\end{aligned}
\tag{15.1}$$

Dimana \vec{D} adalah perpindahan listrik, \vec{B} adalah induksi magnet, \vec{H} adalah intensitas magnet dan \vec{E} adalah medan listrik. Jika diasumsikan bahwa material kristal fotonik bukan material magnetik, sehingga permeabilitas kristal fotonik sama dengan permeabilitas ruang hampa \sim_0 maka berlaku :

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \sim_0 \vec{H}(\vec{r}, t)
\tag{15.2}$$

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \nu_0 \nu(\vec{r}) \vec{E}(\vec{r}, t)$$

Karena permitivitas PHC bersifat periodik dalam ruang $\nu(\vec{r}) = \nu(\vec{r} + \vec{a}_i)$, dengan $i = 1, 2, 3, \dots$ dan $\{\vec{a}_i\}$ adalah vektor kisi elementer dari kristal fotonik, maka $\nu^{-1}(\vec{r})$ dapat diungkapkan dalam deret Fourier:

$$\nu^{-1} = \frac{1}{\nu(\vec{r})} = \sum_{\vec{G}} \nu(\vec{G}) \exp(i\vec{G} \cdot \vec{r})
\tag{15.3}$$

dengan $\{\vec{G}\}$ adalah vektor kisi balik.

$$\left. \begin{aligned}
\vec{G} &= \ell_1 \vec{b}_1 + \ell_2 \vec{b}_2 + \ell_3 \vec{b}_3 \\
\vec{a}_i \cdot \vec{b}_j &= 2\pi \delta_{ij}
\end{aligned} \right\} \vec{b}_i = \text{vektor elementer kisi balik}
\tag{15.4}$$

Sekarang, jika diasumsikan bahwa fungsi dielektrik adalah riil $\nu(-\vec{G}) = \nu^*(\vec{G})$ maka persamaan Maxwell dalam kristal fotonik menjadi:

$$\vec{\nabla} \cdot \{v(\vec{r})\vec{E}(\vec{r})\} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) = 0 \tag{15.5}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Dengan mengeliminasi medan-medan \vec{E} dan \vec{H} , maka diperoleh persamaan gelombang EM :

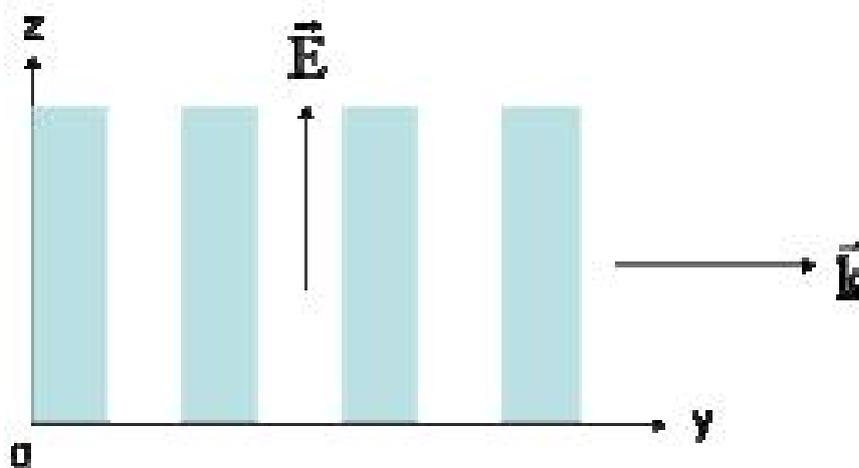
$$\frac{1}{v(\vec{r})} \vec{\nabla}_x \{ \vec{\nabla}_x \vec{E}(\vec{r}, t) \} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}(\vec{r}, t)$$

$$\vec{\nabla}_x \left\{ \frac{1}{v(\vec{r})} \vec{\nabla}_x \vec{H}(\vec{r}, t) \right\} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{H}(\vec{r}, t)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

PBG pada Kristal Fotonik 1D

Dalam struktur kristal fotonik 1D, persamaan nilai eigen jauh sederhana karena hanya ada satu nilai k , dan indeks bias atau permitivitas v seragam dalam dua arah (misalnya arah $-x$ dan $-z$), sehingga permitivitas, medan \vec{H} , dan medan \vec{B} hanya bergantung pada satu koordinat saja (misalnya arah $-y$), seperti ditunjukkan pada gambar 15.2. Perhitungan PBG dapat dilakukan dengan dua metode, yaitu *plane-wave expansion (solid state)* dan matriks transfer.



Gambar 15.2 Perambatan medan dalam kristal fotonik 1D

Jika menggunakan metode *plane-wave expansion*, kita pandang kristal fotonik *1D*, dimana medan \vec{E} sejajar sumbu $-z$ dan gelombang merambat dalam arah $-y$, sehingga medan listrik \vec{E} dapat dinyatakan $\vec{E}(y,t)$, sehingga persamaan Master menjadi:

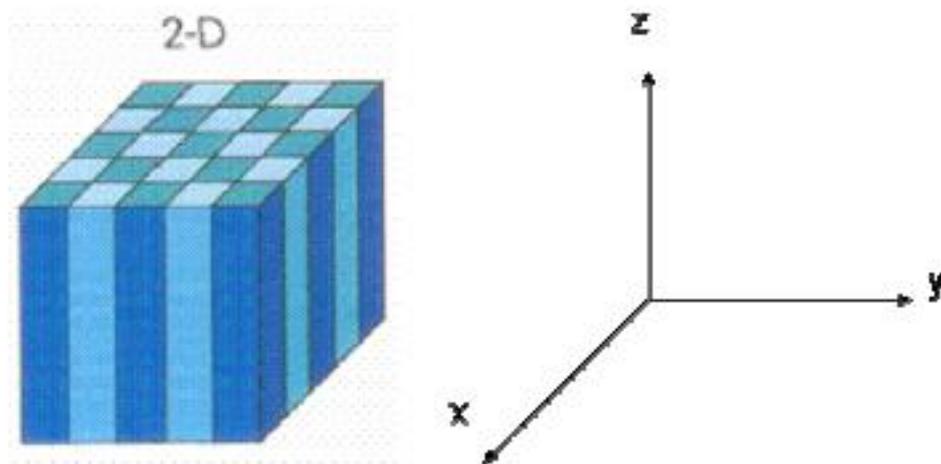
$$\frac{1}{v(y)} \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (15.6)$$

$$v(y+a) = v(y); a = \text{perioda}$$

PBG pada Kristal Fotomik 2D

Dalam *PHC 2D*, variasi indeks bias/permitivitas terjadi dalam dua arah koordinat (misalnya arah- x , dan arah- y) tapi seragam dalam arah- z , seperti ditunjukkan pada gambar 15.3. Akibatnya gelombang merambat dalam bidang $x-y$

dan seragam dalam arah- z , sehingga permitivitas v , medan \vec{E} dan medan \vec{H} tidak bergantung pada sumbu- z .



Gambar 15.3 Struktur Kristal fotonik *2D*, dimana indeks bias bervariasi pada arah- x , dan arah- y , namun seragam dalam arah- z .

Perhitungan *PBG* diawal dengan persamaan Master, dimana untuk kasus *2D* seperti pada gambar 15.3 ada dua set-persamaan, yaitu:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} E_x(\vec{r}_{II}, t) &= -\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} H_x(\vec{r}_{II}, t) \\ \frac{\partial}{\partial x} E_z(\vec{r}_{II}, t) &= -\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} H_y(\vec{r}_{II}, t) \\ \frac{\partial}{\partial x} H_y(\vec{r}_{II}, t) - \frac{\partial}{\partial y} H_x(\vec{r}_{II}, t) &= \nu_0 \nu(\vec{r}_{II}) \frac{\partial}{\partial t} E_z(\vec{r}_{II}, t) \end{aligned} \right\} \quad (15.7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} H_z(\vec{r}_{II}, t) &= \nu_0 \nu(\vec{r}_{II}) \frac{\partial}{\partial t} E_x(\vec{r}_{II}, t) \\ \frac{\partial}{\partial x} H_z(\vec{r}_{II}, t) &= -\nu_0 \nu(\vec{r}_{II}) \frac{\partial}{\partial t} E_y(\vec{r}_{II}, t) \\ \frac{\partial}{\partial x} E_y(\vec{r}_{II}, t) - \frac{\partial}{\partial y} E_x(\vec{r}_{II}, t) &= -\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} H_z(\vec{r}_{II}, t) \end{aligned} \right\} \quad (15.8)$$

Dengan mengasumsikan bahwa medan-medan \vec{E} dan \vec{H} adalah medan harmonik:

$$E_z(\vec{r}_{II}, t) = E_z(\vec{r}_{II}) \exp(-i\check{S}t) \quad (15.9)$$

$$H_z(\vec{r}_{II}, t) = H_z(\vec{r}_{II}) \exp(-i\check{S}t) \quad (15.10)$$

Maka diperoleh persamaan nilai eigen:

$$L_E^2 E_z(\vec{r}_{II}) \equiv -\frac{1}{\nu(\vec{r}_{II})} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right\} E_z(\vec{r}_{II}) \quad (15.11)$$

$$L_E^2 E_z(\vec{r}_{II}) \equiv -\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\nu(\vec{r}_{II})} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\nu(\vec{r}_{II})} \frac{\partial}{\partial y} \right\} H_z(\vec{r}_{II}) \quad (15.12)$$

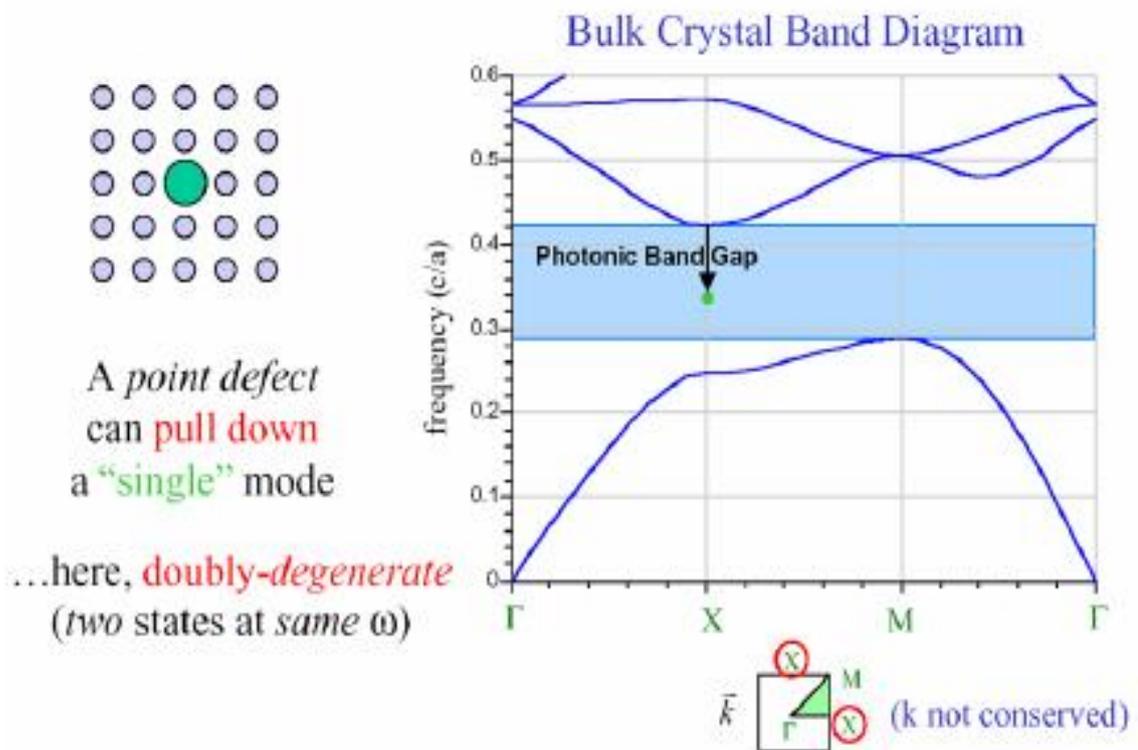
$$L_E^2 E_z(\vec{r}_{II}) = \frac{\check{S}^2}{c^2} H_z(\vec{r}_{II})$$

Dua jenis operator ini menghasilkan dua fungsi eigen dengan dua polarisasi yang berbeda:

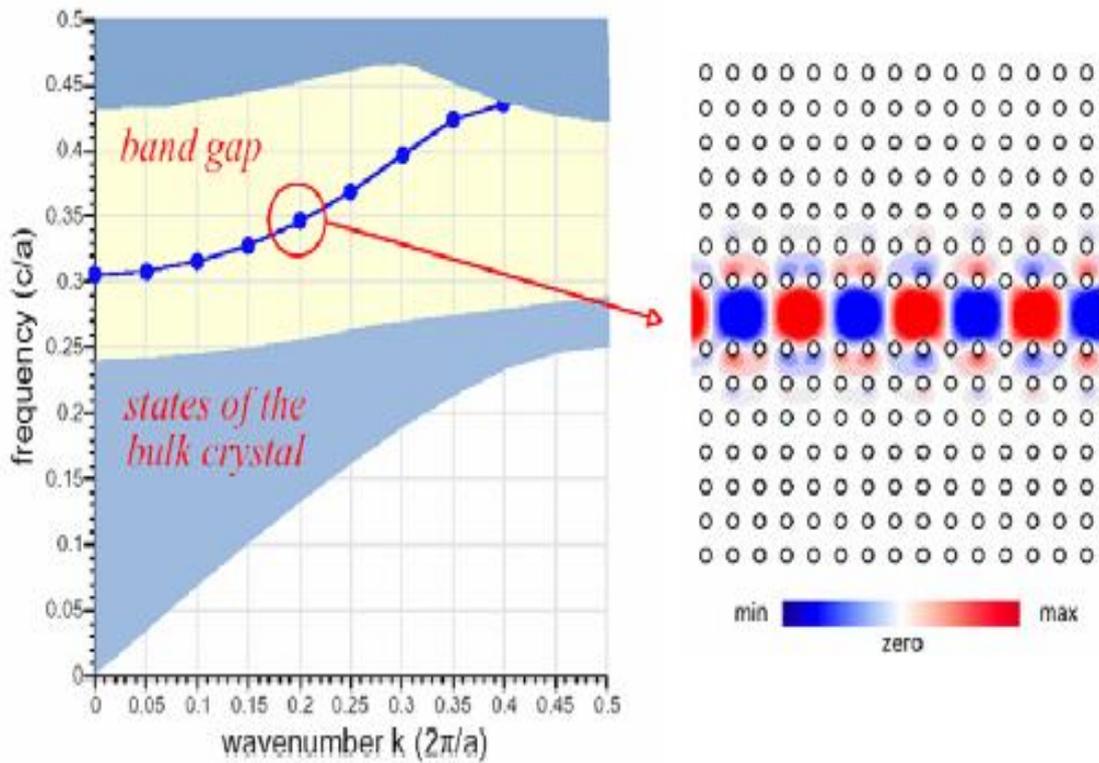
1. Polarisasi \vec{E} (TE), dimana medan listrik \vec{E} sejajar sumbu-z
2. Polarisasi \vec{H} (TM), dimana medan magnet \vec{H} sejajar sumbu-z

Cacat Pada Kristal Fotonik

Cacat pada kristal fotonik sifatnya disengaja, yaitu dengan menyisipkan indeks bias material dielektrik yang berbeda dengan struktur kristal fotonik sempurna atau dengan merubah geometri (ukuran), sehingga periodisitasnya terganggu. Cacat dapat berupa titik (*point defect*) yaitu dengan merubah hanya salah satu dari susunan dielektrik dan cacat garis (*line defect*) yaitu dengan menyisipkan beberapa *defect*. Penyisipan lapisan cacat mengakibatkan munculnya frekuensi (*defect mode*) didalam *bandgap*, sehingga frekuensi tersebut dapat merambat ke dalam struktur kristal fotonik.



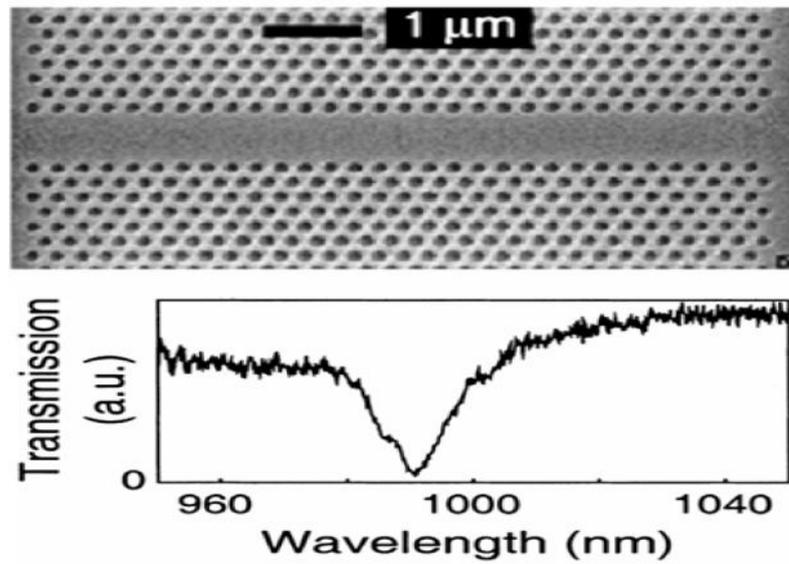
(a)



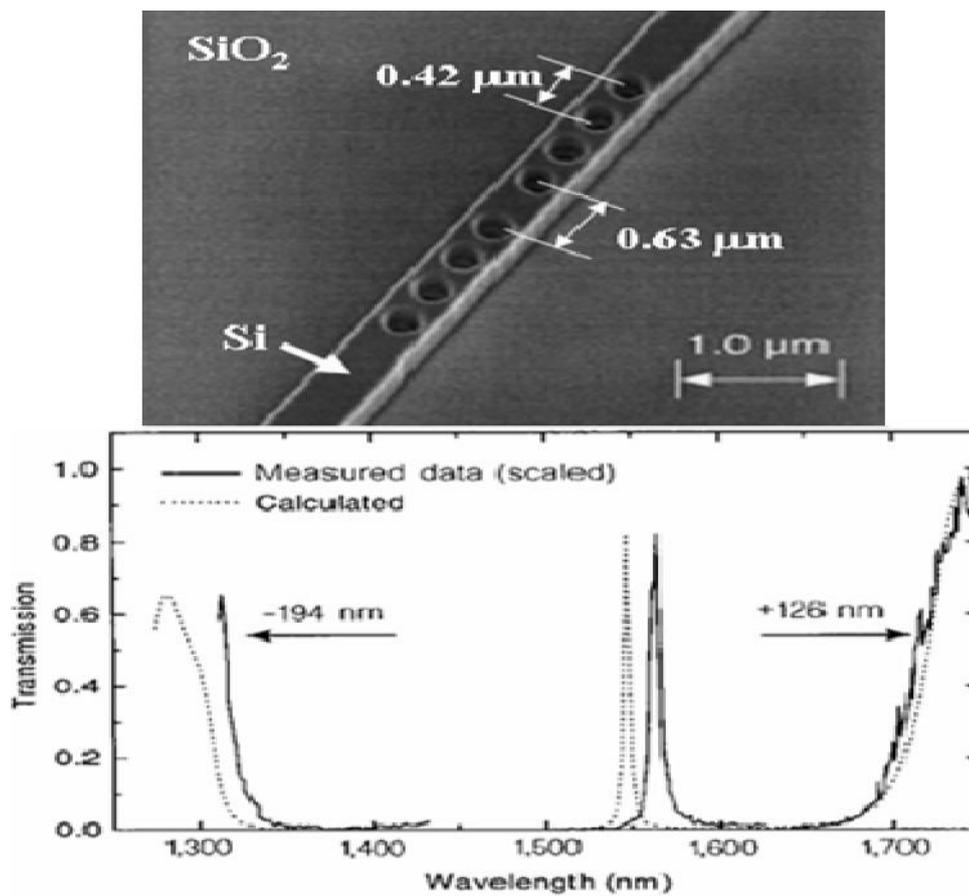
(b)

Gambar 15.4 Pengaruh penyisipan defect pada struktur pita *bandgap* (a). *Point defect*, dan (b) *Line defect*.

Pada gambar 15.4 menunjukkan pengaruh cacat titik terhadap struktur pita. Tampak bahwa terdapat moda didalam *bandgap*. Pembuatan lapisan *defect* ini agar kristal fotonik dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti resonator laser (*point defect*) atau pandu gelombang (*line defect*).



(a)



(b)

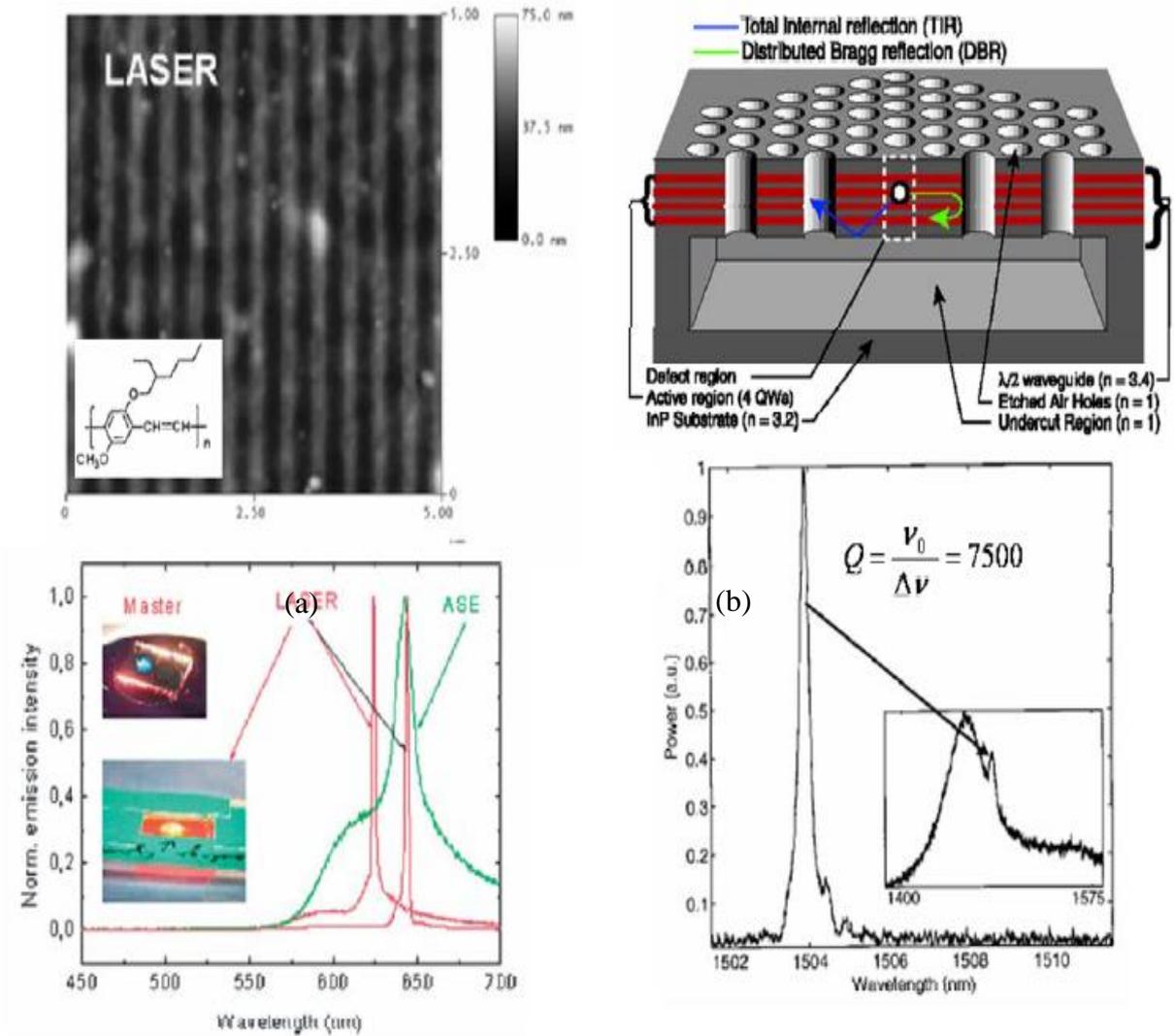
Gambar 15.5 (a) Hasil eksperimen dan kurva resonansi dari *point defect* untuk aplikasi resonator (b) *Line defect* untuk pandu gelombang

Aplikasi Kristal Fotonik

Kristal fotonik dikembangkan untuk memuat berbagai divais fotonik untuk menggantikan divais elektronik, sehingga diharapkan dapat dibuat suatu sistem optik terintegrasi (*integrated optical devices*), seperti halnya pada *integrated electronic*. Pada bagian ini akan dibahas beberapa aplikasi kristal fotonik, seperti laser, pandu gelombang, *all-optical switching*, *add-drop filter*, dan *all-optical diode*.

Laser

Laser yang efisien adalah laser yang hanya membutuhkan energi pembangkit (dapat berupa arus, tegangan listrik atau energi foton) yang kecil atau *threshold* yang kecil. Gambar memperlihatkan hasil eksperimen aplikasi kristal fotonik *1D* dan *2D* untuk laser. Laser *1D* dibuat dengan membentuk *grating* pada permukaan film tipis polimer terkonjugasi *MEH-PPV* dengan teknik *solvent-assisted micromolding*.



Gambar 15.6 Kristal fotonik untuk aplikasi laser : (a) 1D dari material MEH- PPV [taken from M. Gaal et al., Adv. Mater 15 (2003), p.1165], dan (b) 2D dari material InGaAsP [taken from O. Painter et al, Science 284 (1999), p. 1819]

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang pembentukan PBG
2. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang PBG pada Kristal fotonik 1D, 2D
3. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang aplikasi kristal fotonik

RANGKUMAN

1. Kristal fotonik (*photonic crystal, PhC*) atau material *Photonic Bandgap* (PBG) adalah struktur periodik dari material dielektrik dengan permitivitas (ϵ) atau indeks bias (n) yang berbeda, sehingga dapat menghambat perambatan gelombang dengan frekuensi dan arah tertentu.
2. Panjang gelombang jauh lebih besar daripada konstanta kisi dari *PhC*, struktur berperilaku seperti suatu medium efektif, namun jika panjang gelombang sebanding atau lebih kecil daripada konstanta kisi *PhC*, maka akan terjadi refleksi Bragg, sehingga membentuk PBG.
3. Persamaan Maxwell yang akan menghasilkan nilai eigen seperti halnya pada persamaan Schroedinger pada kasus elektron. Solusi persamaan tersebut disebut dengan persamaan dispersi, dimana nilai eigen untuk vektor-gelombang tertentu berkaitan dengan energi elektromagnetik dan fungsi eigennya disebut moda/modus.
4. *Bandgap* adalah tidak adanya modus fotonik dalam suatu rentang frekuensi tertentu untuk segala arah tetapi hanya satu polarisasi saja, yang hanya ada pada *PhC 2D*. Sedangkan *bandgap* sempurna berarti tidak ada moda dalam semua arah dan polarisasi.
5. Konsep dasar dari *PhC* mirip dengan konsep dasar perambatan elektron dalam kristal, hanya pembawanya adalah foton, sehingga bentuk interaksi antara foton dan *PhC* digambarkan oleh persamaan Maxwell.
6. Kalkulasi PBG adalah menggunakan ekspansi gelombang bidang.
7. Bentuk persamaan Maxwell

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Dimana \vec{D} adalah perpindahan listrik, \vec{B} adalah induksi magnet, \vec{H} adalah intensitas magnet dan \vec{E} adalah medan listrik.

8. Dua jenis operator ini menghasilkan dua fungsi eigen dengan dua polarisasi yang berbeda:
 - a. Polarisasi \vec{E} (*TE*), dimana medan listrik \vec{E} sejajar sumbu-*z*
 - b. Polarisasi \vec{H} (*TM*), dimana medan magnet \vec{H} sejajar sumbu-*z*
9. Laser yang efisien adalah laser yang hanya membutuhkan energi pembangkit (dapat berupa arus, tegangan listrik atau energi foton) yang kecil atau *threshold* yang kecil.

EVALUASI FORMATIF 1

1. Jelaskan kristal fotonik (*photonic crystal, PhC*) atau material *Photonic Bandgap*!
2. Jelaskanlah hal apa saja yang mempengaruhi cepat rambat gelombang?
3. Rancanglah aplikasi penggunaan persamaan cepat rambat gelombang dalam kehidupan sehari-hari !
4. Jelaskan pengertian *Bandgap* !
5. Tuliskan perbandingan konsep Kristal fotonik dan Kristal biasa !
6. Tuliskan bentuk persamaan Maxwell !
7. Tuliskan pengertian Laser efisien !

Lembar Kerja Praktek 1

Kegiatan Pembelajaran 2: Laser

KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang laser
2. Mahasiswa mampu menjelaskan, mendiskusikan dan mempresentasikan tentang sifat sifat cahaya laser dan tipe-tipe cahaya pada sebuah laser

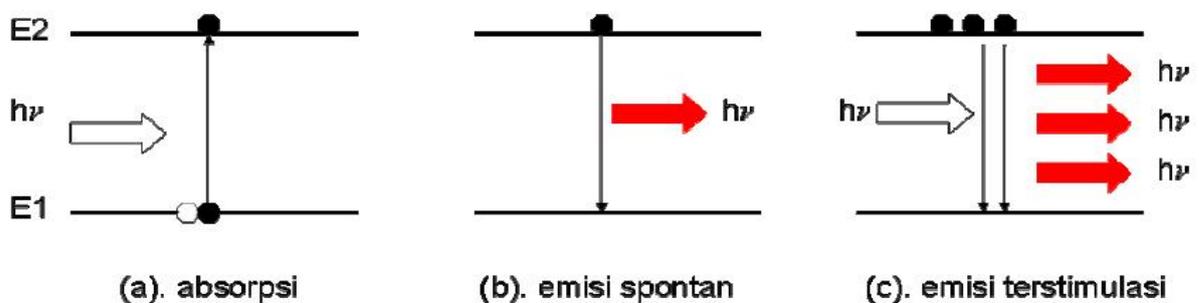
URAIAN MATERI

Konsep Dasar

Laser merupakan singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, yaitu terjadinya proses penguatan cahaya oleh emisi radiasi yang terstimulasi. Ada tiga prinsip interaksi antara cahaya dengan materi, yaitu absorpsi, emisi spontan dan emisi terstimulasi. Dalam bab ini, akan dibahas proses emisi terstimulasi dan beberapa persyaratan material agar terjadi emisi terstimulasi.

Interaksi cahaya dengan materi

Pada dasarnya ada tiga macam bentuk interaksi yang terjadi antara cahaya dengan materi, yaitu absorpsi, emisi spontan dan emisi terstimulasi. Pandang dua buah tingkatan energi E_1 dan E_2 , dimana $E_2 > E_1$, seperti ditunjukkan pada Gambar 15.1.



Gambar 15.7 Tiga jenis interaksi cahaya dengan materi, yaitu (a). absorpsi, (b). emisi spontan dan (c). emisi terstimulasi.

Adapun pengertian dari masing-masing proses di atas adalah sebagai berikut :

(a). Absorpsi adalah proses tereksitasinya elektron dari tingkatan energi E_1 ke E_2 akibat penyerapan foton dengan energi $h\nu > (E_2 - E_1)$, dimana h adalah konstanta Planck $6,626 \times 10^{-34}$ J.s

(b). Emisi spontan adalah proses meluruhnya elektron yang tereksitasi di tingkatan energi E_2 ke tingkatan energi E_1 . Karena $E_2 > E_1$, maka proses peluruhan akan melepaskan energi yang berupa :

Emisi radiatif (memancarkan foton dengan energi = $E_2 - E_1$)

Emisi non-radiatif (tidak memancarkan foton)

(c). Emisi terstimulasi adalah proses yang melibatkan elektron-elektron yang sudah berada di E_2 distimulasi/dirangsang oleh foton yang datang untuk meluruh ke E_1 , sehingga akan memperkuat energi cahaya yang datang (*amplification by stimulated emission of radiation*)

Assumsikan N_i adalah jumlah molekul/atom persatuan volume yang menduduki tingkat energi ke- i pada waktu t (populasi level- i), maka probabilitas/kemungkinan terjadinya proses absorpsi dan emisi adalah sebagai berikut :

(1). Absorpsi

Laju transisi polulasi dari tingkatan energi-1 ke tingkatan energi-2 :

$$\left(\frac{dN_1}{dt} \right) = -W_{12}N_1 \quad (15.13)$$

dengan W_{12} adalah laju absorpsi yang didefinisikan sebagai :

$$W_{12} = \uparrow_{12} F \quad (15.14)$$

dimana \uparrow_{12} adalah penampang absorpsi, dan F adalah fluks foton ($\text{cm}^{-2} \text{det}^{-1}$).

(2). Emisi Spontan

Emisi spontan merupakan laju transisi populasi dari tingkatan energi-2 ke energi-1

$$\left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{sp} = -AN_2 = -\frac{N_2}{\uparrow_{nr}} \quad (15.15)$$

dengan A adalah laju emisi spontan atau disebut juga koefisien Einstein (det^{-1}), dan $\uparrow_{sp} = A^{-1}$ = lifetime emisi spontan (det). Untuk emisi non-radiatif berlaku :

$$\left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{sp} = -\frac{N_2}{\uparrow_{nr}} \quad (15.16)$$

dimana τ_{sp} = lifetime emisi spontan (det).

Perbedaan antara emisi spontan dan emisi non-radiatif adalah pada lifetimenya, dimana nilai τ_{sp} hanya bergantung pada transisi tertentu, sedangkan τ_{nr} bergantung pada transisi tertentu dan keadaan media sekelilingnya.

(3). Emisi Terstimulasi

Emisi terstimulasi sama dengan emisi spontan, dimana terjadi laju transisi dari E_2 ke E_1 :

$$\left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{sp} = -W_{21}N_2 \quad (15.17)$$

dengan W_{21} adalah laju emisi terstimulasi (det⁻¹) yang didefinisikan sebagai :

$$W_{21} = \tau_{21}^{-1} F \quad (15.18)$$

dimana τ_{21} adalah penampang emisi terstimulasi, dan F adalah fluks foton (cm⁻² det⁻¹).

Proses emisi terstimulasi dicirikan oleh emisi terstimulasi dan absorpsi, dimana menurut Einstein:

$$\begin{aligned} g_2 W_{21} &= g_1 W_{12} \\ g_2 \tau_{21}^{-1} &= g_1 \tau_{12}^{-1} \end{aligned} \quad (15.19)$$

dengan g_1 adalah jumlah degenerasi di tingkatan energi-1, dan g_2 adalah jumlah degenerasi di tingkatan energi-2.

Sifat-sifat Berkas Cahaya Laser

Sifat cahaya laser dicirikan oleh monokromatik, koheren, terarah dan brightness.

Monokromatik

Monokromatis artinya hanya satu frekuensi yang dipancarkan. Sifat ini diakibatkan oleh :

- Hanya satu frekuensi yang dikuatkan [$\nu = (E_2 - E_1)/h$]
- Susunan dua cermin yang membentuk cavity-resonant sehingga osilasi hanya terjadi pada frekuensi yang sesuai dengan frekuensi cavity.

Koheren

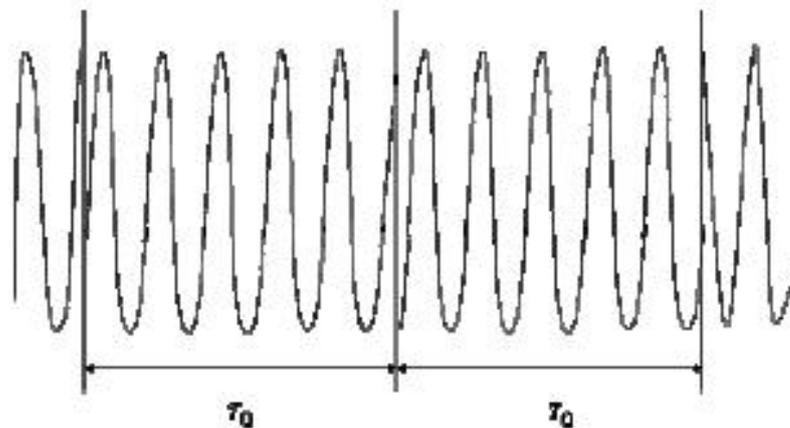
a) Koheren ruang (*spatial coherence*)

Pandang dua buah titik P_1 dan P_2 dimana pada waktu $t = 0$ terletak pada bidang muka gelombang cahaya/EM yang sama. Andaikan $E_1(t)$ dan $E_2(t)$ adalah medan-medan listrik pada kedua titik tadi. Pada $t = 0$ perbedaan fasa kedua medan ini adalah nol. Jika perbedaan fasa ini dapat dipertahankan pada $t > 0$, maka dikatakan koheren ruang sempurna (*perfect spatial*

coherence). Jika titik P_1 dan P_2 terletak pada beberapa titik memiliki korelasi fasa yang baik (perbedaan fasanya kecil), maka disebut koheren ruang sebagian (*partial spatial coherence*)

b) Koheren waktu (*temporal coherence*)

Pandang medan listrik suatu gelombang EM pada titik P pada waktu t dan $t + \Delta t$. Jika pada sembarang waktu Δt yang diberikan, perbedaan fasa antara dua medan tetap sama seperti pada waktu t , maka dikatakan terjadi koheren waktu sepanjang waktu Δt . Jika hal ini terjadi pada sembarang nilai Δt , maka gelombang EM dikatakan koheren waktu sempurna (*perfect temporal coherence*). Jika hanya terjadi untuk waktu delay Δt , dimana $0 < \Delta t < \tau_c$, maka gelombang EM dikatakan koheren waktu sebagian dengan waktu koherensi τ_c . Contoh suatu gelombang EM dengan waktu koherensi τ_c ditunjukkan pada Gambar. 15.1, dimana medan listrik mengalami lompatan fasa pada interval waktu τ_c .



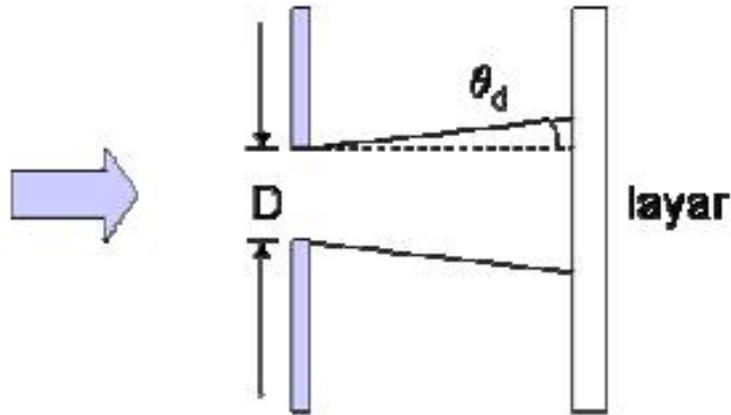
Gambar 15.8 Contoh gelombang EM dengan waktu koherensi τ_c .

Keterarahan (Directionality)

Merupakan konsekuensi langsung ditematkannya bahan aktif dalam cavity resonant, dimana hanya gelombang yang merambat dalam arah yang tegak lurus terhadap cermin-cermin yang dapat dipertahankan dalam cavity.

a) Kasus koheren ruang sempurna

Pada jarak tertentu masih terjadi divergensi akibat difraksi, seperti ditunjukkan pada Gambar 15.9.



Gambar 15.9. Difraksi berkas cahaya laser untuk kasus koheren ruang sempurna

Prinsip Huyghens : muka-muka gelombang pada layar dapat diperoleh akibat superposisi dari gelombang-gelombang yang dipancarkan oleh tiap titik di apertur D , maka sudut difraksi diungkapkan oleh :

$$\theta_D = \frac{\lambda}{D} \quad (15.20)$$

dimana λ adalah panjang gelombang laser, D adalah diameter celah dan n adalah koefisien numerik. Suatu berkas cahaya dimana divergensinya dapat diungkapkan dalam bentuk θ_D diatas disebut *diffraction limited*.

b) Kasus koheren ruang parsial

Divergensi lebih besar daripada nilai minimum untuk difraksi, dimana :

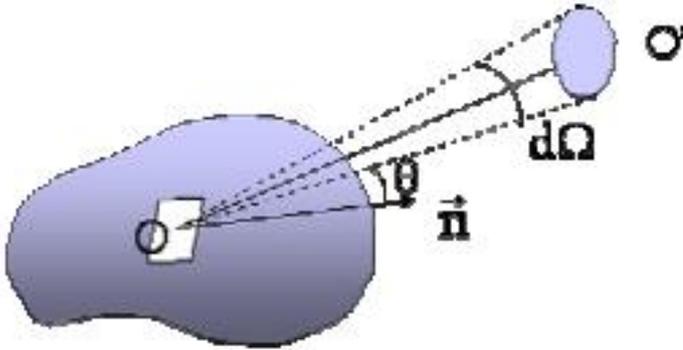
$$\theta = \frac{\lambda}{(S_c)^{1/2}} \quad (15.21)$$

dimana S_c adalah luas koherensi yang berperilaku sebagai apertur batas terjadinya superposisi koheren dari wavelets elementer.

Sebagai kesimpulan, bahwa berkas output laser harus dibuat dalam batas difraksi (*diffraction limited*).

Brightness (Kecemerlangan)

Brightness suatu sumber cahaya didefinisikan sebagai daya yang dipancarkan persatuan luas permukaan persatuan sudut ruang (lihat Gambar 15.3).



Gambar 15.10. Proyeksi sudut ruang yang dipancarkan

Suatu berkas laser bahkan dengan daya yang sedang (mW) mempunyai brightness beberapa orde yang lebih tinggi dibandingkan dengan sumber cahaya konvensional. Hal ini diakibatkan oleh sifat keterarahan yang tinggi.

Tipe-tipe Cahaya Laser

Cahaya laser dalam dibedakan berdasarkan bentuk fisik bahan aktif, panjang gelombang dan durasi berkas yang dipancarkan. Berdasarkan bentuk fisik bahan aktif, laser dibedakan menjadi laser zat padat, zat cair dan gas. Sedangkan berdasarkan panjang gelombang yang dipancarkan maka terdapat beberapa jenis laser, seperti laser UV (ultra-violet), visible, dan infra merah. Berdasarkan durasi berkas cahaya, laser dibedakan menjadi laser kontinu (continuous wave laser) dan pulsa (pulsed laser). Disamping itu, ada bentuk khusus dari jenis laser, yaitu laser elektron bebas (freeelectron LASER) dimana bahan aktifnya terdiri dari elektron-elektron bebas dengan bergerak melewati susunan medan magnet yang periodik.

PENUGASAN KELAS

1. Bentuklah kelompok kecil dan diskusikanlah tentang prinsip kerja laser dan presentasikan didepan kelas
1. Diskusikanlah dalam kelompok kecil tentang sifat-sifat cahaya laser dan tipe-tipe cahaya pada sebuah laser

RANGKUMAN

1. Laser merupakan singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, yaitu terjadinya proses penguatan cahaya oleh emisi radiasi yang terstimulasi.
2. Ada tiga prinsip interaksi antara cahaya dengan materi, yaitu absorpsi, emisi spontan dan emisi terstimulasi
3. Absorpsi adalah proses tereksitasinya elektron dari tingkatan energi E_1 ke E_2 akibat penyerapan foton dengan energi $h \nu > (E_2 - E_1)$, dimana h adalah konstanta Planck $6,626 \times 10^{-34}$ J.s
4. Emisi spontan adalah proses meluruhnya elektron yang tereksitasi di tingkatan energi E_2 ke tingkatan energi E_1 .
5. Emisi terstimulasi adalah proses yang melibatkan elektron-elektron yang sudah berada di E_2 distimulasi/dirangsang oleh foton yang datang untuk meluruh ke E_1 , sehingga akan memperkuat energi cahaya yang datang (*amplification by stimulated emission of radiation*)
6. Sifat cahaya laser dicirikan oleh monokromatik, koheren, terarah dan brightness.
7. Monokromatis artinya hanya satu frekuensi yang dipancarkan.
8. Perbedaan fasa ini dapat dipertahankan pada $t > 0$, maka dikatakan koheren ruang sempurna (*perfect spatial coherence*).
9. Jika titik P_1 dan P_2 terletak pada beberapa titik memiliki korelasi fasa yang baik (perbedaan fasanya kecil), maka disebut koheren ruang sebagian (*partial spatial coherence*)
10. Jika pada sembarang waktu yang diberikan, perbedaan fasa antara dua medan tetap sama seperti pada waktu t , maka dikatakan terjadi koheren waktu sepanjang waktu .

11. Keterarahan (*Directionality*) merupakan konsekuensi langsung ditempatkannya bahan aktif dalam cavity resonant, dimana hanya gelombang yang merambat dalam arah yang tegak lurus terhadap cermin-cermin yang dapat dipertahankan dalam cavity.
12. Brightness suatu sumber cahaya didefinisikan sebagai daya yang dipancarkan persatuan luas permukaan persatuan sudut ruang
13. Berdasarkan bentuk fisik bahan aktif, laser dibedakan menjadi laser zat padat, zat cair dan gas.
14. Berdasarkan panjang gelombang yang dipancarkan maka terdapat beberapa jenis laser, seperti laser UV (ultra-violet), visible, dan infra merah.
15. Berdasarkan surasi berkas cahaya, laser dibedakan menjadi laser kontinu (continuous wave laser) dan pulsa (pulsed laser).
16. Bentuk khusus dari jenis laser, yaitu laser elektron bebas (freeelectron LASER) dimana bahan aktifnya terdiri dari elektron-elektron bebas dengan bergerak melewati susunan medan magnet yang periodik.

EVALUASI FORMATIF 2

1. Jelaskan prinsip laser!
2. Jelaskan lengkap dengan gambar bagaimana cara cahaya mampu berinteraksi dengan materi!
3. Jelaskan pengertian absorpsi, emisi spontan dan emisi terstimulasi!
4. Jelaskan sifat berkas cahaya yang diaplikasikan pada laser!
5. Jelaskan perbedaan sifat koheren ruang dan koheren waktu!
6. Jelaskan bagaimana penggunaan prinsip Huygens pada sifat berkas cahaya pada laser!
7. Jelaskan secara lengkap tipe-tipe cahaya laser dan jenis-jenis laser!

Lembar Kerja Praktek 2

RANGKUMAN MODUL

1. Kristal fotonik (*photonic crystal, PhC*) atau material *Photonic Bandgap* (PBG) adalah struktur periodik dari material dielektrik dengan permitivitas (ϵ) atau indeks bias (n) yang berbeda, sehingga dapat menghambat perambatan gelombang dengan frekuensi dan arah tertentu.
2. Panjang gelombang jauh lebih besar daripada konstanta kisi dari *PhC*, struktur berperilaku seperti suatu medium efektif, namun jika panjang gelombang sebanding atau lebih kecil daripada konstanta kisi *PhC*, maka akan terjadi refleksi Bragg, sehingga membentuk PBG.
3. Persamaan Maxwell yang akan menghasilkan nilai eigen seperti halnya pada persamaan Schroedinger pada kasus elektron. Solusi persamaan tersebut disebut dengan persamaan dispersi, dimana nilai eigen untuk vektor-gelombang tertentu berkaitan dengan energi elektromagnetik dan fungsi eigennya disebut moda/modus.
4. *Bandgap* adalah tidak adanya modus fotonik dalam suatu rentang frekuensi tertentu untuk segala arah tetapi hanya satu polarisasi saja, yang hanya ada pada *PhC 2D*. Sedangkan *bandgap* sempurna berarti tidak ada moda dalam semua arah dan polarisasi.
5. Konsep dasar dari *PhC* mirip dengan konsep dasar perambatan elektron dalam kristal, hanya pembawanya adalah foton, sehingga bentuk interaksi antara foton dan *PhC* digambarkan oleh persamaan Maxwell.
6. Kalkulasi PBG adalah menggunakan ekspansi gelombang bidang.
7. Bentuk persamaan Maxwell

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Dimana \vec{D} adalah perpindahan listrik, \vec{B} adalah induksi magnet, \vec{H} adalah intensitas magnet dan \vec{E} adalah medan listrik.

8. Dua jenis operator ini menghasilkan dua fungsi eigen dengan dua polarisasi yang berbeda:
 - c. Polarisasi \vec{E} (TE), dimana medan listrik \vec{E} sejajar sumbu-z
 - d. Polarisasi \vec{H} (TM), dimana medan magnet \vec{H} sejajar sumbu-z
9. Laser yang efisien adalah laser yang hanya membutuhkan energi pembangkit (dapat berupa arus, tegangan listrik atau energi foton) yang kecil atau *threshold* yang kecil.
10. Laser merupakan singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, yaitu terjadinya proses penguatan cahaya oleh emisi radiasi yang terstimulasi.
11. Ada tiga prinsip interaksi antara cahaya dengan materi, yaitu absorpsi, emisi spontan dan emisi terstimulasi
12. Absorpsi adalah proses tereksitasinya elektron dari tingkatan energi E1 ke E2 akibat penyerapan foton dengan energi $h\nu > (E2 - E1)$, dimana h adalah konstanta Planck $6,626 \times 10^{-34}$ J.s
13. Emisi spontan adalah proses meluruhnya elektron yang tereksitasi di tingkatan energi E2 ke tingkatan energi E1.
14. Emisi terstimulasi adalah proses yang melibatkan elektron-elektron yang sudah berada di E2 distimulasi/dirangsang oleh foton yang datang untuk meluruh ke E1, sehingga akan memperkuat energi cahaya yang datang (*amplification by stimulated emission of radiation*)
15. Sifat cahaya laser dicirikan oleh monokromatik, koheren, terarah dan brightness.
16. Monokromatis artinya hanya satu frekuensi yang dipancarkan.
17. Perbedaan fasa ini dapat dipertahankan pada $t > 0$, maka dikatakan koheren ruang sempurna (*perfect spatial coherence*).
18. Jika titik P₁ dan P₂ terletak pada beberapa titik memiliki korelasi fasa yang baik (perbedaan fasanya kecil), maka disebut koheren ruang sebagian (*partial spatial coherence*)
19. Jika pada sembarang waktu yang diberikan, perbedaan fasa antara dua medan tetap sama seperti pada waktu t, maka dikatakan terjadi koheren waktu sepanjang waktu .
20. Keterarahan (*Directionality*) merupakan konsekuensi langsung ditempatkannya bahan aktif dalam cavity resonant, dimana hanya gelombang yang merambat dalam arah yang tegak lurus terhadap cermin-cermin yang dapat dipertahankan dalam cavity.

21. Brightness suatu sumber cahaya didefinisikan sebagai daya yang dipancarkan persatuan luas permukaan persatuan sudut ruang
22. Berdasarkan bentuk fisik bahan aktif, laser dibedakan menjadi laser zat padat, zat cair dan gas.
23. Berdasarkan panjang gelombang yang dipancarkan maka terdapat beberapa jenis laser, seperti laser UV (ultra-violet), visible, dan infra merah.
24. Berdasarkan surasi berkas cahaya, laser dibedakan menjadi laser kontinu (continuous wave laser) dan pulsa (pulsed laser).
25. Bentuk khusus dari jenis laser, yaitu laser elektron bebas (freeelectron LASER) dimana bahan aktifnya terdiri dari elektron-elektron bebas dengan bergerak melewati susunan medan magnet yang periodik.

DAFTAR PUSTAKA

- Jati, B.M.E, 2010. *Fisika Dasar Listrik Magnet, Optika, Fisika Modern untuk Mahasiswa Ilmu Eksakta dan Teknik*. Yogyakarta: Penerbit Andi,
- erway, R. A. 1986. *Physics for Scientist and engineering with Modern Physics*. New York: Saunders College Publishing
- Tipler, P. A., 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid I (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga Jilid I
- Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Fisika Dasar II*. Bandung : E-book.
- Bahtiar, Ayi. 2008. *Rekayasa Optik*. Bandung : E-Book.