

**BMP.UKI:NM-01-FLM-PFis-I-2021**



**BUKU MATERI PEMBELAJARAN  
FISIKA LISTRIK MAGNET**

**Penulis:**

**NGIA MASTA, S.Pd., M.Si.  
MANOGARI SIANTURI, S.Si., M.T.  
TAAT GUSWANTORO, M.Si.**

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN FISIKA  
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN  
UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA  
JAKARTA  
2021**

# **Kata Pengantar**

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Kuasa karena telah memberikan kesempatan pada penulis untuk menyelesaikan Buku Materi Pembelajaran (BMP) Fisika Listrik Magnet ini. BMP ini disusun guna membantu kelancaran proses pembelajaran mata kuliah Fisika Listrik Magnet. Penulis juga berharap agar BMP ini dapat menambah wawasan dan berguna bagi mahasiswa yang mengambil mata kuliah ini

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Ka.Prodi Pendidikan Fisika yang telah memberikan kesempatan kepada kami untuk mengampu dan menulis BMP ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih pada semua pihak yang telah membantu proses penyusunan BMP ini.

Penulis menyadari BMP ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun akan penulis terima demi kesempurnaan BMP ini.

Jakarta, 2021

Tim Penyusun

# DAFTAR ISI

<i>Kata Pengantar</i> .....	<i>i</i>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xiv</b>
<b>PETUNJUK PENGGUNAAN BMP</b> .....	<b>1</b>
<b>RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)</b> .....	<b>4</b>
<b>PETA KONSEP</b> .....	<b>18</b>
<b>Modul 1 Elektrostatik</b> .....	<b>19</b>
<b>Kegiatan Pembelajaran 1 Hukum Coulomb dan Medan Listrik</b> .....	<b>23</b>
<b>A. Elektrostatik</b> .....	<b>23</b>
1. Muatan Elementer .....	23
2. Hukum Kekekalan Muatan .....	25
Contoh Soal .....	25
<b>B. Hukum Coulomb</b> .....	<b>25</b>
1. Percobaan Gaya Coulomb .....	25
2. Formulasi Hukum Coulomb .....	27
3. Prinsip Superposisi pada Hukum Coulomb .....	28
Contoh Soal .....	29
Contoh Soal .....	30
<b>Rangkuman</b> .....	<b>33</b>
<b>Uji Formatif</b> .....	<b>33</b>
Pilihan Ganda .....	33
Essay .....	36
<b>Umpan balik</b> .....	<b>37</b>
<b>Referensi</b> .....	<b>37</b>
<b>Kegiatan Pembelajaran 2 Medan Listrik</b> .....	<b>39</b>
<b>A. Makna fisis dan formulasi medan listrik</b> .....	<b>39</b>
<b>B. Garis-garis Medan Listrik</b> .....	<b>40</b>
1. Arah garis – garis medan listrik merepresentasikan arah medan listrik. ....	41
2. Kerapatan garis-garis medan listrik merepresentasikan kuat medan listrik. ....	42
Contoh Soal .....	43
Contoh Soal .....	44
<b>C. Medan Listrik pada Muatan Kontinu</b> .....	<b>45</b>
1. Muatan garis .....	46
2. Muatan luas .....	46
3. Muatan ruang .....	47
Contoh Soal .....	47
Contoh Soal .....	48
Contoh Soal .....	50

<b>Rangkuman.....</b>	<b>53</b>
<b>Uji Formatif.....</b>	<b>54</b>
Pilihan Ganda.....	54
Essay .....	57
<b>Umpan balik .....</b>	<b>58</b>
<b>Referensi .....</b>	<b>59</b>
<b><i>Kegiatan Pembelajaran 3 Divergensi dan Curl dari Medan Listrik.....</i></b>	<b>61</b>
<b>A. Fluks .....</b>	<b>61</b>
<b>B. Hukum Gauss .....</b>	<b>62</b>
<b>C. Divergensi dari medan listrik <math>E</math> .....</b>	<b>65</b>
Contoh Soal.....	66
Contoh soal .....	67
<b>D. Curl dari medan listrik <math>E</math> .....</b>	<b>69</b>
<b>Tugas .....</b>	<b>70</b>
<b>Rangkuman.....</b>	<b>71</b>
<b>Uji Formatif.....</b>	<b>71</b>
Pilihan Ganda.....	71
Essay .....	73
<b>Umpan balik .....</b>	<b>75</b>
<b>Referensi .....</b>	<b>75</b>
<b><i>Kegiatan Pembelajaran 4 Potensial Listrik .....</i></b>	<b>77</b>
<b>A. Definisi Potensial Listrik .....</b>	<b>77</b>
<b>B. Formulasi Potensial Listrik .....</b>	<b>78</b>
1. Potensial listrik oleh muatan titik .....	78
2. Potensial oleh distribusi muatan diskrit .....	79
3. Potensial listrik oleh distribusi muatan kontinu.....	79
Contoh Soal -Potensial Listrik pada cincin dan cakram bermuatan .....	80
4. Hubungan medan listrik dan potensial listrik .....	83
Contoh Soal-Potensial bola berongga jika $E$ diketahui .....	83
Contoh Soal - Potensial dari muatan garis.....	84
<b>C. Gradien Potensial dan Permukaan Ekuipotensial.....</b>	<b>87</b>
<b>D. Persamaan Poisson dan Persamaan Laplace.....</b>	<b>89</b>
<b>E. Potensial dari Distribusi Muatan Terlokalisasi.....</b>	<b>91</b>
Contoh Soal - Potensial bola berongga jika $\rho$ diketahui .....	93
<b>F. Kesimpulan dan Syarat Batas Elektrostatik.....</b>	<b>95</b>
1. Diagram Segitiga simpulan elektrostatika .....	95
2. Syarat Batas .....	96
<b>Rangkuman.....</b>	<b>100</b>
<b>Uji Formatif.....</b>	<b>101</b>
Pilihan Ganda.....	101
Essay .....	105
<b>Umpan balik .....</b>	<b>106</b>

<b>Referensi .....</b>	<b>107</b>
<b><i>Kegiatan pembelajaran 5 Energi Potensial Listrik .....</i></b>	<b>109</b>
<b>A. Usaha yang dilakukan untuk memindahkan sebuah muatan .....</b>	<b>109</b>
<b>B. Besar Energi dari sebuah Distribusi Muatan Titik.....</b>	<b>110</b>
<b>C. Energi dari sebuah Distribusi Muatan Kontinu .....</b>	<b>113</b>
Contoh Soal - energi dari sebuah bola pejal bermuatan .....	114
<b>Rangkuman.....</b>	<b>116</b>
<b>Uji Formatif.....</b>	<b>117</b>
Pilihan Ganda.....	117
Essay .....	120
<b>Umpan Balik.....</b>	<b>121</b>
<b>Referensi .....</b>	<b>121</b>
<b><i>Kegiatan pembelajaran 6 Konduktor .....</i></b>	<b>123</b>
<b>A. Properti (Sifat) Dasar Konduktor dalam keadaan elektrostatik.....</b>	<b>123</b>
1. Medan listrik di dalam konduktor adalah nol .....	124
2. Densitas muatan di dalam konduktor adalah nol .....	125
3. Seluruh muatan netto berada di permukaan konduktor .....	125
4. Bahan konduktor adalah sebuah permukaan ekuipotensial .....	125
5. Medan listrik memiliki arah tegak lurus terhadap permukaan konduktor, dan hanya terdapat di luar konduktor .....	126
<b>B. Muatan Induksi .....</b>	<b>127</b>
Contoh - Bola konduktor dengan rongga berbentuk sebarang di dalamnya.....	129
<b>C. Permukaan Bermuatan dan Gaya pada Konduktor .....</b>	<b>130</b>
<b>D. Kapasitor.....</b>	<b>132</b>
1. Kapasitas kapasitor .....	133
Contoh Kapasitansi kapasitor pelat sejajar .....	133
Contoh Kapasitansi dua bola berongga konsentris .....	134
2. Pengisian Kapasitor .....	135
<b>Rangkuman.....</b>	<b>136</b>
<b>Uji Formatif.....</b>	<b>137</b>
Pilihan Ganda.....	137
Essay .....	139
<b>Umpan balik .....</b>	<b>140</b>
<b>Referensi .....</b>	<b>141</b>
<b><i>Kegiatan Pembelajaran 7 Penerapan Elektrostatika pada Teknologi Ramah Lingkungan .....</i></b>	<b>143</b>
<b>Presipitator Elektrostatik.....</b>	<b>143</b>
<b>Rangkuman.....</b>	<b>145</b>
<b>Evaluasi Formatif.....</b>	<b>145</b>
<b>Proyek .....</b>	<b>145</b>
<b>Umpan balik .....</b>	<b>147</b>
<b>Referensi .....</b>	<b>147</b>

<b><i>Modul 2 Medan Listrik dalam Bahan</i></b> .....	<b>149</b>
<b><i>Kegiatan Pembelajaran 1 Polarisasi</i></b> .....	<b>153</b>
<b>A. Dielektrik</b> .....	<b>153</b>
<b>B. Induksi Dipol</b> .....	<b>153</b>
1. Polarisasi pada atom netral .....	154
Contoh.....	155
2. Polarisasi pada molekul .....	156
<b>C. Susunan Molekul Polar</b> .....	<b>157</b>
<b>D. Polarisasi</b> .....	<b>160</b>
<b>E. Medan dari objek terpolarisasi</b> .....	<b>161</b>
1. Muatan terikat .....	161
Contoh.....	162
<b>2. Interpretasi fisis dari Muatan Terikat</b> .....	<b>164</b>
Contoh.....	166
<b>Rangkuman</b> .....	<b>167</b>
<b>Uji Formatif</b> .....	<b>169</b>
Pilihan Ganda.....	169
Essay .....	171
<b>Umpan balik</b> .....	<b>172</b>
<b>Referensi</b> .....	<b>173</b>
<b><i>Kegiatan Pembelajaran 2 Pergeseran Elektrik dan Dielektrik Linear</i></b> <b>175</b>	
<b>A. Pergeseran Elektrik</b> .....	<b>175</b>
1. Hukum Gauss pada bahan dielektrik .....	175
Contoh.....	177
2. Tipuan Paralel .....	179
3. Syarat Batas .....	179
<b>B. Dielektrik Linear</b> .....	<b>180</b>
1. Suseptibilitas, Permittivitas dan Konstanta Dielektrik .....	180
a. Teorema Stokes pada polarisasi dan pergeseran elektrik.....	182
Contoh.....	184
b. Kapasitas kapasitor yang diisi material dielektrik .....	185
2. Beberapa contoh kasus pada lapis batas dua medium dielektrik linear .....	189
Contoh.....	189
Contoh.....	191
3. Energi pada sistem dielektrik.....	192
4. Gaya Elektrostatik pada bahan dielektrik .....	194
<b>Rangkuman</b> .....	<b>196</b>
<b>Uji Formatif</b> .....	<b>198</b>
Pilihan Ganda.....	198
Essay .....	202
<b>Referensi</b> .....	<b>205</b>

<b><i>Kegiatan Pembelajaran 3 Penerapan Bahan Dielektrik dalam Teknologi Ramah Lingkungan</i></b> .....	<b>207</b>
<b>A. Bahan Dielektrik dan Semikonduktor</b> .....	<b>207</b>
<b>B. Aplikasi dielektrik dalam teknologi berbasis pelestarian lingkungan</b>	<b>209</b>
1. Sel Surya .....	209
2. Sel Bahan Bakar Padat (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) .....	211
3. Pengolahan air limbah .....	214
4. Kapasitor, Superkapasitor dan Teknologi Baterai .....	217
<b>Rangkuman</b> .....	<b>218</b>
<b>Uji Formatif</b> .....	<b>220</b>
A. Pilihan Ganda.....	220
B. Essay .....	222
<b>Refleksi</b> .....	<b>223</b>
<b>Umpan balik</b> .....	<b>223</b>
<b>Referensi</b> .....	<b>223</b>
<b><i>Kegiatan Pembelajaran 4 Metode Spektroskopi Impedansi</i></b> .....	<b>225</b>
<b>A. Definisi dan Peran Spektroskopi Impedansi</b> .....	<b>225</b>
<b>B. Sejarah singkat EIS</b> .....	<b>226</b>
<b>C. Prinsip Dasar dari Teknik EIS</b> .....	<b>227</b>
1. Impedansi.....	227
2. Skema dasar percobaan.....	230
3 Resistansi $R$ dan resistivitas $\rho$ .....	232
4. Kapasitansi.....	233
<b>D. Dielektrik kompleks</b> .....	<b>233</b>
<b>Rangkuman</b> .....	<b>237</b>
<b>Evaluasi Formatif</b> .....	<b>238</b>
A. Pilihan Ganda.....	238
B. Essay .....	240
<b>Umpan balik</b> .....	<b>240</b>
<b>Referensi</b> .....	<b>240</b>
<b>Penutup</b> .....	<b>241</b>
1. Rangkuman .....	241
2. Daftar Istilah .....	241
3. Referensi .....	242
<b><i>Modul 3 Medan Elektromagnetik</i></b> .....	<b>243</b>
<b><i>Kegiatan Pembelajaran 1 Magnetostatik</i></b> .....	<b>247</b>
<b>A. Arus listrik (Listrik Dinamis)</b> .....	<b>247</b>
1. Arus Listrik .....	247
2. Densitas Arus $I, K, J$ .....	248
Contoh Kasus – Distribusi Arus pada kawat silinder .....	249
3. Persamaan Kontinuitas .....	251
4. Arus Tunak ( <i>Steady</i> ) .....	251

<b>B. Hukum Biot – Savart .....</b>	<b>252</b>
1. Medan Magnet .....	252
2. Percobaan Hans Christian Oersted .....	253
3. Percobaan Biot-Savart .....	255
Contoh Kasus – Medan Magnet Induksi pada Kawat Lurus Berarus.....	256
Contoh Kasus – Medan Magnet Induksi pada Kawat Melingkar (Loop).....	258
<b>C. Div dan Curl dari <math>\mathbf{B}</math>.....</b>	<b>260</b>
1. Curl dari Medan Magnet $\mathbf{B}$ .....	260
2. Div dari Medan Magnet $\mathbf{B}$ .....	262
3. Aplikasi div dan curl pada Hukum Ampere .....	263
<b>D. Gaya Magnet.....</b>	<b>265</b>
1. Gaya magnet pada muatan yang bergerak di medan Magnet B .....	265
2. Gaya Magnet pada kawat panjang berarus .....	266
<b>E. Perbandingan Elektrostatis dan Magnetostatik .....</b>	<b>267</b>
<b>F. Potensial Vektor Magnetik .....</b>	<b>268</b>
1. Potensial Vektor.....	268
2. Potensial Skalar.....	269
<b>G. Ringkasan persamaan dan syarat batas magnetostatic .....</b>	<b>269</b>
<b>Rangkuman.....</b>	<b>270</b>
<b>Tes Formatif .....</b>	<b>271</b>
A. Pilihan Ganda.....	271
B. Essay .....	274
<b>Umpan balik .....</b>	<b>274</b>
<b>Referensi .....</b>	<b>275</b>
<b><i>Kegiatan Pembelajaran 2 Elektrodinamika.....</i></b>	<b>277</b>
<b>A. Gaya Elektromotif.....</b>	<b>277</b>
1. Hukum Ohm .....	277
2. Fluks Medan Magnet $\Phi$ .....	278
3. Gaya elektromotif / gaya gerak listrik (GGL) .....	279
<b>B. Induksi Elektromagnetik .....</b>	<b>280</b>
1. Hukum Faraday.....	280
2. Medan Listrik Induksi.....	281
3. Induktansi.....	283
4. Energi dalam Medan Magnet.....	286
<b>C. Persamaan Maxwell .....</b>	<b>288</b>
1. Elektrodinamika sebelum Maxwell .....	288
2. Koreksi Maxwell pada Hukum Ampere .....	289
3. Hukum Maxwell .....	291
4. Hukum Maxwell pada bahan .....	292
5. Syarat Batas .....	294
<b>Rangkuman.....</b>	<b>297</b>
<b>Tes Formatif .....</b>	<b>299</b>
A. Pilihan Ganda.....	299

B. Essay .....	302
<b>Umpan balik .....</b>	<b>302</b>
<b>Referensi .....</b>	<b>302</b>
<b><i>Kegiatan Pembelajaran 3 Gelombang Elektromagnetik.....</i></b>	<b><i>303</i></b>
<b>A. Hukum konservasi .....</b>	<b>303</b>
1. Persamaan kontinuitas pada distribusi arus .....	303
2. Teorema Poynting.....	304
Contoh Kasus - Besar Densitas Fluks Energi atau Vektor Poynting (S).....	307
3. Momentum.....	308
<b>B. Gelombang pada satu dimensi .....</b>	<b>313</b>
1. Persamaan gelombang .....	313
2. Gelombang Sinusoidal.....	315
3. Polarisasi.....	317
<b>C. Elektromagnetik pada vakum.....</b>	<b>319</b>
1. Persamaan Gelombang untuk $E$ dan $B$ .....	319
2. Gelombang bidang monokromatis.....	320
3. Energi dan Momentum dari Gelombang Elektromagnetik.....	322
<b>Rangkuman.....</b>	<b>324</b>
<b>Tes Formatif .....</b>	<b>326</b>
<b>Umpan balik .....</b>	<b>328</b>
<b>Referensi .....</b>	<b>329</b>
<b><i>Kegiatan Pembelajaran 4 Penerapan Medan Elektromagnetik pada</i></b>	
<b><i>Green Technology.....</i></b>	<b><i>331</i></b>
<b>Proyek .....</b>	<b>331</b>
<b>Umpan balik .....</b>	<b>333</b>
<b>Penutup .....</b>	<b>334</b>
1. Rangkuman .....	334
2. Daftar Istilah .....	334
3. Referensi .....	334
<b><i>Tentang Penulis .....</i></b>	<b><i>335</i></b>

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Diagram alat percobaan gaya Coulomb .....	26
Gambar 1. 2 Interaksi antar muatan pada percobaan gaya Coulomb .....	26
Gambar 1. 3 Diagram Gaya Coulomb pada Bidang .....	27
Gambar 1. 4 Prinsip Superposisi Hukum Coulomb.....	29
Gambar 1. 5 Interaksi Tiga Muatan Titik Segaris .....	29
Gambar 1. 6 Medan listrik dari distribusi muatan sumber .....	40
Gambar 1. 7 Interaksi antara muatan sumber (-q) dengan muatan uji (+Q) .....	41
Gambar 1. 8 Arah medan listrik dari muatan tunggal.....	41
Gambar 1. 9 Interaksi dua muatan dilihat dari garis-garis medan .....	42
Gambar 1. 10 Medan listrik pada jarak z dari pusat muatan garis.....	48
Gambar 1. 11 Diagram elemen dE dari muatan kontinu berbentuk cincin	49
Gambar 1. 12 Medan Listrik pada Cakram Bermuatan .....	51
Gambar 1. 13 Fluks Medan.....	62
Gambar 1. 14 Permukaan-permukaan yang melingkupi sebuah dipol .....	63
Gambar 1. 15 Aplikasi Hukum Gauss pada Simetri Sferis (bola).....	66
Gambar 1. 16 Perpindahan sebuah partikel dengan dua lintasan berbeda	77
Gambar 1. 17 Sebuah muatan garis yang diselubungi permukaan gauss silinder.....	85
Gambar 1. 18 Usaha pada bidang ekuipotensial adalah nol .....	87
Gambar 1. 19 Garis Medan dan Permukaan Ekuipotensial dari sebuah Muatan titik .....	88
Gambar 1. 20 Medan Listrik E selalu mengarah ke Potensial yang semakin kecil .....	89
Gambar 1. 21 Muatan titik, distribusi muatan diskrit, dan distribusi muatan kontinu.....	91
Gambar 1. 22 Bola Berongga bermuatan.....	94
Gambar 1. 23 Diagram Simpulan Elektrostatik.....	96
Gambar 1. 24 Medan Elektrostatik E diskontinu.....	96
Gambar 1. 25 Medan Listrik tangensial selalu kontinu .....	97
Gambar 1. 26 Sebuah Muatan Uji Q dipindahkan dari a ke b terhadap muatan sumber q .....	109
Gambar 1. 27 Energi pada konfigurasi muatan diskrit .....	111
Gambar 1. 28 Induksi muatan dalam bahan konduktor .....	124

Gambar 1. 29 Arah medan listrik tegak lurus menembus bagian luar permukaan konduktor.....	126
Gambar 1. 30 Induksi muatan pada konduktor netral akibat sebuah muatan titik .....	128
Gambar 1. 31 Induksi muatan pada bidang konduktor berlubang.....	128
Gambar 1. 32 Gaya pada Permukaan Bermuatan .....	131
Gambar 1. 33 Dua konduktor dengan muatan berbeda .....	132
Gambar 1. 34 Kapasitor Pelat Sejajar.....	134
Gambar 1. 35 Kapasitor Silinder Koaksial .....	135
Gambar 1. 36 Skema pemisahan polutan pada presipitator elektrostatik	144
Gambar 1. 37 Skema dasar presipitator elektrostatik .....	144
Gambar 2. 1 Atom netral sebelum terpolarisasi .....	155
Gambar 2. 2 Atom Terpolarisasi.....	155
Gambar 2. 3 Karbon dioksida sebagai molekul non polar.....	157
Gambar 2. 4 Molekul Air sebagai contoh molekul polar .....	157
Gambar 2. 5 Torsi pada molekul polar saat mengalami medan eksternal .....	158
Gambar 2. 6 Medan listrik dari sebuah material terpolarisasi .....	161
Gambar 2. 7 Menentukan medan listrik dari bola terpolarisasi.....	163
Gambar 2. 8 Bola terpolarisasi seragam .....	164
Gambar 2. 9 Dipol pada sebuah tali.....	165
Gambar 2. 10 Analogi Polarisasi Dielektrik dengan sebuah tabung .....	165
Gambar 2. 11 Polarisasi Tak Seragam dari Sebuah Bola .....	166
Gambar 2. 12 Pergeseran dielektrik pada kawat lurus dengan selubung	178
Gambar 2. 13 Menentukan medan listrik dari bahan dielektrik berbentuk bola berongga .....	179
Gambar 2. 14 Teorema Stokes pada Polarisasi.....	183
Gambar 2. 15 Muatan dalam bahan dielektrik.....	184
Gambar 2. 16 Teflon pada ruang vakum .....	184
Gambar 2. 17 Proses pemuatan kapasitor .....	186
Gambar 2. 18 Grafik arus pengisian terhadap waktu.....	187
Gambar 2. 19 Kapasitor Pelat Sejajar yang diisi dengan material dielektrik .....	187
Gambar 2. 20 Polarisasi pada bahan dielektrik kapasitor keping sejajar	188
Gambar 2. 21 Medan di dalam bahan dielektrik.....	189
Gambar 2. 22 Gaya listrik pada bahan dielektrik .....	191

Gambar 2. 23 Polarisasi pada bahan dielektrik dalam kapasitor keping sejajar .....	201
Gambar 2. 24 kapasitor silinder koaksial.....	203
Gambar 2. 25 PV Cell.....	209
Gambar 2. 26 SOFC untuk menerbangkan Space Shuttle .....	211
Gambar 2. 27 Skema dasar SOFC .....	212
Gambar 2. 28 Skema dasar proses fotokatalis .....	216
Gambar 2. 29 Filtrasi membran dengan menggunakan bahan dielektrik	217
Gambar 2. 30 RLC Meter .....	226
Gambar 2. 31 tegangan input sinusoidal pada ferkuensi tunggal terhadap arus responnya I .....	228
Gambar 2. 32 Representasi data impedansi A. Gambar Lissajous; B : plot impedansi konoleks .....	229
Gambar 2. 33 Skema Dasar Eksperimen Impedansi.....	230
Gambar 2. 34 Spektrum impedansi double perovskite SFTO pada jangkauan suhu ruang hingga 523 K .....	232
Gambar 2. 35 Kecenderungan permitivitas riil yang menurun terhadap frekuensi yang meningkat pada material double perovskite SFTO .....	236
Gambar 2. 36 Dielektrik riil sebagai fungsi temperatur pada material double perovskite SFTO .....	236
Gambar 3. 1 Perbandingan arah aliran arus listrik dan elektron.....	248
Gambar 3. 2 Aliran distribusi arus J terhadap penampang tegak lurus $da \perp$ pada kawat penghantar .....	249
Gambar 3. 3 Arus I pada penampang tegak lurus.....	249
Gambar 3. 4 I terhadap elemen ds .....	250
Gambar 3. 5 Arus Tunak.....	252
Gambar 3. 6 Medan Magnet pada benda Magnetik.....	253
Gambar 3. 7 Kaidah Tangan Kanan Oersted .....	254
Gambar 3. 8 Penyimpangan jarum kompas saat berada disekitar kawat lurus berarus .....	254
Gambar 3. 9 Percobaan Biot-Savart.....	255
Gambar 3. 10 skema notasi pada hukum Biot-Savart.....	255
Gambar 3. 11 Menentukan medan magnet dari sebuah kawat lurus berarus .....	256

Gambar 3. 12 Medan induksi dari ujung ke ujung dari sebuah kawat berarus .....	257
Gambar 3. 13 Arah medan magnet induksi dan arah arusnya (beberapa contoh).....	258
Gambar 3. 14 Medan Magnet Induksi dari Kawat Melingkar (Loop) Berarus .....	259
Gambar 3. 15 Ilustrasi Medan Magnetik sirkular (melingkar) terhadap arah arus listrik keluar bidang (x) .....	260
Gambar 3. 16 Medan Magnet dari sekumpulan kawat lurus berarus .....	261
Gambar 3. 17 Induksi magnet dari distribusi arus volume .....	262
Gambar 3. 18 makna dari $\int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a}$ .....	264
Gambar 3. 19 Induksi Magnet pada Percobaan Biot-Savart.....	266
Gambar 3. 20 Perbandingan Medan Listrik dan Medan Magnet.....	267
Gambar 3. 21 Rangkuman Magnetostatik .....	269
Gambar 3. 22 Syarat batas magnetostatik.....	270
Gambar 3. 23 Fluks Magnetik .....	279
Gambar 3. 24 Percobaan Faraday .....	280
Gambar 3. 25 loop persegi pada mdan magnet yang berubah terhadap waktu .....	283
Gambar 3. 26 Induktansi pada dua loop berarus .....	284
Gambar 3. 27 Medan Induksi dari loop berarus .....	285
Gambar 3. 29 Densitas Muatan pada bahan yang terpolarisasi .....	292
Gambar 3. 30 Pergeseran Elektrik pada bidang batas .....	295
Gambar 3. 31 Bidang Batas yang dialiri arus bidang K .....	296
Gambar 3. 31 Vektor Poynting pada kawat lurus berarus .....	308
Gambar 3. 32 Medan listrik dan Medan magnet dari kawat lurus berarus .....	309
Gambar 3. 33 Gaya elektrostatik pada dua muatan yang identik, dengan kecepatan yang sama, masing- masing pada komponen x dan y.....	309
Gambar 3. 34 Gelombang dengan bentuk dan kelajuan tetap .....	313
Gambar 3. 35 simpangan terhadap gaya f.....	314
Gambar 3. 36 Gelombang Sinusoidal.....	316
Gambar 3. 37 Gelombang dalam fungsi cosinus .....	317
Gambar 3. 38Polarisasi pada gelombang elektromagnetik.....	318
Gambar 3. 39 Arah propagasi pada gelombang bidang.....	320

Gambar 3. 40 Medan $E$ dan $B$ dan arah rambat pada Gelombang Elektromagnetik .....	321
Gambar 3. 41 Perkalian produk dari $\mathbf{k.r}$ .....	322
Gambar 3. 42 Propagasi gelombang elektromagnetik dengan laju $c$ .....	323

# DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Muatan kontinu dan densitas masing-masing .....	46
Tabel 2. 1 Polarisabilitas Atom .....	155
Tabel 2. 2 Konstanta Dielektrik untuk Beberapa Bahan .....	182
Tabel 3. 1 Persamaan - Persamaan Elektromagnetik sebelum Maxwell.....	288
Tabel 3. 2 Persamaan - Persamaan Elektromagnetik menurut Maxwell.....	291
Tabel 3. 3 Modifikasi Hukum Maxwell .....	292
Tabel 3. 4 Hukum Maxwell pada bahan .....	294
Tabel 3. 5 Diskontinuitas Medan dalam Persamaan Maxwell .....	295
Tabel 3. 6 Persamaan Maxwell pada ruang vakum.....	319

# PETUNJUK PENGGUNAAN BMP

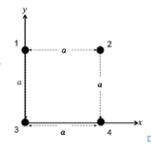
Sebelum mempelajari Buku Materi Pembelajaran (BMP) ini, sebaiknya anda membaca terlebih dahulu petunjuk penggunaan berikut.

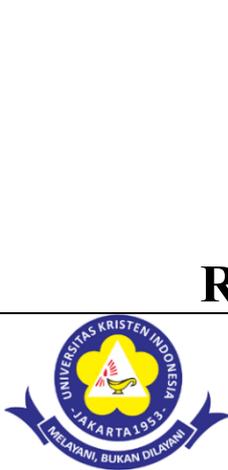
- 1) Berdoalah sebelum memulai pembelajaran.
- 2) BMP ini terdiri dari 3 modul, yaitu Elektrostatika, Medan Listrik dalam Bahan, dan Medan Elektromagnetik. Pada bagian awal diberikan peta konsep yang menunjukkan hubungan antar konsep dalam kegiatan pembelajaran satu dengan lainnya, sehingga dapat membantu memahami gambaran umum seluruh mata kuliah Fisika Listrik Magnet.
- 3) BMP ini memiliki 15 Kegiatan Pembelajaran, yang sudah disesuaikan dengan jumlah minggu pertemuan tatap muka. Pembagian kegiatan pembelajaran sudah disesuaikan dengan alur implementasi, sehingga pemahaman satu materi akan memudahkan pemahaman di materi berikutnya.
- 4) Di setiap akhir kegiatan pembelajaran diberikan Uji Formatif, dengan tujuan menguji tingkat pemahaman Anda setelah menyelesaikan kegiatan pembelajaran. Jawablah setiap pertanyaan dan nilai yang diperoleh dapat dijadikan umpan balik untuk menilai apakah Anda sudah menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran tersebut dengan baik atau belum.
- 5) BMP ini didesain sesuai dengan KKNI, sehingga perkuliahan akan berlangsung dengan pendekatan Student Centered Learning (Berpusat pada mahasiswa). Setiap kegiatan pembelajaran akan dipresentasikan oleh mahasiswa secara berkelompok, sesuai kesepakatan pada awal perkuliahan
- 6) Untuk memudahkan Anda dalam memahami materi dalam modul, dosen (fasilitator) juga akan melakukan koreksi, penguatan konsep, simulasi, dan pembahasan contoh soal selama perkuliahan berlangsung.
- 7) Berdoalah setelah kamu selesai belajar.

Petunjuk penggunaan modul ini juga berguna untuk memandu pembaca mengetahui isi / komponen dalam ini. Penjelasan singkat tentang komponen tersebut akan membantu mempermudah pemahaman kalian tentang materi yang tersaji dalam BMP ini.

<b>1. Judul Kegiatan Pembelajaran</b> Berisi tentang judul atau topik yang akan kamu pelajari per pertemuan.	<b>Kegiatan Pembelajaran 1 Hukum Coulomb dan Medan Listrik</b>
---	--

<p><b>2. Kemampuan Dasar dan Sub Kemampuan Dasar</b></p> <p>Di bagian bawah judul, terdapat tabel yang menunjukkan kemampuan dasar dan sub kemampuan dasar. Fungsinya adalah untuk memandu tentang keterampilan apa saja yang harus kamu kuasai setelah melalui kegiatan pembelajaran ini.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kemampuan Akhir</th> <th>Sub Kemampuan Akhir</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Mampu menganalisis muatan listrik dan gaya listrik, serta penerapannya dalam berbagai kasus</td> <td>           a. Mahasiswa mampu menjelaskan dasar eksperimen dari formulasi hukum coulomb            b. Mahasiswa mampu mengaplikasikan hukum Coulomb dalam pemecahan masalah         </td> </tr> </tbody> </table>	Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir	Mampu menganalisis muatan listrik dan gaya listrik, serta penerapannya dalam berbagai kasus	a. Mahasiswa mampu menjelaskan dasar eksperimen dari formulasi hukum coulomb b. Mahasiswa mampu mengaplikasikan hukum Coulomb dalam pemecahan masalah
Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir				
Mampu menganalisis muatan listrik dan gaya listrik, serta penerapannya dalam berbagai kasus	a. Mahasiswa mampu menjelaskan dasar eksperimen dari formulasi hukum coulomb b. Mahasiswa mampu mengaplikasikan hukum Coulomb dalam pemecahan masalah				
<p><b>3. Uraian Materi</b></p> <p>Berisi sejumlah uraian materi yang menjelaskan materi pembelajaran dalam setiap pertemuan. Pada uraian materi ini berisi uraian, contoh, ilustrasi, persamaan yang fungsinya untuk memperjelas materi pembelajaran.</p>	<p><b>Uraian Materi</b></p> <p><b>A. Elektrostatik</b></p> <p>Elektrostatik atau listrik statis adalah bagian dari ilmu fisika yang mempelajari tentang fenomena yang ditimbulkan oleh muatan-muatan yang statik (diam) satu sama lain. Elektrostatik mempelajari tentang gaya listrik, pengumpulan muatan listrik dan sifat-sifat listrik statik pada benda. Beberapa fenomena elektrostatik yang diterapkan dalam teknologi diantaranya: prinsip kerja <i>carrier bead</i> pada mesin fotokopi, pengumpulan abu dari cerobong asap pabrik dan penyemprotan cat elektrostatik (<i>air brush</i>).</p> <p>Elektrostatik menjadi dasar berkembangnya elektromagnetisme. Istilah "listrik" pertama kali ditemukan dari peristiwa elektrostatik oleh Thales dari Miletus (625-547 SM). Thales mengamati batu amber yang sebelumnya</p>				
<p><b>4. Ilustrasi / Gambar</b></p> <p>Ilustrasi / gambar dicantumkan untuk memberikan gambaran tentang narasi yang diberikan. Ilustrasi / gambar ini bertujuan agar pembaca lebih mudah memahami uraian materi.</p>	<p>Gambar 1. 1 Diagram alat percobaan gaya Coulomb</p> <p>Sumber: <a href="https://www.pasco.com/products/complete-experiments/electromagnetism/ex-9930">https://www.pasco.com/products/complete-experiments/electromagnetism/ex-9930</a></p>				
<p><b>5. Persamaan – Persamaan</b></p> <p>Persamaan-persamaan ditulis secara tersusun dan diberi nomor, untuk memudahkan pembaca mencari persamaan yang diinginkan.</p>	$E = \frac{F}{Q} = \frac{k \frac{Qq}{r^2}}{Q} = k \frac{q}{r^2} \quad 1.5$				
<p><b>6. Contoh Soal</b></p> <p>Contoh Soal diberikan agar kamu dapat berlatih dalam menyelesaikan permasalahan / kasus / soal secara matematis</p>	<p><b>Contoh Soal</b></p> <p>Reaksi Peluruhan Radioaktif dari inti. Suatu nuklida Po ditembak dengan sinar alpha menurut reaksi: <math>Po + \alpha \rightarrow X + n</math></p> <p>Berapa nomor atom dan bilangan massa Nuklida X?</p> <p><b>Jawab</b></p> <p><math>Po + \alpha \rightarrow X + n</math></p> <p><math>Po + He \rightarrow X + n</math></p> <p>Maka: nomor atom = 92, bilangan massa = 237</p>				

<p><b>7. Tugas / Latihan/ lembar kerja Praktek</b></p> <p>Fungsinya untuk menguji dan memperdalam pengetahuan, serta salah satu bentuk penerapan pengetahuanmu.</p>	<p><b>Tugas</b></p> <p>1. Perhatikan gambar disamping. Ada empat partikel membentuk sebuah persegi. Muatannya adalah <math>q_1 = q_4 = Q</math> dan <math>q_2 = q_3 = q</math>. Tentukan</p>  <p>Berapakah rasio <math>\frac{Q}{q}</math> jika gaya elektrostatis total pada partikel 1 dan 3 adalah nol?</p> <p><b>Jawab:</b></p> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>
<p><b>8. Rangkuman</b></p> <p>Jika kamu tersesat, bacalah mulai dari rangkuman. Rangkuman menyajikan versi singkat dari uraian materi.</p>	<p><b>Rangkuman</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Elektrostatis atau listrik statis adalah bagian dari ilmu fisika yang mempelajari tentang fenomena yang ditimbulkan oleh muatan-muatan yang statis (diam) satu sama lain.</li> <li>2. Besar gaya Coulomb berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan dan berbanding lurus dengan hasil kali kedua muatan.</li> <li>3. Prinsip superposisi menjelaskan bahwa interaksi antara dua muatan tidak dipengaruhi oleh kehadiran muatan lainnya.</li> </ol>
<p><b>9. Uji Formatif</b></p> <p>Bagian ini berfungsi sebagai evaluasi pembelajaran pada setiap pertemuan. Jangan khawatir, jika skor mu masih dibawah 80, kamu bisa mengulang, hingga skormu mencapai 80.</p>	<p><b>Uji Formatif</b></p> <p><b>Pilihan Ganda</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Dona melakukan sebuah observasi terhadap tiga balok bermuatan, yaitu A, B dan C. Ia memperhatikan bahwa balok A ditarik oleh balok B, tapi ditolak oleh balok C. Yang terjadi jika balok B didekatkan dengan balok C adalah ...        A. kedua balok saling tarik menarik        B. kedua balok saling menjauh        C. kedua balok tolak menolak        D. kedua balok tetap diam        E. Informasi yang diperoleh belum cukup untuk menentukan keadaan kedua balok</li> <li>2. Sebuah muatan <math>-2,3 \times 10^{-6}</math> mengalami gaya tolak sebesar 0,35 N oleh sebuah partikel yang berjarak 0,20 m terhadapnya. Besar dan jenis partikel tersebut adalah ...        A. <math>6,8 \times 10^{-7}</math> C, muatan negatif        B. <math>6,8 \times 10^{-7}</math> C, muatan positif        C. muatan netral        D. <math>1,2 \times 10^{-6}</math>, muatan negatif        E. <math>1,2 \times 10^{-6}</math>, muatan positif</li> <li>3. Dua muatan positif dengan besar <math>q_1 = q_2 = 1.10^{-3}C</math> berada tepat di sumbu x (lihat Gambar) dengan <math>L = 10</math> cm.</li> </ol>
<p><b>10. Titik Henti</b></p> <p>Mahasiswa bisa berselancar di internet, menonton video pembelajaran yang bisa membantumu memahami materi.</p>	<p>Untuk dapat memahami tentang presipitator elektrostatis, kamu dapat mengklik link dibawah ini  <a href="https://www.youtube.com/watch?v=AcyFY3iAdlw">https://www.youtube.com/watch?v=AcyFY3iAdlw</a>        atau dengan melakukan scan kode QR disamping</p> 



# RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER

UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA

Fakultas : Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan

Jurusan / Prodi : Pendidikan Fisika

## RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER

MATA KULIAH	KODE	Rumpun MK	BOBOT (SKS)	SEMESTER
Fisika Listrik Magnet (FLM)	141241020	Mata Kuliah Program Studi (MKPD)	5	GANJIL
OTORISASI	<b>Pengembang RPS</b>		<b>Koordinator RMK</b>	
	<b>NGIA MASTA, S.Pd.,M.Si.</b> <b>MANOGARI SIANTURI, S.Si., M.T.</b> <b>TAAT GUSWANTORO, M.Si.</b>			
	CPL	Sikap 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap orang lain. 1) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8). 2) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri.  Keterampilan Umum 1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang dipimpinnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-1). 2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan memberikan akses terhadap karya intelektual yang harusnya dapat menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9). 3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan mengajar. 4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai pendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-1).		

		<p>Keterampilan Khusus</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan per</li> <li>2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)</li> </ol> <p>Pengetahuan</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (P</li> <li>2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-</li> <li>3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskop</li> <li>4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPT</li> </ol>
	CPMK	
DESKRIPSI SINGKAT MK	<p>Mata kuliah ini menjabarkan metode SEM, peranan, prinsip kerja dan cara menganal untuk keperluan riset bidang fisika murni. Mata kuliah ini terdiri dari 3 bagian, yaitu:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) ELEKTROSTATIKA</li> <li>2) MEDAN ELEKTROSTATIKA DALAM BAHAN DIELEKTRIK</li> <li>3) ELEKTROMAGNETIKA</li> </ol>	
BAHAN KAJIAN	<p>Kegiatan Pembelajaran 1.1 Hukum Coulomb  Kegiatan Pembelajaran 1.2 Medan Listrik  Kegiatan Pembelajaran 1.3 Divergensi dan Curl dari Medan Listrik  Kegiatan Pembelajaran 1.4 Potensial Listrik  Kegiatan Pembelajaran 1.5 Energi Potensial Listrik  Kegiatan pembelajaran 1.6 Konduktor  Kegiatan pembelajaran 1.7 Penerapan Elektrostatika pada Teknologi Ramah Lingkungan  Kegiatan Pembelajaran 2.1 Polarisasi  Kegiatan Pembelajaran 2.2 Pergeseran Elektrik dan Dielektrik Linier  Kegiatan Pembelajaran 2.3 Penerapan Dielektrik pada Teknologi Ramah Lingkungan  Kegiatan Pembelajaran 2.4 Spektroskopi Impedansi  Kegiatan pembelajaran 3.1 Magnetostatik  Kegiatan pembelajaran 3.2 Elektrodinamika  Kegiatan pembelajaran 3.3 Gelombang Elektromagnetik  Kegiatan pembelajaran 3.4 Penerapan Elektromagnetik pada Teknologi Ramah Ling</p>	
PUSTAKA	<p>UTAMA</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Buku Materi Pembelajaran Fisika Listrik Magnet</li> </ol>	

	<p>2. Griffiths, D. J. (2012). Introduction to electrodynamics 4<sup>th</sup> edition. New Jersey: Wiley.</p> <p><b>PENDUKUNG</b></p> <p>3. Kanginan, Marthen. (2018). Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan IPA. Jakarta: Erlangga</p> <p>4. Halliday, Resnick. (2005) Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2. Jakarta: Erlangga.</p> <p>5. Effendi, Rustam, dkk. (2007). Medan Elektromagnetika terapan. Jakarta: Erlangga.</p> <p>6. Sailah, Siti, dkk. (2014). Medan Elektromagnetik, Teori dan contoh soal. Yogyakarta: Graha Pustaka.</p>
MEDIA PEMBELAJARAN	<p><b>PERANGKAT LUNAK</b></p> <p>1. Ms. Teams</p> <p>2. Ms. Office</p> <p>3. Internet browser</p> <p><b>PERANGKAT KERAS</b></p> <p>Laptop</p> <p>Handphone / gadget</p>
DOSEN PENGAMPU	<p>NGIA MASTA, S.Pd., M.Si.</p> <p>MANOGARI SIANTURI, S.Si, MT</p> <p>TAAT GUSWANTORO, M.Si.</p>
MATA KULIAH SYARAT	<p>Fisika Gerak</p> <p>Metode Matematika untuk Fisika I</p> <p>Matematika Dasar</p>

Mgu ke	Sub CPMK (Kemampuan Akhir yang direncanakan)	Bahan kajian (Materi Pembelajaran)	Bentuk dan metode pembelajaran (Media dan Sumber Belajar)	Estimasi waktu	Pengalaman Belajar Mahasiswa
1		RPS			Mahasiswa <b>mendengarkan</b> penjelasan dosen, dan mengajukan pertanyaan
2	Mahasiswa mampu menjelaskan teori konsep, hukum, dan persamaan-persamaan pada fenomena elektrostatika	Kegiatan Pembelajaran 1.1 Hukum Coulomb	<b>Bentuk :</b> Kuliah Daring <b>Metode:</b> Presentasi mahasiswa, simulasi , diskusi kelompok dan penugasan <b>Media :</b> Ms. Teams , Power point / Sway <b>Sumber belajar</b> Buku Ajar , handout , Video	TM: 3 x 50 ‘‘ TT: 3 x 2 x 60’’ BM: 3 x 2 x 60’’	Mahasiswa <b>melakukan kuliah, mendengarkan</b> penjelasan presentasi kelompok <b>mengajukan</b> pertanyaan, dan <b>mengerjakan tugas.</b>
		Kegiatan Pembelajaran 1.2 Medan Listrik	<b>Bentuk :</b> Kuliah Daring <b>Metode:</b> Presentasi mahasiswa, simulasi , diskusi kelompok dan penugasan <b>Media :</b> Ms. Teams , Power point / Sway <b>Sumber belajar</b> Buku Ajar , handout , Video	TM: 3 x 50 ‘‘ TT: 3 x 2 x 60’’ BM: 3 x 2 x 60’’	Mahasiswa <b>melakukan kuliah, mendengarkan</b> penjelasan presentasi kelompok <b>mengajukan</b> pertanyaan, dan <b>mengerjakan tugas.</b>
4		Kegiatan Pembelajaran 1.3 Divergensi dan Curl dari Medan Listrik	<b>Bentuk :</b> Kuliah Daring <b>Metode:</b>	TM: 3 x 50 ‘‘ TT: 3 x 2 x 60’’	Mahasiswa <b>melakukan kuliah, mendengarkan</b> penjelasan presentasi kelompok <b>mengajukan</b>

Mgu ke	Sub CPMK (Kemampuan Akhir yang direncanakan)	Bahan kajian (Materi Pembelajaran)	Bentuk dan metode pembelajaran (Media dan Sumber Belajar)	Estimasi waktu	Pengalaman Belajar Mahasiswa
			Presentasi mahasiswa, simulasi, diskusi kelompok dan penugasan  <b>Media :</b> Ms. Teams, Power point / Sway  <b>Sumber belajar</b> Buku Ajar, handout, Video	BM: 3 x 2 x 60''	pertanyaan, dan <b>mengerjakan tugas.</b>
5		Kegiatan Pembelajaran 1.4 Potensial Listrik	<b>Bentuk :</b> Kuliah Daring  <b>Metode:</b> Presentasi mahasiswa, simulasi, diskusi kelompok dan penugasan  <b>Media :</b> Ms. Teams, Power point / Sway  <b>Sumber belajar</b> Buku Ajar, handout, Video	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa <b>melakukan kuliah, mendengarkan</b> penjelasan presentasi kelompok <b>mengajukan</b> pertanyaan, dan <b>mengerjakan tugas.</b>
6		Kegiatan Pembelajaran 1.5 Energi Potensial Listrik	<b>Bentuk :</b> Kuliah Daring  <b>Metode:</b> Presentasi mahasiswa, simulasi, diskusi kelompok dan penugasan  <b>Media :</b> Ms. Teams, Power point / Sway  <b>Sumber belajar</b> Buku Ajar, handout, Video	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa <b>melakukan kuliah, mendengarkan</b> penjelasan presentasi kelompok <b>mengajukan</b> pertanyaan, dan <b>mengerjakan tugas.</b>

Mgu ke	Sub CPMK (Kemampuan Akhir yang direncanakan)	Bahan kajian (Materi Pembelajaran)	Bentuk dan metode pembelajaran (Media dan Sumber Belajar)	Estimasi waktu	Pengalaman Belajar Mahasiswa	
7		Kegiatan pembelajaran 1.6 Konduktor	<b>Bentuk</b> : Kuliah Daring <b>Metode</b> : Presentasi mahasiswa, simulasi , diskusi kelompok dan penugasan <b>Media</b> : Ms. Teams , Power point / Sway <b>Sumber belajar</b> Buku Ajar , handout , Video	TM: 3 x 50 ‘‘ TT: 3 x 2 x 60’’ BM: 3 x 2 x 60’’	Mahasiswa <b>melakukan kuliah, mendengarkan penjelasan presentasi kelompok mengajukan pertanyaan, dan mengerjakan tugas.</b>	K K de da ya  B T B
8		UTS Kegiatan pembelajaran 1.7 Penerapan Elektrostatika pada Teknologi Ramah Lingkungan	<b>Bentuk</b> : PROYEK <b>Metode</b> : Penugasan <b>Media</b> : Ms. Teams , Power point / Sway <b>Sumber belajar</b> Artikel ilmiah	TM: 3 x 50 ‘‘ TT: 3 x 2 x 60’’ BM: 3 x 2 x 60’’	Mahasiswa <b>membuat proyek desain teknologi sederhana yang mengaplikasikan elektrostatika pada green technology</b>	K K de da ya  B T B I
9	Mahasiswa mampu menjelaskan teori konsep, hukum, dan persamaan-persamaan pada fenomena medan listrik static pada dielektrik	Kegiatan Pembelajaran 2.1 Polarisasi	<b>Bentuk</b> : Kuliah Daring <b>Metode</b> : Presentasi mahasiswa, simulasi , diskusi kelompok dan penugasan <b>Media</b> : Ms. Teams , Power point / Sway <b>Sumber belajar</b>	TM: 3 x 50 ‘‘ TT: 3 x 2 x 60’’ BM: 3 x 2 x 60’’	Mahasiswa <b>melakukan kuliah, mendengarkan penjelasan presentasi kelompok mengajukan pertanyaan, dan mengerjakan tugas.</b>	K K de da ya  B T B

Mgu ke	Sub CPMK (Kemampuan Akhir yang direncanakan)	Bahan kajian (Materi Pembelajaran)	Bentuk dan metode pembelajaran (Media dan Sumber Belajar)	Estimasi waktu	Pengalaman Belajar Mahasiswa
10		Kegiatan Pembelajaran 2.2 Pergeseran Elektrik dan Dielektrik Linier	Buku Ajar , handout , Video <b>Bentuk :</b> Kuliah Daring <b>Metode:</b> Presentasi mahasiswa, diskusi kelompok dan penugasan <b>Media :</b> Ms. Teams , Power point / Sway <b>Sumber belajar :</b> Buku Ajar , handout , Video	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa melakukan presentasi , mendengarkan presentasi penjelasan kelompok mengajukan pertanyaan, dan mengerjakan tugas mingguan .
11		Kegiatan Pembelajaran 2.3 Penerapan Dielektrik pada Teknologi Ramah Lingkungan	<b>Bentuk :</b> PROYEK <b>Metode:</b> Penugasan <b>Media :</b> Ms. Teams , Power point / Sway <b>Sumber belajar</b> Artikel ilmiah	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa membuat proyek desain teknologi sederhana yang mengaplikasikan elektrostatika pada green technology
12		Kegiatan Pembelajaran 2.4 Spektroskopi Impedansi	<b>Bentuk :</b> Kuliah Daring <b>Metode:</b> Presentasi mahasiswa, diskusi kelompok dan penugasan <b>Media :</b> Ms. Teams , Power point / Sway	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa melakukan presentasi , mendengarkan presentasi penjelasan kelompok mengajukan pertanyaan, dan mengerjakan tugas mingguan .

Mgu ke	Sub CPMK (Kemampuan Akhir yang direncanakan)	Bahan kajian (Materi Pembelajaran)	Bentuk dan metode pembelajaran (Media dan Sumber Belajar)	Estimasi waktu	Pengalaman Belajar Mahasiswa
13	Mahasiswa mampu menjelaskan teori konsep, hukum, dan persamaan-persamaan pada fenomena elektromagnet	Kegiatan pembelajaran 3.1 Magnetostatik	<p><b>Sumber belajar</b> : Buku Ajar , handout , Video</p> <p><b>Bentuk</b> : Kuliah Daring</p> <p><b>Metode:</b> Presentasi mahasiswa, simulasi , diskusi kelompok dan penugasan</p> <p><b>Media</b> : Ms. Teams , Power point / Sway ,</p> <p><b>Sumber belajar</b> : Buku Ajar , handout , Video</p>	<p>TM: 3 x 50 ‘‘</p> <p>TT: 3 x 2 x 60’’</p> <p>BM: 2 x 2 x 60’’</p>	Mahasiswa <b>melakukan presentasi , mendengarkan penjelasan presentasi kelompok , mengajukan pertanyaan, dan menganalisis fenomena magnetostatik</b>
14		Kegiatan pembelajaran 3.2 Elektrodinamika	<p><b>Bentuk</b> : Kuliah Daring</p> <p><b>Metode:</b> Presentasi mahasiswa, simulasi , diskusi kelompok dan penugasan</p> <p><b>Media</b> : Ms. Teams , Power point / Sway</p> <p><b>Sumber belajar</b> : Buku Ajar , handout , Video</p>	<p>TM: 3 x 50 ‘‘</p> <p>TT: 3 x 2 x 60’’</p> <p>BM: 3 x 2 x 60’’</p>	Mahasiswa <b>melakukan kuliah, mendengarkan penjelasan presentasi kelompok , mengajukan pertanyaan, dan mengerjakan tugas.</b>
15		Kegiatan pembelajaran 3.3 Gelombang Elektromagnetik	<p><b>Bentuk</b> : Kuliah Daring</p> <p><b>Metode:</b> Presentasi mahasiswa, simulasi , diskusi kelompok dan penugasan</p> <p><b>Media</b> : Ms. Teams , Power point / Sway</p>	<p>TM: 3 x 50 ‘‘</p> <p>TT: 3 x 2 x 60’’</p> <p>BM: 3 x 2 x 60’’</p>	Mahasiswa <b>melakukan kuliah, mendengarkan penjelasan presentasi kelompok , mengajukan pertanyaan, dan mengerjakan tugas.</b>

Mgu ke	Sub CPMK (Kemampuan Akhir yang direncanakan)	Bahan kajian (Materi Pembelajaran)	Bentuk dan metode pembelajaran (Media dan Sumber Belajar)	Estimasi waktu	Pengalaman Belajar Mahasiswa
			<b>Sumber belajar</b> Buku Ajar , handout , Video		Be pre
16		UAS Kegiatan pembelajaran 3.4 Penerapan Elektromagnetik pada Teknologi Ramah Lingkungan	<b>Bentuk : PROYEK</b>  <b>Metode:</b> Penugasan  <b>Media :</b> Ms. Teams , Power point / Sway  <b>Sumber belajar</b> Artikel ilmiah	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa membuat proyek desain teknologi yang sederhana yang mengaplikasikan elektrostatika pada green echnology

# SISTEM PENILAIAN

## I. PERSYARATAN UMUM

### A. Kehadiran:

1. Jumlah kuliah tatap muka per semester yang harus dihadiri oleh mahasiswa/i adalah 16 pertemuan.
2. Batas toleransi kehadiran mahasiswa/i 75 % dari total jumlah pertemuan.
3. Kriteria ketidakhadiran mahasiswa/i adalah: S (sakit) ditandai dengan surat keterangan dokter, I (Ijin) ditandai dengan surat ijin resmi, dan A (Alpa), maksimal 4x pertemuan kelas.
4. Mahasiswa aktif dan partisipatif mengikuti ibadah keluarga besar UKI dan tidak diperkenankan melakukan kegiatan lain selama ibadah berlangsung.
5. Toleransi keterlambatan perkuliahan (dosen + mahasiswa/i) setiap tatap muka adalah 15 menit. Jika setelah 15 menit dosen + mahasiswa/i tidak hadir maka perkuliahan dibatalkan. (kecuali ada persetujuan atau ada masalah tertentu).

### B. Perkuliahan:

1. Mata kuliah yang dilaksanakan mahasiswa berbasis KKNi.
2. Mata kuliah berbasis KKNi dinilai/dievaluasi per topik yang telah tuntas
3. Persentase penilaian/evaluasi ditentukan oleh dosen yang bersangkutan sesuai kompetensi MK dan capaian pembelajaran.
4. Tidak diperkenankan meninggalkan kelas selama perkuliahan tanpa ijin oleh dosen.
5. Mahasiswa tidak diijinkan membuka HP saat proses belajar mengajar berlangsung tanpa ijin oleh dosen.
6. Mahasiswa memakai busana yang sopan.
7. Tidak membuat kegaduhan selama proses pembelajaran berlangsung.

### C. Kejahatan akademik: plagiarisme Menurut Peraturan Menteri Pendidikan RI Nomor 17 Tahun 2010:

“Plagiat adalah perbuatan **sengaja** atau **tidak sengaja** dalam memperoleh atau mencoba memperoleh kredit atau nilai untuk suatu karya ilmiah, dengan mengutip sebagian atau seluruh karya dan atau karya ilmiah pihak lain yang diakui sebagai karya ilmiahnya, tanpa menyatakan sumber secara tepat dan memadai.” (Permendik No 17 Tahun 2010 dan Panduan Anti Plagiasime terlampir).

Sanksi sesuai Permendik No 17 Tahun 2010 Pasal 12:

1. teguran;
2. peringatan tertulis;
3. penundaan pemberian sebagian hak mahasiswa;
4. pembatalan nilai satu atau beberapa mata kuliah yang diperoleh mahasiswa;
5. pemberhentian dengan hormat dari status sebagai mahasiswa;

6. pemberhentian tidak dengan hormat dari status sebagai mahasiswa; atau
7. pembatalan ijazah apabila mahasiswa telah lulus dari suatu program.

## II. PERSYARATAN KHUSUS

### A. Tugas dan Tanggung jawab mahasiswa/i

Pada setiap tatap muka mahasiswa/i diwajibkan berpartisipasi aktif dalam proses perkuliahan melalui hal-hal berikut

1. Presentasi: mahasiswa/i wajib berpartisipasi aktif dalam diskusi yang diadakan dalam setiap tatap muka sesuai kebutuhan materi perkuliahan (lihat RPS).
2. Studi lapangan/*service learning*: mahasiswa/i wajib berpartisipasi aktif dalam studi lapangan yang diadakan di luar kampus sesuai topik materi perkuliahan yang sudah ditentukan dalam RPS.
3. Tugas Mandiri: mahasiswa/i wajib mengerjakan tugas mandiri dalam bentuk review materi kuliah yang telah diberi tanda bintang pada referensi yang digunakan di RPS.
4. Tugas terstruktur: mahasiswa/i wajib membentuk kelompok untuk mendiskusikan berbagai fenomena sosiologis yang berhubungan dengan media dengan menerapkan konsep, teori dan metode analisis sosiologis media untuk menganalisis dan menjelaskannya.

### B. Gaya Selingkung Pengerjaan Tugas

1. Untuk mengerjakan tugas review, mahasiswa/i wajib mematuhi ketentuan berikut:
  - a. Artikel mahasiswa/i harus ditulis dengan komposisi: Pendahuluan (1 hal), Pembahasan (2 hal), Kesimpulan ( $\frac{1}{2}$  hal).
  - b. Daftar referensi minimal menggunakan 3 buku dan 2 jurnal ilmiah.
  - c. Pengutipan dan penulisan daftar pustaka sesuai .
  - d. Ketentuan kertas A4, huruf Cambria, ukuran jenis 12, spasi  $1\frac{1}{2}$ .
2. Untuk mengerjakan tugas makalah kelompok, mahasiswa/i wajib mematuhi ketentuan berikut:
  - a. Artikel mahasiswa/i harus ditulis dengan komposisi: Pendahuluan berisi permasalahan dan pentingnya isu/fenomena tersebut dibahas (2 hal), Tinjauan Teoritis berisi teori apa yang hendak digunakan sebagai pisau analisis (2 hal), Pembahasan (5 hal), Kesimpulan (1 hal).
  - b. Daftar referensi minimal menggunakan 5 buku dan 10 jurnal ilmiah.
  - c. Pengutipan dan penulisan daftar pustaka menggunakan "APA (American Psychological Association).
  - d. Ketentuan kertas A4, jenis huruf calibri , ukuran 12, spasi  $1\frac{1}{2}$ .

## III. PENILAIAN (\*point-point penilaian rubrik dapat diisi sesuai dengan kebutuhan)

1. Rubrik penilaian presentasi

No	Indikator Penilaian Presentasi	Bobot (B)	Nilai (N)	B x N
1.	Penguasaan materi	30%		
2.	Slide	20%		
3.	Komunikatif	20%		
4.	Kemampuan menjawab pertanyaan dari audience	30%		
Jumlah				

2. Rubrik penilaian kognitif (Kuis dan tugas mingguan )

No	Kualitas Jawaban	Bobot
1.	Kuis	50%
2.	Tugas mingguan	50%
3.		
4.		

3. Rubrik penilaian Kinerja (makalah presentasi dan Proyek)

No	Indikator	Bobot (B)	Nilai (N)	B x N
1		-		50%
2				50%
3				
Jumlah				

4. Rubrik penilaian sikap

No	Pernyataan	Selalu (SL)	Sering (SR)	Kadang – Kadang (KK)	Tidak Pernah (TP)
1	Aktif dalam diskusi kelas				
2	Jujur tidak melakukan plagiasi				
3	Bekerja sama				
4	Bertanggung jawab				
5					

5. Skala nilai akhir dalam huruf dan angka:

Nilai Akhir (NA)	Nilai Huruf (NH)	Nilai Mutu (NM)
80,0-100,0	A	4,0
75,0-79,0	A-	3,7
70,0-74,9	B+	3,3

65,0-69,9	B	3,0
60,0-64,9	B-	2,7
55,0-59,9	C	2,3
50,0-54,9	C-	2,0
45,0-49,9	D	1,0
<44,9	E	0

6. Presentase Tahap Penilaian Tugas dan kewajiban mahasiswa

Tahap1	: Presentasi Kelompok	sebesar 25 %
Tahap2	: Penilaian kognitif	sebesar 30 %
Tahap3	: UTS(Proyek)	sebesar 20 %
Tahap3	: Penilaian sikap	sebesar 25%

Terima kasih atas kerja sama dan kerja keras mahasiswa sekalian. Shalom.

Jakarta, 02 September 2020

Mengetahui,  
Ketua Program Studi,



Disusun Oleh,  
Manogari Sianturi, S.Si., M.T.



Disusun Oleh  
Ngia Masta, S.Pd., M.Si.

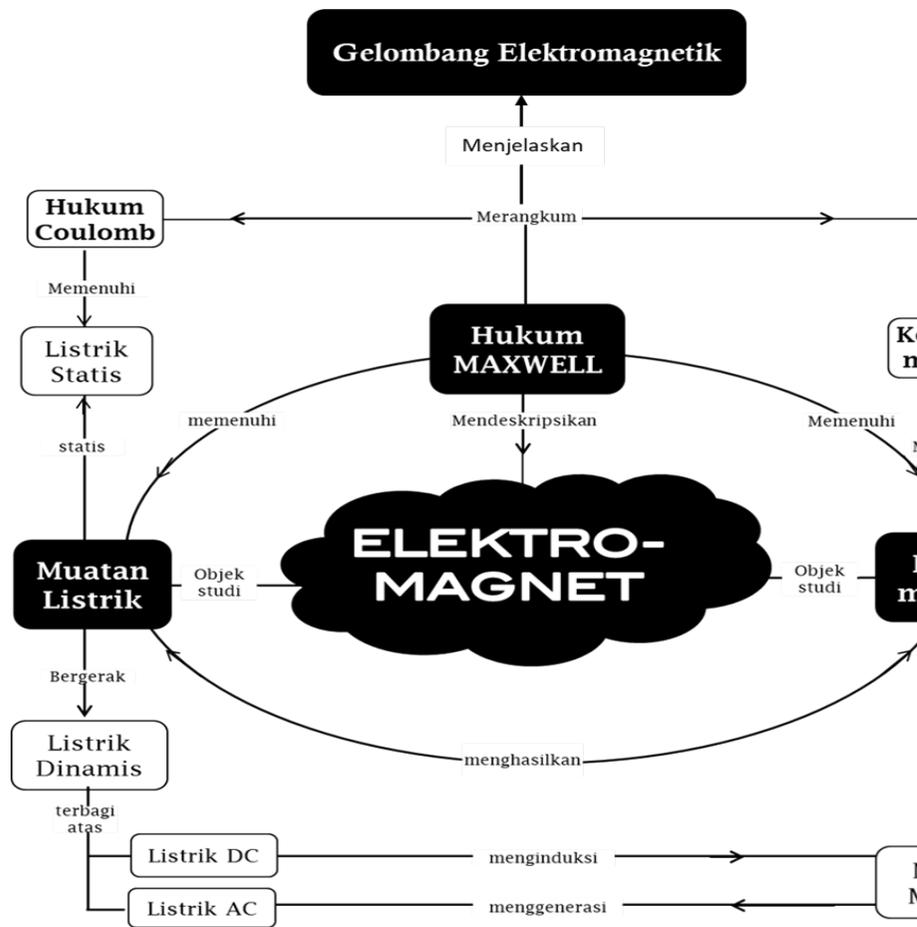


Disusun Oleh  
Taata Guswantoro, M.Si.



<b>Modul</b>	<b>Ming ke</b>	<b>Kegiatan Pembelajaran</b>
Modul 1 Elektrostatik	2.	Kegiatan Pembelajaran 1 Hukum Coulomb
	3.	Kegiatan Pembelajaran 2 Medan Listrik
	4.	Kegiatan Pembelajaran 3 Divergensi dan Curl dari Medan Listrik
	5.	Kegiatan Pembelajaran 4 Potensial Listrik
	6.	Kegiatan Pembelajaran 5 Energi Potensial Listrik
	7.	Kegiatan pembelajaran 6 Konduktor
	8.	Kegiatan pembelajaran 7 Penerapan Elektrostatika pada Teknologi Ramah Lingkungan
Modul 2 Medan Listrik dalam bahan	9.	Kegiatan Pembelajaran 1 Polarisasi
	10.	Kegiatan Pembelajaran 2 Pergeseran Elektrik dan Dielektrik Linier
	11.	Kegiatan Pembelajaran 3 Penerapan Dielektrik pada Teknologi Ramah Lingkungan
	12.	Kegiatan Pembelajaran 4 Spektroskopi Impedansi
Modul 3 Medan Elektromagnetik	13.	Kegiatan pembelajaran 1 Magnetostatik
	14.	Kegiatan pembelajaran 2 Elektrodinamika
	15.	Kegiatan pembelajaran 3 Gelombang Elektromagnetik
	16.	Kegiatan pembelajaran 4 Penerapan Elektromagnetik pada Teknologi Ramah Lingkungan

# PETA KONSEP



# Modul 1

## Elektrostatik

### Pendahuluan

**Hai Physics Learners!** Selamat datang di Modul 1 yang berjudul “Elektrostatik”. Pada modul ini kita akan mempelajari tentang: 1) Hukum Coulomb dan Medan Listrik; 2) Potensial Listrik dan Energi Listrik; 3) Persamaan Laplace; 4) Metode bayangan, Separasi Variabel, dan Ekspansi Multipol.

Pada hukum coulomb dan medan listrik kita akan berkenalan juga dengan hukum Gauss, fluks listrik dan garis-garis gaya listrik. Kita juga akan mempelajari persamaan-persamaan yang digunakan dalam elektrostatik, diantaranya persamaan poisson dan persamaan laplace, metode bayangan, separasi variabel, dan ekspansi multipol. Kita juga akan mempelajari tentang potensial listrik dan energi listrik. Kamu juga akan melihat bahwa medan listrik  $B$  berhubungan dengan potensial listrik  $V$ .

Elektrostatik menjadi dasar bagi hukum-hukum listrik magnet yang akan dipelajari pada modul- modul berikutnya. Setelah menyelesaikan Modul 1, kamu diharapkan dapat menerapkan prinsip-prinsip elektrostatika dalam kehidupan sehari-hari ya. Mari pelajari dengan antusias!

### 1. Capaian Pembelajaran Lulusan

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki:

Ranah	Capaian Pembelajaran Lulusan
<b>Sikap (S)</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6)</li><li>2. menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8)</li></ol>
<b>Keterampilan Umum (KU)</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 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-1)</li><li>2. mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi ; (KU-9)</li></ol>

Ranah	Capaian Pembelajaran Lulusan
<b>Keterampilan Khusus (KK)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mampu Mendayagunakan IPTEKS dalam Kegiatan Pembelajaran Fisika; (KK-3)</li> <li>2. Mampu Mendayagunakan IPTEKS yang Berorientasi dalam Kehidupan Sehari-Hari; (KK-4)</li> </ol>
<b>Pengetahuan (PG)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mengetahui dan Memahami Konsep dan Prinsip Keilmuan Fisika; (P-3)</li> <li>2. Mengetahui dan Memahami Konsep dan Prinsip Terapan Fisika (P-4)</li> <li>3. Mampu Menguasai Konsep Perkembangan Fisika secara Mikroskopik; (P-6)</li> </ol>

## 2. Kemampuan Akhir

Ranah	Kemampuan Akhir (KA)
<b>Pengetahuan</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mampu menganalisis muatan listrik dan gaya listrik, serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>2. Mampu menganalisis kuat medan listrik serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>3. Mampu menganalisis divergensi dan curl dari kuat medan listrik, garis gaya listrik, fluks serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>4. Mampu menganalisis potensial listrik serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>5. Mampu menganalisis usaha dan energi elektrostatik serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> </ol>
<b>Sikap</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif.</li> <li>2. Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik.</li> <li>3. Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.</li> </ol>
<b>Psikomotor</b>	Mahasiswa mampu melakukan percobaan berikut presentasi percobaan elektrostatik dan manfaatnya dalam kehidupan sehari-hari

### 3. Prasyarat kompetensi

Prasyarat untuk mata kuliah ini antara lain:

- Mahasiswa mampu menganalisis gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang Gerak (Fisika Gerak dan Praktikum).
- Mahasiswa mampu menggunakan diferensiasi dan integral pada kalkulus (Matematika I)
- Mahasiswa mampu menggunakan analisis vektor berupa divergensi dan curl (Metode Matematika untuk Fisika I)

### 4. Kegunaan Modul

Modul elektrostatik berguna bagi mahasiswa calon pendidik untuk memperkuat dasar pengetahuannya dalam kajian listrik magnet. Materi hukum Coulomb, medan listrik, potensial dan energi elektrostatik, hingga kapasitor, kapasitansi dan dielektrik adalah materi yang akan diajarkan di kelas XII SMA. Sementara materi hukum Gauss, metode matematika yang digunakan (persamaan Laplace, metode bayangan, separasi variabel dan ekspansi multipol), serta konduktivitas adalah kajian fisika universitas yang akan berguna jika mahasiswa menjadi peneliti pada bidang sifat listrik bahan atau melanjutkan pendidikannya pada bidang fisika murni dan terapan.

### 5. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

Materi Pokok	Sub Materi Pokok
A. Hukum Coulomb	1. Elektrostatik 2. Hukum Coulomb
B. Medan Listrik	1. Medan Listrik 2. Distribusi Muatan Kontinu
C. Divergensi dan Curl dari medan listrik	1. Garis medan, fluks, dan hukum gauss 2. Divergensi dari $\mathbf{E}$ 3. Aplikasi Hukum Gauss 4. Curl dari $\mathbf{E}$
D. Potensial Listrik	1. Perkenalan Potensial Elektrostatik 2. Persamaan Poisson dan Persamaan Laplace 3. Potensial dari Distribusi Muatan yang Terlokalisasi 4. Kesimpulan : Syarat batas elektrostatik

Materi Pokok	Sub Materi Pokok
E. Usaha dan Energi elektrostatik	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan</li> <li>2. Energi dari sebuah distribusi muatan titik</li> <li>3. Energi dari sebuah distribusi muatan kontinu</li> </ol>
F. Konduktor	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sifat dasar</li> <li>2. Muatan-muatan Induksi</li> <li>3. Permuakaan bermuatan dan gaya pada konduktor</li> <li>4. Kapasitor</li> </ol>

# Kegiatan Pembelajaran 1 Hukum Coulomb dan Medan Listrik

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mampu menganalisis muatan listrik dan gaya listrik, serta penerapannya dalam berbagai kasus	a. Mahasiswa mampu menjelaskan dasar eksperimen dari formulasi hukum coulomb b. Mahasiswa mampu mengaplikasikan hukum Coulomb dalam pemecahan masalah

## Uraian Materi

### A. Elektrostatik

Elektrostatik atau listrik statis adalah bagian dari ilmu fisika yang mempelajari tentang fenomena yang ditimbulkan oleh muatan-muatan yang statik (diam) satu sama lain. Elektrostatik mempelajari tentang gaya listrik, pengumpulan muatan listrik dan sifat-sifat listrik statik pada benda. Beberapa fenomena elektrostatik yang diterapkan dalam teknologi diantaranya: prinsip kerja *carrier bead* pada mesin fotokopi, pengumpulan abu dari cerobong asap pabrik dan penyemprotan cat elektrostatik (*air brush*).

Elektrostatik menjadi dasar berkembangnya elektromagnetisme. Istilah “listrik” pertama kali ditemukan dari peristiwa elektrostatik oleh Thales dari Miletus (625-547 SM). Thales mengamati batu amber yang sebelumnya digosokkan batu tersebut dengan kain wol ternyata dapat menarik bulu ayam di sekitarnya. Batu amber yang telah digosokkan tersebut juga membuat jerami dan bahkan serbuk besi berloncatan ke arahnya. Thales mengamati bahwa penggosokan batu amber mengakibatkan munculnya gaya tarik yang kita kenal saat ini sebagai gaya listrik.

#### 1. Muatan Elementer

Gaya listrik yang ditemukan Thales menjadi perhatian. Para filsuf dizaman yunani kuno kemudian menemukan gaya listrik dapat berupa gaya tarik dan gaya tolak. Gaya listrik tidak memerlukan kontak (sentuhan) untuk menggerakkan benda lain. Gaya listrik hanya terjadi pada benda tertentu yang telah digosokkan atau berasal dari jenis batu tertentu. Benda yang mengalami gaya

listrik selanjutnya disebut sebagai benda bermuatan. Apabila dua muatan sejenis didekatkan maka akan timbul gaya tolak. Apabila dua muatan berbeda jenis didekatkan maka akan timbul gaya tarik.

Penemuan gaya listrik dari zaman Yunani kuno kemudian kembali mengalami perkembangan pada abad ke 18 dengan mendefinisikan istilah muatan. Batang kaca menjadi bermuatan listrik setelah digosokkan dengan kain wol. Batang kaca yang bermuatan listrik kemudian mengakibatkan bulu ayam, jerami, dan serbuk besi yang menempel padanya menjadi “bermuatan listrik” juga. Muatan listrik kemudian menjadi sifat intrinsik dari setiap benda. Benjamin Franklin kemudian mengusulkan dua jenis muatan, yaitu muatan negatif dan muatan positif. Benjamin Franklin menjelaskan konsep gerak benda muatan sebagai akibat dari sebuah fluida kontinu. Aliran fluida kontinu inilah yang mengakibatkan benda bermuatan bergerak dengan arah tertentu.

Konsep “fluida kontinu” ini kemudian ditinggalkan setelah penemuan elektron. Penemuan elektron berasal dari percobaan sinar katoda oleh J.J. Thomson. J.J. Thomson juga menemukan rasio muatan terhadap massa ( $e/m$ ) elektron. Temuan J.J. Thomson kemudian ditilik oleh percobaan minyak Milikan, yang berhasil menemukan besar muatan elektron. Besar muatan elektron ini kemudian menunjukkan bahwa muatan atau “fluida listrik” bersifat terkuantisasi (diskrit) dan bukan kontinu. Besar muatan elektron adalah

$$e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ coulomb}$$

Penemuan elektron kemudian disusul dengan penemuan proton melalui percobaan hamburan alfa oleh Rutherford. Rutherford menemukan bahwa atom terdiri atas inti yang bermuatan positif dan kulit yang bermuatan negatif. Inti atom yang bermuatan positif ini kemudian disebut sebagai proton. Muatan proton sama besar dengan muatan elektron, yaitu  $1,6 \times 10^{-19}$  coulomb. Muatan elektron kemudian disebut **muatan elementer**, semua besar muatan partikel sub atomik dinyatakan dalam bentuk perkalian terhadap muatan elektron.

Setelah ditemukan elektron dan proton, definisi benda bermuatan mengalami koreksi. Setiap benda memiliki muatan sebagai penyusun atom-atomnya. Benda dikatakan netral jika jumlah elektron dan neutron adalah sama. Benda yang bermuatan negatif adalah benda yang memiliki kelebihan elektron. Pada zat padat, proton adalah muatan elementer yang terikat kuat di dalam inti atom, sehingga proton tidak bergerak dengan bebas seperti elektron. Sehingga

benda yang bermuatan positif adalah benda yang telah melepas elektronnya, sehingga jumlah proton lebih banyak dibandingkan elektron.

## 2. Hukum Kekekalan Muatan

**Hukum kekekalan muatan** menyatakan bahwa muatan bersifat kekal, tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Hukum kekekalan muatan berlaku tanpa pengecualian untuk semua objek di alam semesta, baik yang berukuran besar maupun yang berukuran sangat kecil (skala sub atomik). Kuantisasi muatan elektron dan proton juga mengoreksi penjelasan fenomena elektrostatik, dimana sebelumnya proses penggosokkan dianggap “menciptakan” muatan pada batang kaca.

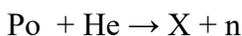
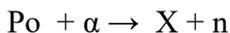
Ketika benda-benda saling bergesekan, maka terjadi perpindahan elektron dari satu benda ke benda yang lain. Batang kaca yang telah digosok dengan kain sutera menjadi bermuatan positif karena elektron batang kaca berpindah ke kain wol. Kain wol menjadi kelebihan elektron dan batang gelas menjadi kekurangan elektron. Muatan pada batang kaca tidak diciptakan dari proses penggosokkan, melainkan terjadi perpindahan muatan elektron. Dengan demikian, gaya tarik atau gaya tolak yang terjadi pada fenomena elektrostatik sesuai dengan hukum kekekalan muatan.

### Contoh Soal

**Reaksi Peluruhan Radioaktif dari inti.** Suatu nuklida Po ditembakkan dengan sinar alpha menurut reaksi :  $Po + \alpha \rightarrow X + n$  .

Berapa nomor atom dan bilangan massa Nuklida X ?

**Jawab**



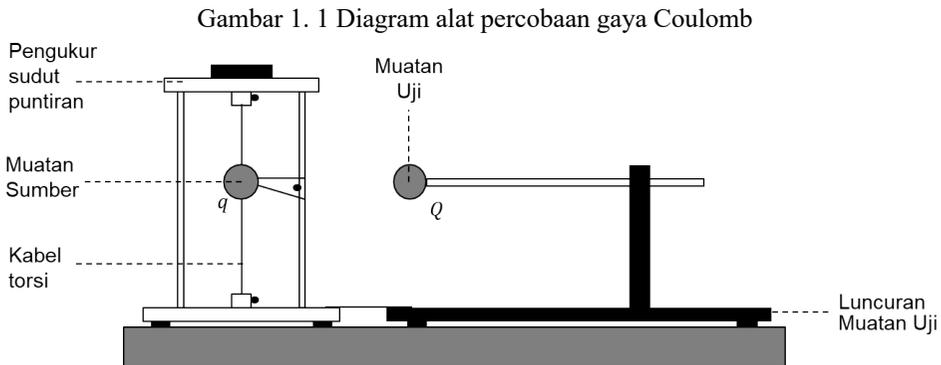
Maka: nomor atom = 92, bilangan massa = 237

## B. Hukum Coulomb

### 1. Percobaan Gaya Coulomb

Pada tahun 1785 Charles Coulomb melakukan percobaan gaya elektrostatik menggunakan timbangan puntir (Gambar 1.1). Di dalam timbangan puntir terdapat bola muatan sumber  $q$  yang dihubungkan dengan kabel torsi. Kabel torsi dihubungkan lagi dengan alat pengukur sudut puntiran di bagian atas

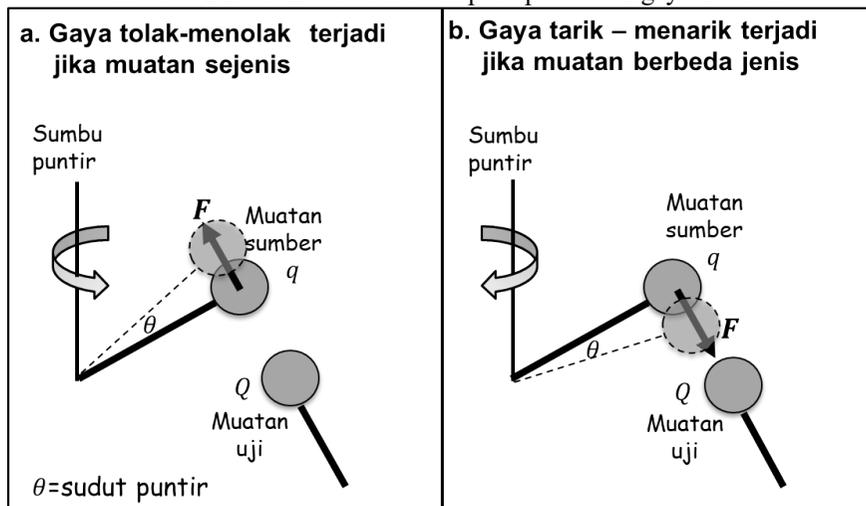
timbangan puntir. Di luar timbangan puntir terdapat bola muatan uji  $Q$  yang dapat diubah posisinya menggunakan luncuran muatan uji.



Sumber: <https://www.pasco.com/products/complete-experiments/electromagnetism/ex-9930>

Pada percobaan ini, lengan muatan sumber dan lengan muatan uji ditempatkan saling tegak lurus. Saat muatan uji digeser mendekati muatan sumber, maka muatan sumber akan bergerak terhadap muatan uji. Muatan sumber akan menjauhi muatan uji jika kedua muatan sejenis. Sebaliknya, muatan sumber akan mendekati muatan uji jika kedua muatan berbeda jenis. Gerakan muatan sumber akan mengakibatkan kabel torsi menyimpang dengan besar sudut puntiran  $\theta$  (Gambar 1.2). Sudut puntiran inilah yang kemudian dikalibrasi menjadi besar gaya listrik ( $F$ ).

Gambar 1. 2 Interaksi antar muatan pada percobaan gaya Coulomb



Coulomb menggunakan bola bermuatan dengan radius jauh lebih kecil dibandingkan jarak antara kedua bola, sehingga dianggap sebagai muatan titik. Bola berukuran kecil ini juga mengakibatkan gaya listrik menjadi jauh lebih besar dari gaya gravitasinya, sehingga gaya gravitasi dapat diabaikan. Variasi besar muatan dilakukan melalui teknik induksi. Teknik induksi dilakukan dengan cara membumikan salah satu bola agar muatannya terlepas. dan kemudian kedua bola dikontakkan kembali. Dengan teknik ini, jika mula - mula muatan pada setiap bola sebesar  $q_0$ , maka besar muatan dapat dikurangi menjadi  $\frac{1}{2} q_0$ .

## 2. Formulasi Hukum Coulomb

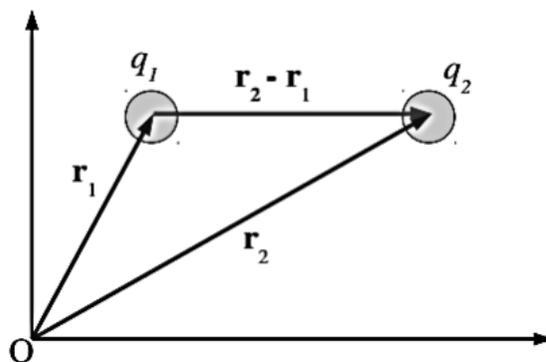
Melalui set percobaan ini, ada dua hal yang diselidiki oleh Coulomb, yaitu: (1) Hubungan antara gaya listrik ( $F$ ) dengan muatan – muatan yang saling berinteraksi ( $Q$  dan  $q$ ) dan (2) Hubungan antara gaya listrik ( $F$ ) dengan jarak antar muatan ( $r$ ). Hasil dari kedua penyelidikan diatas adalah bahwa besar **gaya Coulomb** berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan dan berbanding lurus dengan hasil kali kedua muatan.

Berdasarkan hukum III Newton, maka besar gaya coulomb antara dua muatan pada bidang (Gambar 1.3) berlaku sama. Gaya  $F_{21}$  mempunyai harga yang sama besar dengan  $F_{12}$  tetapi mempunyai arah yang berlawanan:

$$F_{21} = -F_{12} \quad 1.1$$

Jika kedua muatan mempunyai tanda yang sama, yaitu jika keduanya positif atau negatif, gaya bersifat tolak menolak. Jika kedua muatan mempunyai tanda yang berlawanan, gayanya tarik-menarik.

Gambar 1. 3 Diagram Gaya Coulomb pada Bidang



Sesuai dengan bunyi Hukum Coulomb, maka gaya coulomb secara matematis dituliskan:

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \quad 1.2$$

Dengan  $q_1$  dan  $q_2$  merupakan dua muatan titik yang terpisah sejauh  $r_{12}$ . Satuan SI dari  $q_1$  dan  $q_2$  adalah Coulomb. Gaya listrik  $F_{12}$  adalah gaya Coulomb yang satuannya Newton (N). Vektor  $\hat{\mathbf{r}}_{12}$  adalah vektor posisi yang mengarah dari  $q_1$  ke  $q_2$ .

$$\mathbf{r}_{12} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad 1.3$$

Notasi  $\mathbf{r}_{12}$  menunjukkan besar dan  $\hat{\mathbf{r}}_{12}$  menunjukkan arah. Gaya  $\mathbf{F}_{12}$  adalah gaya interaksi yang dilakukan  $q_1$  terhadap  $q_2$ . Dari persamaan 1.2 juga diperoleh  $\epsilon_0$  yang merupakan permitivitas pada ruang hampa dan  $k$  adalah tetapan Coloumb. Besar  $\epsilon_0$  dan  $k$  masing-masing adalah:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$$

dan

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \times 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

#### Fakta Menarik

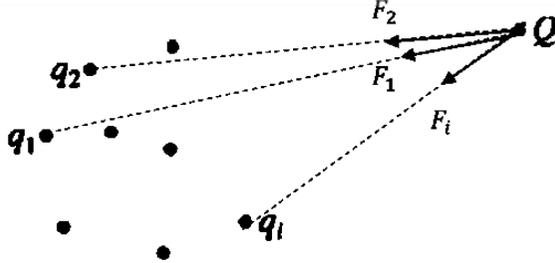


Terdapat kesamaan antara Hukum Coloumb dan Hukum Gravitasi Newton. Keduanya adalah hukum kuadrat terbalik. Namun demikian, gaya gravitasi antara dua partikel berbanding lurus dengan massa-massa partikel dan selalu tarik-menarik, sedangkan gaya listrik berbanding lurus dengan muatan-muatan listrik dan dapat bersifat tarik-menarik atau tolak-menolak

### 3. Prinsip Superposisi pada Hukum Coulomb

Formulasi gaya coulomb pada persamaan 1.2 berlaku pada interaksi dua muatan titik, yaitu satu muatan sumber  $q$  dan satu muatan uji  $Q$ . Kemudian, bagaimana interaksi pada lebih dari dua muatan titik? Ambil sebuah muatan uji  $Q$  kemudian tempatkan di sekitar beberapa muatan sumber  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$  (Gambar 1.4). Muatan uji  $Q$  akan mengalami resultan gaya coulomb setiap muatan sumber  $q$ .

Gambar 1. 4 Prinsip Superposisi Hukum Coulomb  
Muatan sumber Muatan uji



Resultan gaya – gaya ini disebabkan oleh berlakunya **prinsip superposisi** pada hukum Coulomb. Prinsip superposisi menjelaskan bahwa interaksi antara dua muatan tidak dipengaruhi oleh kehadiran muatan lainnya. Artinya, untuk mengetahui besar gaya yang dialami muatan uji  $Q$  maka harus menghitung besar  $F_1$  yang disebabkan oleh muatan uji  $q_1$ , besar  $F_2$  yang disebabkan oleh muatan uji  $q_2$ , besar  $F_3$  yang disebabkan oleh muatan uji  $q_3$ , hingga besar  $F_n$  yang disebabkan oleh muatan uji  $q_n$ . Setelah setiap gaya akibat muatan uji diperoleh, baru kemudian dilakukan sumasi yang dapat ditulis:

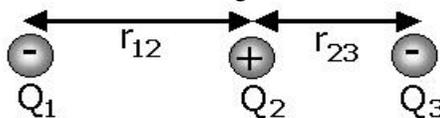
$$\sum_{i=1}^n F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n \quad 1.4$$

Persamaan 1.4 menunjukkan bahwa interaksi yang melibatkan  $n$  muatan sumber juga akan menimbulkan gaya Coulomb independen sebanyak  $n$  buah. Gaya independen ini hanya melibatkan satu pasang muatan

### Contoh Soal

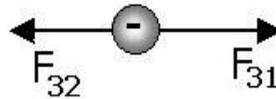
Tiga partikel bermuatan disusun dalam satu garis, seperti Gambar 1.5. Tentukan gaya elektrostatis total pada  $Q_3$  yang disebabkan oleh dua muatan yang lain, bila  $r_{12} = 30 \text{ cm}$ ,  $r_{23} = 20 \text{ cm}$ ,  $Q_1 = -8 \times 10^{-6} \text{ C}$ ,  $Q_2 = +3 \times 10^{-6} \text{ C}$ ,  $Q_3 = -4 \times 10^{-6} \text{ C}$ .

Gambar 1. 5 Interaksi Tiga Muatan Titik Segaris



**Jawab:**

Arah gaya yang bekerja pada muatan  $Q_3$  dinyatakan seperti gambar di bawah. Gaya total pada muatan  $Q_3$  merupakan jumlah vektor gaya  $F_{31}$  yang diakibatkan oleh muatan  $Q_1$  dan gaya  $F_{32}$  yang diakibatkan oleh muatan  $Q_2$ .



Tanda positif dan negatif pada muatan tidak perlu dimasukkan dalam perhitungan, tetapi harus disadari bahwa keberadaannya untuk menentukan arah setiap gaya. Dari gambar tampak bahwa  $F_{32}$  tarik menarik dan berarah ke kiri sedangkan  $F_{31}$  tolak menolak dan berarah ke kanan.

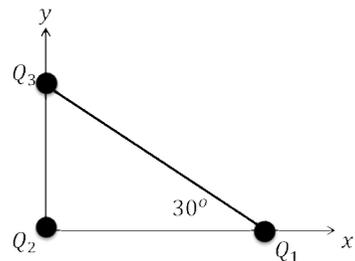
$$F_{31} = k \frac{Q_3 Q_1}{r^2} = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2 \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})(8 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,5\text{m})^2} = 1,2 \text{ N}.$$

$$F_{32} = k \frac{Q_3 Q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2 \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})(3 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,2\text{m})^2} = 2,7 \text{ N}.$$

Jika arah kanan  $F_{31}$  dianggap menunjuk ke arah  $x$  positif dan arah kiri  $F_{32}$  menunjuk ke arah  $x$  negatif. Maka gaya total pada muatan  $Q_3$  adalah : 1,5 N ke arah  $Q_2$ .

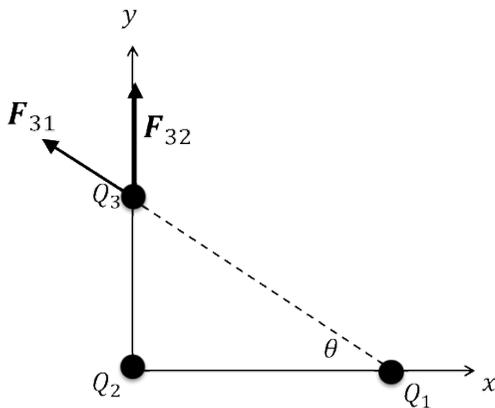
### Contoh Soal

Tiga muatan  $Q_1$ ,  $Q_2$ , dan  $Q_3$  tersusun seperti disamping. Bila  $r_{23} = 30 \text{ cm}$ ,  $r_{21} = 52 \text{ cm}$  dan  $Q_1 = 86 \mu\text{C}$ ,  $Q_2 = 50 \mu\text{C}$ ,  $Q_3 = 65 \mu\text{C}$ .  
Tentukan gaya listrik total pada muatan  $Q_3$ !



**Jawab:**

Gaya-gaya  $F_{31}$ ,  $F_{32}$  dan penguraian arahnya ditunjukkan dalam gambar dibawah ini.



$$F_{31} = k \frac{Q_3 Q_1}{r^2}$$

$$= 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2 \frac{(6,5 \times 10^{-5} \text{ C})(8,6 \times 10^{-5} \text{ C})}{(0,6\text{m})^2} = 140\text{N}$$

$$F_{32} = k \frac{Q_3 Q_2}{r^2}$$

$$= 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2 \frac{(6,5 \times 10^{-5} \text{ C})(5 \times 10^{-5} \text{ C})}{(0,3\text{m})^2} = 330\text{N}$$

Karena  $F_{31}$  berada pada bidang  $xy$ , maka  $F_{31}$  perlu diuraikan terhadap komponen komponennya sepanjang sumbu  $x$  dan  $y$ , sehingga :

$$F_{31x} = F_{31} \cos 30^\circ = 121,2\text{N}$$

$$F_{31y} = F_{31} \sin 30^\circ = -70\text{N}$$

Gaya  $F_{32}$  hanya mempunyai komponen  $y$ , sehingga gaya total pada muatan  $Q_3$  mempunyai komponen-komponen :

$$F_{3x} = F_{31x} = 121,2\text{N}$$

$$F_{3y} = F_{32} + F_{31y} = (300 - 70)\text{N} = 260\text{N}$$

Dengan demikian besar gaya total pada muatan  $Q_3$  adalah :

$$F_3 = \sqrt{F_{3x}^2 + F_{3y}^2} = \sqrt{(121,2\text{N})^2 + (260\text{N})^2} \approx 290\text{N}$$

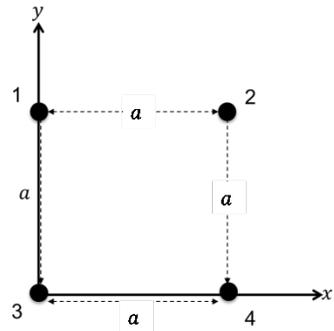
Sedangkan arah gayanya:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_{3y}}{F_{3x}} = \tan^{-1} \frac{260}{121,2} \approx \tan^{-1} 2,2 = 65^\circ$$

## Tugas

1. Perhatikan gambar disamping.

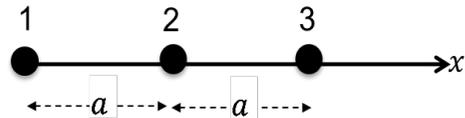
Ada empat partikel membentuk sebuah persegi. Muatannya adalah  $q_1 = q_4 = Q$  dan  $q_2 = q_3 = q$ . Tentukan



Berapakah rasio  $\frac{Q}{q}$  jika gaya elektrostatis total pada partikel 1 dan 3 adalah nol?

**Jawab**

2. Perhatikan gambar di samping!



Tiga partikel bermuatan diletakkan pada sumbu s. partikel 1 dan 2 tetap di tempatnya. Partikel 3 bebas untuk bergerak. Gaya listrik total yang dialami partikel 1 dan 2 adalah nol. Jika partikel 2 berada pada tepat di tengah – tengah antara partikel 1 dan 3 , maka berapa rasio  $\frac{q_1}{q_2}$ ?

**Jawab**

3. Jika seekor kucing menggosokkan badannya ke celana katun anda di siang hari yang kering, transfer muatan antara bulu kucing dan kapas dapat menyebabkan anda memiliki kelebihan muatan sebesar  $-2,00\mu C$ .
- a. Berapa banyak elektron ditransfer diantara Anda dan kucing?

**Jawab**

- b. Anda akan secara bertahap melepaskan elektron melalui lantai, tapi alih-alih menunggu, Anda langsung meraih keran dan sebuah bunga api muncul ketika jari-jari Anda mendekati keran itu. Dalam percikan bunga api itu, apakah elektron mengalir dari Anda ke keran atau sebaliknya?

<b>Jawab</b>

## Rangkuman

1. Elektrostatis atau listrik statis adalah bagian dari ilmu fisika yang mempelajari tentang fenomena yang ditimbulkan oleh muatan-muatan yang statik (diam) satu sama lain
2. Besar gaya Coulomb berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan dan berbanding lurus dengan hasil kali kedua muatan.
3. Prinsip superposisi menjelaskan bahwa interaksi antara dua muatan tidak dipengaruhi oleh kehadiran muatan lainnya.

## Uji Formatif

### Pilihan Ganda

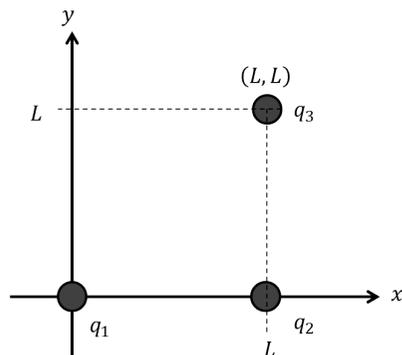
1. Dona melakukan sebuah observasi terhadap tiga balok bermuatan, yaitu A, B dan C. Ia memperhatikan bahwa balok A ditarik oleh balok B, tapi ditolak oleh balok C. Yang terjadi jika balok B didekatkan dengan balok C adalah ...
  - A. kedua balok saling tarik menarik
  - B. kedua balok saling menjauh
  - C. kedua balok tolak menolak
  - D. kedua balok tetap diam
  - E. Informasi yang diperoleh belum cukup untuk menentukan keadaan kedua balok
2. Sebuah muatan  $-2,3 \times 10^{-6}$  mengalami gaya tolak sebesar 0,35 N oleh sebuah partikel yang berjarak 0,20 m terhadapnya. Besar dan jenis partikel tersebut adalah...

A. $6,8 \times 10^{-7}$ C, muatan negatif	D. $1,2 \times 10^{-6}$ , muatan negatif
B. $6,8 \times 10^{-7}$ C, muatan positif	E. $1,2 \times 10^{-6}$ , muatan positif
C. muatan netral	

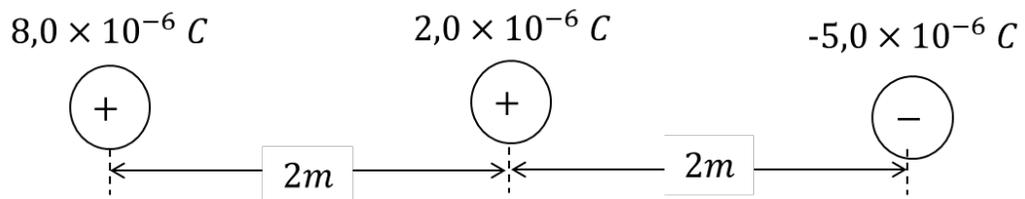
3. Dua muatan positif dengan besar  $q_1 = q_2 = 1 \cdot 10^{-3} C$  berada tepat di sumbu  $x$  (lihat Gambar) dengan  $L = 10 \text{ cm}$ .

Besar gaya yang dialami oleh muatan  $q_3 = -1 \cdot 10^{-6} C$  yang berada pada  $(x, y) = (L, L)$  adalah ....

- A.  $-3,2 \times 10^2 \hat{x} - 1,2 \times 10^3 \hat{y}$
- B.  $-3,2 \times 10^2 \hat{x} - 9,2 \times 10^2 \hat{y}$
- C.  $-4,5 \times 10^2 \hat{x} + 1,3 \times 10^3 \hat{y}$
- D.  $-4,5 \times 10^2 \hat{x}$
- E.  $-4,5 \times 10^2 \hat{x} - 1,3 \times 10^3 \hat{y}$



4. Sebuah muatan  $2,0 \times 10^{-6} C$  berada tepat di antara muatan  $8,0 \times 10^{-6} C$  dan  $-5,0 \times 10^{-6} C$ , seperti gambar di bawah ini.



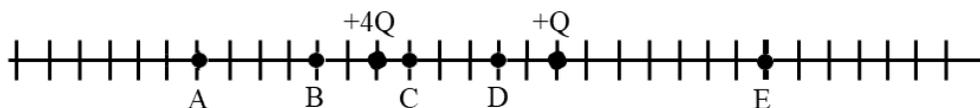
Gaya netto yang dialami oleh muatan  $2,0 \times 10^{-6} C$  adalah ...

- A.  $1,4 \times 10^{-2} N$  ke kiri
- B.  $1,4 \times 10^{-2} N$  ke kanan
- C.  $0 N$ , Diam
- D.  $5,9 \times 10^{-2} N$  ke kiri
- E.  $5,9 \times 10^{-2} N$  ke kanan

5. Muatan titik  $q_A = 5 \text{ nC}$  berada di titik  $P_1(5,4,3)$ . Muatan titik  $q_B = 100 \text{ nC}$  berada di titik  $P_2(2,0,3)$ . Kedua muatan berada dalam keadaan vakum. Jika  $F_A$  adalah gaya yang dialami muatan  $q_A$  dan  $F_B$  adalah gaya yang dialami muatan  $q_B$ , maka pernyataan yang sesuai adalah ....

- A.  $F_A = 1,08\hat{i} + 1,44\hat{j} \mu N$
- B.  $F_B = 1,08\hat{i} + 1,44\hat{j} \mu N$
- C.  $F_A = F_B = 1,08\hat{i} + 1,44\hat{j} \mu N$
- D.  $[F_B] = 1,8 \mu N$  dan  $[F_A]$  tidak dapat didefinisikan.
- E.  $[F_A] = 1,8 \mu N$  dan  $[F_B]$  tidak dapat didefinisikan.

6. Perhatikan gambar berikut



Dua muatan  $+4Q$  dan  $+Q$  diletakkan pada posisi diatas. Apabila sebuah muatan  $-q$  diletakkan diantara keduanya, maka muatan  $-q$  akan mengalami hukum I Newton pada titik ...

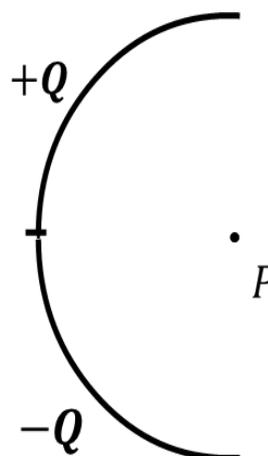
- A. A                      B.B                      C.C                      D.D                      E.E

7. Perhatikan gambar di bawah ini

Jika muatan positif  $+Q$  terdistribusi merata pada bagian atas kawat dan muatan  $-Q$  terdistribusi merata pada bagian bawah kawat, maka arah gaya coulomb yang dialami oleh sebuah muatan  $+q$  yang diletakkan di titik P adalah ...



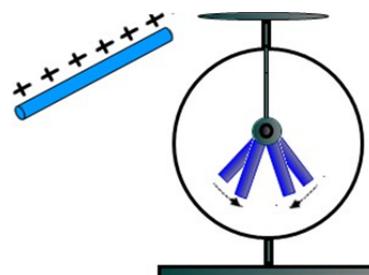
- C. ←  
D. →  
E. nol



8. Perhatikan gambar berikut

Sebuah batang bermuatan positif didekatkan dengan sebuah elektroskop bermuatan. Sebagai hasilnya diamati bahwa kedua daun elektroskop bergerak saling mendekat satu sama lain. Muatan pada elektroskop adalah ...,

- A. Positif  
B. Negatif  
C. Netral  
D. Bergantung pada bahan Elektroskop.  
E. bergantung pada jarak elektroskop dan batang bermuatan

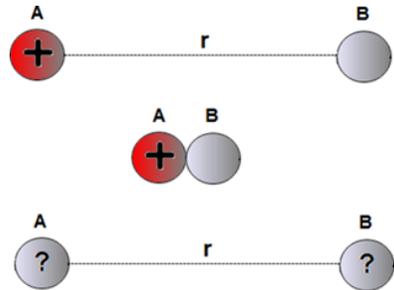


9. Dua bola konduksi identik A dan B memiliki massa yang sama. Kedua bola terpisah pada jarak yang lebih besar dari diameternya. Gaya elektrostatis antara bola A dan B awalnya adalah  $F$ . Bola identik ketiga ditempatkan dengan muatan netto  $q_c = 0$ . Bola C pertama kali dikontakkan (disentuh) dengan bola A, kemudian dengan bola B, dan kemudian dilepaskan. Besar gaya elektrostatis antara bola A dan B saat ini adalah ....

- A.  $\frac{F}{2}$
- B.  $\frac{F}{4}$
- C.  $\frac{3F}{8}$
- D.  $\frac{F}{16}$
- E. 0

10. Perhatikan gambar berikut

Bola A bermuatan positif  $+4Q$  dan bola B netral. Pada awalnya kedua bola terpisah sejauh  $r$ . Kedua bola kemudian disentuhkan satu sama lain dan kemudian dikembalikan pada posisi semula. Besar muatan pada setiap bola adalah ....



- A.  $1/4Q$
- B.  $1/2Q$
- C.  $Q$
- D.  $2Q$
- E.  $4Q$

### Essay

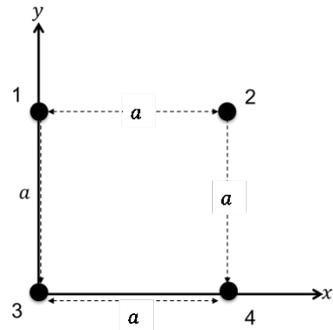
1. Tiga buah muatan titik masing masing sebesar  $2nC$ ,  $4nC$  dan  $-5nC$ . Ketiga muatan masing-masing berada di  $r_1 = 2x + 3y - z$ ;  $r_2 = 2x - y + 2z$ ; dan  $r_3 = -2x + 2y + 2z$ . Tentukan besar dan arah gaya total yang bekerja pada muatan 2!

**Jawab**

--

2. Perhatikan gambar disamping.

Ada empat partikel membentuk sebuah persegi. Muatannya adalah  $q_1 = q_4 = Q$  dan  $q_2 = q_3 = q$ . Apakah ada nilai  $q$  yang membuat gaya elektrostatis total pada masing-masing dari keempat partikel itu nol? Jelaskan!



**Jawab**

## Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

- Griffiths, D. J. (2012). Introduction to electrodynamics 4<sup>th</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Kanginan, Marthen. (2018). Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan Matematika dan Ilmu-Ilmu Alam. Jakarta: Erlangga
- Halliday, Resnick. (2005) Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Effendi, Rustam, dkk. (2007). Medan Elektromagnetika terapan. Jakarta: Erlangga.
- Sailah, Siti, dkk. (2014). Medan Eleltromagnetik, Teori dan contoh soal. Yogyakarta: ANDI.



## Kegiatan Pembelajaran 2 Medan Listrik

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mampu menganalisis kuat medan listrik serta penerapannya dalam berbagai kasus	a. Mahasiswa mampu menjelaskan makna fisis dari medan listrik. b. Mahasiswa mampu memformulasikan medan listrik $E$ dari distribusi muatan diskrit, kontinu dan dipol listrik. c. Mahasiswa mampu menganalisis besar gaya listrik yang dihasilkan oleh medan listrik $E$

### Uraian Materi

#### A. Makna Fisis dan Formulasi Medan Listrik

Kita dapat mengetahui keberadaan sebuah muatan dari keberadaan medan listriknya. Besar medan listrik dinyatakan sebagai kuat medan listrik. Kuat medan listrik adalah besar gaya coulomb yang dialami muatan uji  $Q$  oleh muatan sumber  $q$ .

$$E = \frac{F}{Q} = \frac{k \frac{Qq}{r^2} \hat{r}}{Q} = k \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad 1.5$$

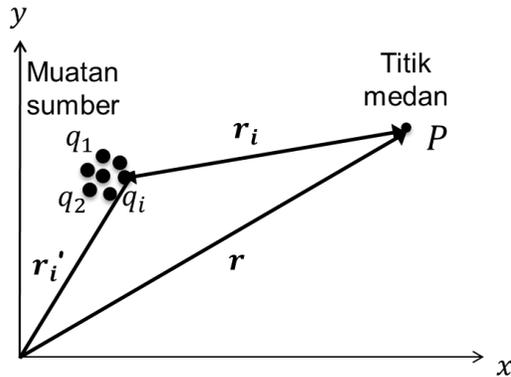
Dengan  $E$  adalah medan listrik dengan satuan  $\frac{N}{C}$  (SI), muatan uji dinyatakan dalam  $Q$  dan muatan sumber dinyatakan dalam  $q$ .

Apabila muatan uji  $Q$  berada di sekitar  $i$  muatan sumber  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_i$  (Gambar 1.6), maka besar medan listrik yang dialami muatan uji  $Q$  dapat dihitung menggunakan prinsip superposisi.

Setiap muatan sumber  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_i$  memiliki jarak sejauh  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_i$  terhadap muatan uji  $Q$  yang berada di titik P. Besar gaya elektrostatik yang dialami muatan uji  $Q$  adalah

$$\begin{aligned}
 \sum \mathbf{F} &= \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 + \dots + \mathbf{F}_i \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1 \cdot Q}{r_1^2} \hat{r}_1 + \frac{q_2 \cdot Q}{r_2^2} \hat{r}_2 + \dots + \frac{q_i \cdot Q}{r_i^2} \hat{r}_i \right) \\
 &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{r_1^2} \hat{r}_1 + \frac{q_2}{r_2^2} \hat{r}_2 + \dots + \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i \right) \quad 1.6
 \end{aligned}$$

Gambar 1. 6 Medan listrik dari distribusi muatan sumber



Atau dapat dituliskan dalam bentuk

$$F = Q \cdot E \tag{1.7}$$

Dengan

$$E(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{r_1^2} \hat{\mathbf{r}}_1 + \frac{q_2}{r_2^2} \hat{\mathbf{r}}_2 + \dots + \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \tag{1.8}$$

Persamaan 1.8 digunakan untuk menyatakan besar medan listrik  $E$  dari muatan sumber yang terdistribusi. Perhatikan bahwa medan listrik  $E$  adalah fungsi kedudukan ( $\mathbf{r}$ ) yang bergantung pada kedudukan titik P. Jadi apa sebenarnya makna fisis dari medan listrik  $E$ ?

Medan listrik  $E$  adalah sebuah besaran vektor yang menunjukkan pengaruh suatu muatan terhadap daerah disekitarnya. Medan listrik inilah yang mengakibatkan muatan lain yang berada disekeliling muatan sumber mengalami gaya listrik. Gaya listrik ini kemudian menentukan gerak dari muatan – muatan yang mengalaminya. Dengan demikian bukan muatan sumber yang menolak atau menarik muatan lain, melainkan muatan uji berinteraksi dengan medan yang dihasilkan oleh muatan sumber, sehingga terjadi gaya listrik antara keduanya.

## B. Garis-Garis Medan Listrik

Dari persamaan 1.8 kita telah mempelajari medan listrik secara kuantitatif. Sekarang kita akan mempelajari properti (sifat) dari medan listrik melalui garis – garis medan listrik. Garis- garis medan listrik mendeskripsikan medan listrik secara geometri melalui vektor. Konsep garis medan listrik pertama kali diusulkan oleh Michael Faraday.. Berdasarkan intuisinya, Faraday menjelaskan

bahwa ruang disekitar muatan dipenuhi oleh garis – garis medan listrik. Hubungan antara medan listrik dan vektor medan listrik dijelaskan sebagai berikut:

### 1. Arah garis – garis medan listrik merepresentasikan arah medan listrik.

Garis – garis medan digambarkan dapat berupa garis lurus ataupun garis melengkung yang memiliki arah. Di titik mana pun, arah garis medan menunjukkan arah medan  $E$  yang hanya berlaku di titik itu. Untuk menjelaskan garis-garis medan berdasarkan jenis muatan, digunakan sebuah muatan sumber negatif  $-q$  yang didekati oleh muatan uji positif  $+Q$  (Gambar 1.7). Telah disebutkan sebelumnya bahwa muatan uji tidak bergerak karena ditari atau ditolak oleh muatan sumber. Melainkan gerak muatan uji timbul karena muatan uji berinteraksi dengan medan yang dihasilkan oleh muatan sumber.

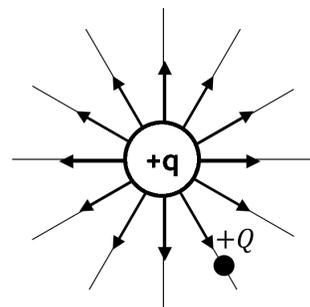
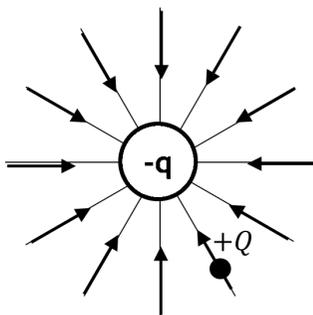
Gambar 1. 7 nteraksi antara muatan sumber ( $-q$ ) dengan muatan uji ( $+Q$ )



Gambar 1. 8 Arah medan listrik dari muatan tunggal

a) Arah medan muatan negatif

b) Arah medan muatan positif



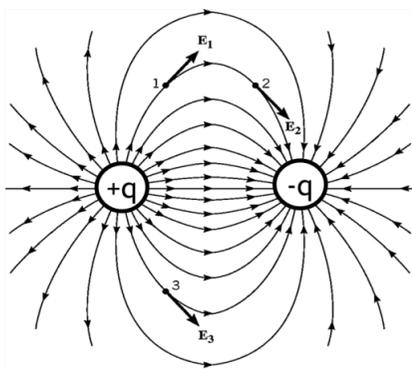
Muatan uji berinteraksi dengan muatan sumber kar menuju muatan sumber  $-q$ . Muatan uji bergerak menuju muatan negatif ( $-q$ ), maka arah medan listrik dari muatan negatif adalah masuk atau *menuju* muatan negatif itu (Gambar 1.8 a). Sedangkan jika muatan sumber diganti dengan muatan positif ( $+q$ ), maka muatan uji akan bergerak *menjauhi* atau keluar dari muatan sumber. Dengan

demikian, arah medan listrik dari muatan positif adalah menjauhi atau keluar dari muatan positif itu (Gambar 1.8. b).

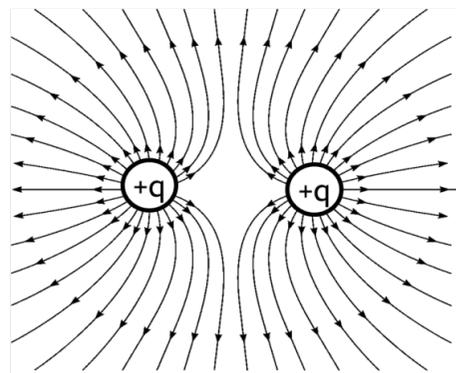
Interaksi antara dua muatan (biasanya disebut dipol) juga dapat dijelaskan menggunakan konsep garis-garis medan listrik (Gambar 1.9). Dari gambar 1.9 dapat dijelaskan kenapa dua muatan berbeda jenis (dipol) akan saling tarik menarik. Hal ini disebabkan karena medan yang ditimbulkan oleh interaksi dua muatan berbeda jenis saling searah, sehingga menimbulkan interaksi berupa gaya tarik menarik.

Gambar 1. 9 Interaksi dua muatan dilihat dari garis-garis medan

**a. Dua muatan berbeda jenis (Dipol)**



**b. Dua muatan sejenis**



Hal sebaliknya dilihat pada dua muatan sejenis. Semua garis-garis medan listrik yang ditimbulkan dari kedua muatan tidak ada yang menyatu, semuanya mengarah keluar dari muatan. Hal ini membuat dua muatan sejenis akan saling tolak menolak ketika didekatkan.

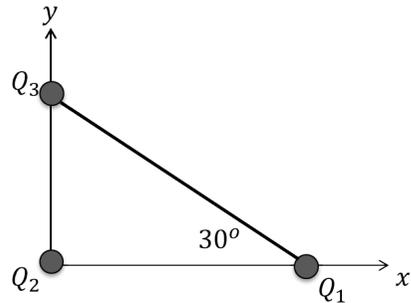
**2. Kerapatan garis-garis medan listrik merepresentasikan kuat medan listrik.**

Garis-garis medan dilukiskan sedemikian rupa sehingga jumlah garis per satuan luas sebanding dengan besar (magnitudo) medan  $E$ . Apabila garis – garis medan digambarkan dalam keadaan rapat satu sama lain, maka menandakan medan  $E$  yang kuat di daerah itu. Sebaliknya, jika garis- garis medan digambarkan saling renggang, maka menunjukkan medan  $E$  yang lemah. Dengan demikian kuat medan tidak ditentukan oleh panjang vektor medan, namun ditunjukkan oleh kerapatan garis-garis gaya medan.

## Contoh Soal

Perhatikan gambar di samping!  
Terdapat tiga partikel bermuatan dengan keterangan sebagai berikut

$$\begin{aligned} q_1 &= +q \\ q_2 &= -q \\ q_3 &= -2q. \end{aligned}$$



Ketiga partikel ini berjarak  $a$  dari titik *origin*  $(0,0)$ . Berapa besar medan listrik netto yang dihasilkan pada titik  $(0,0)$ ?

### Jawab:

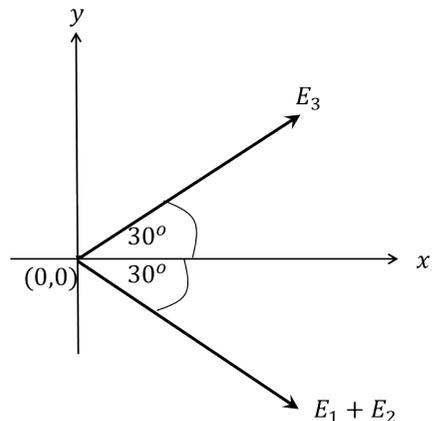
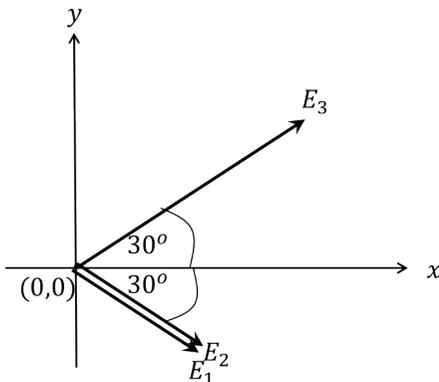
Soal diatas dapat diselesaikan dengan menggambar diagram vektor (Gambar a) yang ditimbulkan masing-masing dari muatan  $q_1$ ,  $q_2$ , dan  $q_3$  terhadap titik . Dari gambar a kemudian diperoleh bahwa medan  $E_1$  dan  $E_2$  searah. Sehingga medan  $E_1$  dan  $E_2$  dapat dijumlahkan terlebih dahulu.

Selanjutnya kita tentukan besar  $E_1$ ,  $E_2$  dan  $E_3$ .

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{a^2} \text{ dan } E_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2q}{a^2}$$

a) Diagram vektor medan listrik

b) Diagram vektor dengan  $E_1 + E_2$



Penjumlahan  $E_1$  dan  $E_2$  adalah

$$E_{1+2} = E_1 + E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2q}{a^2}$$

Karena besar  $E_3$  dan  $E_1 + E_2$  adalah sama, maka dimisalkan

$$E_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2q}{a^2} = E$$

Sehingga resultan medan yang terjadi di titik (0,0) sebesar

$$E_{total} = E_3 + E_{1+2},$$

Dengan menggunakan metode penjumlahan cosinus diperoleh

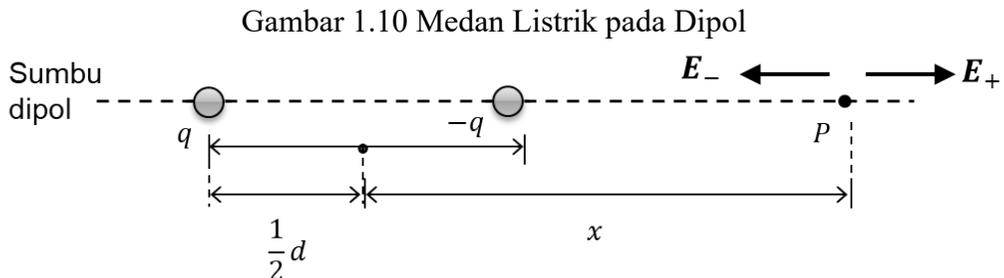
$$E_{total} = \sqrt{E^2 + E^2 + E \cdot E \cdot 2 \cos 60^\circ} = E\sqrt{3}$$

Kemudian substitusi nilai E, sehingga diperoleh

$$E_{total} = E_3 + E_{1+2} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{q}{a^2} \sqrt{3} \frac{N}{C}$$

## Contoh Soal

**Medan listrik dipol.** Dipol adalah sistem yang terdiri dari dua muatan berbeda jenis. Jarak kedua muatan biasanya disebut sebagai panjang atau lengan dipol  $d$ . Tentukan besar medan listrik pada titik  $P$  yang berada sejauh  $x$  dari pusat sumbu dipol (Gambar 1.10). Sumbu dipol adalah sumbu yang menghubungkan kedua muatan.



### Jawab:

Dengan menerapkan prinsip superposisi, maka resultan medan pada titik  $P$  adalah sebesar:

$$E = E_+ + E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q}{\left(x + \frac{1}{2}d\right)^2} - \frac{q}{\left(x - \frac{1}{2}d\right)^2} \right)$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{x^2} \left[ \left(1 + \frac{1}{2} \frac{d}{x}\right)^{-2} - \left(1 - \frac{1}{2} \frac{d}{x}\right)^{-2} \right] \quad 1.9$$

Medan listrik yang dicari biasanya adalah pada jarak yang sangat jauh dari dipol ( $x \gg d$ ). Pada jarak yang sangat jauh, nilai  $\frac{d}{2x}$  menjadi lebih kecil dari 1 atau

$\frac{d}{2x} \ll 1$ . Kedua suku di dalam kurung dalam persamaan 1.9 kemudian dapat diekspansi menggunakan ekspansi binomial sehingga diperoleh:

$$\left[ \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{2d}{x(1!)} + \dots \right) - \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{2d}{x(1!)} + \dots \right) \right]$$

Maka

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{x^2} \left[ \left( 1 + \frac{d}{x} + \dots \right) - \left( 1 - \frac{d}{x} + \dots \right) \right] \quad 1.10$$

Suku-suku yang tidak dituliskan dalam persamaan 1.10 adalah suku-suku yang memiliki pangkat semakin tinggi. Seiring kenaikan pangkat tersebut maka komponen  $\frac{d}{x}$  akan semakin kecil, sehingga tidak perlu dituliskan. Maka aproksimasi dari besar medan listrik dipol dari jarak  $x$  yang sangat jauh adalah

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{x^2} \frac{2}{dx} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qd}{x^3} \quad 1.11$$

Selanjutnya didefinisikan **momen dipol listrik** ( $\mathbf{p}$ )

$$\mathbf{p} = qd \quad 1.12$$

Sehingga persamaan 1.11 dapat ditulis ulang menjadi

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p}}{x^3} \quad 1.13$$

Persamaan 1.13 adalah medan listrik total pada sebuah titik yang jauh dari sumbu pusat dipol.

## C. Medan Listrik pada Muatan Kontinu

Untuk menentukan medan listrik dari muatan kontinu, kita harus membagi distribusi muatan kedalam elemen muatan tak hingga  $dq$  (persamaan 1.9) yang dapat dianggap sebagai muatan titik. Sehingga pada muatan sumber yang terdistribusi kontinu pada sebuah daerah, maka medan listrik total yang dihasilkannya dapat diperoleh dengan mengubah bentuk sumasi dari persamaan 1.8 menjadi bentuk integral sebagai berikut:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{1}{r^2} \hat{\mathbf{r}} dq \quad 1.14$$

Jenis muatan yang terdistribusi kontinu (muatan kontinu) berdasarkan geometrinya diberikan pada Tabel 1

Berdasarkan Tabel 1 dan persamaan 1.9, makabesar medan listrik pada titik P untuk setiap muatan terdistribusi kontinu adalah:

## 1. Muatan garis

Persamaan 1.14 diberi modifikasi dengan mensubstitusi

$$dq = \lambda d\ell$$

Sehingga medan listrik di titik P pada muatan garis dengan panjang  $\mathcal{P}$  adalah

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_P \frac{\lambda(r')}{r^2} \hat{\mathbf{r}} d\ell \quad 1.15$$

Tabel 1. 1 Muatan kontinu dan densitas masing-masing

Jenis Muatan	Definisi	Densitas muatan	Ilustrasi
<b>Muatan garis</b>	Jika muatan terdistribusi dalam bentuk garis $\lambda =$ densitas muatan garis $d\ell =$ elemen panjang Satuan $\lambda = C/m$	$\lambda = \frac{dq}{d\ell}$	
<b>Muatan luas</b>	Jika muatan terdistribusi dalam bentuk luasan. $\sigma =$ densitas muatan luas $dA =$ elemen luas Satuan $\sigma = C/m^2$	$\sigma = \frac{dq}{dA}$	
<b>Muatan ruang</b>	Jika muatan terdistribusi dalam sebuah volume $\rho =$ densitas muatan ruang $d\tau =$ elemen volume Satuan $\rho = C/m^3$	$\rho = \frac{dq}{d\tau}$	

## 2. Muatan luas

Persamaan 1.14 diberi modifikasi dengan mensubstitusi

$$dq = \sigma dA$$

Sehingga medan listrik di titik P pada muatan luas dengan luas permukaan  $\mathcal{S}$  adalah

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma(r')}{r^2} \hat{\mathbf{r}} dA \quad 1.16$$

### 3. Muatan ruang

Persamaan 1.14 diberi modifikasi dengan mensubstitusi

$$dq = \rho d\tau$$

Sehingga medan listrik di titik P pada muatan ruang dengan volume  $\mathcal{V}$  adalah

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\mathcal{V}} \frac{\rho(r')}{r^2} \hat{\mathbf{r}} d\tau \quad 1.17$$

Persamaan 1.17 seringkali juga disebut sebagai persamaan Coulomb, karena muatan yang paling banyak ditemui adalah muatan ruang.

#### Contoh Soal

Tentukan menda listrik yang berada pada jarak  $z$  dari pusat sebuah muatan garis dengan panjang  $L$  yang membawa muatan dengan densitas  $\lambda$

#### Jawab

Besar medan listrik dari sebuah muatan garis dapat ditentukan menggunakan persamaan 1.15. Karena titik P berada sejauh  $z$  dari titik pusat muatan garis, maka kita dapat menggambar diagram gayanya (Gambar 1.10)

Dari gambar 1.10 kita dapat melihat bahwa resultan elemen medan listrik di sumbu  $x$  adalah nol ( $\sum dE_x = 0$ ). Sehingga kita hanya akan menghitung resultan medan listrik di sumbu  $y$ . Karena besar elemen muatan  $dq$  di kedua ujung sama besar dan terpisah pada jarak yang sama besar terhadap titik P, maka kita dapat menggunakan kesimetrisan dalam melakukan perhitungan. Besar resultan elemen medan di sumbu  $y$  adalah:

$$\sum dE_y = 2 \cdot dE \cdot \cos \theta \quad 1.18$$

Dari Gambar 1.10 diperoleh bahwa :

$$\cos \theta = \frac{z}{r} \quad 1.19$$

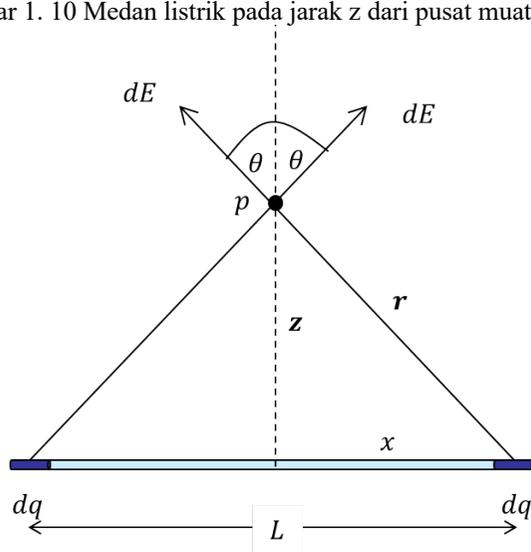
Dan dengan menggunakan teorema pythagoras diperoleh

$$r = \sqrt{z^2 + x^2} \quad 1.20$$

Untuk mencari besar elemen medan listrik dari sebuah muatan garis digunakan

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r^2} \hat{\mathbf{r}} dx \quad 1.21$$

Gambar 1. 10 Medan listrik pada jarak  $z$  dari pusat muatan garis



Besar medan listrik total di titik P dapat dicari menggunakan integral dari persamaan 1.18 dan 1.21

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{\frac{1}{2}L} 2 \cdot \frac{\lambda}{r^2} \hat{r} dx \cdot \cos \theta \quad 1.22$$

Kemudian substitusikan persamaan 1.19 dan 1.20 ke persamaan 1.22

$$E = \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{\frac{1}{2}L} \frac{\lambda z}{(z^2 + x^2)^{3/2}} \hat{r} dx. \quad 1.23$$

Hasil dari integralnya adalah

$$E = \frac{2\lambda z}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{x}{z^2(z^2 + x^2)^{1/2}} \right]_0^{\frac{1}{2}L} \hat{r} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda L}{z \sqrt{z^2 + \frac{1}{4}L^2}} \hat{r} \quad 1.24.a$$

Jika muatan garis panjang tak hingga, maka resultan medan menjadi

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{z} \hat{r} \quad 1.24.b$$

Dengan arah  $\hat{r}$  searah  $z$ .

### Contoh Soal

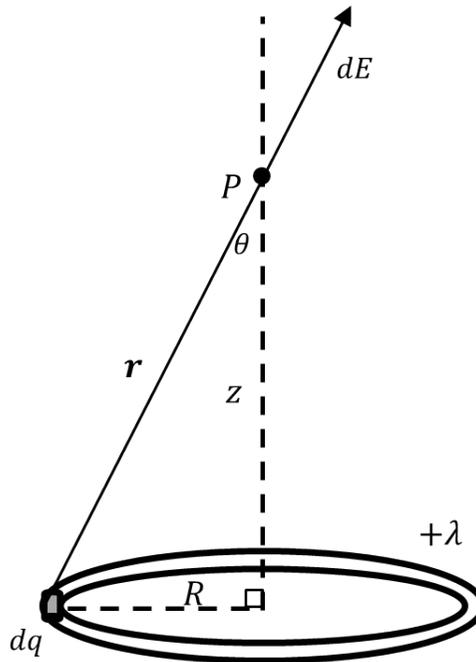
Sebuah cincin tipis berjari-jari  $R$  dengan densitas muatan linear  $\lambda$  bermuatan positif. Bagaimana formulasi dan arah medan listrik  $E$  di titik  $P$  yang berjarak  $z$  dari bidang cincin dan terletak pada sumbu pusatnya?

**Jawab:**

Langkah pertama adalah membagi cincin menjadi komponen elemen muatan . Elemen muatan  $dq$  menyerupai muatan titik yang menghasilkan elemen medan  $dE$ . Setelah itu jumlahkan seluruh elemen medan listrik  $dE$  menggunakan integral. Diagram vektor elemen medan listrik dari cincin diberikan pada Gambar1.11.

Dari Gambar 1.11 kita dapat melihat ada kemiripan penyelesaian dengan soal muatan garis lurus. Total medan listrik yang kita hitung hanya yang berada pada komponen vertikal (searah  $z$ ), karena komponen – komponen medan yang searah dengan bidang cincin daling meniadakan. kita definisikan terlebih dahulu besar medan listrik pada titik P

Gambar 1. 11 Diagram elemen  $dE$  dari muatan kontinu berbentuk cincin



$$E = \int dE \cdot \cos \theta \tag{1.25}$$

Dengan  $\cos \theta = \frac{z}{r}$

dan dengan menggunakan teorema pythagoras diperoleh

$$r = \sqrt{z^2 + R^2} \quad 1.26$$

Kemudian dengan menggunakan persamaan 1.15, maka

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \left( \frac{\lambda}{r^2} \hat{r} d\ell \right) \cos \theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda z}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \hat{r} d\ell \quad 1.27$$

Untuk menjumlahkan semua komponen medan  $dE \cos \theta$  yang sejajar, maka integral pada persamaan 1.27 dilakukan disepanjang cincin (keliling cincin =  $2\pi R$ ).

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda z}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} \hat{r} d\ell = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda z}{(z^2 + R^2)^{3/2}} (2\pi R) \quad 1.28$$

Karena  $\lambda$  adalah densitas muatan garis, dengan  $\lambda = \frac{dq}{d\ell} = \frac{q}{(2\pi R)}$ , maka  $\lambda(2\pi R) = q$ . Sehingga diperoleh

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q z}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad 1.29$$

Persamaan 1.29 adalah formulasi medan listrik pada titik P yang tegak lurus terhadap bidang cincin dan berjarak sejauh  $z$  dari pusat cincin. Apabila titik P berada sangat jauh ( $z \gg R$ ), maka medan listrik di titik P menjadi:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{z^2} \quad 1.30$$

## Contoh Soal

Sebuah cakram plastik berjari-jari  $R$  memiliki densitas muatan permukaan positif seragam sebesar  $\sigma$  pada permukaan atasnya (Gambar 1.12). Bagaimana formulasi medan listrik di titik  $P$  yang berjarak  $z$  dari cakram ini dan terletak pada pusat cakram?

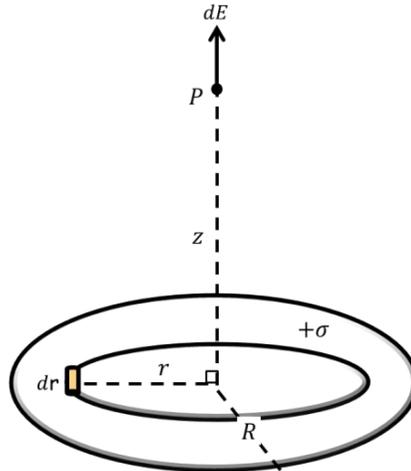
### Jawab

Analog dengan cara mengerjakan contoh soal 1.6 dan contoh soal 1.7, cakram dibagi dahulu kedalam elemen-elemen muatan  $dq$ . Elemen muatan  $dq$  juga merupakan bagian dari elemen jari-jari cakram  $dr$  yang berjarak  $r$  dari pusat cakram. Besar medan listrik dihitung menggunakan komponen  $dE$  pada arah vertikal.

Kita dapat memandang sebuah cakram terdiri dari cincin-cincin yang lebih kecil. Hanya saja, muatan permukaan dari cakram dapat kita nyatakan sesuai dengan Tabel 1.

$$dq = \sigma \cdot dA = \sigma (2\pi r) dr \quad 1.31$$

Gambar 1. 12 Medan Listrik pada Cakram Bermuatan



Elemen  $dq$  adalah elemen muatan dari cincin penyusun cakram, dimana cincin ini berjari-jari  $r$ . Oleh sebab itu kita dapat menggunakan medan listrik dari cincin bermuatan yang ada di persamaan 1.29.

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{z}{(z^2 + R^2)^{3/2}} dq = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{z}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \sigma (2\pi r) dr \quad 1.32$$

Atau

$$dE = \frac{\sigma z}{4\epsilon_0} \frac{(2r) dr}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad 1.33$$

Kemudian kita dapat menghitung besar medan  $E$  dengan mengintegrasikan seluruh  $dE$  mulai dari  $r = 0$  hingga  $r = R$ .

$$E = \int dE = \frac{\sigma z}{4\epsilon_0} \int_{r=0}^{r=R} \frac{(2r) dr}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad 1.34$$

Untuk memperoleh hasil integral, suku  $(z^2 + R^2)^{3/2}$  pada persamaan akan dimodifikasi menjadi bentuk  $\int X^m dX$ . Dengan  $X = (z^2 + R^2)$  dan  $m = \frac{3}{2}$ . Hasil  $dX = (2r)dr$ .

Dengan mengikuti bentuk

$$\int X^m dX = \frac{1}{m+1} (X^{m+1})$$

persamaan 1.34 menjadi

$$E = \frac{\sigma z}{4\epsilon_0} \left[ \frac{(z^2 + r^2)^{-1/2}}{2 / -\frac{1}{2}} \right]_0^R \quad 1.35$$

Atau

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left( 1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right) \quad 1.36. a$$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R^2}{z^2}}} \right) \quad 1.36.b$$

Persamaan 1.36 adalah rumusan medan listrik yang dihasilkan oleh sebuah cakram melingkar rata bermuatan di suatu titik pada sumbu pusatnya.

Jika kita mempertahankan R menjadi tak hingga sementara z tetap terhingga, maka suku kedua pada tanda kurung menjadi mendekati nol. Sehingga persamaan medan listrik pada keping bermuatan dengan jari-jari R dengan z tak berhingga (titip P sangat jauh dari cakram bermuatan adalah

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad 1.37$$

### Tugas

1. Terdapat dua permukaan sferis yang saling konsentris. Didalam sebuah bola berongga terdapat bola lain yang lebih kecil. Muatan positif seragam  $+q_1$  berada pada kulit dalam dan muatan negatif seragam  $-q_2$  berada pada kulit luar. Buatlah sketsa kualitatif garis-garis medan listrik di antara dan di luar dua kulit sferis konduksi yang konsentris. Jika

a.  $q_1 > q_2$

Jawab

b.  $q_1 = q_2$

Jawab

c.  $q_1 < q_2$

Jawab

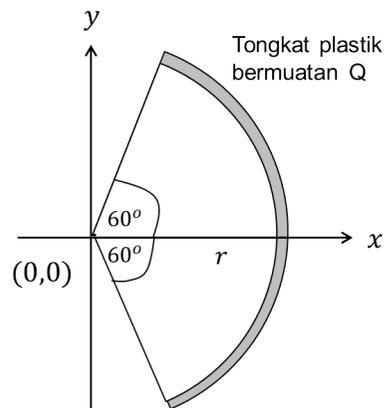
2. Pada jarak berapakah di sepanjang sumbu pusat tegak lurus pada cakram plastik bermuatan seragam yang berjari-jari 0,600 m, besar medan listrik akan sama dengan setengah dari besarnya di pusat permukaan cakram tersebut?

Jawab

3. Perhatikan gambar berikut.

Sebatang plastik memiliki muatan terdistribusi seragam di permukaannya sebesar  $-Q$ . batang ini dibengkokkan membentuk busur lingkaran dengan sudut dalam  $120^\circ$  dan berjari-jari  $r$ .

Batang kemudian diletakkan di sebuah sumbu koordinat, sedemikian sehingga sumbu simetri batang akan berimpit pada sumbu  $x$ . Titik asal koordinat berimpit dengan titik pusat kelengkungan batang yang diberi titik  $P(0,0)$ .



Berapakah medan listrik  $E$  yang diakibatkan batang ini di titik  $P$ ?

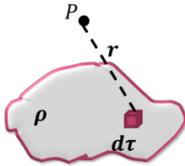
## Rangkuman

1. Medan listrik  $E$  adalah sebuah besaran vektor yang menunjukkan pengaruh suatu muatan terhadap daerah disekitarnya.
2. Garis- garis medan listrik mendeskripsikan medan listrik secara geometri melalui vektor. kuat medan tidak ditentukan oleh panjang vektor medan, namun ditunjukkan oleh kerapatan garis-garis gaya medan.
3. Jenis muatan yang terdistribusi kontinu (muatan kontinu) berdasarkan geometrinya, yaitu muatan garis, muatan bidang dan muatan ruang.

# Uji Formatif

## Pilihan Ganda

1. Perhatikan gambar berikut



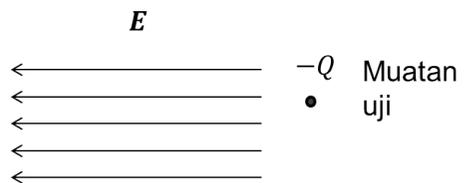
Besar muatan pada sebuah elemen muatan ruang dapat dinyatakan dengan...

- A.  $dq = \lambda d\ell$
- B.  $dq = \sigma dA$
- C.  $dq = \rho d\tau$
- D.  $p = qd$
- E. semua jawaban benar

2. Sebuah bola berongga yang terbuat dari logam memiliki jari-jari  $R$  dan bermuatan  $Q$ . Besar medan listrik di dalam bola adalah ...

- A. nol
- B.  $\frac{KQ}{r}$
- C.  $\frac{KQ}{r^2}$
- D.  $\frac{KQ}{R^2}$
- E.  $\frac{KQ}{R}$

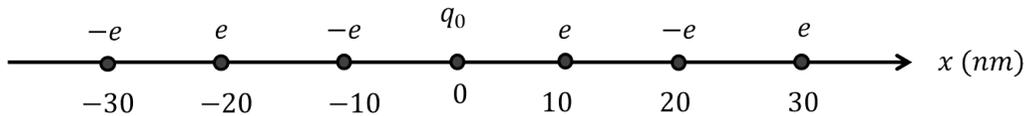
3. Sebuah partikel bermuatan negatif ditempatkan pada sebuah medan listrik seragam yang mengarah ke kiri. Partikel itu awalnya dalam keadaan diam. Jika gravitasi diabaikan, maka yang terjadi adalah...



- A. Partikel uji mengalami percepatan ke arah kanan dan mengalami peningkatan energi kinetik dan energi potensial
- B. Partikel uji mengalami percepatan ke arah kanan dan mengalami peningkatan energi kinetik tapi mengalami penurunan energi potensial
- C. Tidak ada yang terjadi, partikel uji tetap dalam keadaan diam.
- D. Partikel uji mengalami percepatan ke arah kiri, mengalami peningkatan energi kinetik dan tapi mengalami penurunan energi potensial

E. Partikel uji mengalami percepatan ke arah kiri, mengalami peningkatan energi kinetik dan energi potensial

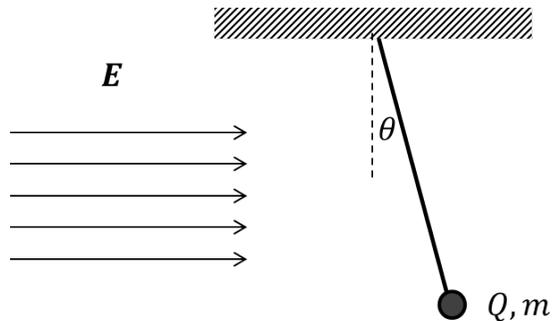
4. Perhatikan gambar berikut.



Dengan menggunakan  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  maka besar medan listrik pada titik origin adalah ...

- A.  $1,2 \times 10^7 \text{ N/C}$  searah  $+\hat{x}$
- B.  $2,5 \times 10^7 \text{ N/C}$  searah  $+\hat{x}$
- C. 0
- D.  $1,2 \times 10^7 \text{ N/C}$  searah  $-\hat{x}$
- E.  $2,5 \times 10^7 \text{ N/C}$  searah  $-\hat{x}$

5. Sebuah bola bermuatan memiliki massa 0,5 g. Bola ini diikat pada sebuah tali dengan panjang  $L=20 \text{ cm}$  dan diletakkan pada daerah yang diberi medan listrik seragam  $E = 1000 \text{ N.C}$ . Saat tali dalam keadaan diam, ternyata tali mengalami simpangan sebesar  $\theta = 15^\circ$  terhadap sumbu vertikal.



Besar muatan netto dari bola adalah ... ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ )

- A.  $-1,3 \times 10^{-6} \text{ C}$
- B.  $-1,8 \times 10^{-6} \text{ C}$
- C.  $1,3 \times 10^{-6} \text{ C}$
- D.  $1,8 \times 10^{-6} \text{ C}$
- E.  $5,0 \times 10^{-6} \text{ C}$

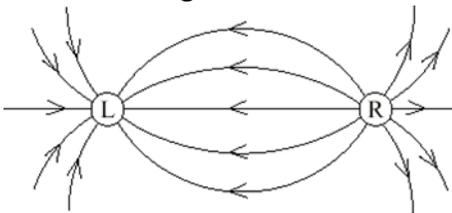
6. Medan listrik adalah ....

- A. Momentum dari muatan uji
- B. Energi kinetik dari muatan uji
- C. Energi potensial dari muatan uji
- D. Gaya elektrostatis yang terjadi pada muatan uji
- E. Besar muatan yang dibawa oleh muatan uji

7. Budi melakukan eksperimen menggunakan muatan uji  $q_0$  dan Anto menggunakan muatan uji  $2q_0$  untuk mengukur besar medan listrik dari sebuah muatan statis. Hasil pengukuran besar medan listrik yang diuji oleh Budi ...

- A. Memiliki besar dan arah yang sama dengan hasil pengukuran Anto
- B. Lebih besar dari pada hasil pengukuran Anto
- C. Lebih kecil daripada hasil pengukuran Anto
- D. Berlawanan arah dengan hasil pengukuran Anto
- E. Bergantung pada percepatan muatan uji

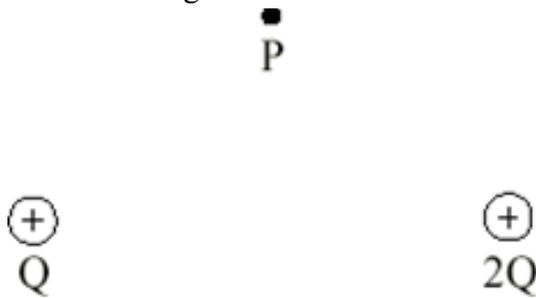
8. Perhatikan gambar berikut



Pernyataan yang benar adalah ...

- A. partikel L bermuatan positif, partikel R bermuatan negatif
- B. partikel L bermuatan positif, partikel R bermuatan positif
- C. partikel L bermuatan negatif, partikel R bermuatan positif
- D. partikel L bermuatan negaif, partikel R bermuatan negatif
- E. Partikel L dan R keduanya netral

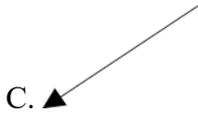
9. Perhatikan gambar berikut



Berdasarkan gambar diatas,vektor yang benar untuk menggambarkan total medan listrik yang dialami titik P adalah ...

A. nol





10. Sebuah cakram bermuatan dengan densitas muatan  $\sigma$  dan memiliki jari jari R ditempatkan pada sebuah ruangan. Besar medan listrik pada titik P yang sangat jauh dari titik pusat cakram bermuatan adalah ...

A.  $E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{z} \hat{r}$

D.  $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$

B.  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{z}$

E.  $E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda L}{z \sqrt{z^2 + \frac{1}{4}L^2}} \hat{r}$

C.  $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}}\right)$

### Essay

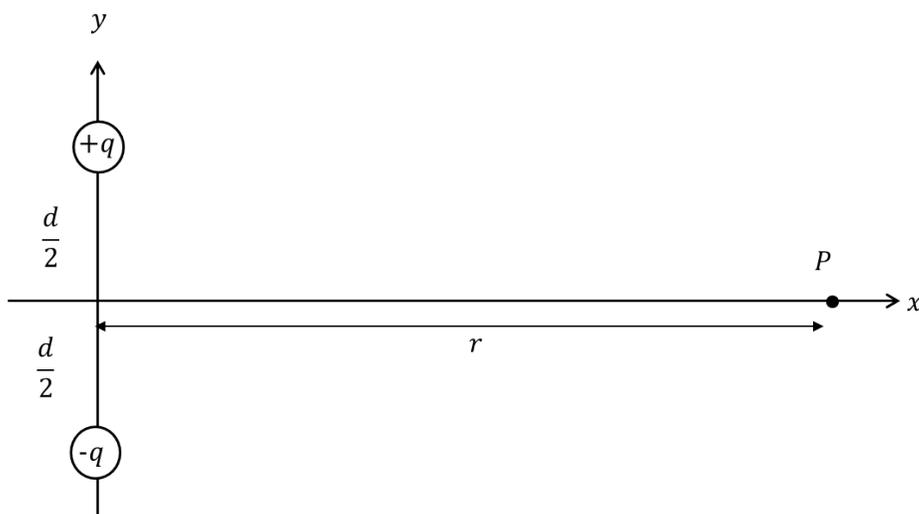
1. Muatan titik 12 nC dan -5 nC berada pada masing-masing titik (6,2,1) m dan (2, 7, 4) m. Berapa besar medan listrik di titik P (4,4,4) m?

<b>Jawab</b>

2. Dua partikel dibuat tetap pada sumbu x. Partikel 1 bermuatan  $q_1 = 2,1 \times 10^{-8}$  C di  $x = 20$  cm dan partikel 2 bermuatan  $q_2 = -4,00 q_1$  di  $x = 70$  cm. di koordinat manakah pada sumbu tersebut, medan listrik netto yang dihasilkan oleh kedua partikel ini sama dengan nol?

<b>Jawab</b>

3. Perhatikan gambar berikut:



Sebuah dipol listrik ditempatkan pada koordinat sesuai gambar. Tentukan:

a. Besar medan listrik dipol di titik P yang terletak pada jarak  $r \gg d$  dari dipol

Jawab

b. arah medan listrik dipol di titik P (relatif terhadap sumbu  $x$ )

Jawab

## Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

- Griffiths, D. J. (2012). Introduction to electrodynamics 4<sup>th</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Kanginan, Marthen. (2018). Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan Matematika dan Ilmu-Ilmu Alam. Jakarta: Erlangga
- Halliday, Resnick. (2005) Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Effendi, Rustam, dkk. (2007). Medan Elektromagnetika terapan. Jakarta: Erlangga.
- Sailah, Siti, dkk. (2014). Medan Eleltromagnetik, Teori dan contoh soal. Yogyakarta: ANDI.



## Kegiatan Pembelajaran 3 Divergensi dan *Curl* dari Medan Listrik

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mampu menganalisis divergensi dan curl dari kuat medan listrik, garis gaya listrik, fluks serta penerapannya dalam berbagai kasus	a. Mahasiswa mampu memformulasikan fluks listrik. b. Mahasiswa mampu menganalisis bentuk garis medan listrik. c. Mahasiswa mampu memformulasikan medan listrik diskrit, kontinu dan dipol listrik menggunakan hukum Gauss.

### Uraian Materi

#### A. Fluks

Dari penjelasan sebelumnya kita telah mengenal garis-garis medan yang digunakan untuk merepresentasikan arah dan besar (magnitudo) medan. Semakin rapat garis-garis medan  $\mathbf{l}$  maka semakin besar medan magnet di daerah itu. Kerapatan garis-garis medan ditunjukkan dengan jumlah garis medan yang melalui sebuah permukaan. Untuk menunjukkan kerapatan garis-garis medan, kemudian digunakanlah konsep fluks medan (Gambar 1.13).

**Fluks medan listrik  $\mathbf{E}$**  (Gambar 1.13) didefinisikan sebagai -jumlah garis medan listrik yang menembus tegak lurus bidang dengan luas  $A$

$$\Phi_E = EA \cos \theta \text{ dengan } \mathbf{E} \perp \mathbf{A} \quad 1.38$$

Dengan  $\Phi_E$  adalah fluks medan listrik  $\mathbf{E}$ . Fluks medan listrik adalah besaran skalar dan satuannya adalah weber (Wb) atau  $Nm^2/C$ .  $E$  adalah medan listrik dan  $A$  adalah luas permukaan yang ditembus fluks. Semakin besar kerapatan (densitas) fluks, maka semakin besar medan listrik pada permukaan itu.

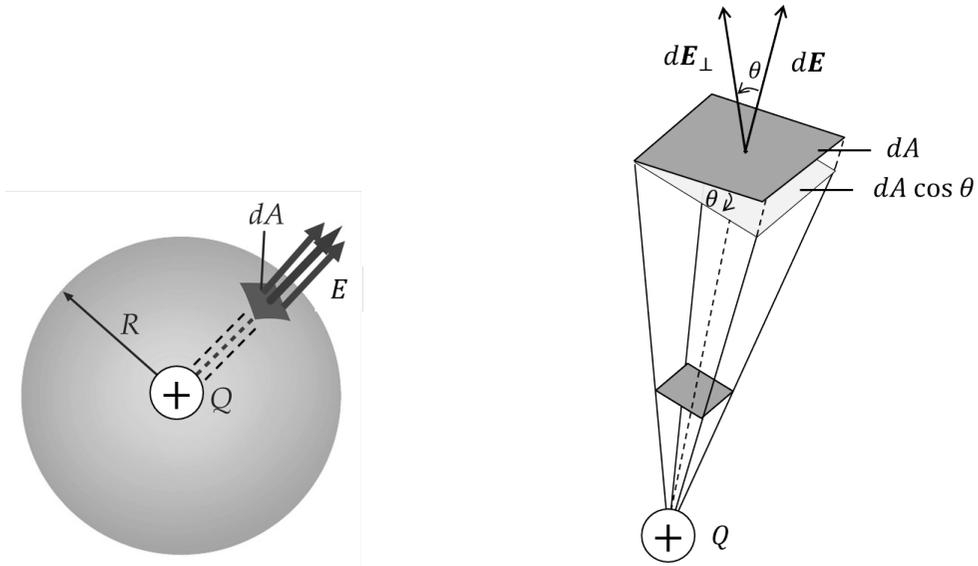
Fluks medan listrik  $\mathbf{E}$  non seragam yang menembus permukaan tertutup  $S$  didefinisikan sebagai

$$\Phi_E = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} \quad 1.39$$

Perhatikan dari persamaan 1.39 bahwa perkalian antara medan listrik dan komponen luas adalah perkalian dot, sesuai dengan definisi fluks sebagai besaran skalar. Fluks bersifat skalar karena fluks menunjukkan kesebandingan jumlah

netto garis-garis medan listrik yang melalui sebuah permukaan. Jumlah netto garis-garis medan ini sebanding dengan magnitudo medan di daerah itu.

Gambar 1. 13 Fluks Medan



a) Fluks medan dari sebuah muatan di dalam bola

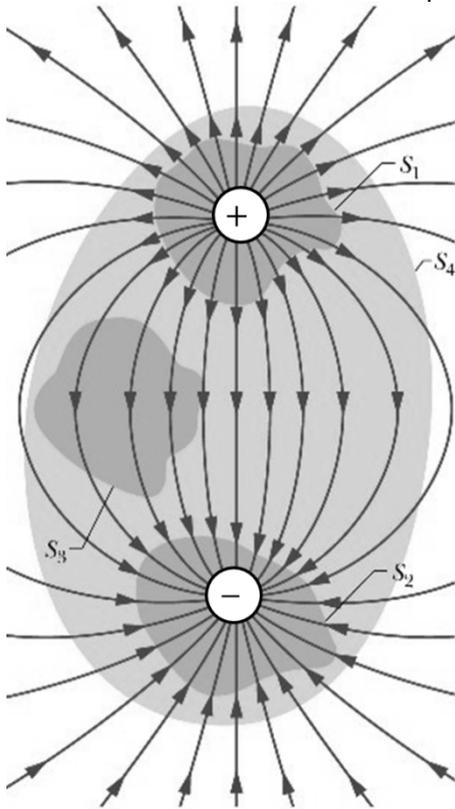
b) Proyeksi luas permukaan agar tegak lurus dengan elemen medan  $dE$  ( $dA \cos \theta$ )

Fluks yang meninggalkan sebuah permukaan tertutup adalah positif, sementara fluks yang masuk kedalam permukaan adalah negatif. Fluks netto diseluruh permukaan adalah nol jika jumlah garis yang memasuki permukaan setara dengan jumlah garis yang meninggalkan permukaan.

## B. Hukum Gauss

Hukum Gauss memiliki peranan penting dalam kelistrikan, karena hukum ini menghubungkan muatan listrik dan medan listrik. Dengan menggunakan Hukum gauss kita dapat menentukan medan listrik dari suatu sistem muatan. Kita juga dapat menggunakan hukum Gauss secara terbalik, yaitu untuk menentukan sistem muatan dari medan listriknya.

Gambar 1. 14 Permukaan-permukaan yang melingkupi sebuah dipol



Permukaan	Besar Fluks
$S_1$	$\Phi_1 = \frac{q}{\epsilon_0}$
$S_2$	$\Phi_2 = \frac{-q}{\epsilon_0}$
$S_3$	$\Phi_3 = 0$
$S_4$	$\Phi_4 = \frac{q + (-q)}{\epsilon_0} = 0$

Hukum Gauss menggunakan fluks dengan perhitungan matematis yang lebih mudah daripada hukum Coulomb. Total flux diseluruh permukaan Gaussian tertutup berbentuk bola (Gambar 1.13) adalah

$$\Phi_E = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} Q \cdot (4\pi r^2) = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} \quad 1.40$$

Berdasarkan persamaan 1.40, kemudian diformulasikanlah bunyi hukum Gauss yaitu Flux netto diseluruh permukaan tertutup setara dengan  $\frac{1}{\epsilon_0}$  kali muatan netto yang melingkupi permukaan tertutup itu.

Namun Hukum Gauss memiliki beberapa keterbatasan, diantaranya: a) hanya berlaku pada sistem muatan yang terdistribusi seragam; b) hanya berlaku pada sistem muatan memiliki simetri; c) hanya berlaku pada permukaan yang menutupi muatan netto. Muatan netto adalah jumlah aljabar semua muatan positif dan negatif yang dilingkupi, nilai muatan netto bisa negatif atau positif.

Jika muatan yang terlingkupi ( $q_{enc}$ ) adalah positif, maka fluks netto mengarah keluar. Jika ( $q_{enc}$ ) adalah negatif mengarah ke dalam (masuk) permukaan Gaussian. Muatan yang berada diluar permukaan gaussian tidak

termasuk kedalam  $q_{enc}$ . Permukaan Gaussian adalah permukaan dimana Hukum Gauss dapat berlaku. Permukaan Gaussian biasanya adalah permukaan yang tegak lurus atau sejajar dengan permukaan yang memiliki kesimetrisan medan listrik. Untuk lebih memahami permukaan Gaussian, perhatikan Gambar 1.14.

Sebuah dipol dan sekelilingnya dilingkupi oleh empat permukaan, yaitu  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  dan  $S_4$ . Permukaan  $S_1$  melingkupi muatan  $+q$  dan permukaan  $S_2$  melingkupi muatan  $-q$ . Besar fluks pada setiap permukaan diberikan oleh tabel disamping gambar garis-garis medan dipol. Fluks  $\Phi_1$  dan  $\Phi_2$  tidak nol, dengan demikian permukaan  $S_1$  dan  $S_2$  adalah permukaan Gaussian. Sementara permukaan  $S_3$  dan  $S_4$  bukan merupakan permukaan Gaussian, karena besar fluks masing-masing adalah nol. Fluks  $\Phi_3$  bernilai nol karena tidak ada muatan yang dilingkupi oleh permukaan  $S_3$ . Fluks  $\Phi_4$  bernilai nol karena muatan netto yang dilingkupi permukaan  $S_4$  adalah nol.

Persamaan Gauss's dapat dibuat dalam bentuk persamaan diferensial dengan menggunakan teorema divergensi / teorema Green / teorema Gauss. Teorema divergensi menurut Kalkulus adalah mengubah bentuk integral luas menjadi bentuk integral volume.

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = \int (\nabla \cdot \mathbf{E}) d\tau \quad 1.41$$

Ruas kiri pada persamaan 1.41 dapat ditulis

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = \iiint d\mathbf{E} \cdot d\mathbf{a}$$

Dimana

$$d\mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} \hat{\mathbf{a}}_x dx + \frac{\partial E_y}{\partial y} \hat{\mathbf{a}}_y dy + \frac{\partial E_z}{\partial z} \hat{\mathbf{a}}_z dz$$

Kemudian masukkan persamaan berikut

$$\frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho d\tau \quad 1.42$$

Karena  $\rho$  berlaku untuk semua volume, maka integralnya adalah:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad 1.43$$

Persamaan 1.43 dikenal juga sebagai Hukum Gauss's dalam bentuk diferensial.

## C. Divergensi dari medan listrik $E$

Divergensi ( $\nabla \cdot \mathbf{v}$ ) adalah sebuah bentuk perkalian dot antara operator vektor derivatif del ( $\nabla$ ) dengan sebuah vektor ( $\mathbf{v}$ ). Secara geometri, divergensi ( $\nabla \cdot \mathbf{v}$ ) dijelaskan sebagai operasi vektor dapat mengukur seberapa besar vektor  $\mathbf{v}$  menyebar (*diverges*) dari sebuah titik. Medan Listrik dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{all\ space} \frac{dq}{r^2} \hat{\mathbf{r}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{all\ space} \frac{1}{r^2} \rho(\mathbf{r}') \hat{\mathbf{r}} d\tau \quad 1.44$$

Divergensi medan listrik adalah

$$\nabla \cdot E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{all\ space} \left( \nabla \cdot \frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2} \right) \rho(\mathbf{r}') d\tau \quad 1.45$$

Divergensi  $\frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2}$  adalah nol di setiap titik, kecuali di titik asal dan hasil integralnya diseluruh volume akan mengandung sebuah konstanta ( $4\pi$ ). Dengan menggunakan syarat fungsi delta Dirac diperoleh

$$\left( \nabla \cdot \frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2} \right) = 4\pi\delta^3(r)$$

Maka

$$\nabla \cdot E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{all\ space} 4\pi\delta^3(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \rho(\mathbf{r}') d\tau = \frac{1}{\epsilon_0} \rho(\mathbf{r}) \quad 1.46$$

Persamaan 1.46 adalah bentuk persamaan Gauss dalam persamaan diferensial. Makna fisis dari persamaan 1.46 menunjukkan divergensi dari medan listrik adalah keberadaan muatan ruang. Artinya medan listrik berasal dari muatan dan besar medan listrik sebanding dengan besar muatan. Semakin besar muatan sumber, maka medan listrik akan menyebar pada daerah yang semakin luas.

Untuk mengembalikan bentuk integral, kita dapat membalik prosedur yang telah kita lakukan, integralkan terhadap volume dan terapkan teorema divergensi, maka diperoleh:

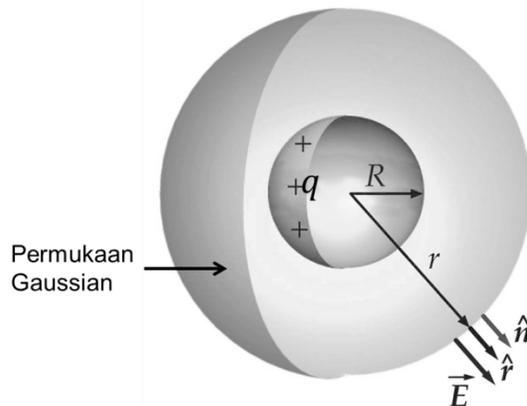
$$\int_{\mathcal{V}} \nabla \cdot \mathbf{E} d\tau = \int_{\mathcal{S}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{\mathcal{V}} \rho d\tau = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} \quad 1.47$$

## Contoh Soal

Sebuah bola berjari-jari  $R$  yang bermuatan seragam di permukaannya. Total muatan yang terdistribusi merata pada volumenya adalah  $Q$ . Tentukan kuat medan pada (a) dalam bola, dan (b) luar bola

## Jawab

Gambar 1. 15 Aplikasi Hukum Gauss pada Simetri Sferis (bola)



Untuk memperkuat ingatanmu, maka kita akan mengulangi kembali bunyi hukum Gauss. Hukum Gauss menyatakan bahwa jumlah fluks netto dalam permukaan tertutup setara dengan  $\frac{1}{\epsilon_0}$  kali muatan netto atau secara matematis dinyatakan:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = \frac{1}{\epsilon_0} q_{enc}$$

Untuk mengaplikasikan hukum gauss pada bola bermuatan  $s$ . Perhatikan sketsa gambar bola bermuatan berikut (Gambar 1.15)

(a) di dalam bola

Sesuai dengan hukum gauss, untuk mengetahui kuat medan di sebuah daerah maka kita perlu mengetahui jumlah muatan yang ditutupi oleh sebuah permukaan gaussian. Permukaan gauss di dalam bola ditunjukkan dengan sebuah kulit yang jari-jarinya lebih kecil dari jari-jari muatan  $r < R$ , sehingga muatan netto yang dilingkupi permukaan gauss diberikan oleh

$$q_{enc} = \left(\frac{r}{R}\right)^3 q$$

Sehingga

$$\begin{aligned}
\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} &= \frac{1}{\epsilon_0} q_{enc} \\
E(4\pi r^2) &= \frac{1}{\epsilon_0} \left(\frac{r}{R}\right)^3 q \\
\mathbf{E} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{r}{R^3} q
\end{aligned}
\tag{1.48}$$

Persamaan 1.48 adalah persamaan medan listrik di dalam bola dengan muatan terdistribusi merata diseluruh volumnya ( $r < R$ )

(b) di luar bola ( $r > R$ )

Lihat gambar 1.15, di luar bola konduktor maka muatan yang terlingkupi oleh permukaan Gauss adalah sama dengan total muatan bola.

$$q_{enc} = q$$

Sehingga

$$\begin{aligned}
\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} &= \frac{1}{\epsilon_0} q_{enc} \\
E(4\pi r^2) &= \frac{1}{\epsilon_0} q \\
\mathbf{E} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}
\end{aligned}
\tag{1.48}$$

Dengan  $r$  adalah jari-jari permukaan Gauss.

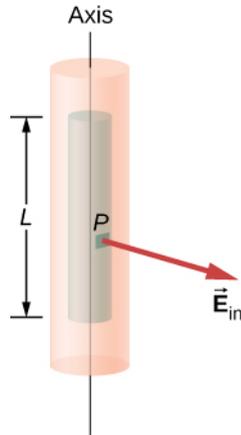
### Contoh soal

Sebuah silinder panjang bermuatan dengan densitas muatan sebanding jaraknya dari sumbu  $\rho = ks$ ,  $k$  adalah konstanta.

Tentukan medan listrik di dalam silinder!

**Jawab:**

Gunakan permukaan Gaussian pada gambar dibawah ini



Total muatan tertutup adalah

$$q_{enc} = \int \rho \, d\tau = 2\pi kL \int_0^s s'^2 \, ds' = \frac{2}{3} \pi kls^3$$

Sehingga

$$\begin{aligned} \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} &= \frac{1}{\epsilon_0} q_{enc} \\ E(2\pi sL) &= \frac{1}{\epsilon_0} \frac{2}{3} \pi kls^3 \\ \mathbf{E} &= \frac{1}{3\epsilon_0} ks^2 \hat{\mathbf{s}} \end{aligned} \quad 1.49$$

### Tugas

1. Tuliskan kembali bunyi dan persamaan hukum Gauss!

<b>Jawab</b>

2. Tentukan medan yang disebabkan oleh :

(a) Selamp permukaan dengan luas tak hingga dengan densitas muatan  $+\sigma$

<b>Jawab</b>

(b) dua lembar paralel tak hingga dengan densitas muatan  $+\sigma$  dan  $-\sigma$ .

<b>Jawab</b>

3. Kerapatan muatan garis yang serba sama sebesar  $20 \text{ nC/m}^2$  terletak pada sumbu  $z$  antara  $z = 1$  dan  $z = 3$ . Carilah besar medan listrik pada titik asal (origin)!

<b>Jawab</b>

## D. Curl dari medan listrik $E$

Curl secara matematis ditunjukkan oleh

$$\text{curl } \mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{v}$$

Dengan  $\mathbf{v}$  harus merupakan sebuah vektor. Secara geometri, curl menunjukkan seberapa besar sebuah vektor mengitari sebuah titik. Medan listrik dapat dinyatakan dalam bentuk berikut

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\text{all space}} \frac{\hat{r}}{r^2} \rho(\mathbf{r}') d\tau = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\text{all space}} \left( \nabla \frac{1}{r} \right) \rho(\mathbf{r}') d\tau \quad 1.50$$

Curl dari medan listrik diberikan oleh

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\text{all space}} \left( \nabla \times \left( \nabla \frac{1}{r} \right) \right) \rho(\mathbf{r}') d\tau \quad 1.51$$

Curl dari gradient selalu nol

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0}$$

Prinsip superposisi menyatakan total medan adalah sumasi vektor dari medan individual

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n$$

Sehingga

$$\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots) = \nabla \times \mathbf{E}_1 + \nabla \times \mathbf{E}_2 + \dots = \mathbf{0} \quad 1.52$$

Persamaan 1.52 menunjukkan bahwa curl medan listrik adalah nol (medan listrik tidak mengitari sebuah muatan).

## Tugas

1. Buktikan bahwa  $\text{curl } E = 0$ , Dengan menggunakan

a. koordinat silinder

<b>Jawab</b>

b. koordinat bola

<b>Jawab</b>

2. Jika vektor rapat fluks listrik dinyatakan dalam

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$$

Dengan satuan vektor rapat listrik  $\mathbf{D}$  dinyatakan dalam  $\frac{C}{m^2}$ . Hukum Gauss juga dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = q$$

Maka tentukan besar densitas muatan ruang di titik  $P(3,4,5)$  untuk vektor rapat fluks

a.  $\mathbf{D} = \frac{a_x}{x^2} \frac{a_y}{y^2} \frac{a_z}{z^2} \mu C / m^2$

<b>Jawab</b>

b.  $\mathbf{D} = \frac{a_\rho}{\rho^2} \mu C / m^2$

<b>Jawab</b>

c. Dengan menggunakan teorema divergensi, tentukan fluks listrik yang dipancarkan dari permukaan bola dengan jari-jari  $r = 2m$  untuk  $\mathbf{D} = \frac{a_x}{x^2} \mu C / m^2$

<b>Jawab</b>

## Rangkuman

1. Fluks medan listrik  $E$  (Gambar 1.13) didefinisikan sebagai -jumlah garis medan listrik yang menembus tegak lurus bidang dengan luas  $A$
2. Hukum gauss: Flux netto diseluruh permukaan tertutup setara dengan  $\frac{1}{\epsilon_0}$ Kali muatan netto yang melingkupi permukaan tertutup itu.
3. Divergensi dari medan listrik adalah besar muatan.
4. *Curl* medan listrik adalah nol (medan listrik tidak mengitari sebuah muatan).

## Uji Formatif

### Pilihan Ganda

1. Sebuah partikel bermuatan  $q$  ditempatkan di dalam sebuah kubus, tapi tidak di pusat kubus. Besar fluks listrik yang keluar dari salah satu sisi kubus adalah ....

A. Nol

D.  $\frac{q}{6\epsilon_0}$

B.  $\frac{q}{\epsilon_0}$

E. Tidak dapat dihitung menggunakan hukum Gauss

C.  $\frac{q}{4\epsilon_0}$

2. Sebuah muatan  $2,0 \mu\text{C}$  berada pada pusat sebuah permukaan Gaussian berbentuk kubus. Adapun panjang sisi kubus Gaussian itu adalah  $9 \text{ cm}$ . Besar fluks listrik diseluruh permukaan gaussian adalah...

A.  $1,7 \times 10^5 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}}$

D.  $2,1 \times 10^5 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}}$

B.  $1,8 \times 10^5 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}}$

E.  $2,2 \times 10^5 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}}$

C.  $1,9 \times 10^5 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}}$

3. Sebuah bola konduksi berongga memiliki jari-jari 0,01 m. Permukaan bola memiliki muatan yang terdistribusi secara merata sebesar  $1,0 \times 10^{-9}$  C. Besar medan listrik di dalam bola adalah ....

- A. 0
- B. 450
- C. 900
- D. 4.500
- E. 90.000

4. Besar fluks listrik pada permukaan  $dA$  dari sebuah medan listrik  $E$  diberikan oleh...

- A.  $E \cdot dA$
- B.  $(E \cdot dA)/q$
- C.  $E \times dA$
- D.  $(E \times dA)/q$
- E.  $E/dA$

5. Terdapat dua bola berongga yang masing masing memiliki jari-jari  $R$  dan  $2R$ . Kedua bola diselimuti oleh muatan yang terdistribusi merata di permukaan masing-masing. Perbandingan besar medan listrik yang terukur pada permukaan masing-masing antara bola yang besar dan kecil adalah...

- A. 1
- B. 2
- C. 4
- D.  $\frac{1}{2}$
- E.  $\frac{1}{4}$

6. Pernyataan yang benar tentang fluks listrik adalah...

- A. Merupakan besaran vektor
- B. Merupakan besaran skalar
- C. Selalu bernilai negatif
- D. Selalu bernilai positif
- E. Tidak memiliki dimensi

7. Sebuah muatan titik menghasilkan fluks listrik sebesar  $-1,0 \times 10^3 \frac{Nm^2}{C}$  pada sebuah permukaan gaussian berbentuk bola. Jari-jari permukaan Gaussian tersebut adalah 10,0 cm. Muatan titik tepat berada pada pusat bola. Jari-jari permukaan gauss kemudian diperbesar hingga dua kalinya. Nilai yang benar tentang besar fluks dan besar muatan titik adalah ...

- A.  $10^3 \frac{Nm^2}{C}$ ,  $-7,85$  nC
- B.  $10^3 \frac{Nm^2}{C}$ ,  $-8,85$  nC
- C.  $10^3 \frac{Nm^2}{C}$ ,  $+8,85$  nC
- D.  $-10^3 \frac{Nm^2}{C}$ ,  $-8,85$  nC
- E.  $10^3 \frac{Nm^2}{C}$ ,  $-6,85$  nC

8. Bentuk permukaan gauss dari sebuah muatan titik dan sebuah muatan garis adalah ...

- A. Silinder dan titik
- B. Silinder dan kubus
- C. Silinder dan bola
- D. Bola dan Silinder
- E. Bola dan kubus

9. Pernyataan berikut yang benar tentang operasi Curl pada medan listrik statis (E) adalah ....

- A. dituliskan dalam  $\nabla \times E$
- B. hasil dari Curl E selalu berupa vektor
- C. Menunjukkan bahwa pengaruh dari medan listrik statis berupa rotasi tak berhingga
- D. menghasilkan  $\frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$
- E. dituliskan dalam  $\nabla \cdot E$

10. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) menghasilkan  $\frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$
- (2) Menunjukkan bahwa medan listrik bersifat menyebar dari satu titik sumber
- (3) Hasil dari div E berupa vektor
- (4) dituliskan dalam  $\nabla \cdot E$

Pernyataan yang benar tentang operasi div pada medan listrik statis (E) adalah ....

- A. (1), (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua jawaban benar

### Essay

1. Sebuah kawat lingkaran dengan muatan garis  $\lambda = 50 \text{ nC/m}$  terdistribusi merata. Jari jari kawat adalah sebesar 10 cm dan terletak di udara bebas. Besar intensitas medan listrik ( E ) pada sumbu z positif di jarak

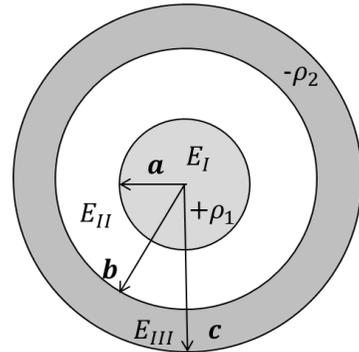
a.  $z = 10 \text{ cm}$

<b>Jawab</b>

b.  $z = 25 \text{ cm}$

<b>Jawab</b>

2. Sebuah bola pejal non konduktif bermuatan positif  $-\rho_1$  dilingkupi oleh permukaan non konduktif yang juga bermuatan  $-\rho_2$ . Bola pejal memiliki jari-jari  $a$  dan permukaan sferis yang melingkupinya berjari-jari dalam  $b$  dan jari-jari luarnya  $c$ . kedua bola (bola pejal dan bola berongga) dalam keadaan konsentrik (sepusat).



Gunakan hukum gauss untuk memformulasikan besar medan listrik pada

a.  $E_I$  pada daerah  $r < a$

<b>Jawab</b>

b.  $E_{II}$  pada daerah  $a < r < b$

<b>Jawab</b>

c.  $E_{III}$  pada daerah  $b < r < c$

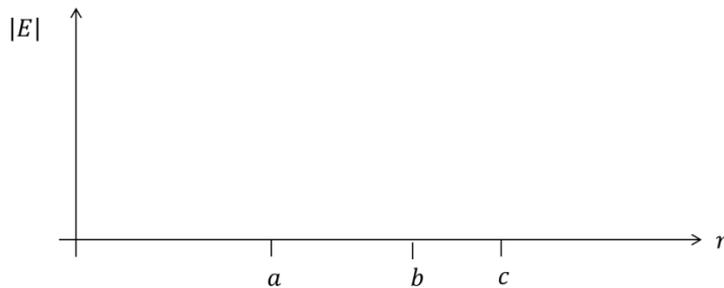
<b>Jawab</b>

d. untuk  $r > c$ , tentukan  $\frac{\rho_1}{\rho_2}$

<b>Jawab</b>

e. Plot besar medan listrik terhadap  $r$  yang dinyatakan dalam  $0, a, b$ , dan  $c$

## Jawab



## Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

- Griffiths, D. J. (2012). Introduction to electrodynamics 4<sup>th</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Kanginan, Marthen. (2018). Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan Matematika dan Ilmu-Ilmu Alam. Jakarta: Erlangga
- Halliday, Resnick. (2005) Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Effendi, Rustam, dkk. (2007). Medan Elektromagnetika terapan. Jakarta: Erlangga.
- Sailah, Siti, dkk. (2014). Medan Eleltromagnetik, Teori dan contoh soal. Yogyakarta: ANDI.



# Kegiatan Pembelajaran 4 Potensial Listrik

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mampu menganalisis potensial listrik serta penerapannya dalam berbagai kasus	a. Mahasiswa mampu menjelaskan makna fisis potensial listrik. b. Mahasiswa mampu menyelesaikan persoalan yang berhubungan dengan potensial listrik secara matematis.

## Uraian Materi

### A. Definisi Potensial Listrik

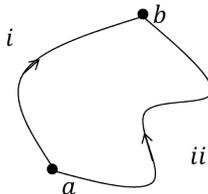
Gaya elektrostatik adalah gaya konservatif sehingga memiliki energi potensial listrik. Energi potensial listrik ini kemudian terkait dengan potensial listrik. Semua gaya konservatif memiliki usaha yang hanya dipengaruhi oleh keadaan awal dan akhir, usaha oleh gaya konservatif tidak memperdulikan lintasannya. Potensial listrik memiliki analogi dengan potensial gravitasi, sehingga potensial listrik ( $V$ ) juga merupakan besaran skalar.

Besar perubahan energi potensial dapat dianalisis dari besar usaha ( $W$ ) yang dilakukan untuk. Saat terjadi perubahan posisi ini, muatan uji mengalami perubahan energi potensial ( $\Delta U$ ) sebesar

$$W = \Delta U = U_f - U_i \quad 1.53$$

Apabila muatan uji  $Q$  mengalami perpindahan dari keadaan awal ( $a$ ) ke keadaan akhir ( $b$ ) terhadap muatan sumber  $q$  (Gambar 1.16), maka besar usaha dapat dinyatakan dalam bentuk integral gaya terhadap komponen perpindahan.

Gambar 1. 16 Perpindahan sebuah partikel dengan dua lintasan berbeda



Kemudian jika gaya dinyatakan dengan :

$$W = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \int_a^b -(\mathbf{E} \cdot Q) \cdot d\boldsymbol{\ell} = -Q \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} \quad 1.54$$

Karena besar muatan uji tidak mengalami perubahan terhadap posisi, maka muatan uji  $Q$  diletakkan sebagai konstanta terhadap hasil integral persamaan 1.54.

$$V = \frac{W}{Q} = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} \quad 1.55$$

## B. Formulasi Potensial Listrik

Karena curl dari medan listrik adalah nol ( $\nabla \times \mathbf{E} = 0$ ). Maka integral garis dari  $\mathbf{E}$  pada lintasan tertutup adalah nol (sesuai dengan teorema Stokes).

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = 0$$

Integral garis dari titik  $\mathbf{a}$  ke titik  $\mathbf{b}$  adalah sama besar untuk semua lintasan (kecuali jika muatan tersebut bergerak dari  $\mathbf{a}$  ke titik  $\mathbf{b}$  melalui lintasan  $i$  dan kemudian kembali menuju titik  $\mathbf{a}$  melalui lintasan  $ii$ , maka  $\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} \neq 0$ ). Karena integral garis dari setiap lintasan adalah konservatif, maka kita dapat mendefinisikan fungsi dari potensial listrik yaitu:

$$V(\mathbf{r}) = - \int_0^{\mathbf{r}} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} \quad 1.56$$

Dengan  $0$  adalah kerangka acuan yang telah ditetapkan sebelumnya dan  $V$  hanya bergantung pada vektor posisi  $\mathbf{r}$ . Simbol  $V$  pada persamaan 1.56 selanjutnya disebut sebagai potensial listrik. Persamaan 1.56 memberikan hubungan antara potensial listrik dengan medan elektrostatik. Kita dapat mengetahui besar potensial listrik jika mengetahui besar medan elektrostatik.

### 1. Potensial listrik oleh muatan titik

Besar potensial listrik dari titik  $\mathbf{a}$  ke titik  $\mathbf{b}$  adalah

$$\begin{aligned} V(\mathbf{b}) - V(\mathbf{a}) &= - \int_0^{\mathbf{b}} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} + \int_0^{\mathbf{a}} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} \\ V(\mathbf{b}) - V(\mathbf{a}) &= - \int_0^{\mathbf{b}} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} - \int_{\mathbf{a}}^0 \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = - \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} \quad 1.57 \end{aligned}$$

Persamaan 2.2 kemudian dapat digunakan untuk menentukan besar potensial yang dihasilkan oleh muatan titik yaitu

$$V_{ab} = V(\mathbf{b}) - V(\mathbf{a}) = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_a^b \frac{q}{r^2} \hat{r} dr \quad 1.58$$

$$V_{ab} = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q \left( \frac{1}{r} \Big|_a^b \right) = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right) \quad 1.59$$

Jika muatan uji berpindah dari titik acuan ( $a = \infty$ ) ke titik tertentu ( $b = r$ ), maka persamaan 2.4 menjadi

$$V_{ab} = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q}{r} \right) \quad 1.60$$

.dengan  $q$  adalah besar muatan sumber  $q$ . Adapun satuan dari potensial adalah newton-meter per coulomb atau Joule / Coulomb atau juga biasa disebut sebagai **Volt**. Dari persamaan 1.60 kemudian dapat diperoleh bahwa **potensial listrik** yang didefinisikan sebagai usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan uji sebesar satu satuan muatan positif dari  $a$  ke  $b$ .



**Potensial listrik** didefinisikan sebagai usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan uji sebesar satu satuan muatan positif dari satu titik ke titik lainnya.

## 2. Potensial oleh distribusi muatan diskrit

Potensial listrik telah didefinisikan sebagai usaha yang diperlukan untuk membawa satu satuan muatan positif dari titik acuan ( $\infty$ ) ke titik tertentu ( $r$ ). Usaha tersebut tidak bergantung lintasannya, demikian juga potensialnya. Besar potensial listrik untuk satu muatan titik telah diformulasikan pada persamaan 1.60. Untuk potensial listrik dari  $n$  muatan titik yang terdistribusi diskrit dapat ditentukan menggunakan prinsip superposisi.

Potensial listrik memenuhi prinsip superposisi, sehingga total potensial listrik yang dialami oleh distribusi muatan listrik diskrit diberikan adalah jumlah seluruh potensial listrik yang diakibatkan oleh masing-masing muatan sumber. Secara matematis dituliskan

$$V = V_1 + V_2 + \dots$$

$$V(\mathbf{r}) = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{|r - r_1|} + \frac{q_2}{|r - r_2|} + \dots + \frac{q_n}{|r - r_n|} \right) \quad 1.61$$

## 3. Potensial listrik oleh distribusi muatan kontinu

Jika masing-masing muatan titik dinyatakan sebagai muatan yang terdistribusi kontinu maka sesuai jenisnya persamaannya menjadi:

a. Distribusi muatan berbentuk garis

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda(r')}{r} \hat{r} d\ell \quad 1.62$$

Dimana  $\lambda(r')d\ell$  menunjukkan sejumlah muatan diferensial  $dq$  yang terletak pada  $\mathbf{r}'$

b. Distribusi muatan berbentuk luasan

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma(r')}{r} \hat{r} da \quad 1.63$$

Dimana  $\sigma(r')da$  menunjukkan sejumlah muatan diferensial  $dq$  yang terletak pada  $\mathbf{r}'$

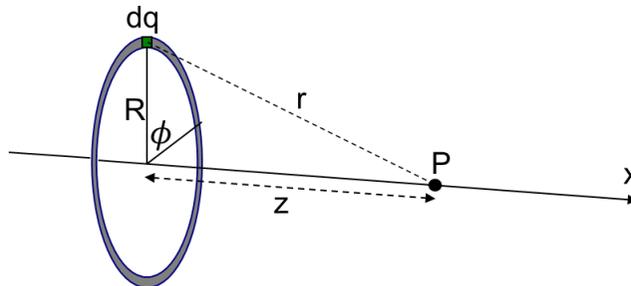
c. Distribusi muatan berbentuk volume

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(r')}{r} \hat{r} d\tau \quad 1.64$$

Dimana  $\rho(r')d\sigma$  menunjukkan sejumlah muatan diferensial  $dq$  yang terletak pada  $\mathbf{r}'$

### Contoh Soal -Potensial Listrik pada cincin dan cakram bermuatan

Hitung potensial di titik A (0,0,10) yang disebabkan oleh distribusi muatan (dalam vakum):



a. Cincin  $\lambda = 5nC/m$ ,  $r = 4$ , dan  $z = 0$

b. Piringan  $\sigma = 2nC/m$ ,  $0 \leq r \leq 4$ ;  $z = 0$

**Jawab**

a. Cincin .  $\lambda = 5nC/m$ ,  $r = 4$ , dan  $z = 0$

gunakan persamaan 2.7 untuk menentukan besar potensial cincin (muatan garis) pada elemen muatan  $dq$

$$dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda d\ell}{r}$$

Dengan

$$r = \sqrt{R^2 + z^2}$$

dengan  $d\ell$  adalah elemen panjang busur lingkaran yang memenuhi

$$d\ell = R d\phi$$

Dan elemen muatan memenuhi

$$\lambda d\ell = \lambda R d\phi$$

Sehingga

$$V = \int dV = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda R}{\sqrt{R^2 + z^2}} d\phi$$

Karena muatan terdistribusi dalam bentuk cincin (lingkaran) maka  $\oint d\phi = 2\pi$

$$V = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda R}{\sqrt{R^2 + z^2}} \oint d\phi = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda R}{\sqrt{z^2 + R^2}} (2\pi) = \frac{1}{2\epsilon_0} \frac{\lambda R}{\sqrt{z^2 + R^2}}$$

$$\boxed{V = \frac{1}{2\epsilon_0} \frac{\lambda R}{\sqrt{z^2 + R^2}}} \quad 1.65$$

Persamaan 1.65 adalah persamaan besar potensial titik yang beradasejauh  $z$  dari pusat bidang muatan garis berbentuk cincin.

Kemudian masukkan besaran-besaran yang telah diketahui nilainya

$$V = -\frac{1}{2\epsilon_0} \frac{5 \times 10^{-9}(4)}{\sqrt{(10^2) + (4^2)}} = 105 \text{ Volt}$$

b. Piringan  $\sigma = 2nC/m$ ,  $0 \leq r \leq 4$ ;  $z = 10$

sesuai dengan persamaan 1.63, maka

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma(r')}{r} \hat{r} da$$

Dengan elemen luas  $da$  dapat dinyatakan sebagai

$$da = r dr d\phi$$

Dan

$$r = \sqrt{r^2 + z^2}$$

Sehingga

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma}{\sqrt{r^2 + z^2}} r dr d\phi$$

Atau

$$\begin{aligned} V(\mathbf{r}) &= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{r=4} \int_0^{2\pi} \frac{\sigma}{\sqrt{r^2 + z^2}} r dr d\phi \\ &= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{r=4} \int_0^{2\pi} \frac{(2 \times 10^{-9})}{\sqrt{r^2 + z^2}} r dr d\phi \\ &= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} (2 \times 10^{-9}) (2\pi) \int_0^{r=4} \frac{r}{\sqrt{r^2 + z^2}} dr \end{aligned}$$

Gunakan  $X = (r^2 + z^2)$  dan  $m = -\frac{1}{2}$  serta  $2r dr = \frac{1}{2} dX = r dr$

$$\int \frac{1}{2} X^m dX = \frac{1}{2} \int X^m dX = \frac{1}{2} \frac{X^{m+1}}{m+1}$$

kemudian

$$\begin{aligned} \int \frac{2r}{\sqrt{r^2 + z^2}} dr &= \frac{1}{2} \frac{\sqrt{r^2 + z^2}}{\frac{1}{2}} = \sqrt{r^2 + z^2} \\ V(\mathbf{r}) &= \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left| \sqrt{r^2 + z^2} \right|_0^r = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} (\sqrt{r^2 + z^2} - z) \end{aligned}$$

$$\boxed{V(\mathbf{r}) = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} (\sqrt{r^2 + z^2} - z)} \quad 1.66$$

Persamaan 1.66 adalah persamaan besar potensial yang berada sejauh  $z$  dari pusat bidang cakram bermuatan.

Masukkan angka untuk menyelesaikan permasalahan diatas menggunakan persamaan 1.66:

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{10^{-9}}{8,854 \times 10^{-12}} \left| \sqrt{r^2 + 10^2} \right|_0^4 = 87 V$$

#### 4. Hubungan medan listrik dan potensial listrik

Persamaan 1.58 juga dapat kita tuliskan dalam bentuk gradien menjadi

$$V(b) - V(a) = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \int_a^b (\nabla V) \cdot d\boldsymbol{\ell} \quad 1.67$$

Dari persamaan 1.59 kita peroleh bahwa integran dua persamaan paling kanan adalah setara, atau dapat kita tuliskan

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad 1.68$$

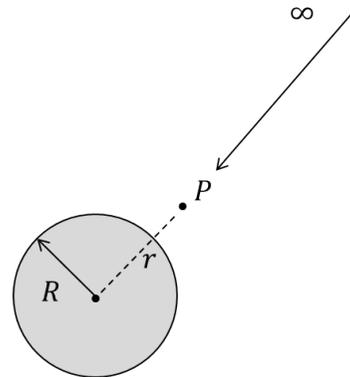
Persamaan 1.68 adalah persamaan 1.55 dalam bentuk gradien. Makna fisis dari persamaan 1.68 adalah bahwa medan listrik merupakan hasil gradien dari potensial skalar. Dari persamaan 1.68 kita memperoleh hubungan antara potensial listrik (skalar) dan medan listrik (vektor). Sehingga kita dapat menentukan medan listrik, jika diketahui medan listrik, dan sebaliknya.

#### Contoh Soal-Potensial bola berongga jika E diketahui

Tentukan besar potensial listrik di dalam sebuah bola berongga yang berjari-jari  $R$ , yang membawa muatan terdistribusi merata di permukaannya sebesar  $q$ . Tentukan titik acuan dari tak hingga.

#### Jawab

Berdasarkan hukum Gauss, maka besar medan listrik diluar bola adalah sebesar



$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \hat{r} dr$$

a. Di dalam bola ( $r < R$ )

Berdasarkan hukum Gauss, muatan yang terlingkupi di dalam bola adalah nol, sehingga medan listrik di dalam bola adalah nol. Untuk mencari besar potensial di dalam bola, maka kita harus membagi integral ke dalam dua bagian, yaitu

$$V(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\infty}^R \frac{q}{r^2} dr - \int_R^r (0) dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \Big|_{\infty}^R + 0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R}$$

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R} \tag{1.69}$$

Perhatikan bahwa potensial di dalam bola berongga bermuatan tidak nol, meskipun medan listrik di dalam bola adalah nol. Potensial di dalam bola adalah konstan sesuai persamaan 1.69.

b. Di luar bola ( $r > R$ )

Di luar bola, besar muatan yang terlindungi oleh permukaan gauss adalah  $q$ , sehingga

$$V(\mathbf{r}) = - \int_0^r \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\infty}^r \frac{q_{enc}}{r^2} \cdot \hat{\mathbf{r}} \, dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{enc}}{r^2} \Big|_{\infty}^r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{enc}}{r}$$

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{enc}}{r} \tag{1.70}$$

**Contoh Soal - Potensial dari muatan garis**

Tentukan usaha yang diperlukan untuk memindahkan sebuah muatan garis dari titik  $b$  ke  $a$ !

**Jawab**

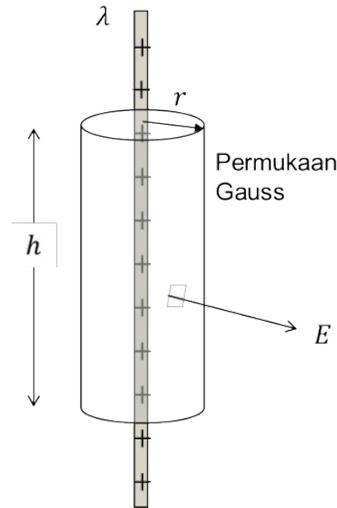
Elemen muatan garis dinyatakan dengan  $dq = \lambda \, d\ell$

Besar usaha yang diperlukan untuk memindahkan sebuah muatan garis didefinisikan sebagai potensial listrik.

$$V_{ba} = \frac{W}{Q} = - \int_b^a \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell}$$

Untuk menyelesaikan persamaan diatas, Pertama-tama kita cari dahulu besa rmedan listrik yang dihasilkan oleh sebuah muatan garis dengan panjang tak hingga menggunakan Hukum Gauss (Gambar 1.17)

Gambar 1. 17 Sebuah muatan garis yang diselubungi permukaan gauss silinder



Permukaan Gauss yang digunakan harus sesuai dengan masalah (kasus/soal) yang diberikan. Permukaan Gauss yang dipilih untuk melingkupi sebuah muatan garis adalah permukaan gauss berupa silinder. Silinder ini satu sumbu (koaksial) dengan muatan garis. Karena permukaan Gauss adalah permukaan tertutup, maka kita menyertakan juga tutup dan alas dari silinder sebagai permukaan.

Sebuah muatan garis akan memiliki medan listrik yang arahnya serba sama  $E$  dengan arah radial keluar dari selimut tabung (Gambar 1.17). Besar medan listrik ini adalah

$$\int E \cdot da = E (2\pi r h) = \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{\lambda h}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \tag{1.24.b}$$

Persamaan 1.24.b pada Kegiatan Pembelajaran 1.2 adalah besar medan listrik  $E$  yang dihasilkan oleh sebuah muatan garis dengan panjang tak hingga. Persamaan 1.24.b kemudian kita gunakan untuk menentukan besar potensial pada muatan garis dengan panjang tak hingga.

$$V_{ba} = - \int_b^a E \cdot d\ell = - \int_b^a \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \cdot d\ell = - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_b^a \frac{1}{r} \cdot d\ell = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{a}{b} \tag{1.71}$$

Jika  $b > a$  maka  $V_{ba} > 0$  dan jika  $b < a$  maka  $V_{ba} < 0$ .

## Tugas

1. Apa yang dimaksud dengan potensial listrik ? Jelaskan!

Jawab

2. Tuliskan kembali persamaan potensial listrik pada sebuah titik P yang berjarak  $r$  dari sebuah muatan titik (lengkapi dengan keterangan dari setiap simbol nya )

Jawab

3. Tuliskan kembali persamaan hubungan antara potensial listrik dengan energi potensial listrik

Jawab

4. Tuliskan kembali persamaan besar potensial listrik pada bola pejal bermuatan, pada sebuah titik yang berada di

a. di dalam bola

Jawab

b. di luar bola

Jawab

5. Tuliskan kembali persamaan besar potensial titik yang beradasejauh  $z$  dari a. pusat bidang muatan garis berbentuk cincin.

Jawab

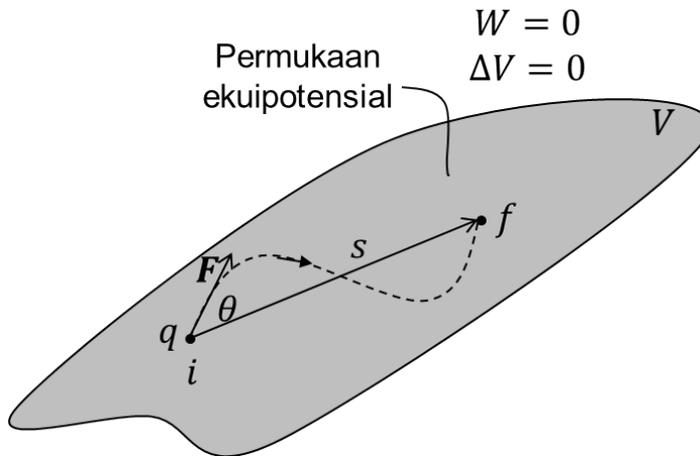
b. pusat bidang muatan berbentuk cakram

Jawab

## C. Gradien Potensial dan Permukaan Ekuipotensial

Titik-titik berdekatan yang memiliki potensial sama akan membentuk sebuah permukaan ekuipotensial. Permukaan ekuipotensial adalah permukaan imajiner yang memiliki potensial yang sama besar. Apabila muatan melakukan perpindahan pada permukaan ekuipotensial, maka usaha yang dilakukannya adalah nol (Gambar 1.18)

Gambar 1. 18 Usaha pada bidang ekuipotensial adalah nol



Berdasarkan persamaan 1.55, maka kita dapat menuliskan persamaan komponen potensial listrik dalam bentuk

$$dV = -d\mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -dE(d\ell) \cos \theta \quad 1.72$$

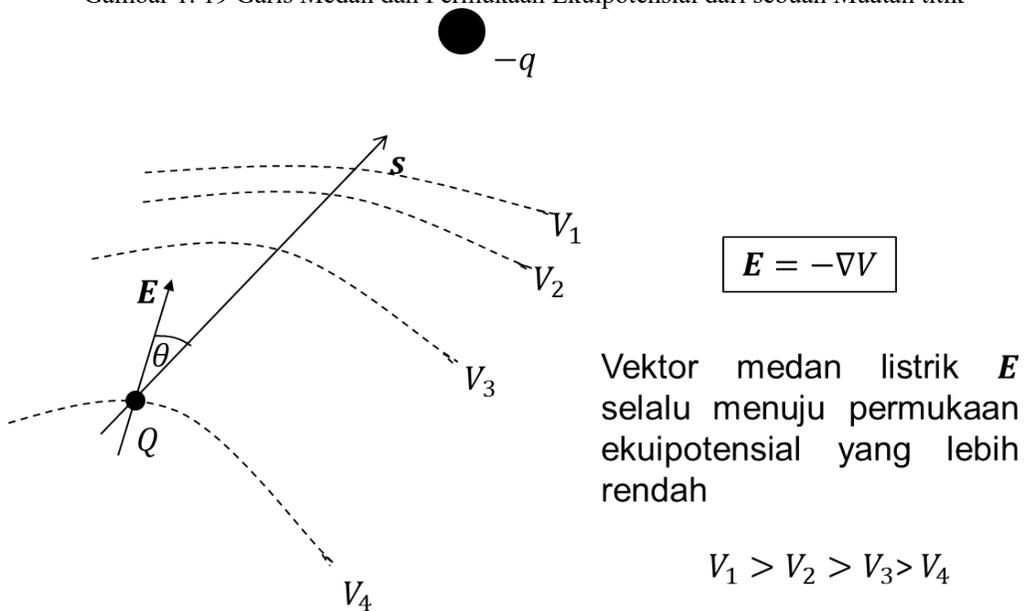
Untuk elemen panjang yang sangat kecil maka kita dapat menanggapi besar medan listrik adalah seragam.

$$-E \cos \theta = \frac{dV}{d\ell}$$

Persamaan 1.72 akan maksimal jika  $\cos \theta = 1$ , artinya untuk sebuah medan listrik seragam, maka permukaan ekuipotensialnya berupa sekumpulan bidang-bidang yang tegak lurus garis medan. Hubungan antara medan listrik dengan permukaan ekuipotensial diilustrasikan pada Gambar 1.18. Hubungan medan listrik dan potensial listrik secara matematis diberikan oleh:

$$\mathbf{E} = -\left. \frac{dV}{d\ell} \right|_{max} = -\nabla V \quad 1.73$$

Gambar 1. 19 Garis Medan dan Permukaan Ekuipotensial dari sebuah Muatan titik



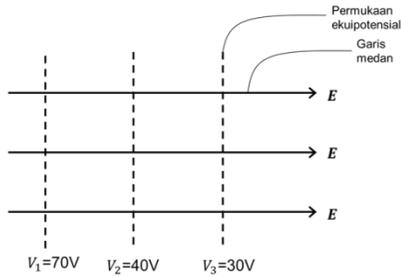
Persamaan 1.73 memiliki makna fisis yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Besar intensitas medan listrik ( $\mathbf{E}$ ) sama dengan harga maksimum laju perubahan potensial terhadap jarak.
- Harga maksimum tersebut diperoleh pada saat arah pertambahan lintasan berlawanan dengan arah  $\mathbf{E}$ .
- Medan potensial ditunjukkan dengan permukaan ekuipotensial.

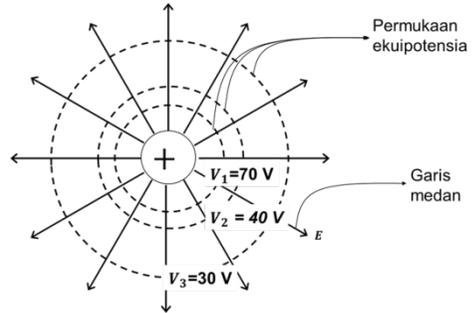
Pada setiap titik, Komponen medan listrik  $\mathbf{E}$  tegak lurus dengan permukaan ekuipotensial dengan arah menuju permukaan yang lebih kecil harga potensialnya. Dapat juga dikatakan bahwa permukaan ekuipotensial terjadi jika  $\Delta \ell \perp \mathbf{E}$  sehingga  $\Delta V = -E \cdot \Delta \ell = 0$ . Pernyataan diatas dapat digambarkan dalam sebuah ilustrasi (Gambar 1.19). Dari Gambar 1.18 dan 1.19 menunjukkan bahwa medan listrik harus tegak lurus terhadap permukaan ekuipotensial yang bernilai +30, +40 dan +70.

Gambar 1. 20 Medan Listrik E selalu mengarah ke Potensial yang semakin kecil

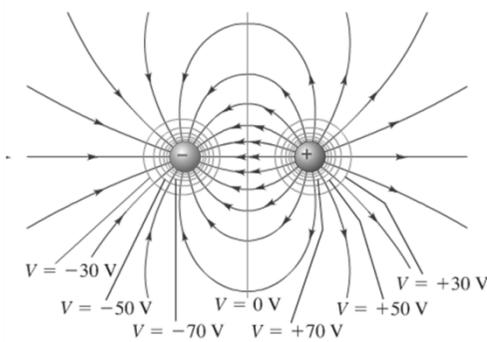
**a. Pada medan listrik homogen**



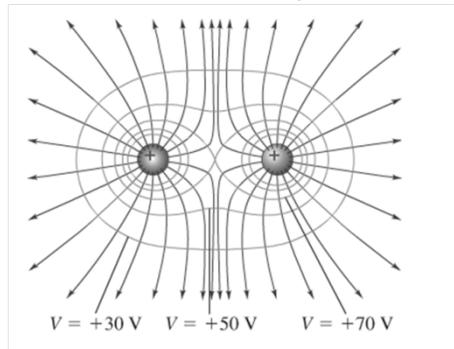
**b. Pada muatan titik**



**c. Pada dipol**



**d. Pada dua muatan sejenis**



## D. Persamaan Poisson dan Persamaan Laplace

Medan listrik dapat dituliskan dalam bentuk gradien dari potensial skalar

$$\mathbf{E} = -\nabla V$$

Dengan demikian, muncul pertanyaan, bagaimana bentuk persamaan fundamental dari medan listrik  $\mathbf{E}$ ?

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \text{ dan } \nabla \times \mathbf{E} = 0$$

Bagaimana jika divergensi dan curl  $\mathbf{E}$  dalam bentuk beda potensial? Kita substitusikan  $\mathbf{E}$  sebagai gradien  $V$  kedalam divergensi, sehingga diperoleh

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \nabla \cdot (-\nabla V) = -\nabla^2 V \tag{1.74}$$

Persamaan 1.74 menunjukkan bentuk persamaan Laplacian. Saat persamaan 1.74 dihubungkan dengan bentuk diferensial dari hukum Gauss (sesuai teorema divergensi), maka diperoleh

$$\boxed{\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0}} \tag{1.75}$$

Persamaan 1.74 kemudian disebut sebagai persamaan Poisson. Apabila kita melakukan gradien berorde dua terhadap fungsi potensial, maka kita akan memperoleh densitas muatan  $\rho$  ( $\rho$  dibaca: rho).

Pada daerah yang tidak memiliki muatan, maka  $\rho = 0$ , **persamaan Poisson** tereduksi menjadi **persamaan Laplace**.

$$\nabla^2 V = 0 \qquad 1.76$$

Persamaan 1.76 akan lebih banyak dieksplorasi pada Modul 2

### Tugas

1. Medan listrik adalah negatif dari gradien potensial listrik

a. Tuliskan kembali persamaan hubungan antara medan listrik E dengan potensial listrik dalam bentuk gradien!

Jawab

b. jelaskan makna fisisnya !

Jawab

3. Bidang ekuipotensial

a. Apa yang dimaksud dengan bidang ekuipotensial ?

Jawab

b. bagaimana hubungan antara bidang ekuipotensial dengan garis- garis medan magnet ?

Jawab

c. Buatlah ilustrasi tentang hubungan bidang ekuipotensial dengan garis-garis medan magnet pada :

### 1. Muatan titik bermuatan negatif

Jawab

### 2. dipol

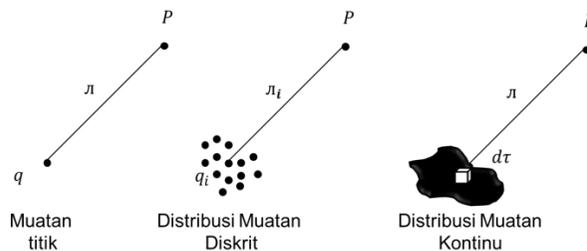
Jawab

## E. Potensial dari Distribusi Muatan Terlokalisasi

Persamaan 1.56 memberikan kita cara untuk menentukan potensial listrik  $V$  jika diketahui medan elektrostatis  $E$ . Meskipun dalam pemecahan kasus, lebih banyak diarahkan untuk mencari berapa besar  $E$ . Jika demikian, maka kita harus menentukan persamaan potensial listrik terlebih dahulu, baru kemudian kita cari  $E$  melalui gradien  $V$ . Untuk menentukan persamaan  $V$ , kita ambil sekumpulan muatan yang terdistribusi pada daerah tertentu. Muatan yang terdistribusi pada daerah tertentu ini biasa disebut juga sebagai distribusi muatan terlokalisasi.

Dari kasus . soal biasanya telah diberikan nilai densitas muatan yang dinyatakan dalam  $\rho$  (baca: rho) dan kita diminta untuk menentukan  $V$ . Hubungan antara potensial listrik  $V$  dengan densitas muatan ruang  $\rho$  telah diberikan pada persamaan Poisson (Persamaan 1.75). Tapi persamaan 1.75 ini kita gunakan jika kita telah mengetahui potensial listriknya ( $V$ ) baru kemudian kita ingin menentukan besar densitas muatan  $\rho$ . Nah, untuk melakukan yang sebaliknya, yaitu menentukan potensial listrik jika diketahui distribusi muatan, maka kita akan melakukan menggunakan invers dari persamaan Poisson ini.

Gambar 1. 21 Muatan titik, distribusi muatan diskrit, dan distribusi muatan kontinu



Ambil sebuah muatan titik pada titik origin (yang dimaksud dengan titik origin adalah titik 0,0). Kemudian kita atur agar titik awal  $O$ (reference point) terdapat di tak hingga. Artinya muatan uji  $Q$  digerakkan dari titik tak hingga menuju titik  $P$  (Gambar 1.21 ) yang berjarak  $r$  terhadap muatan sumber. Maka besar potensial listrik di titik  $P$  yang disebabkan oleh sebuah muatan titik  $q$  yang berada di titik origin adalah

$$V(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\infty}^r \frac{q}{r'^2} dr' = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r'} \Big|_{\infty}^r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

1.77

Persamaan 1.77 adalah bentuk persamaan potensial listrik dari sebuah muatan titik secara umum. Dengan  $r$  adalah jarak antara muatan terhadap  $\mathbf{r}$  (Gambar 1.21)

Tanda negatif yang digunakan untuk menghasilkan persamaan 1.77 diatas menunjukkan bahwa arah medan listrik dari sebuah muatan positif selalu mengarah keluar. Kita dapat menggunakan perumpamaan daerah yang bermuatan positif sebagai “bukit” dan daerah yang bermuatan negatif sebagai “lembah”. Sehingga “aliran air” yang berada di “bukit” akan selalu cenderung untuk meninggalkan puncaknya dan menuju ke “lembah” yang lebih rendah. Dengan menggunakan prinsip superposisi, maka besar potensial dari sekumpulan muatan adalah

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i}$$

1.78

Dan untuk sebuah muatan yang terdistribusi kontinu, besar potensialnya

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{1}{r} dq$$

1.79

Secara khusus untuk distribusi muatan ruang dengan densitas muatan  $\rho$ , besar potensialnya dinyatakan dengan

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}')}{r} d\tau$$

1.80.a

Persamaan 1.80.a adalah persamaan yang akan kita gunakan untuk menentukan potensial listrik jika diketahui densitas muatannya.

Jika kita bandingkan dengan persamaan untuk menentukan medan listrik dari distribusi muatan diberikan oleh persamaan

$$E(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}')}{r^2} \hat{n} d\tau$$

Salah satu perbedaannya adalah vektor  $\hat{n}$  pada persamaan 1.80.a hilang, karena potensial listrik adalah besaran skalar. Persamaan 1.80.a dapat kita modifikasi kedalam bentuk distribusi muatan garis dengan densitas  $\lambda$  dan distribusi muatan bidang dengan densitas  $\sigma$  sebagai berikut:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda(\mathbf{r}')}{r} d\ell \tag{1.80.b}$$

Dan

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma(\mathbf{r}')}{r} da \tag{1.80.c}$$

**Contoh Soal - Potensial bola berongga jika  $\rho$  diketahui**

Tentukan potensial dari sebuah bola berongga yang dimuati oleh distribusi muatan seragam pada kulitnya. Jari jari bola dinyatakan dalam R (Gambar ).

**Jawab**

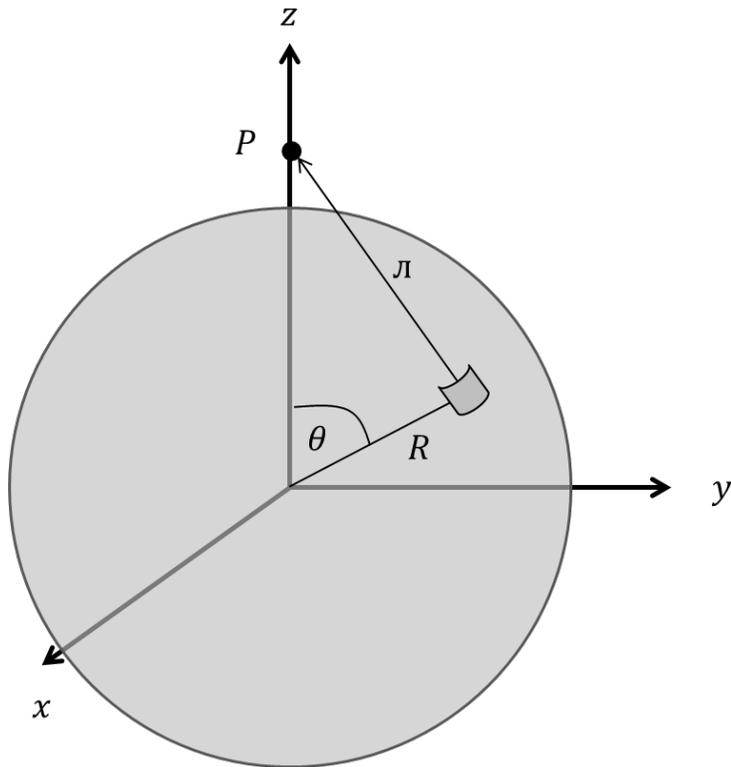
Contoh soal ini sama dengan contoh soal 1. 12, namun kita akan menggunakan persamaan 1.80.c untuk menyelesaikannya.

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma(\mathbf{r}')}{r} da$$

Tentukan arah  $\mathbf{r}$  pada sumbu z dan gunakan kosinus untuk menyatakan  $r$  dalam sudut polar  $\theta$  (lihat Gambar )

$$r^2 = R^2 + z^2 - 2Rz \cos \theta$$

Gambar 1. 22 Bola Berongga bermuatan



Sebuah elemen luas yang ada di kulit bola dinyatakan dalam

$$da = R^2 \sin \theta \, d\theta \, d\phi$$

Sehingga

$$\begin{aligned} 4\pi\epsilon_0 V(z) &= \sigma \int \frac{R^2 \sin \theta \, d\theta \, d\phi}{\sqrt{R^2 + z^2 - 2Rz \cos \theta}} \\ &= 2\pi R^2 \sigma \int_0^\pi \frac{\sin \theta}{\sqrt{R^2 + z^2 - 2Rz \cos \theta}} d\theta \\ &= 2\pi R^2 \sigma \frac{1}{Rz} \sqrt{R^2 + z^2 - 2Rz \cos \theta} \Big|_0^\pi \\ &= \frac{2\pi R^2 \sigma}{z} \left( \sqrt{R^2 + z^2 + 2Rz} - \sqrt{R^2 + z^2 - 2Rz} \right) \\ &= \frac{2\pi R^2 \sigma}{z} \left[ \sqrt{(R+z)^2} - \sqrt{(R-z)^2} \right] \end{aligned}$$

Pada tahap ini kita harus berhati – hati dalam menarik akar positif.

a. besar potensial di luar bola

Untuk titik di luar bola,  $z > R$  sehingga  $\sqrt{(R - z)^2} = z - R$

Maka besar potensial diluar bola berongga adalah

$$V(z) = \frac{R\sigma}{2\varepsilon_0 z} [(R + z) - (z - R)] = \frac{R^2\sigma}{\varepsilon_0 z}$$

b. besar potensial di di dalam bola

untuk titik di dalam bola  $\sqrt{(R - z)^2} = R - z$  maka

$$V(z) = \frac{R\sigma}{2\varepsilon_0 z} [(R + z) - (R - z)] = \frac{R\sigma}{\varepsilon_0}$$

Jika muatan total pada kulit bola dinyatakan dengan

$$q = 4\pi R^2 \sigma$$

Maka besar potensial pada bola berongga dinyatakan dengan

a. pada titik di luar bola

$$V(z) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{z}$$

Atau secara umum ditulis

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r}$$

1.81.a

b. pada titik di dalam bola

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{R}$$

1.81.b

## F. Kesimpulan dan Syarat Batas Elektrostatik

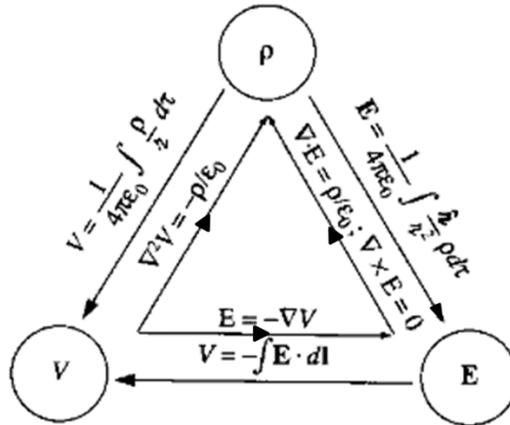
### 1. Diagram Segitiga simpulan elektrostatika

Kebanyakan soal / kasus elektrostatik, kamu akan diberikan densitas muatan ruang  $\rho$  pada sebuah titik. kemudian kamu akan diminta untuk menentukan besar medan elektrostatik  $E$  yang ditimbulkan dari distribusi muatan itu. Jika pada kasus tersebut memiliki sifat simetri, maka bisa kita selesaikan menggunakan persamaan Gaus. Namun jika tidak, kamu dapat menyelesaikan soal tersebut dengan menentukan potensialnya  $V$  terlebih dahulu. Jadi penentuan medan elektrostatik dari potensial adalah sebuah langkah dengan kesulitan menengah.

Dari kegiatan pembelajaran 2 hingga kegiatan pembelajaran 4 ini, kita telah menurunkan sedikitnya 6 (enam) persamaan umum elektrostatika. Keenam

persamaan ini dapat menghubungkan distribusi muatan  $\rho$ , medan elektrostatis  $E$  dan potensial listrik  $V$ . Hubungan ketiga besaran elektrostatis ini dirangkum pada Gambar berikut:

Gambar 1. 23 Diagram Simpulannya Elektrostatis



Sumber: (Griffith, 2012)

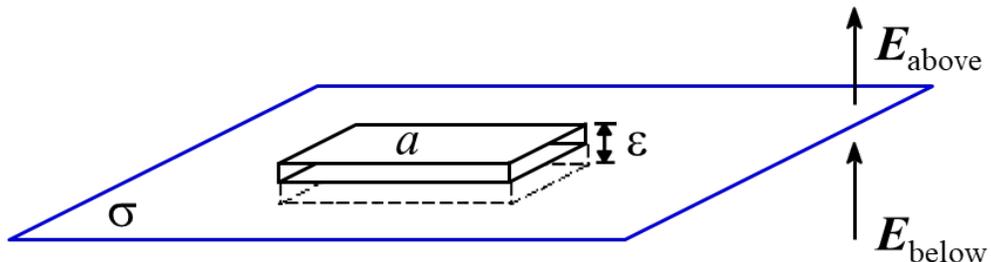
Segitiga hubungan  $\rho$ ,  $E$ , dan  $V$  (Gambar 1.23) didasari oleh prinsip superposisi dan hukum coulomb.

## 2. Syarat Batas

a) komponen normal dari medan listrik

Syarat batas dimaksudkan untuk menjelaskan bahwa: komponen normal dari  $E$  diskontinu pada sejumlah  $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$  pada batas manapun (gambar 1.24).

Gambar 1. 24 Medan Elektrostatis  $E$  diskontinu



Medan listrik akan selalu diskontinu saat ia berpapasan dengan muatan bidang  $\sigma$ . Medan listrik  $E$  akan secara sederhana mengalami perubahan pada keadaan batas (yaitu muatan bidang).

$$\oint_S E \cdot da = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

Untuk keadaan diskontinu ini ditunjukkan oleh persamaan

$$E_{above}^\perp - E_{below}^\perp = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad 1.82$$

Dengan ( $E^\perp$ ) menunjukkan garis-garis medan listrik yang memiliki arah normal terhadap muatan bidang batas.

b) komponen tangensial dari medan listrik

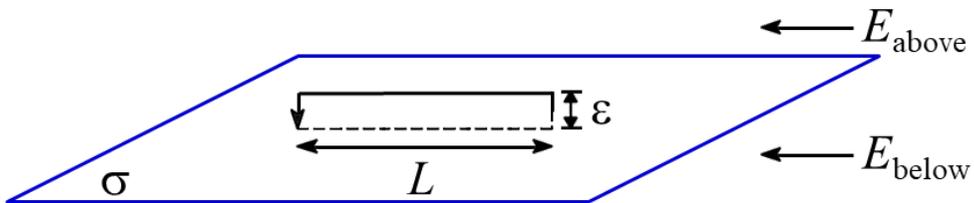
Namun apabila garis-garis medan E tidak berpotongan dengan arah normal dengan muatan bidang, maka medan elektrostatis tersebut akan selalu kontinu.

$$\oint E \cdot d\ell = 0$$

Medan elektrostatis yang paralel ( $E^\parallel$ ) dan berada pada permukaan bola bermuatan adalah kontinu (gambar 1.25).

$$E_{above}^\parallel - E_{below}^\parallel = 0 \quad 1.83$$

Gambar 1. 25 Medan Listrik tangensial selalu kontinu



Maka syarat batas untuk medan listrik E secara umum adalah

$$E_{above} - E_{below} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n} \quad 1.84$$

Dengan  $\hat{n}$  adalah vektor satuan yang tegak lurus terhadap permukaan bermuatan, dengan arah dari “bawah” ke atas permukaan.

Sementara potensial listrik adalah kontinu pada semua batas, sehingga berlaku

$$V_{above} - V_{below} = 0 \quad 1.85$$

Meskipun demikian, gradien dari V dapat mengalami diskontinuitas, karena gradien dari V adalah E. Gradien V akan mengalami diskontinuitas pada keadaan.:

$$\nabla V_{above} - \nabla V_{below} = -\frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n} \quad 1.86$$

Atau secara umum dapat kita tuliskan dalam bentuk

$$\frac{\partial V_{above}}{\partial n} - \frac{\partial V_{below}}{\partial n} = -\frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n} \quad 1.87$$

Dimana  $\frac{\partial V}{\partial n} = \nabla V \cdot \hat{n}$  adalah derivasi normal dari V. Derivasi normal dari V adalah laju perubahan pada arah tegak lurus terhadap permukaan.

### Tugas

1. Tuliskan kembali persamaan potensial listrik pada sebuah titik P yang berjarak  $r$  dari : (lengkapi dengan keterangan dari setiap simbol nya )

a. Muatan titik

Jawab

b. muatan yang terdistribusi diskrit

Jawab

c. muatan ruang

Jawab

d. muatan garis

Jawab

e. muatan bidang

Jawab

f. Bola berongga dengan muatan terdistribusi merata pada kulitnya. Jari-jari bola adalah R, jika

1) di dalam bola

Jawab
-------

--

2) di luar bola

Jawab

## 2. Syarat batas medan listrik

a. Tuliskan persamaan umum dari syarat batas medan listrik

Jawab

b. Jelaskan makna fisisnya

Jawab

## 3. Simpulan dari elektrostatik

a. Gambarkan diagram simpulan yang mengilustrasikan hubungan antara muatan, medan elektrostatik dengan potensial listrik

Jawab

b. jelaskan makna fisis dari diagram tersebut

Jawab

# Rangkuman

## 1. Definisi potensial listrik

- Potensial yang ditimbulkan oleh sebuah muatan atau (sistem muatan) listrik adalah usaha yang diperlukan untuk memindahkan satu satuan muatan positif dari  $\infty$  menuju titik yang dicari potensialnya ( $r$ ). Usaha ini tidak bergantung pada lintasan yang diambil antara kedua titik tersebut.
- Potensial yang ditimbulkan oleh sistem muatan (lebih dari satu muatan) adalah jumlah dari potensial masing-masing muatan sumber tersebut.

## 2. Hubungan antara medan listrik dan potensial listrik

- Dinyatakan dalam persamaan

$$E = -\nabla V$$

- medan listrik merupakan hasil gradien dari potensial skalar. Medan Listrik selalu mengarah ke daerah yang potensialnya lebih rendah.

## 3. Potensial listrik dari muatan terlokalisasi dinyatakan oleh:

- muatan titik

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

- muatan terdistribusi diskrit

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i}$$

- muatan terdistribusi kontinu

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{1}{r} dq$$

- 1) muatan garis

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda(\mathbf{r}')}{r} d\ell$$

- 2) muatan bidang

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma(\mathbf{r}')}{r} da$$

3) muatan ruang

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}')}{r} d\tau$$

4. medan listrik pada komponen normal akan diskontinu oleh bidang batas bermuatan.

## Uji Formatif

### Pilihan Ganda

1. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Potensial listrik adalah perubahan energi potensial listrik ketika memindahkan satu satuan muatan uji dari satu titik ke titik lain.
- (2) Potensial listrik adalah besaran skalar.
- (3) nilai negatif dari gradien potensial listrik adalah medan listrik
- (4) Potensial listrik di dalam bola berongga bermuatan adalah nol.

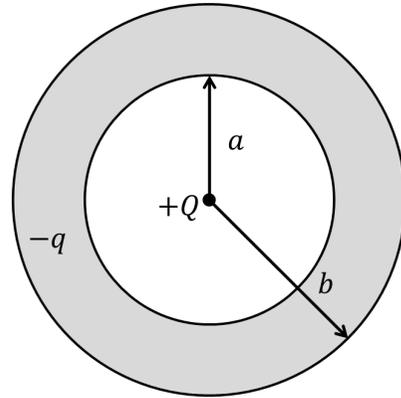
Pernyataan yang benar tentang potensial listrik adalah ....

- |                      |                |
|----------------------|----------------|
| A. (1), (2), dan (3) | D. (4) saja    |
| B. (1) dan (3)       | E. benar semua |
| C. (2) dan (4)       |                |

2. Pernyataan yang benar tentang syarat batas adalah ....

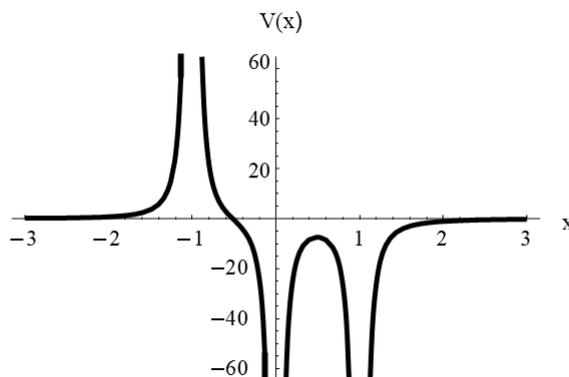
- A. Garis medan listrik kontinu pada semua keadaan
- B. Garis medan listrik pada komponen normal akan kontinu pada semua bidang batas
- C. Potensial listrik akan diskontinu pada bidang bermuatan
- D. Medan listrik akan mengalami diskontinu saat berpotongan tegak lurus pada bidang bermuatan.
- E. Gradien potensial listrik diskontinu pada komponen paralel terhadap bidang bermuatan.

3. Sebuah kulit bola logam dengan jari-jari permukaan dalam  $a$  dan jari-jari permukaan luar  $b$  dibuat dari bahan konduktif. Sebuah muatan titik  $+Q$  diletakkan di pusat kulit bola dan total muatan  $-q$  diberikan pada kulit. Pernyataan yang benar adalah ...

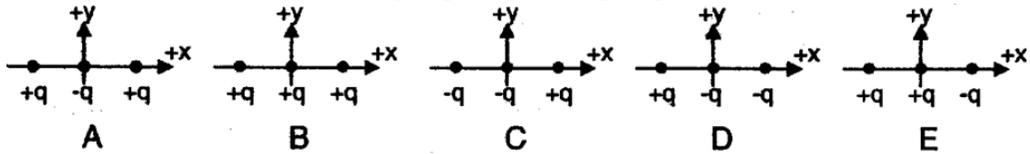


- A. muatan nol pada permukaan dalam, muatan  $-q$  pada permukaan luar
  - B.  $-Q$  pada permukaan dalam, muatan  $-q$  pada permukaan luar
  - C.  $-Q$  pada permukaan dalam, muatan  $-q+Q$  pada permukaan luar
  - D.  $+Q$  pada permukaan dalam, muatan  $-q-Q$  pada permukaan luar
  - E. muatan  $-q$  disebar merata secara seragam di antara permukaan dalam dan permukaan luar
4. Diberikan dua bola konduktor pejal yang memiliki besar muatan identik yaitu  $Q$ . Jika bola pertama berjari – jari  $a$  dan bola kedua berjari – jari  $b$ , dengan  $a < b$  dan titik referensi ada pada tak hingga maka pernyataan yang benar adalah ...
- A. potensial  $a$  lebih besar dari  $b$
  - B. potensial  $b$  lebih besar dari  $a$
  - C. potensial  $a$  dan  $b$  sama besar
  - D. potensial  $a$  dan  $b$  adalah nol
  - E. informasi yang tersedia belum cukup untuk menarik kesimpulan

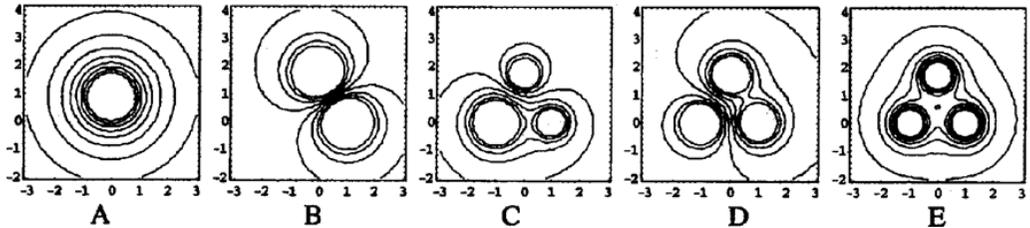
5. Perhatikan gambar berikut



Konfigurasi muatan – muatan yang sesuai dengan gambar di atas adalah ...



6. Gambar yang menunjukkan bidang ekipotensial dari tiga muatan sejenis yang diletakkan pada ujung – ujung segitiga sama sisi adalah ...



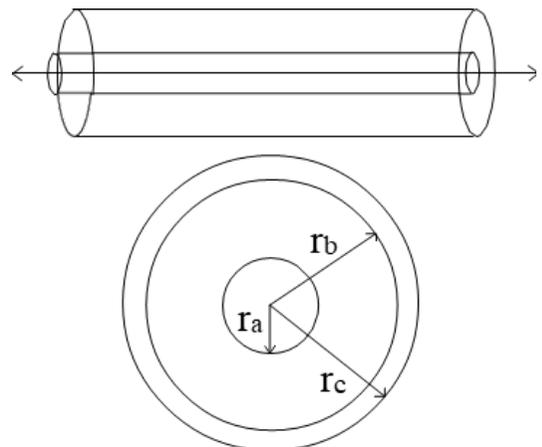
7. Muatan  $+3 \mu\text{C}$ ,  $-2 \mu\text{C}$ ,  $4 \mu\text{C}$ , dan  $+5 \mu\text{C}$  berturut-turut diletakkan di titik-titik sudut . posisi muatan tersebut berbentuk sebuah persegi dengan panjang diagonal  $0,6 \text{ m}$ . Potensial listrik di titik pusat persegi adalah....

- a.  $9 \times 10^1 \text{ Volt}$
- b.  $9 \times 10^3 \text{ Volt}$
- c.  $9 \times 10^5 \text{ Volt}$
- d.  $9 \times 10^2 \text{ Volt}$
- e.  $9 \times 10^4 \text{ Volt}$

8. Sebuah silinder logam berongga memiliki kulit yang tebal, dengan jari-jari luar  $r_c$  dan jari-jari dalam  $r_b$  yang sepusat. Terhadap kawat logam yang berjari – jari  $r_a$ . Densitas muatan garis dari kawat adalah  $+\lambda$  dan densitas muatan garis dari silinder adalah  $-\lambda$ .

Diberikan beberapa pernyataan berikut.

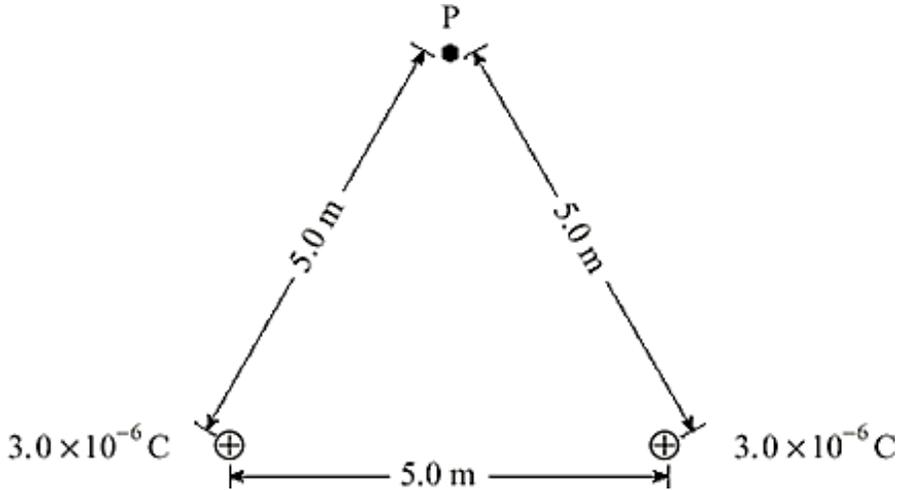
- (1) Beda potensial antara  $r_c$  dan  $r_b$  adalah nol.
- (2) Beda potensial antara  $r_b$  dan  $r_a$  adalah nol.
- (3) Beda potensial antara sebuah titik di luar silinder dan  $r_c$  adalah nol
- (4) Medan elektrostatis antara sebuah titik di luar silinder dan  $r_c$  adalah nol



Pernyataan yang betul adalah ....

- A. Hanya (1) dan (4) adalah benar
- B. Hanya (2) dan (4) yang benar
- C. Hanya (1) dan (3) yang benar
- D. Hanya (2), (3) dan (4) yang benar
- E. Hanya (1), (3) dan (4) yang benar

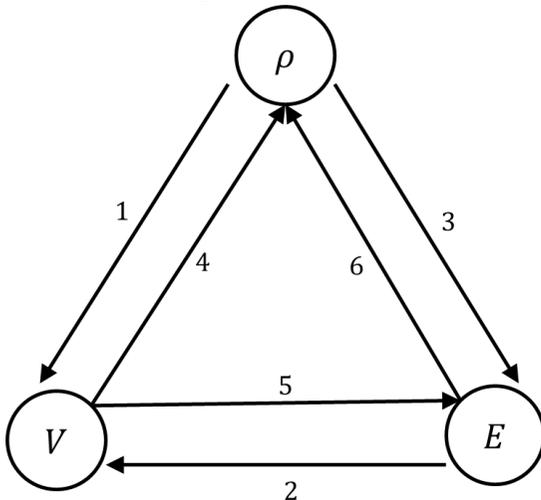
9. Dua muatan titik sebesar  $3,0 \times 10^{-6} \text{ C}$  terpisah sejauh 5.0 m seperti gambar dibawah ini



Besar potensial yang dialami di titik P akibat kedua muatan ini adalah ...

- A. 0 V
- B.  $5.4 \times 10^3 \text{ V}$
- C.  $6,0 \times 10^3 \text{ V}$
- D.  $7.6 \times 10^3 \text{ V}$
- E.  $1.1 \times 10^4 \text{ V}$

10. Perhatikan gambar berikut



Persamaan yang sesuai dengan nomor 5 adalah ...

A.  $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho}{r} d\tau$

D.  $V = - \int E \cdot d\ell$

B.  $\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

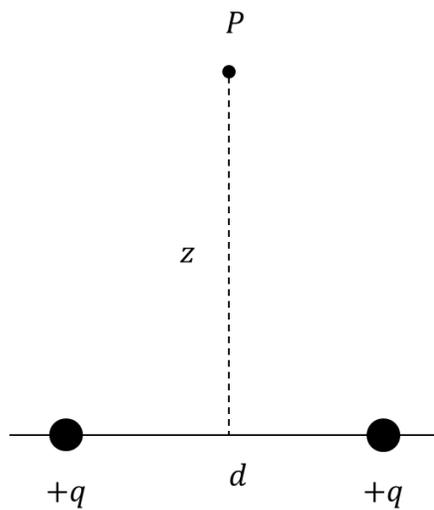
E.  $E = -\nabla V$

C.  $\nabla \times E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

### Essay

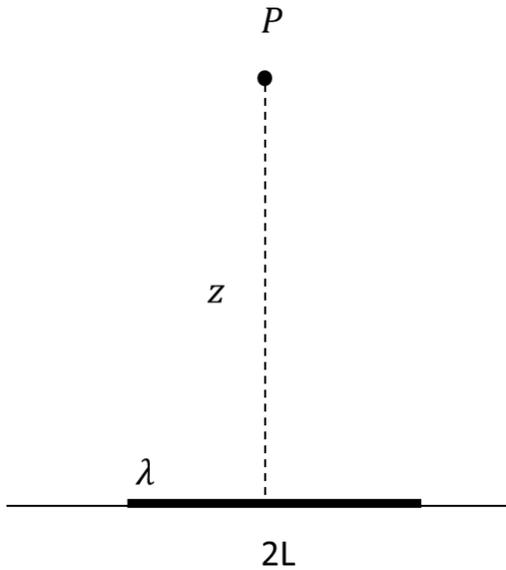
Tentukan potensial pada jarak  $z$  diatas pusat distribusi muatan sesuai gambar berikut:

a. dua muatan titik



Jawab

b. muatan garis



Jawab

## Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

- Griffiths, D. J. (2012). Introduction to electrodynamics 4<sup>th</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Kanginan, Marthen. (2018). Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan Matematika dan Ilmu-Ilmu Alam. Jakarta: Erlangga
- Halliday, Resnick. (2005) Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Effendi, Rustam, dkk. (2007). Medan Elektromagnetika terapan. Jakarta: Erlangga.
- Sailah, Siti, dkk. (2014). Medan Eleltromagnetik, Teori dan contoh soal. Yogyakarta: ANDI.



# Kegiatan pembelajaran 5 Energi Potensial Listrik

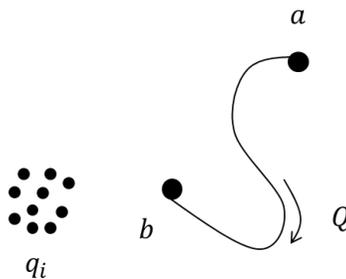
Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mampu menganalisis usaha dan energi elektrostatik serta penerapannya dalam berbagai kasus	a. Mahasiswa mampu menjelaskan makna fisis usaha dan energi elektrostatik. b. Mahasiswa mampu menyelesaikan persoalan yang berhubungan dengan usaha dan energi elektrostatik secara matematis.

## Uraian Materi

### A. Usaha yang dilakukan untuk memindahkan sebuah muatan

Apabila terdapat sebuah distribusi muatan titik dalam keadaan statis, kemudian kita ingin memindahkan sebuah muatan uji  $Q$  dari titik  $a$  ke titik  $b$  (Gambar), maka besar usaha yang kita lakukan untuk memindahkan sebuah muatan uji tersebut dapat kita tentukan sebagai berikut.

Gambar 1. 26 Sebuah Muatan Uji  $Q$  dipindahkan dari  $a$  ke  $b$  terhadap muatan sumber  $q$



Pada titik manapun pada lintasan muatan uji, besar gaya listrik pada  $Q$  adalah sebesar

$$F = Q E$$

Karena muatan uji dan muatan sumber keduanya positif, maka gaya yang kamu berikan memiliki arah berlawanan dengan arah medan, sehingga dapat juga ditulis sebagai

$$F = - Q E$$

untuk memahami makna dari tanda negatif ini, kita dapat menganalogikan muatan uji yang kita pindahkan dengan sebuah bata yang kamu gerakkan vertikal ke atas. Batu bata tersebut mengalami gaya gravitasi yang arahnya menuju pusat bumi dan mengalami gaya keatas akibat gaya yang kamu berikan.

Apabila kamu memberikan gaya yang lebih besar dari gravitasi, maka resultan gaya akan menjadi tidak nol dan bata mengalami akselerasi (percepatan). Usaha yang kamu lakukan ini kemudian menghasilkan energi kinetik bagi bata. Besar usaha yang kamu lakukan disini adalah

$$W = \int_a^b F \cdot dl = -Q \int_a^b E \cdot dl = Q[V(b) - V(a)]$$

Perhatikan bahwa besar usaha tidak bergantung pada bentuk lintasan yang ditempuh muatan dari a ke b, sehingga gaya elektrostatik ini kita sebut sebagai gaya konservatif. Dengan membagi persamaan diatas terhadap Q maka diperoleh

$$V(b) - V(a) = \frac{W}{Q}$$

Dengan kata lain, beda potensial antara titik a dan b setara dengan besar usaha per unit satuan muatan yang diperlukan untuk membawa satu partikel dari a ke b. Secara khusus, jika kita ingin membawa muatan Q dari jauh tak hingga menuju posisi r yang tetap terhadap muatan sumber, maka besar usahanya adalah

$$W = Q[V(r) - V(\infty)]$$

Maka jika kita menetapkan titik awal muatan adalah pada tak hingga, kita akan memperoleh

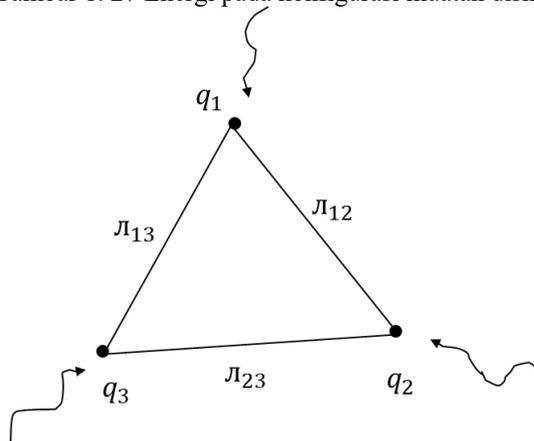
$$W = QV(\mathbf{r})$$

1.88

## B. Besar Energi dari sebuah Distribusi Muatan Titik

Besar usaha yang harus dikerjakan untuk menempatkan muatan muatan dalam konfigurasi tertentu dapat ditentukan sebagai berikut. Bayangkan kita membawa sebuah muatan satu per satu dari jauh tak hingga (Gambar 1.27), dimulai dari muatan  $q_1$ .

Gambar 1. 27 Energi pada konfigurasi muatan diskrit



Muatan diletakkan pada posisinya sesuai Gambar 1.27 dari tak hingga. Karena belum ada muatan di sekitarnya, maka usaha untuk memindahkan  $q_1$  ini adalah nol.

$$W_1 = 0$$

Kemudian kita ambil muatan  $q_2$  dari tak hingga kemudian kita letakkan sesuai Gambar 1.27. Muatan  $q_1$  menimbulkan potensial  $V_1$  terhadap muatan  $q_2$  saat  $q_1$  dan  $q_2$  terpisah sejauh  $r_{12}$ .

Usaha yang diperlukan untuk menghasilkan susunan muatan  $q_1$  dan  $q_2$  kemudian akan memiliki energi potensial sebesar

$$W_2 = q_2 V_1(r_2) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q_2 \left( \frac{q_1}{r_{12}} \right)$$

Kemudian kita ambil muatan  $q_3$ , maka besar usaha yang diperlukan untuk memindahkannya dari tak hingga ke konfigurasi Gambar 1.27 adalah

$$W_3 = q_3 V_{1,2}(r_3) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q_3 \left( \frac{q_1}{r_{13}} + \frac{q_2}{r_{23}} \right)$$

Dengan  $V_{1,2}(r_3)$  menunjukkan muatan  $q_3$  mengalami pengaruh dari potensial muatan  $q_1$  dan  $q_2$ , saat muatan ditempatkan di  $r_3$ .

Total usaha yang diperlukan untuk menyusun ketiga muatan pertama ini adalah

$$W = W_1 + W_2 + W_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{12}} + \frac{q_1 q_1}{r_{13}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}} \right]$$

Atau secara umum dapat kita buat persamaannya menjadi

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j>i}}^n \frac{q_i q_j}{r_{ij}} \tag{1.89}$$

Notasi  $j > i$  digunakan untuk mengingatkan kita agar tidak mengalikan sebuah pasangan sebanyak dua kali. Cara yang lebih nyaman untuk digunakan agar menghindari perkalian pasangan dua kali ini adalah dengan benar-benar melakukan perkalian tiap pasangan sebanyak dua kali dan kemudian hasil sumasinya kita bagi dua. Sehingga kita peroleh

$$W = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{q_i q_j}{r_{ij}} \quad 1.90$$

Kemudian kita keluarkan faktor  $q_i$ , sehingga diperoleh

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} q_j \right) \quad 1.90$$

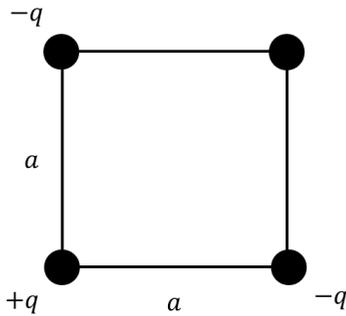
Suku yang berada di dalam tanda kurung menunjukkan potensial yang dialami muatan uji  $q_i$  ketika berada pada titik  $\mathbf{r}_i$  terhadap semua muatan sumber. Persamaan 1.90 kemudian bisa kita tulis ulang sebagai

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i V(\mathbf{r}_i) \quad 1.91$$

Persamaan 1.91 menunjukkan usaha yang diperlukan untuk menghasilkan sebuah konfigurasi muatan diskrit. Besar usaha ini ternyata sama juga dengan besar usaha untuk mempertahankan muatan-muatan diskrit ini tetap dalam konfigurasinya atau tetap dalam sistemnya. Karena usaha setara energi, maka besar usaha untuk mempertahankan sistem muatan ini juga merepresentasikan besar energi yang tersimpan dalam sistem muatan.

### Tugas

Tiga muatan telah disusun dengan konfigurasi seperti gambar di bawah ini. Kemudian sebuah muatan lain  $+q$  dari titik jauh tak hingga, ditempatkan pada sudut keempat yang berada di titik sebelah kanan atas. Berapa besar usaha yang diperlukan untuk menyusun semua konfigurasi dari keempat muatan seperti gambar berikut ?



**Jawab**

### C. Energi dari sebuah Distribusi Muatan Kontinu

Jika sebelumnya kita telah menentukan / merumuskan besar usaha untuk menyusun dan mempertahankan sistem muatan terdistribusi diskrit dengan konfigurasi tertentu, maka selanjutnya kita akan merumuskan besar usaha untuk menyusun / mempertahankan muatan yang terdistribusi secara kontinu.

Untuk sebuah muatan ruang dengan densitas  $\rho$ , maka besar usahanya kita peroleh dengan memodifikasi persamaan 1.91 sehingga menjadi

$$W = \frac{1}{2} \int \rho V d\tau \quad 1.92. a$$

Dengan cara yang sama, maka kita juga dapat memodifikasi persamaan 1.92 untuk muatan garis dengan densitas  $\lambda$  menjadi

$$W = \frac{1}{2} \int \lambda V d\ell \quad 1.92. b$$

Dan untuk muatan bidang dengan densitas  $\sigma$  menjadi

$$W = \frac{1}{2} \int \sigma V da \quad 1.92. c$$

Dari persamaan 1.92. a kita juga dapat kembali memodifikasi persamaan, sehingga kita dapat menentukan usaha dari medan listrik. perhatikan kembali dari persamaan 1.92.a , suku  $\rho$  dan  $V$  adalah medan listrik  $E$  dengan menggunakan hukum Gauss.

$$\rho = \epsilon_0 \nabla \cdot E$$

Maka persamaannya menjadi

$$W = \frac{1}{2} \int \rho V d\tau = \frac{1}{2} \int (\epsilon_0 \nabla \cdot E) V d\tau$$

Kemudian gunakan integral sebagian dengan mengikuti identitas

$$\int f(\nabla \cdot \mathbf{A}) d\tau = - \int \mathbf{A} \cdot (\nabla f) d\tau + \oint_S f \mathbf{A} \cdot d\mathbf{a}$$

Sehingga

$$W = \frac{\epsilon_0}{2} \left[ - \int_V \mathbf{E} \cdot (\nabla V) d\tau + \oint_S V \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} \right]$$

Karena  $\nabla V = -\mathbf{E}$ , maka

$$W = \frac{\epsilon_0}{2} \left[ - \int_V E^2 d\tau + \oint_S V \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} \right] \quad 1.93$$

Jika kita integralkan pada seluruh ruangan, maka integral permukaan akan menjadi nol, sehingga

$$W = \frac{\epsilon_0}{2} \int_{\text{all space}} E^2 d\tau \quad 1.93$$

### Contoh Soal - energi dari sebuah bola pejal bermuatan

Tentukan energi dari sebuah bola berongga bermuatan yang terdistribusi seragam di seluruh permukaannya. Besar muatan bola tersebut adalah  $q$  dan jari-jarinya  $R$ .

Jawab:

Solusi 1

Kita gunakan persamaan 1.92.c

$$W = \frac{1}{2} \int \sigma V da$$

Karena potensial pada permukaan bola adalah

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R}$$

Maka

$$W = \frac{1}{2} \int \sigma \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R} \right) da = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q}{R} \int \sigma da = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R}$$

$$W = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R}$$

Solusi 2

Gunakan persamaan 1.93, dengan keterangan di dalam bola  $E = 0$  dan di luar bola, besar medan listriknya

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

Sehingga

$$E^2 = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{q^2}{r^4}$$

Kemudian

$$\begin{aligned} W_{tot} &= \frac{\epsilon_0}{2} \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \int_{outside} \frac{q^2}{r^4} (r^2 \sin\theta \, dr \, d\theta \, d\phi) \\ &= \frac{1}{32 \pi^2 \epsilon_0} q^2 4\pi \int_R^\infty \frac{1}{r^2} \, dr = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R} \end{aligned}$$

### Tugas

Tentukan besar energi yang tersimpan pada sebuah bola pejal bermuatan dengan jari – jari  $R$  dan muatan  $q$ . pada :

a. di dalam bola

Jawab

b. di permukaan bola

Jawab

c. di luar bola

Jawab

## Rangkuman

1. Definisi energi oleh sistem muatan listrik

a. Beda potensial antara titik a dan b setara dengan besar usaha per unit satuan muatan yang diperlukan untuk membawa satu partikel dari a ke b.

b. dinyatakan dalam

$$W = QV(\mathbf{r})$$

2. Besar energi dari sebuah distribusi muatan titik

a. dinyatakan dalam

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i V(\mathbf{r}_i)$$

b. Besar usaha ini ternyata sama juga dengan besar usaha untuk mempertahankan muatan-muatan diskrit ini tetap dalam konfigurasinya atau tetap dalam sistemnya.

c. Besar usaha untuk mempertahankan sistem muatan ini juga merepresentasikan besar energi yang tersimpan dalam sistem muatan.

3. Energi dari sebuah bola berongga

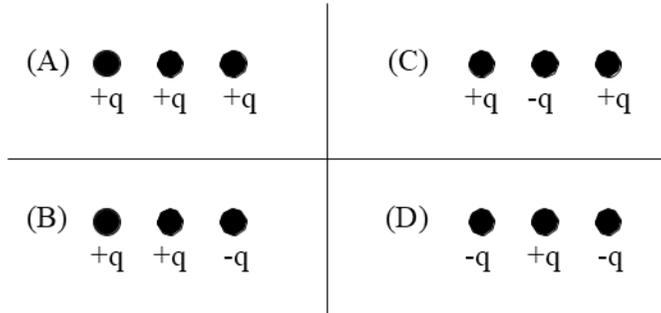
$$W = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R}$$

Dengan R adalah jari – jari bola dan q adalah muatan netto bola

# Uji Formatif

## Pilihan Ganda

1. Perhatikan gambar berikut



Diberikan empat konfigurasi yang masing masing terdiri dari tiga muatan. Apabila jarak dari muatan paling tepi ke muatan yang berada di tengah adalah sama untuk semua konfigurasi, maka urutan konfigurasi muatan yang memerlukan usaha dari yang paling kecil ke yang paling besar adalah ....(Gunakan kerangka acuan dari energi potensial adalah dari tak hingga )

A.  $A < B < C = D$

D.  $B = C = D < A$

B.  $C = D < B < A$

E.  $D < C = B < A$

C.  $A < B = C = D$

2. Sebuah muatan titik Q berada di sebuah titik yang tetap. Kemudian sebuah muatan uji q di dekatkan dengan muatan titik Q dengan kecepatan konsten.

Maka :

(1) Energi potensial elektrostatik q meningkat saat ia semakin mendekat dengan Q , jika q dan Q memiliki tanda yang sama

(2) Usaha yang dilakukan oleh gaya elektrostatik adalah positif jika q dan Q memiliki tanda yang sama

(3) Usaha yang dilakukan oleh gaya eksternal untuk membawa q mendekat ke Q adalah positif jika q dan A memiliki tanda yang berlawanan

(4) Usaha yang dilakukan oleh gaya eksternal untuk membawa q mendekat ke Q adalah negatif jika q dan Q memiliki tanda yang berlawanan.

Pernyataan yang benar adalah ...

A. (1) saja

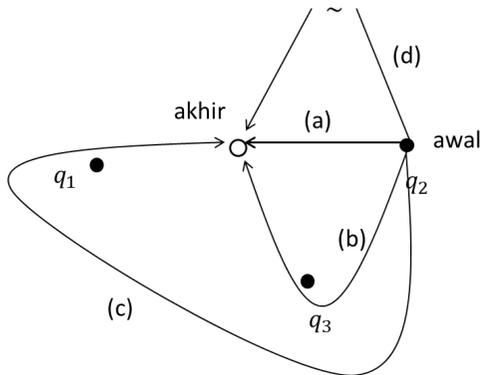
D. (1) dan (4) saja

B. (2) saja

E. (2) dan (3) saja

C. (1) dan (2) saja

3. Diberikan tiga muatan titik positif yang diletakkan pada titik-titik tetap dalam sebuah ruang. Kemudian muatan  $q_2$  dipindahkan dari lokasi awalnya ke lokasi akhirnya seperti ditunjukkan pada gambar.



Empat lintasan berbeda ditandai dari (a) sampai (d). Lintasan (a) mengikuti garis terpendek, lintasan (b) membawa  $q_2$  mengitari  $q_3$ ; lintasan (c) membawa  $q_2$  mengitari  $q_3$  dan  $q_1$ ; lintasan (d) membawa  $q_2$  ke tak berhingga dan kemudian ke lokasi akhir.

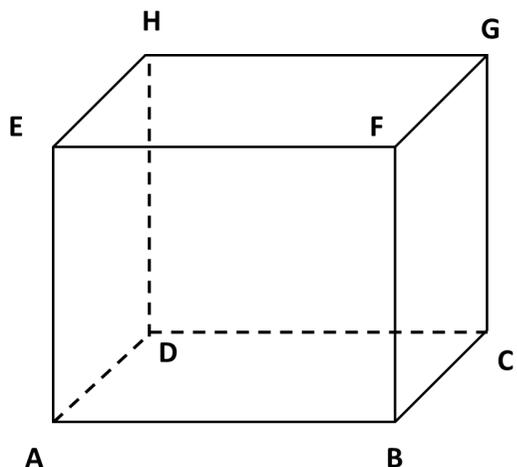
Lintasan yang memerlukan usaha paling kecil adalah ....

- A. lintasan (a)
- B. lintasan (b)
- C. lintasan (c)
- D. lintasan (d)
- E. sama untuk semua lintasan

4. Sebuah kubus dengan panjang rusuk 30 cm. jika muatan  $+100\text{mC}$  menempati pusat kubus.

Besarnya usaha untuk memindahkan muatan  $+10\text{ mC}$  dari titik B ke F adalah ...

- A. nol
- B. 5 mJ
- C. 10 mJ
- D. 15 mJ
- E. 25 mJ



5. Sebuah partikel bermuatan  $Q$  dan bermassa  $m$  dipercepat dari keadaan diam melalui sebuah beda potensial  $V$  dan energi kinetik  $K$ . Energi kinetik dari suatu partikel bermuatan  $3Q$  dan bermassa  $\frac{1}{2}m$  yang dipercepat dari keadaan diam dengan beda potensial yang sama adalah ...

- A.  $0,5 K$
- B.  $2 K$
- C.  $3 K$
- D.  $4 K$
- E.  $6 K$

6. ketika sebuah muatan berakselerasi disepanjang beda potensial  $500 V$ , energi kinetiknya meningkat dari  $2.0 \times 10^{-5} J$  menjadi  $6.0 \times 10^{-5} J$ . Besar muatan tersebut adalah ...

- A.  $4.0 \times 10^{-8} C$
- B.  $8.0 \times 10^{-8} C$
- C.  $1.2 \times 10^{-7} C$
- D.  $1.6 \times 10^{-7} C$
- E. Tidak dapat ditentukan

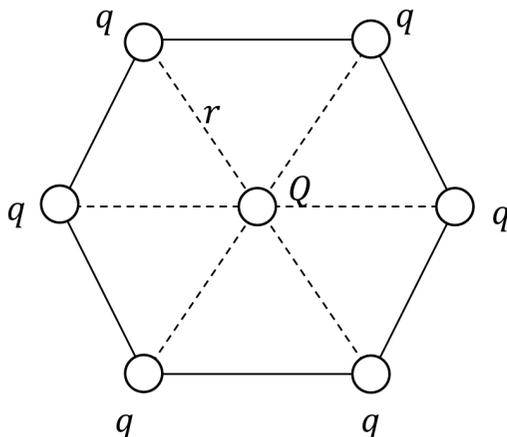
7. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) besar muatan
- (2) permitivitas
- (3) garis- garis fluks
- (4) medan listrik eksternal

Yang mempengaruhi besar energi elektrostatik adalah ....

- A. (1), (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

8. Perhatikan gambar berikut



Sebuah muatan Q dikelilingi oleh enam muatan identik q dengan konfigurasi sesuai gambar. Apabila besar dan jenis muatan Q sama dengan q, maka besar usaha yang diperlukan untuk mempertahankan konfigurasi sistem partikel diatas adalah ...

A. nol

B.  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{6q}{r}$

C.  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{6q^2}{r}$

D.  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{36q}{r}$

E.  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{36q^2}{r}$

9. ketika dua muatan didekatkan, maka energi potensial listriknya...

A. Semakin besar

D. nol

B. Semakin kecil

E. bisa saja semakin besar atau

C. tetap sama (tidak mengalami perubahan )

10. Apabila muatan positif bergerak dari daerah potensial rendah menuju potensial tinggi, maka besar energi potensialnya akan ....

A. Semakin besar

D. tidak dapat ditentukan

B. Semakin kecil

E. Bisa semakin besar atau semakin

C. Tetap (tidak ada perubahan ) kecil

### Essay

Dua bola berongga saling konsentris memiliki jari – jari a dan b. Anggap bahwa bola di bagian dalam berjari a dan bermuatan q. Sementara bola di bagian luar memiliki jari-jari b dan bermuatan –q. Kedua permukaan bola memiliki muatan yang terdistribusi merata. Tentukan besar energi yang dimiliki konfigurasi bola seperti ini!

Jawab

## Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

- Griffiths, D. J. (2012). Introduction to electrodynamics 4<sup>th</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Kanginan, Marthen. (2018). Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan Matematika dan Ilmu-Ilmu Alam. Jakarta: Erlangga
- Halliday, Resnick. (2005) Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Effendi, Rustam, dkk. (2007). Medan Elektromagnetika terapan. Jakarta: Erlangga.
- Sailah, Siti, dkk. (2014). Medan Eleltromagnetik, Teori dan contoh soal. Yogyakarta: ANDI.



## Kegiatan pembelajaran 6 Konduktor

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mampu menganalisis sifat dasar konduktor serta penerapannya dalam berbagai kasus	<ol style="list-style-type: none"><li>Mahasiswa mampu mendeskripsikan sifat dasar konduktor</li><li>Mahasiswa mampu menjelaskan muatan terinduksi</li><li>Mahasiswa mampu menjelaskan permukaan terinduksi dan gaya pada konduktor</li><li>Mahasiswa mampu menjelaskan prinsip kerja kapasitor</li></ol>

### Uraian Materi

#### A. Properti (Sifat) Dasar Konduktor dalam keadaan elektrostatik

Secara umum, sifat bahan terhadap listrik kita bagi dua jenis, yaitu konduktif dan non konduktif. Bahan non konduktif ini juga dapat disebut sebagai bahan isolator. Bahan isolator memiliki elektron yang terikat pada atom-atomnya. Sedangkan bahan konduktor memiliki elektron yang bebas berkeliaran terhadap atom-atomnya di seluruh bahan.

Pada konduktor yang berfase padat, muatan yang bergerak adalah elektron (negatif). Pada konduktor yang berfase liquid, misalnya air garam, terdapat ion (positif dan negatif) yang bergerak. Sebuah konduktor sempurna akan menjadi bahan yang mengandung supply elektron bebas tak terbatas. Namun pada kehidupan sehari-hari tidak terdapat konduktor sempurna, namun material yang bersifat mendekati konduktif sempurna.

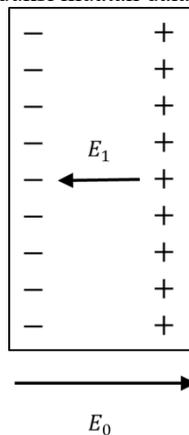
Pada kegiatan pembelajaran ini kita akan mempelajari bagaimana properti bahan konduktif pada keadaan listrik statis (elektrostatik). Pada keadaan elektrostatik ini maksudnya bahan konduktor tidak dihubungkan dengan beda tegangan, misalnya dari baterai atau dari power supply, sehingga bahan konduktor hanya mendapat pengaruh dari medan listrik eksternal. Dari definisi konduktor sempurna, ada beberapa properti dari konduktor ideal pada keadaan elektrostatik, yaitu:

## 1. Medan listrik di dalam konduktor adalah nol

Medan listrik di dalam bahan konduktor adalah nol karena apabila terdapat medan listrik, maka muatan – muatan bebas di dalam bahan akan bergerak. Apabila muatan – muatan bebas bergerak, maka keadaan di dalam bahan tidak lagi elektrostatik. Bagaimana mungkin medan listrik di dalam bahan konduktor adalah nol? Fenomena ini hanya dapat dijelaskan pada keadaan elektrostatik.

Saat sebuah bahan konduktor (kita ambil contoh sebuah batang logam) di beri medan listrik luar  $E_0$ . Pada keadaan elektrostatik, medan listrik luar ini akan mengakibatkan muatan – muatan di dalam bahan konduktor tersusun ulang. Muatan positif akan bergerak ke arah kanan dan muatan negatif akan bergerak ke kiri (Gambar 1.28)

Gambar 1. 28 Induksi muatan dalam bahan konduktor



Dalam zat padat, telah disebutkan bahwa sebenarnya hanya elektronlah yang dapat bergerak. Saat diberi medan listrik luar ke arah kanan, maka elektron akan bergerak cenderung ke arah sebaliknya dari medan listrik eksternal. Akibatnya atom – atom yang “dijauhi” elektron – elektronnya ini akan seperti berkumpul di sisi lainnya ( di ujung anak panah medan listrik). Setelah muatan positif dan negatif masing – masing bereposisi ( menyusun ulang susunnya ) , maka sekarang pada bahan konduktor telah terdapat dua sisi dengan muatan yang berbeda. Sisi kiri bermuatan negatif dan sisi kanan bermuatan positif. Fenomena tersusun ulangnya muatan – muatan dalam bahan akibat diberi medan listrik luar, sehingga pada bahan menjadi memiliki dua muatan berbeda pada ujung- ujungnya inilah yang disebut dengan induksi muatan



Induksi Muatan: fenomena dimana muatan – muatan dalam bahan melakukan re-orientasi akibat diberikan medan listrik luar, sehingga bahan memiliki dua muatan berbeda pada kedua ujungnya.

Muatan – muatan terinduksi ini kemudian menghasilkan medan listrik internal di dalam bahan  $E_1$  (lihat kembali Gambar 1.27 ). Karena arah medan listrik internal ini berlawanan dengan medan listrik eksternal, maka medan listrik internal ini cenderung untuk meniadakan medan listrik luar. Muatan – muatan (elektron) akan terus melakukan re-posisi atau re – orientasi hingga medan listrik luar benar – benar telah berhasil ditiadakan pengaruhnya dan resultan medan di dalam bahan tepat nol. Keseluruhan proses induksi muatan pada bahan konduktor terjadi secara instan (sangat cepat).

## 2. Densitas muatan di dalam konduktor adalah nol

Densitas muatan di dalam konduktor adalah nol pada keadaan elektrostatik karena mengikuti hukum Gauss.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Karena resultan medan listrik  $E$  di dalam bahan adalah nol (seperti yang telah dijelaskan pada poin 1 sebelumnya) , maka densitas muatan di dalam bahan konduktor juga adalah nol atau lebih tepatnya muatan netto di dalam bahan konduktor adalah nol. Memang di dalam bahan masih terdapat muatan negatif dan positif, namun netto-nya adalah nol.

## 3. Seluruh muatan netto berada di permukaan konduktor

Muatan netto di dalam bahan adalah nol, namun muatan netto di permukaan bidang konduktor tidak nol. Seluruh muatan netto berada di permukaan bahan konduktor. Bidang permukaan adalah tempat muatan netto.

## 4. Bahan konduktor adalah sebuah permukaan ekuipotensial

Bidang permukaan bahan konduktor adalah permukaan ekuipotensial. Apabila terdapat dua titik  $a$  dan  $b$  pada bidang permukaan konduktor, maka berlaku

$$V(b) - V(a) = - \int_a^b E \cdot dl = 0$$

Atau

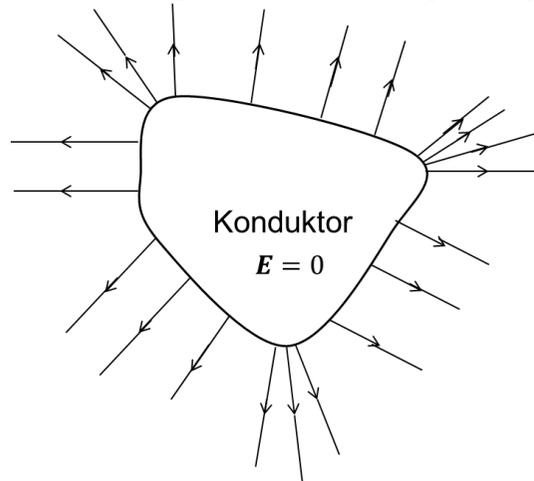
$$V(b) = V(a)$$

## 5. Medan listrik memiliki arah tegak lurus terhadap permukaan konduktor, dan hanya terdapat di luar konduktor

Sesuai dengan sifat pada poin 1, maka muatan akan langsung mengalir mengitari permukaan hingga meniadakan medan listrik tangensial (Gambar 1.29). Apabila arah medan tegak lurus permukaan, maka muatan di dalam bahan konduktor tidak dapat mengalir, karena masih terikat pada bahan konduktor. Arah tegak lurus ini juga sesuai dengan pembahasan kegiatan 1.3 tentang medan listrik dan bidang ekuipotensial.

Permukaan konduktor pada keadaan elektrostatik merupakan bidang ekuipotensial, sehingga medan listrik akan selalu tegak lurus terhadap bidang permukaannya.

Gambar 1. 29 Arah medan listrik tegak lurus menembus bagian luar permukaan konduktor



Medan listrik pada permukaan ekuipotensial akan tegak lurus terhadap permukaan bidang karena muatan- muatan pada permukaan yang saling tolak menolak dan terdistribusi merata. Jika medan listrik tidak tegak lurus, maka akan terjadi aliran muatan di sekitar konduktor dan keadaan elektrostatik menjadi hilang.

Karena medan listrik tegak lurus dengan bidang ekuipotensial, maka muatan – muatan akan terdorong untuk bergerak keluar dan berada di permukaan bidang konduktor bagian luar. Muatan – muatan tersebut tetap berada di permukaan bidang konduktor dan tidak akan keluar dari permukaan bahan karena adanya potential barrier yang mengikat muatan – muatan tersebut.

Pada permukaan bidang, muatan – muatan ini akan tersebar merata karena adanya gaya tolak menolak antar muata, sehingga muatan – muatan melakukan re- posisi sehingga mencari konfigurasi yang menghasilkan energi elektrostatis paling rendah. Energi elektrostatis ini akan tercapai saat muatan- muatan terdistribusi merata di permukaan bidang konduktor. Contoh paling sederhana dalam energi elektrostatis dari sebuah bola saat muatan netto terdistribusi merata di permukaan bidang adalah sebesar

$$W = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R} \quad 1.94$$

Tapi saat muatannya tersebar merata di seluruh bidang diperoleh energinya sebesar

$$W = \frac{3}{20\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R} \quad 1.95$$

**Tugas**

Buktikanlah besar energi pada bola pejal yang memiliki muatan terdistribusi merata di seluruh volume nya adalah

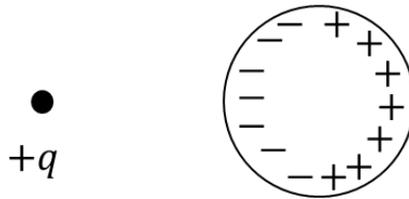
$$W = \frac{3}{20\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R}$$

Jawab

**B. Muatan Induksi**

Jika kita mendekatkan sebuah muatan +q terhadap bahan konduktor netral (Gambar 1.30) , maka kedua benda ini saling tarik menarik. Kenapa bisa timbul gaya tarik menarik ? Karena saat muatan + q mendekati bahan konduktor netral, muatan + q akan menyebabkan elektron dari bahan konduktor tertarik menuju + q. karena elektron melakukan orientasi menuju +q, akibatnya di sisi lainnya akan ada muatan yang menjauhi muatan +q karena muatannya sejenis. Akibatnya pada sisi yang paling dekat dengan +q akan bermuatan negatif dan pada ujung sisi yang muatannya paling jauh dari + q akan bermuatan positif.

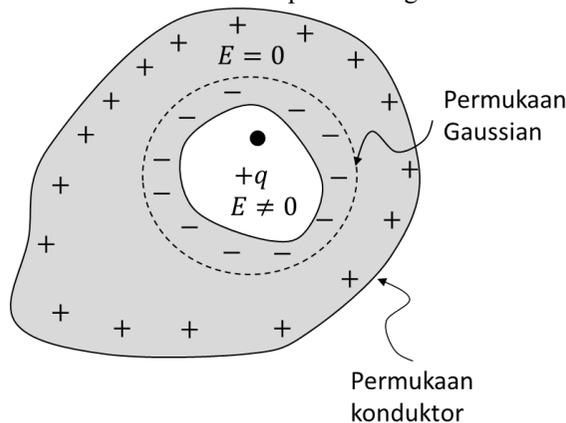
Gambar 1. 30 Induksi muatan pada konduktor netral akibat sebuah muatan titik



Kedadaan reorientasi muatan sehingga mengakibatkan sebuah konduktor netral menjadi terpolarisasi pada kedua ujungnya ini disebut sebagai induksi muatan. Dan muatan yang mengalami re-orientasi ini disebut sebagai muatan terinduksi. Muatan terinduksi ini juga bisa dijelaskan juga terjadi karena ingin meniadakan medan listrik di dalam bahan, sehingga medan listrik dalam bahan konduktor tetap nol.

Apabila terdapat sebuah bahan konduktor yang memiliki lubang di dalamnya, dan pada permukaannya diselubungi oleh distribusi muatan (Gambar 1.31) , maka bagian dalam yang berlubang (atau berongga) tersebut tidaklah nol. Hanya saja bagian berlubang dan muatannya tersebut terisolasi dari lingkungan luar oleh kulit konduktornya. Tidak ada medan listrik yang dapat masuk kedalam lubang di dalam konduktor. Medan eksternal itu akan di-tiadakan (*di-cancel*) di luar bola oleh oleh muatan- muatan terinduksi di bagian permukaan bahan ini.

Gambar 1. 31 Induksi muatan pada bidang konduktor berlubang



Fenomena ini juga berlaku pada muatan yang berada di dalam lubang. Medan yang ditimbulkan oleh muatan di dalam lubang akan *di-cancel* oleh muatan – muatan yang terinduksi di permukaan konduktor. Total muatan terinduksi pada dinding rongga setara dan berlawanan tanda dengan muatan di

dalam rongga. Sehingga jika kita menyelubungi rongga dengan permukaan Gussian, maka semua titik di dalam konduktor, maka muatan netto di dalam rongga adalah nol.

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = 0$$

Dengan

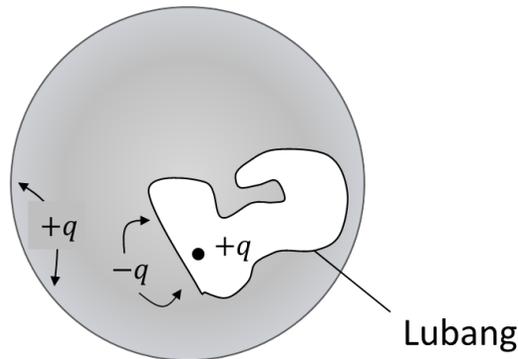
$$Q_{enc} = q + q_{induksi}$$

Atau

$$q_{induksi} = -q$$

### Contoh - Bola konduktor dengan rongga berbentuk sebarang di dalamnya

Sebuah bola konduktor tak bermuatan dengan pusatnya berada di titik origin. Bola konduktor ini memiliki rongga dengan bentuk yang aneh di dalamnya seperti gambar di bawah ini



Di dalam rongga tersebut terdapat muatan  $q$ . Berapa besar medan listrik di luar bola?

#### Jawab

Sekilas akan terlihat bahwa jawabannya bergantung pada ukuran dari lubang dan posisi muatan, namun kenyataannya keliru. Jawabannya, medan listrik di luar bola berongga tersebut adalah

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

Artinya bentuk dan tempat muatan pada lubang tidak mempengaruhi medan listrik di luar bola. Bahan konduktor akan menyembunyikan informasi tentang rongga dan hanya menampilkan muatan netto yang terdapat pada permukaan konduktor.

Bahan konduktor akan mengalami induksi muatan akibat muatan yang terada di dalam rongga. Muatan + q di dalam lubang akan menginduksi muatan - q pada dinding rongga dan muatan +q yang berada di permukaan konduktor. Muatan -q ini akan menyusun posisinya sendiri pada dinding rongga, sehingga medan yang dihasilkan oleh muatan + q di dalam lubang akan menjadi tercancel. Karena bahan konduktor awalnya netral, maka yang tersisa hanyalah muatan +q yang terdistribusi merata pada seluruh permukaan bola.

Dengan demikian, jika terdapat muatan di dalam lubang maka tiga medan pada bahan konduktor berlubang (berongga), yaitu medan oleh muatan di dalam rongga  $E_{+q}$ , medan oleh muatan induksi yang terdapat pada bagian dalam bahan konduktor  $E_{induced}$ , dan medan yang tercipta oleh muatan tersisa yang ada di permukaan bahan konduktor  $E_{leftover}$ .  $E_{+q}$  dan  $E_{induced}$  saling meniadakan, sehingga hanya tersisa  $E_{leftover}$  yang terdapat di bagian luar permukaan bahan konduktor.

**Tugas**

Saat kamu berada dalam badai petir, apakah kamu relatif lebih aman jika berada di dalam mobil yang berbahan logam? Mengapa? Jelaskanlah !

Jawab

**C. Permukaan Bermuatan dan Gaya pada Konduktor**

Karena medan di dalam bahan konduktor adalah nol, maka syarat batas akan berlaku dalam menjelaskan medan listrik yang berada tepat di bagian luar permukaan dalam bentuk

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n} \tag{1.96}$$

Persamaan 1.96 konsisten dengan kesimpulan sebelumnya bahwa arah medan listrik adalah pada arah normal terhadap permukaan. Dalam bentuk potensial, persamaan densitas muatan bidang dinyatakan dalam

$$\sigma = -\epsilon_0 \frac{\partial V}{\partial n} \tag{1.97}$$

Dengan menggunakan persamaan 1.96 dan 1.97 maka kita dapat menghitung muatan bidang pada sebuah konduktor jika kita dapat menentukan  $E$  atau  $V$ .

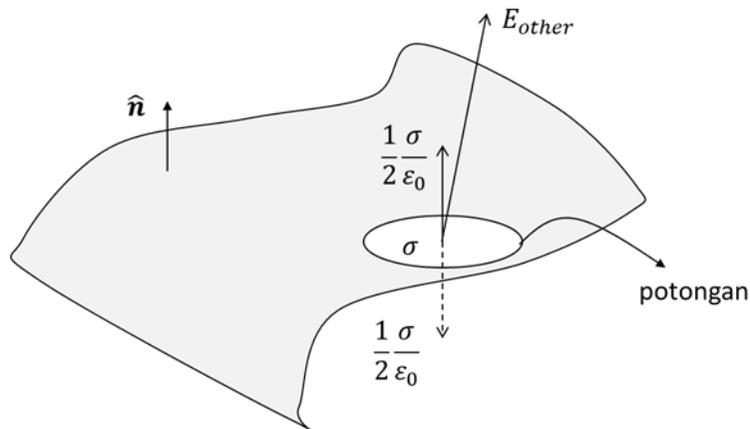
Akibat adanya medan listrik, maka muatan permukaan akan secara alamiah mengalami gaya elektrostatik yang dapat dinyatakan dalam gaya per satuan luas  $f$  sebagai  $\sigma E$ . Namun untuk medan listrik yang mengalami diskontinuitas pada permukaan bermuatan maka besar gaya elektrostatik per satuan luasnya adalah

$$f = \sigma E_{average} = \frac{1}{2} \sigma (E_{above} + E_{below}) \quad 1.98$$

Dengan  $E_{average}$  adalah besar medan listrik rata – rata. Untuk menjelaskan kenapa kita menggunakan  $E_{average}$ , maka simak penjelasan berikut:

Perhatikan sebuah potongan permukaan (Gambar 1.32). Potongan ini mengelilingi muatan titik yang ingin diketahui. Potongan permukaan ini dibuat kecil sedemikian sehingga menjadi datar dan permukaan muatan di atasnya menjadi konstan.

Gambar 1. 32 Gaya pada Permukaan Bermuatan



Total medan listrik terdiri dari dua bagian, yaitu medan listrik yang ditimbulkan oleh muatan di dalam potongan itu sendiri dan medan listrik eksternal. Bisa kita tuliskan sebagai berikut

$$E = E_{potongan} + E_{other}$$

Kini potongan ini tidak dapat menimbulkan gaya pada dirinya sendiri, seperti halnya saat kita berada di dalam sebuah keranjang, kemudian kita mengangkat diri kita sendiri melalui pegangan keranjang itu. Gaya yang terdapat pada potongan secara khusus dihasilkan dari  $E_{other}$  dan tidak mengalami diskontinuitas. Jika kita menghapus potongan, maka medan dari “lubang” ini akan tampak menjadi sangat halus. Diskontinuitas ini disebabkan karena seluruh

muatan yang ada pada potongan bidang menghasilkan medan sebesar  $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$  pada arah keluar dari kedua sisinya (Gambar 1.32) sehingga

$$E_{above} = E_{other} + \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{n}$$

$$E_{below} = E_{other} - \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{n}$$

Sehingga

$$E_{other} = \frac{1}{2}(E_{above} - E_{below}) = E_{average}$$

Argumen yang berlaku pada permukaan konduktor bermuatan apapun adalah bahwa medan di dalam bahan konduktor adalah nol dan bernilai sebesar  $\frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n}$  pada bagian luar permukaan bahan dan besar gaya per satuan luas adalah

$$f = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0} \hat{n} \quad 1.99$$

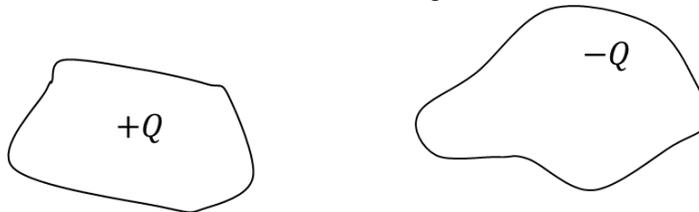
Persamaan 1.99 menunjukkan jumlah **tekanan elektrostatik** di permukaan bermuatan yang dapat dinyatakan dengan

$$P = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 \quad 1.100$$

## D. Kapasitor

Anggap kita memiliki dua konduktor dan kita menempatkan muatan  $+Q$  pada salah satu konduktor dan  $-Q$  pada konduktor lainnya (Gambar ).

Gambar 1. 33 Dua konduktor dengan muatan berbeda



Karena  $V$  adalah konstan pada masing – masing konduktor, maka kita dapat menyatakan perbedaan potensial  $V$  antara keduanya sebagai :

$$V = V_+ - V_- = - \int_{(-)}^{(+)} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} \quad 1.101$$

Kemudian kita akan menyatakan  $E$  dalam densitas muatan ruang  $\rho$  sesuai dengan hukum Coulomb:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho}{r^2} \hat{\mathbf{r}} d\tau$$

Maka jika kita menggandakan  $\rho$  maka  $E$  juga akan menjadi dua kali semula. Jika kita menggandakan  $Q$  maka  $\rho$  juga akan menjadi lipat duanya. Saat  $Q$  dilipat-duakan maka muatan – muatan akan bergerak dengan konfigurasi yang berbeda.

## 1. Kapasitas kapasitor

Karena  $E$  sebanding dengan  $Q$ , maka  $V$  juga sebanding dengan  $Q$ . Konstanta perbandingan antara muatan  $Q$  dengan  $V$  disebut sebagai kapasitansi, dengan persamaan:

$$C = \frac{Q}{V} \tag{1.102}$$

Kapasitansi semata-mata dipengaruhi oleh kuantitas geometri, diantaranya ukuran, bentuk, dan jarak pisah antara dua konduktor. Dalam satuan SI,  $C$  dinyatakan dalam farad (F).

$$1 \text{ farad} = 1 \text{ Coulomb} / 1 \text{ Volt}$$

$$1 \text{ mikروفarad} = 1 \mu F = 1 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$1 \text{ nanofarad} = 1 nF = 1 \times 10^{-9} \text{ F}$$

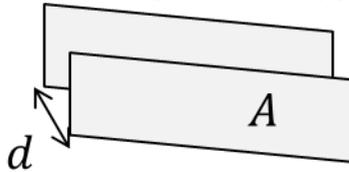
$$1 \text{ pikofarad} = 1 pF = 1 \times 10^{-12} \text{ F}$$

Perhatikan bahwa  $V$  secara definisi menyatakan bahwa potensial listrik dari konduktor positif lebih rendah dari pada konduktor negatif. Kapasitansi adalah sebuah besaran intrinsik yang selalu bernilai positif. Apabila kamu diminta untuk menentukan kapasitansi dari konduktor tunggal, maka konduktor keduanya adalah sebuah kulit bola bermuatan  $-Q$  imajiner dengan jari – jari tak hingga yang menyelubungi seluruh permukaan konduktor. Kulit imajiner ini tak berkontribusi terhadap medan dan kapasitasnya diberikan oleh persamaan 1.102 dimana  $V$  adalah potensial dengan titik referensi (titik awal) dari tak hingga.

### Contoh Kapasitansi kapasitor pelat sejajar

Tentukan kapasitansi dari sebuah kapasitor pelat paralel yang terdiri dari dua permukaan logam dengan luas penampang  $A$  dan saling terpisah pada jarak  $d$  (Gambar 1.34)

Gambar 1. 34 Kapasitor Pelat Sejajar



**Jawab:**

jika kita menempatkan  $+Q$  pada keping depan dan  $-Q$  pada keping belakang, maka muatan – muatan itu akan terdistribusi seragam pada setiap permukaan keping. Anggap luas keping  $A$  cukup besar dan jarak pisah antara dua keping  $d$  kecil.

Densitas muatan bidang  $\sigma$  dinyatakan dengan

$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

Sehingga medan listrik yang dihasilkannya adalah  $\frac{1}{\epsilon_0} \frac{Q}{A}$  dan beda potensial antara kedua keping adalah sebesar

$$V = \frac{Q}{A\epsilon_0} d$$

Kemudian

$$C = \frac{A\epsilon_0}{d}$$

Sebagai contoh, jika pelat sejajar berbentuk persegi dengan oanjang 1 cm, terpisah sejauh 1 mm, maka besar kapasitansinya adalah  $9 \times 10^{-3} F$ .

**Contoh Kapasitansi dua bola berongga konsentris**

Tentukan kapasitansi dari dua bola logam konsentris berongga dengan jari- jari  $a$  dan  $b$

Jawab:

Tempatkan muatan  $+Q$  pada bola bagian dalam dan  $-Q$  pada bola yang terluar. Medan diantara kedua bola adalah

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r}$$

Sehingga beda potensial diantara dua bola adalah

$$V = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_b^a \frac{1}{r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)$$

Karena  $V$  sebanding dengan  $Q$  maka besar kapasitansi

$$C = \frac{Q}{V} = 4\pi\epsilon_0 \frac{ab}{(b-a)}$$

## 2. Pengisian Kapasitor

Untuk mengisi kapasitor, maka kita harus memindahkan semua elektron pada pelat positif dan memindahkannya ke pelat negatif. Dalam pengisian ini terjadi kerja yang “melawan” medan listrik, dimana medan listrik ini akan selalu menarik elektron kembali ke pelat positif dan menolak elektron untuk menuju pelat negatif. Berapa besar usaha yang diperlukan kemudian agar kapasitor mencapai sejumlah  $Q$ ? Anggap pada tahapan akhir muatan pada pelat positif adalah  $q$ , sehingga beda potensialnya adalah  $q/C$ . Sehingga persamaan usaha yang harus dikerjakan untuk memindahkan muatan  $dq$  adalah

$$dW = \left(\frac{q}{C}\right) dq$$

Total usaha yang diperlukan untuk charging dari  $q = 0$  ke  $q = Q$  adalah

$$W = \int_0^Q \left(\frac{q}{C}\right) dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

Karena  $Q = CV$

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

Dimana  $V$  adalah potensial akhir dari kapasitor.

### Tugas

Tentukan besar kapasitansi per satuan panjang dari dua tabung logam koaksial dengan jari – jari  $a$  dan  $b$  (lihat Gambar)

Gambar 1. 35 Kapasitor Silinder Koaksial



Jawab

## Rangkuman

- Lima (5) properti dari konduktor ideal pada keadaan elektrostatik, yaitu:
  - Medan listrik di dalam konduktor adalah nol
  - Densitas muatan di dalam konduktor adalah nol.
  - Seluruh muatan netto berada di permukaan konduktor.
  - Bahan konduktor adalah sebuah permukaan ekuipotensial.
  - Medan listrik memiliki arah tegak lurus terhadap permukaan konduktor, dan hanya terdapat di luar konduktor
- Bagian dalam bahan konduktor berlubang akan tetap mengalami resultan medan listrik sama dengan nol karena adanya induksi muatan.
- Besar gaya elektrostatik per satuan luas pada permukaan konduktor dinyatakan dalam:

$$\mathbf{f} = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0} \hat{\mathbf{n}}$$

- Dengan tekanan elektrostatik dinyatakan oleh

$$P = \frac{\epsilon_0}{2} E^2$$

- Kapasitansi

- Konstanta perbandingan antara muatan  $Q$  dengan  $V$  disebut sebagai kapasitansi, dengan persamaan:

$$C = \frac{Q}{V}$$

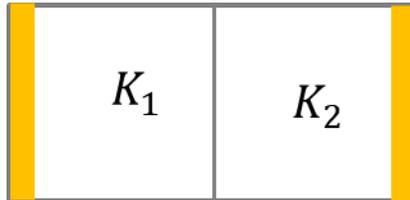
- Total usaha yang diperlukan untuk charging dari  $q = 0$  ke  $q = Q$  adalah

$$W = \int_0^Q \left(\frac{q}{C}\right) dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2$$

# Uji Formatif

## Pilihan Ganda

1. Sebuah kapasitor dibuat dari dua keping logam persegi dengan luas  $L^2$  dipisahkan oleh jarak  $d$ .



Setengah ruang antara kedua keping diisi dengan bahan yang memiliki tetapan dielektrik  $K_1$ . Setengah bagian lagi diisi bahan dengan tetapan dielektrik  $K_2$ . Anggap kapasitas kapasitor dengan ruang vakum adalah  $C_0$  maka kapasitas kapasitor ini adalah ....

A.  $\frac{5C_0K_1K_2}{K_1+K_2}$

D.  $\frac{2C_0K_1K_2}{K_1+K_2}$

B.  $(K_1 + K_2)C_0$

E.  $\frac{C_0(K_1+K_2)}{K_1+K_2}$

C.  $\frac{C_0K_1K_2}{K_1+K_2}$

2. Tiga kapasitor dengan kapasitansi masing-masing 1 mF, 2 mF dan 3 mF dirangkai secara seri dan diberi tegangan 1 volt pada ujung-ujungnya.

(1) Masing-masing kapasitor memiliki muatan listrik yang sama banyak.

(2) Kapasitor yang besarnya 1 mF menyimpan energi listrik terbesar.

(3) Pada kapasitor 3 mF bekerja tegangan terkecil

(4) Ketiga kapasitor bersama-sama membentuk sebuah kapasitor ekuivalen dengan muatan sebesar  $\frac{6}{11}C$ .

Pernyataan yang benar ditunjukkan oleh nomor

A. (1) , (2) dan (3)

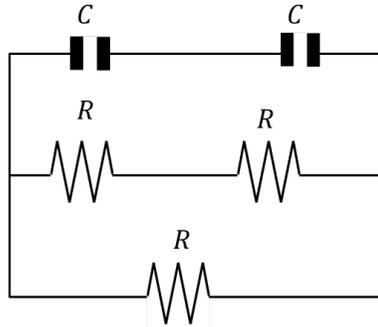
D. (4) saja

B. (1) dan (3)

E. Semua benar

C. (2) dan (4)

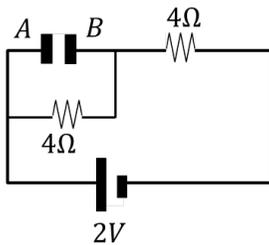
3. Dua kapasitor masing- masing dengan kapasitas  $C$  dilepaskan muatannya melalui rangkaian seperti ditunjukkan gambar berikut.



Besar  $R$  pengganti dan  $C$  ekuivalen dari rangkaian tersebut adalah ....

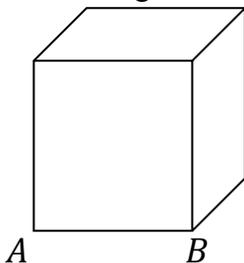
- A.  $\frac{1}{4} R$  dan  $\frac{1}{2} C$
- B.  $\frac{1}{3} R$  dan  $\frac{1}{2} C$
- C.  $\frac{1}{2} R$  dan  $\frac{1}{2} C$
- D.  $\frac{2}{3} R$  dan  $\frac{1}{2} C$
- E.  $R$  dan  $\frac{1}{2} C$

4. Apabila sebuah kapasitor yang kapasitansinya  $3\mu F$  dihubungkan pada ujung  $A$  dan  $B$  maka muatan penuh yang tersimpan pada kapasitor adalah ...



- A.  $6 \mu F$
- B.  $4 \mu F$
- C.  $3 \mu F$
- D.  $2 \mu F$
- E. 0

5. Pada rangkaian kubus di samping,



tiap rusuknya terpasang sebuah kapasitor dengan kapasitas  $C$ . Kapasitas ekivalen rangkaian jika diukur pada titik-titik A dan B adalah ....

- A.  $\frac{2}{3} C$
- B.  $\frac{5}{6} C$
- C.  $C$
- D.  $\frac{6}{5} C$
- E.  $\frac{3}{4} C$

### Essay

1. Dua keping sejajar yang terpisah sejauh 3 cm terhubung baterai 120 V. Kedua keping berada dalam ruang hampa.

a. Tentukan besar kuat medan listrik di antara ke dua keping tersebut.

Jawab

b. Tentukan gaya yang dialami elektron yang berada di antara kedua keping tersebut

Jawab

c. hitung energi potensial listrik yang hilang jika elektron berpindah dari keping B ke keping A

Jawab

d. Jika elektron dilepas di keping B, berapa kecepatan elektron sesaat sebelum menumbuk keping A?

Jawab

2. Sebuah kapasitor  $0,8 \text{ mF}$  dihubungkan ke catu daya  $20 \text{ V}$  dan dibuang muatannya melalui resistor  $80 \text{ k}\Omega$ , hitung

a. muatan awal yang disimpan kapasitor

Jawab

b. arus pelepasan awal

Jawab

c. nilai tetapan waktu

Jawab

d. muatan pada keping setelah  $128 \text{ s}$

Jawab

e. beda potensial saat itu

Jawab

## Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

Griffiths, D. J. (2012). Introduction to electrodynamics 4<sup>th</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.

Kanginan, Marthen. (2018). Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan Matematika dan Ilmu-Ilmu Alam. Jakarta: Erlangga

Halliday, Resnick. (2005) Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2. Jakarta: Erlangga.

Effendi, Rustam, dkk. (2007). Medan Elektromagnetika terapan. Jakarta: Erlangga.

Sailah, Siti, dkk. (2014). Medan Eleltromagnetik, Teori dan contoh soal. Yogyakarta: ANDI.

[https://edurev.in/course/quiz/result/1643\\_5044\\_c82b7342-4bb2-4284-b92f-74e4ff5e7236](https://edurev.in/course/quiz/result/1643_5044_c82b7342-4bb2-4284-b92f-74e4ff5e7236)

[http://www.owl.net.rice.edu/~phys102/Tests/2006/Exam1\\_06\\_MC\\_KEY.pdf](http://www.owl.net.rice.edu/~phys102/Tests/2006/Exam1_06_MC_KEY.pdf)

[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University\\_Physics/Book%3A\\_rpvUniversity\\_Physics\\_\(OpenStax\)/Map%3A\\_University\\_Physics\\_II\\_-\\_Thermodynamics\\_Electricity\\_and\\_Magnetism\\_\(OpenStax\)/05%3A\\_Electric\\_Charges\\_and\\_Fields/5.06%3A\\_Calculating\\_Electric\\_Fields\\_of\\_Charge\\_Distributions](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_rpvUniversity_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_II_-_Thermodynamics_Electricity_and_Magnetism_(OpenStax)/05%3A_Electric_Charges_and_Fields/5.06%3A_Calculating_Electric_Fields_of_Charge_Distributions)

<http://www.phys.nthu.edu.tw/~thschang/notes/EM02.pdf>

[https://edurev.in/course/quiz/attempt/-1\\_Work-And-Energy-In-Electrostatics-System-MCQ-/f2d785f9-9758-4619-8e41-55a1225a14fb](https://edurev.in/course/quiz/attempt/-1_Work-And-Energy-In-Electrostatics-System-MCQ-/f2d785f9-9758-4619-8e41-55a1225a14fb)



# Kegiatan Pembelajaran 7 Penerapan Elektrostatika pada Teknologi Ramah Lingkungan

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mampu menjelaskan penerapan elektrostatika pada teknologi ramah lingkungan	Mahasiswa mampu menjelaskan aplikasi elektrostatika pada proses penyaringan polusi udara

## Uraian Materi

### Presipitator Elektrostatik

Kamu pasti sudah pernah mendengar bagaimana aplikasi elektrostatika pada penangkal petir, mesin fotokopi dan printer Ink-Jet. Namun sekarang mari kita berkenalan dengan salah satu aplikasi elektrostatika yang berperan pada filter udara.

Untuk dapat memahami tentang presipitator elektrostatik, kamu dapat mengklik link dibawah ini

<https://www.youtube.com/watch?v=AcyFY3iAdlw>

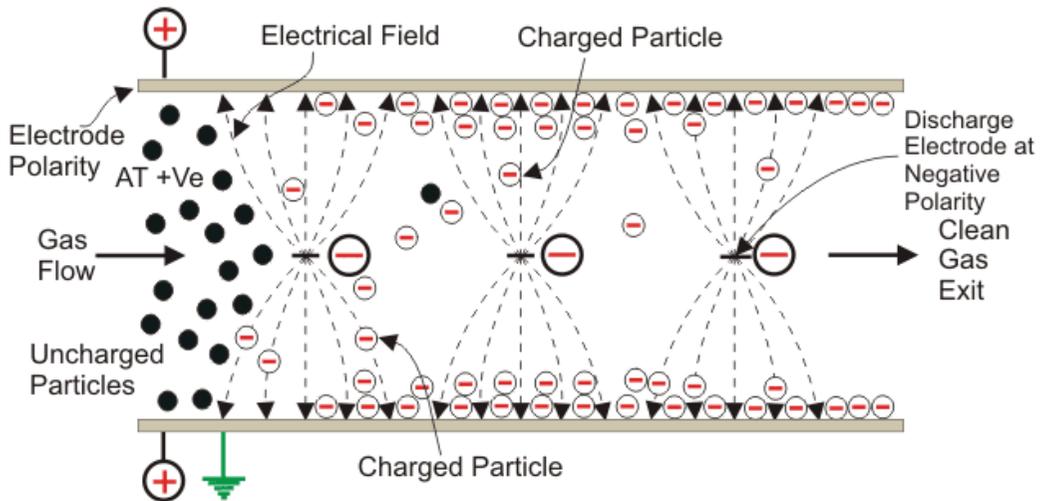
atau dengan melakukan scan kode QR disamping



Presipitator elektrostatik (electrostatic precipitation, ESP) atau bisa juga disebut sebagai filter elektrostatik adalah komponen yang berguna sebagai filter penyaring polusi udara. Presipitasi artinya proses pengendapan dari dalam suatu campuran, misalnya larutan, suspensi atau campuran gas. Presipitator elektrostatik dapat menghilangkan polutan udara seperti debu, partikel – partikel pengotor lainnya dengan berbagai ukuran, asap rokok dan asap pabrik. Polutan – polutan ini kemudian dibuang keluar bersama gas buangan yang sudah lebih ramah terhadap lingkungan.

Presipitator elektrostatika bekerja dengan memberi muatan pada partikel – partikel polutan. Partikel polutan yang telah dimuati kemudian ditarik oleh elektroda sehingga terpisah dari gas buangan menggunakan medan listrik eksternal (gambar 1.36).

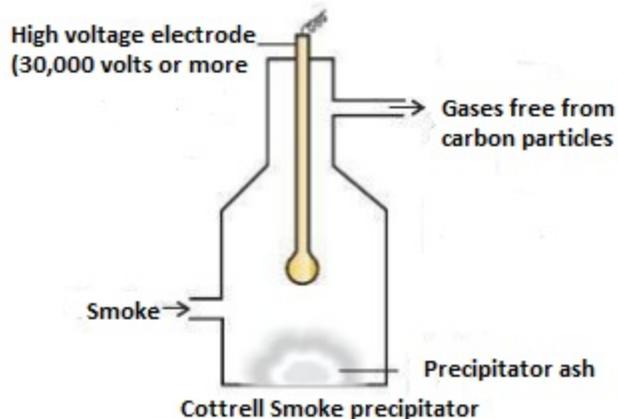
Gambar 1. 36 Skema pemisahan polutan pada presipitator elektrostatis



Sumber: <https://www.electrical4u.com/electrostatic-precipitator/>

Partikel polutan kemudian menempel pada elektroda pengumpul polutan (diendapkan) dan kemudian dibuang. Skema presipitator elektrostatis secara sederhana dapat diberikan sebagai berikut:

Gambar 1. 37 Skema dasar presipitator elektrostatis



Sumber: <https://www.examfear.com/notes-dir/00/00/22/00002239.html>

Filter seperti ini biasanya dipasang secara luas pada industri-industri besar, misalnya pada instalasi pembangkit tenaga listrik, industri baja, semen, kertas, penyulingan minyak, pemrosesan fosfat dan bahan kimia lainnya.

Nah, walaupun kamu sudah mengenal teknologi filtrasi udara menggunakan presipitator elektrostatis, namun bukan berarti kita bisa seenaknya mencemari bumi dengan polusi udara ya! Tetap jaga kelestarian alam, karena Bumi kita hanya ada satu dan itu adalah milik bersama.

## Rangkuman

Presipitator elektrostatis (electrostatic precipitation, ESP) atau bisa juga disebut sebagai filter elektrostatis adalah komponen yang berguna sebagai filter penyaring polusi udara.

## Evaluasi Formatif Proyek

1. Filter penyaring udara berupa presipitator elektrostatis kini tidak hanya digunakan pada industri berskala besar dengan medan listrik yang sangat besar. Perkembangan saat ini, presipitator elektrostatis juga dapat digunakan sebagai pembersih udara dalam ruang (indoor), dengan medan listrik yang cukup kecil (sesuai dengan skala rumahan).

Lakukanlah studi literatur, berselancarlah dengan internetmu, kemudian coba rancang presipitator elektrostatis versimu sendiri, yang wajib sesuai dengan ketentuan berikut:

- a. presipitator elektrostatis ini bisa dipakai pada skala rumahan, berfungsi sebagai pembersih udara dari debu atau asap pada ruangan kamar atau ruangan lain yang ada di rumah
- b. bisa beroperasi dengan medan listrik yang relatif kecil (sesuai dengan skala rumah tangga)
- c. memanfaatkan barang bekas
- d. buatlah desain gambarnya
- e. jelaskan cara kerjanya

Untuk mengerjakan tugas no. 1, kamu tinggal mengikuti format ini saja :

A. Identitas Nama Alat:
B. Pendahuluan ( jelaskan mengapa kamu memilih desain alat seperti ini)
C. Tujuan Desain

Jelaskan apa tujuan yang kamu ingin capai dari desain alat ini.

#### D. Manfaat

Jelaskan apa manfaat apa saja yang diperoleh dari desain alat ini.

#### E. Kajian Teori (minimal 1 halaman)

(Buatlah kajian teori dari desain alat ini. Jika merupakan pengembangan dari penelitian yang sudah ada, jabarkan dimana keunggulan yang kamu adopsi dan dimana modifikasi yang kamu lakukan, sehingga desain yang kamu buat memiliki inovasi. Jangan lupa memasukkan persamaan – persamaan jika menurutmu penting untuk menjelaskan desain yang akan kamu lakukan)

Kajian teori yang boleh digunakan adalah dari jurnal penelitian, skripsi, tesis / disertasi. Boleh juga dari buku – buku teks, jika ada.

Kamu tidak boleh mengutip blog, cuitan, atau bahkan status di media social, karena tidak memenuhi kaidah ilmiah)

#### F. Metode

##### 1. Alat dan Bahan yang diperlukan :

(jangan lupa memanfaatkan barang bekas ke dalam desainmu)

No.	Nama Alat dan Bahan	Jumlah	Harga (estimasi)
1.			
2.			
...			
dst			

##### 2. Alur kerja

(buat diagram alur kerja desain, mulai dari persiapan, desain, pembuatan, dan uji coba alat. Jangan lupa beri penjelasan dari alur kerjanya !)

##### 3. Desain alat

(berikan gambar desain alat, dan jangan lupa beri penjelasan)

##### 4. Uji coba alat

Berikan penjelasan apa saja bentuk uji coba alat yang ingin kamu buat. Ada berapa uji coba yang akan kamu lakukan ? Jelaskan juga bagaimana kamu melakukan uji coba itu.

#### G. Daftar Referensi

(buat dalam format APA)

2. Menurut pendapatmu, apakah materi yang kamu pelajari tentang elektrostatika bisa bermanfaat untuk membuat Bumi menjadi lebih baik atau malah sebaliknya ? Jelaskan pendapatmu, minimal dalam 200 kata

Jawab

## Umpan balik

Jika kamu dapat skor minimal 80, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

Griffiths, D. J. (2005). Introduction to electrodynamics 3<sup>rd</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.

Alaydrus, M. (2014). Medan Elektromagnetika. Yogyakarta: Penerbit ANDI.

<https://www.examfear.com/notes-dir/00/00/22/00002239.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=AcyFY3iAdlw>



# Modul 2

## Medan Listrik dalam Bahan

### Pendahuluan

**Hai Physics Learners!** Selamat datang di Modul 2 yang berjudul “Medan Listrik pada bahan”. Pada modul ini kita akan mempelajari tentang: 2.1) Polarisasi dan 2.2) Pergeseran Elektrik dan Dielektrik, 2.3) Penerapan dielektrik pada green technology dan 2.4) Spektroskopi Impendansi,

Pada bagian polarisasi kita akan mempelajari tentang medan listrik dalam bahan dielektrik, terutama penyebab bahan dielektrik dapat berfungsi sebagai penyimpan muatan. Pada bagian pergeseran elektrik atau perpindahan elektrik, kita memahami  $D$  sebagai medan listrik dalam bahan, kita akan mempelajari bagaimana operasi vektor dan makna fisis dari persamaan-persamaannya. Pada bagaian penerapan dielektrik kita akan melihat bagaimana bahan dielektrik adalah salah satu bahan yang banyak dikembangkan saat ini. Pada bagian spektroskopi impedansi, kita mempelajari metode yang digunakan untuk menguji dielektrik bahan.

Medan listrik dalam bahan banyak diterapkan pada teknologi material, penyimpanan energi, dan teknologi ramah lingkungan. Pembelajaran ini dapat menjadi dasar jika kamu berkecimpung sebagai periset atau sbagai guru dalam menjelaskan kebermanfaatan dari material dielektrik. Setelah menyelesaikan Modul 2, kamu diharapkan dapat menerapkan medan listrik dalam bahan di kehidupan sehari-hari ya. Mari pelajari dengan antusias!

### 1. Capaian Pembelajaran Lulusan

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki:

Ranah	Capaian Pembelajaran Lulusan
<b>Sikap (S)</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6)</li><li>2. Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8)</li></ol>
<b>Keterampilan Umum (KU)</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 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-1)</li></ol>

<b>Ranah</b>	<b>Capaian Pembelajaran Lulusan</b>
	2. Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi ; (KU-9)
<b>Keterampilan Khusus (KK)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mampu Mendayagunakan IPTEKS dalam Kegiatan Pembelajaran Fisika; (KK-3)</li> <li>2. Mampu Mendayagunakan IPTEKS yang Berorientasi dalam Kehidupan Sehari-Hari; (KK-4)</li> </ol>
<b>Pengetahuan (PG)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mengetahui dan Memahami Konsep dan Prinsip Keilmuan Fisika; (P-3)</li> <li>2. Mengetahui dan Memahami Konsep dan Prinsip Terapan Fisika (P-4)</li> <li>3. Mampu Menguasai Konsep Perkembangan Fisika secara Mikroskopik; (P-6)</li> </ol>

## 2. Kemampuan Akhir

<b>Ranah</b>	<b>Kemampuan Akhir (KA)</b>
<b>Pengetahuan</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mampu menganalisis muatan listrik dan gaya listrik, serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>2. Mampu menganalisis kuat medan listrik serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>3. Mampu menganalisis divergensi dan curl dari kuat medan listrik, garis gaya listrik, fluks serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>4. Mampu menganalisis potensial listrik serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>5. Mampu menganalisis usaha dan energi elektrostatik serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> </ol>
<b>Sikap</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif.</li> <li>2. Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik.</li> <li>3. Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.</li> </ol>

Ranah	Kemampuan Akhir (KA)
Psikomotor	Mahasiswa mampu melakukan percobaan berikut presentasi medan listrik dalam bahan dan manfaatnya dalam kehidupan sehari-hari

### 3. Prasyarat kompetensi

Prasyarat untuk mata kuliah ini antara lain:

- Mahasiswa mampu menganalisis gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang Gerak (Fisika Gerak dan Praktikum).
- Mahasiswa mampu menggunakan diferensiasi dan integral pada kalkulus (Matematika I)
- Mahasiswa mampu menggunakan analisis vektor berupa divergensi dan curl (Metode Matematika untuk Fisika I)

### 4. Kegunaan Modul

Modul medan listrik dalam bahan berguna bagi mahasiswa calon pendidik untuk memperkuat dasar pengetahuannya dalam kajian listrik magnet. Materi polarisasi adalah materi yang akan diajarkan di kelas XII SMA. Sementara materi perpindahan elektrik, dielektrik linier, dan spektroskopi impedansi adalah kajian fisika universitas yang akan berguna jika mahasiswa menjadi peneliti pada bidang sifat listrik bahan atau melanjutkan pendidikannya pada bidang fisika murni dan terapan.

### 5. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

Materi Pokok	Sub Materi Pokok
A. Polarisasi	1. Dielektrik 2. Induksi Dipol 3. Susunan Molekul Polar 4. Polarisasi 5. Medan dari objek
B. Perpindahan Elektrik dan Dielektrik Linier	1. pergeseran (perpindahan) elektrik 2. Dielektrik linier
C. Penerapan Medan Listrik dalam bahan untuk Teknologi ramah lingkungan	1. Bahan dielektrik dan semikonduktor 2. Aplikasi dielektrik pada teknologi ramah lingkungan
D. Spektroskopi Impedansi	1. Definisi dan Peran

<b>Materi Pokok</b>	<b>Sub Materi Pokok</b>
	2. Sejarah Singkat EIS 3. Prinsip dasar dan teknik EIS 4. Dielektrik Kompleks

# Kegiatan Pembelajaran 1 Polarisasi

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mampu menjelaskan gejala polarisasi sebagai pengaruh medan listrik terhadap pada bahan.	<ol style="list-style-type: none"><li>Mahasiswa mampu menjelaskan polarisasi pada atom netral.</li><li>Mahasiswa mampu menjelaskan polarisasi molekul netral pada saat diberi medan listrik seragam.</li><li>Mahasiswa mampu menjelaskan polarisasi molekul polar saat diberi medan listrik seragam.</li><li>Mahasiswa mampu menjelaskan polarisasi molekul polar saat diberi medan listrik tak seragam.</li></ol>

## Uraian Materi

### A. Dielektrik

Saat ini kita akan mempelajari tentang bagaimana bahan (material) melakukan respon terhadap medan pada keadaan elektrostatik. Telah dijelaskan sebelumnya bahwa terdapat dua jenis baha berdasarkan responnya terhadap medan listrik, yaitu konduktor dan non konduktor (isolator atau dielektrik). Dengan konduktor adalah bahan yang memiliki suplai elektron bebas yang tak terbatas. Kebanyakan elektron pada bahan konduktor tidak terikat pada satu atom secara khusus.

Sebaliknya pada bahan dielektrik, seluruh elektron terikat pada satu atom atau molekul khusus. Yang paling dapat dilakukan oleh elektron terikat ini adalah hanya bergerak disekitar atom atau molekulnya saja. Pergerakan elektron terikat ini sangat kecil jika dibandingkan dengan pergerakan elektron bebas. Tapi efek yang ditimbulkan oleh elektron terikat ini menentukan sifat dari dielektrik. Ada dua mekanisme yang dapat dihasilkan saat bahan dielektrik diberikan medan elektrik luar, yaitu pemuluran (*stretching*) dan rotasi (*rotating*).

### B. Induksi Dipol

Untuk memahami bagaimana medan listrik eksternal mempengaruhi bahan, maka kita akan melihat terlebih dahulu bagaimana medan listrik eksternal

ini mempengaruhi atom netral. Setelah kita mempelajari polarisasi pada atom netral, selanjutnya kita akan mempelajari tentang polarisasi pada molekul.

## 1. Polarisasi pada atom netral

Mungkin kamu akan berfikir bahwa medan listrik tidak akan berpengaruh, karena atom itu netral. Namun ternyata anggapan ini keliru. Medan listrik eksternal ini akan memberikan pengaruh pada atom netral. Kenapa? karena pada atom netral ini pun terdapat muatan positif pada nukleus (inti) dan muatan negatif (elektron) pada bagian kulitnya.

Pada saat netral, konfigurasi nukleus dan elektron saling simetris (setimbang), namun ketika diberikan medan listrik luar, nukleus yang bermuatan positif akan bergerak menuju arah medan listrik luar. Sementara elektron yang bermuatan negatif akan bereposisi (bergerak) menjauhi arah medan listrik. Reposisi (gerak nukleus dan elektron) ini akan terus berlangsung hingga atom mengalami keadaan setimbang yang baru, yaitu saat pusat konfigurasi susunan elektron tidak lagi sepusat dengan nukleusnya.

Pada keadaan setimbang yang baru ini, atom memiliki dua sisi dengan muatan yang berbeda, keadaan ini bisa dijelaskan misalnya saat awalnya atom berbentuk bola, maka kemudian akan berbentuk lonjong, dengan ujung yang satu bermuatan positif dan ujung yang lain bermuatan negatif. Jika muatan-muatan positif dan negatif pada atom sudah terdistribusi masing-masing pada kedua ujungnya ini, maka atom kemudian disebut memiliki kutub atau "terpolarisasi". Sehingga keadaan terpolarisasi pada sebuah atom ditandai dengan keberadaan muatan positif pada satu ujung dan muatan negatif pada ujung lainnya.

Karena muatan negatif dan positif sudah tampak saling terpusat pada ujung sisi masing-masing, maka akan timbul gaya tarik menarik antar muatan pada atom. Dengan demikian antara muatan positif (nukleus) dan muatan negatif (elektron) tidak akan terpisah akibat pengaruh medan luar ini, melainkan akan tetap terjaga ikatan antar keduanya. Medan listrik luar akan menarik muatan positif ke arahnya, sedangkan elektron akan menjauhi medan listrik.

Keadaan saat atom terpolarisasi ini menyebabkan atom memiliki dua kutub atau biasanya dinyatakan sebagai dipol (di = dua, pol : pole : kutub). Dipol ini memiliki momen dipol yang dinyatakan dalam  $p$ . Momen dipol adalah besaran vektor, arah momen dipol sama dengan arah medan listrik luar  $E$ . Besar momen dipol sebanding dengan medan listrik luar. Konstanta proporsional (konstanta perbandingan) dari momen dipol dengan medan listrik luar disebut sebagai polarisabilitas atom ( $\alpha$ ).

$$\mathbf{p} = \alpha \mathbf{E}$$

2.1

Nilai polarisabilitas atom berdasarkan hasil eksperimen diberikan pada tabel.

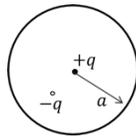
Tabel 2. 1 Polarisabilitas Atom

Atom	Polarisabilitas
H	0,667
He	0,205
Li	24,3
Be	5,60
C	1,76
Ne	0,396
Na	24,1
Ar	1.64
K	43,4
Cs	59.6

### Contoh

Sebuah model primitif terdiri dari sebuah nukleus ( $+q$ ) dikelilingi oleh awan bola elektron ( $-q$ ) dengan jari – jari  $a$  (Gambar 2.1). Hitung polarisabilitas atom dari atom ini!

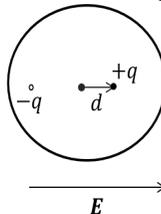
Gambar 2. 1 Atom netral sebelum terpolarisasi



Jawab:

Saat atom netral diberik medan listrik eksternal, maka atom netral tersebut akan menjadi terpolarisasi (Gambar 2.2)

Gambar 2. 2 Atom Terpolarisasi



Pergeseran nukleus hanya terjadi sedikit saja bahkan awan elektron sebenarnya tetap tampak seperti mempertahankan bentuk bola. Gambar 4.2

menunjukkan polarisasi pada atom hanya menimbulkan pergeseran kecil pada nuklus. Keseimbangan yang kedua ditandai dengan nukleus yang sudah bergeser sejauh  $d$  dari titik awalnya yaitu pusat bola. Pada titik itu medan eksternal mendorong nukleus untuk bergeser ke kanan dan menyebabkan keseimbangan terhadap medan internal yang mendorongnya ke arah kiri, sehingga

$$E = E_e$$

Dimana  $E_e$  adalah medan yang dihasilkan oleh awan elektron. Kini medan listrik pada jarak  $d$  terhadap pusat bola bermuatan adalah

$$E_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qd}{a^3}$$

Dengan

$$p = qd$$

Sehingga

$$p = qd = (4\pi\epsilon_0 a^3)E$$

Dan polarisabilitas atom diberikan oleh

$$\alpha = 4\pi\epsilon_0 a^3 = 3\epsilon_0 v$$

Dengan  $v$  adalah volume atom.

## 2. Polarisasi pada molekul

Polarisasi pada molekul tidak dapat dipandang sederhana, karena molekul – molekul ini sering terpolarisasi oleh satu sama lain. Karbon dioksida (Gambar 2.3) memiliki polarisabilitas sebesar  $4,5 \times 10^{-40} \text{ C}^2 \cdot \text{m}/\text{N}$  ketika kita mengaplikasikan medan listrik pada sumbu simetri molekul, tapi polarisabilitas ini akan menjadi  $2 \times 10^{-40}$  saat diberikan medan tegak lurus terhadap arah ini. Ketika medan diberikan pada beberapa sudut terhadap sumbu  $x$ , maka kita harus menggunakan komponen vektor dalam penyelesaiannya. Dalam bentuk persamaan dapat kita tuliskan sebagai berikut :

$$\mathbf{p} = \alpha_{\perp} \mathbf{E}_{\perp} + \alpha_{\parallel} \mathbf{E}_{\parallel}$$

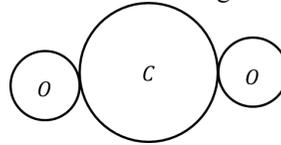
Keterangan

$\perp$  : komponen tegak lurus

$\parallel$  : komponen sejajar

Kemudian pada kasus ini diberikan jika  $\mathbf{p}$  tidak searah dengan  $\mathbf{E}$ . Sebuah molekul karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) berbentuk planar, atom – atom pada molekul ini tersusun secara lurus satu sama lain dengan atom karbon berada diantara dua atom oksigen lainnya (Gambar 2.3).

Gambar 2. 3 Karbon dioksida sebagai molekul non polar



Untuk sebuah molekul asimetris, maka persamaan 2.1 kita konversi menjadi persamaan umum hubungan linear antara  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{p}$  yang kita tuliskan :

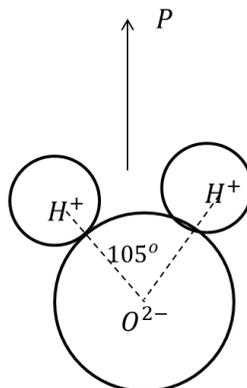
$$\begin{aligned} p_x &= a_{xx}E_x + a_{xy}E_y + a_{xz}E_z \\ p_y &= a_{yx}E_x + a_{yy}E_y + a_{yz}E_z \\ p_z &= a_{zx}E_x + a_{zy}E_y + a_{zz}E_z \end{aligned} \quad 2.2$$

Kemudian kita nyatakan kesembilan suku  $a_{ij}$  untuk mengganti tensor polarisabilitas. Nilai tensor ini bergantung pada arah dari sumbu yang dipilih, walaupun kita dapat menggunakan sumbu tertentu yang sering dipakai sebagai titik acuannya.

### C. Susunan Molekul Polar

Pada bagian B telah kita bahas tentang polarisasi pada atom dan molekul netral. Kini kita akan membahas bagaimana polarisasi pada molekul yang telah memiliki momen dipol permanennya sendiri, sebelum diberikan medan listrik luar. Contohnya pada molekul air ( $H_2O$ ) (Gambar 2.4), awan elektron cenderung berada di dekat atom oksigen dan menyebabkan molekul air ini membentuk sudut  $105^\circ$ .

Gambar 2. 4 Molekul Air sebagai contoh molekul polar



Keadaan ini membuat molekul air sudah dalam memiliki momen dipolnya sendiri, dengan muatan positif pada ujungnya dan muatan negatif pada sisi lain

yang berseberangan. Momen dipol molekul air ini cukup besar, yaitu  $6,1 \times 10^{-30}$  C.m, sehingga mengakibatkan air menjadi melukel yang efektif sebagai pelarut.

Apa yang terjadi saat molekul polar (misalnya air) ini diberi medan listrik eksternal?

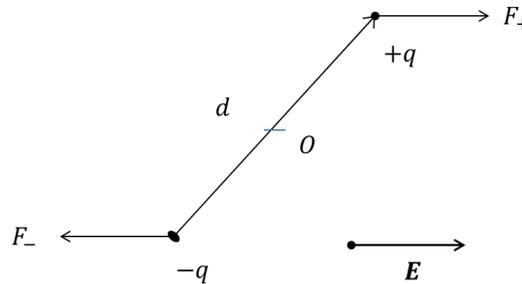
Jika medan listrik nya seragam, maka gaya pada ujung positif adalah sebesar ‘

$$F = +qE$$

Yang kemudian meniadakan gaya dari ujung negatif (Gambar 2.5) sebesar

$$F = +qE$$

Gambar 2. 5 Torsi pada molekul polar saat mengalami medan eksternal



Dengan demikian, tidak akan terjadi translasi pada molekul polar, namun demikian, pada molekul polar ini tetap akan terjadi torsi akibat medan listrik luar, sebesar:

$$\begin{aligned} \mathbf{N} &= (\mathbf{r}_+ \times \mathbf{F}_+) + (\mathbf{r}_- \times \mathbf{F}_-) \\ &= \left[ \left( \frac{d}{2} \times qE \right) + \left( \left( -\frac{d}{2} \right) \times (-qE) \right) \right] \\ &= q\mathbf{d} \times \mathbf{E} \end{aligned}$$

Sehingga sebuah molekul yang memiliki momen dipole  $p = dq$  pada medan listrik eksternal akan mengalami torsi sebesar:

$$\boxed{\mathbf{N} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}} \quad 2.3$$

Perhatikan bahwa  $\mathbf{N}$  memiliki arah segaris dengan  $p$  dan paralel terhadap  $E$  (gunakan kaidah tangan kanan untuk torsi). Molekul polar ini akan bebas berotasi hingga sesuai dengan arah dari medan eksternal.

Edengan  $F_-$ , dengan demikian resultan gaya tidak nol dan akan menghasilkan gaya netto (molekul polar akan mengalami translasi). Meskipun medan listrik

memiliki nilai yang berbeda- beda, namun kita dapat menentukan persamaan untuk gaya pada sebuah dipol akibat medan listrik tak seragam sebagai berikut:

$$F = F_+ + F_- = q(E_+ + E_-) = q(\Delta E)$$

Dengan  $\Delta E$  menunjukkan perbedaan medan antara ujung positif dan negatif. Asumsikan bahwa jarak antar dipol sangat pendek, sehingga kita dapat menggunakan persamaan berikut untuk menentukan perubahan medan pada sumbu x ( $E_x$ )

$$\Delta E_x = (\nabla E_x) d$$

Persamaan diatas dapat kita sesuaikan lagi pada sumbu y dan z, dengan mengganti label *subscript*-nya

Secara umum, persamaan diatas menjadi

$$\Delta E = (d \cdot \nabla) E$$

Sehingga

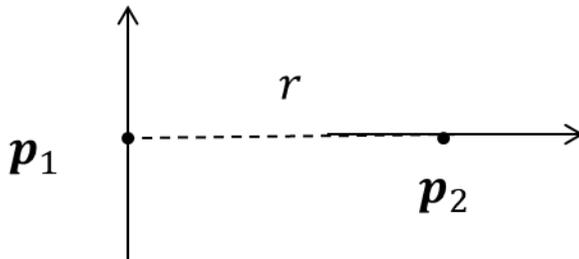
$$F = (p \cdot \nabla) E \quad 2.4$$

Untuk sebuah dipol sempurna, dengan panjang tak hingga, maka persamaan 2.3 dapat kita modifikasi untuk mencari torsi yang dialami oleh sebuah dipol yang beradai di medan listrik tak seragam, dengan rotasi berporos pada titik tengah dipol adalah :

$$N = (p \times E)(r \times F)$$

### Tugas

Perhatikan gambar berikut.



Dua buah dipol  $p_1$  dan  $p_2$  adalah dipol sempurna yang saling terpisah sejauh  $r$  satu sama lain. Jika kedua pusat dipol berada pada garis lurus searah sumbu x, maka hitunglah

a. Besar torsi yang dialami oleh  $p_1$  oleh  $p_2$

Jawab

b. Besar torsi yang dialami oleh  $p_2$  oleh  $p_1$

Jawab

## D. Polarisasi

Dari pembahasan sebelumnya kita telah mempelajari bagaimana medan listrik mempengaruhi atom atau molekul. Sekarang kita akan mempelajari bagaimana medan listrik mempengaruhi bahan dielektrik? Jika bahan memiliki atom-atom netral (atau molekul non polar), medan listrik akan menginduksi setiap dipol – dipol kecil dan mengarahkannya pada arah yang sama dengan medan listrik luar. Jika bahan terbuat dari molekul polar, maka setiap dipol permanen akan mengalami torsi, menyesuaikan arahnya sehingga bisa searah dengan medan listrik luar.

Perhatikan bahwa dua mekanisme ini menghasilkan hal yang sama: ada banyak dipol-dipol kecil yang mengarah sesuai dengan medan eksternal, sehingga material menjadi **terpolarisasi**. Untuk lebih memudahkan, polarisasi dapat kita nyatakan sebagai berikut:

$$\mathbf{P} \equiv \text{momen dipol per unit volum}$$

Dengan  $\mathbf{P}$  kita sebut sebagai **polarisasi** atau juga dapat disebut sebagai **vektor polarisasi**.

Biasanya pada material polar, dipol- dipol akan lebih mudah mengalami rotasi dibandingkan dengan peregangan (translasi). Pada beberapa material juga mengalami kekakuan setelah terpolarisasi, sehingga bentuknya tetap terpolarisasi meskipun medan listrik telah dihilangkan.

## E. Medan dari objek terpolariasasi

### 1. Muatan terikat

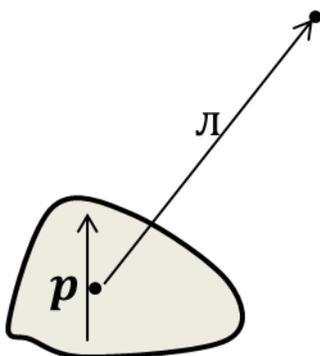
Anggap kita memiliki sebuah bahan yang sudah terpolariasasi, artinya setiap dipol- dipol kecil di dalamnya sudah tersusun searah. Dan momen dipol per satuan volume telah diberikan sebesar  $\mathbf{P}$ . Pertanyaan berikutnya adalah berapa besar medan listrik yang dihasilkan dari internal bahan ini ? Untuk mengetahuinya maka kita akan meninjau medan listrik yang dihasilkan oleh secercah (satu elemen kecil) dari dipol dan menentukan medan yang dihasilkannya, setelah itu kita akan lakukan integral untuk mengetahui besar medan internal yang dihasilkan dari seluruh dipol yang ada di dalam material.

Untuk sebuah dipol tunggal, kita dapat menentukan besar potensialnya adalah

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p}}{\mathcal{L}^2} \hat{\mathcal{L}} \quad 2.5$$

Dengan  $\mathcal{L}$  adalah vektor dari dipol ke titik yang dicari besar potensialnya (Gambar 2.6).

Gambar 2. 6 Medan listrik dari sebuah material terpolariasasi



Dengan pada pembahasan sebelumnya kita telah mengevaluasi besar momen dipol pada setiap volume dapat kita tuliskan sebagai

$$\mathbf{p} = \mathbf{P} d\tau$$

Dengan  $d\tau$  adalah elemen volume, sehingga total potensialnya adalah

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_v \frac{\mathbf{p}}{\mathcal{L}^2} \hat{\mathcal{L}} d\tau \quad 2.6$$

Dengan

$$\frac{\hat{\mathcal{L}}}{\mathcal{L}^2} = \nabla \left( \frac{1}{\mathcal{L}} \right)$$

Sehingga persamaan 2.6 dapat kita tulis:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\mathcal{V}} \mathbf{P} \cdot \nabla \left( \frac{1}{\mathcal{L}^2} \right) d\tau$$

Kemudian lakukan integrasi sebagian menggunakan aturan perkalian produk nomor 5, sehingga

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \int_{\mathcal{V}} \nabla \cdot \left( \frac{\mathbf{P}}{\mathcal{L}} \right) d\tau - \int_{\mathcal{V}} \frac{1}{\mathcal{L}} (\nabla \cdot \mathbf{P}) d\tau \right]$$

Atau dengan menggunakan teorema divergensi diperoleh

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \oint_S \frac{1}{\mathcal{L}} \mathbf{P} \cdot d\mathbf{a} - \int_{\mathcal{V}} \frac{1}{\mathcal{L}} (\nabla \cdot \mathbf{P}) d\tau \right] \quad 2.7$$

Dengan suku pertama menunjukkan besar potensial pada permukaan bermuatan

$$\sigma_b \equiv \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad 2.8$$

Dengan  $\hat{\mathbf{n}}$  adalah vektor normal, dan suku kedua adalah potensial dari muatan ruang yang kita nyatakan dalam

$$\rho_b \equiv -\nabla \cdot \mathbf{P} \quad 2.9$$

Sehingga persamaan 2.7 kita nyatakan dalam

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \oint_S \frac{\sigma_b}{\mathcal{L}} \cdot d\mathbf{a} - \int_{\mathcal{V}} \frac{\rho_b}{\mathcal{L}} d\tau \right] \quad 2.10$$

Artinya potensial (dan juga medan) dari sebuah material terpolarisasi juga dihasilkan dari densitas muatan ruang ditambah muatan permukaan. Dari pada kita melakukan integrasi terhadap dipol tak hingga, dari persamaan 2.6, maka kita dapat menentukan muatan terikatnya, dan kemudian hitung medan listrik yang dihasilkannya. dengan cara yang sama, kita juga dapat menghitung medan dari muatan volum dan muatan permukaan (misalnya dengan menggunakan hukum gauss).

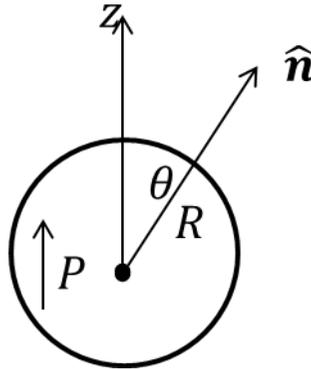
## Contoh

Tentukan besar medan listrik yang dihasilkan oleh sebuah bola yang terpolarisasi secara seragam, dengan jari – jari bola adalah R.

### Jawab:

Kita gunakan sumbu z untuk yang berimpit dengan arah polarisasi (Gambar 2.7)

Gambar 2. 7 Menentukan medan listrik dari bola terpolarisasi



Densitas muatan ruang terikat netto  $\rho_b$  adalah nol , oleh sebab itu bola terpolarisasi secara seragam. Namun densitas muatan di permukaan tidak nol, sehingga

$$\sigma_b = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}} = P \cos \theta$$

Dengan  $\theta$  adalah koordinat bola. Besar medan listrik yang dihasilkan pelh densitas muatan  $P \cos \theta$  yang tersebar merata di seluruh permukaan bola , dapat dinyatakan dalam persamaan berikut. (untuk memperoleh persamaan ini, lihat Example 3.9 Griffith)

$$V(r, \theta) = \begin{cases} \frac{P}{3\epsilon_0} r \cos \theta & \text{untuk } r \leq R \\ \frac{P}{3\epsilon_0} \frac{R^3}{r^2} \cos \theta & \text{untuk } r \geq R \end{cases}$$

Karena  $r \cos \theta = z$ , maka medan di dalam bola adalah seragam

$$\mathbf{E} = -\nabla V = -\frac{P}{3\epsilon_0} \hat{\mathbf{z}}, \text{ untuk } r < R \quad 2.11$$

Besar potensial di luar permukaan bola identik dengan dipol yang berada pada titik origin

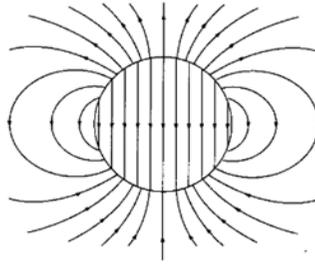
$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p}}{r^2} \cdot \hat{\mathbf{r}}, \text{ untuk } r \geq R \quad 2.12$$

Dimana momen dipol setara dengan total momen dipol pada seluruh permukaan

$$\mathbf{p} = \frac{4}{3} \pi R^3 \mathbf{P} \quad 2.13$$

Medan dari bola terpolarisasi seragam diberikan oleh Gambar 2.8.

Gambar 2. 8 Bola terpolarisasi seragam



### Tugas

Sebuah bola dengan jari- jari R terpolarisasi sebesar

$$\mathbf{P}(r) = k\mathbf{r}$$

Dengan k adalah konstanta dan r adalah vektor posisi dari pusat bola

a. hitunglah besar muatan terikat dari  $\sigma_b$  dan  $\rho_b$

**Jawab**

--

b. Tentukan besar medan di dalam dan di luar bola

**Jawab**

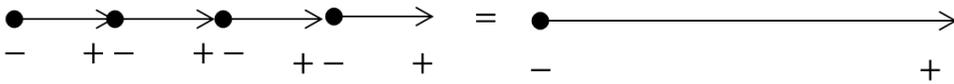
--

## 2. Interpretasi fisis dari Muatan Terikat

Dari pembahasan sebelumnya, kita dapat menyimpulkan bahwa besar medan listrik yang dihasilkan oleh bahan terpolarisasi sama dengan besar medan yang dihasilkan dari muatan terikatnya yaitu dari muatan ruang  $\rho_b$  dan muatan permukaan  $\sigma_b$ . Tapi kita belum menjelaskan secara khusus apa yang dimaksud dengan muatan terikat. Pada pembahasan kali ini kita akan mempelajari bahwa fenomena polarisasi akan mengantarkan kita pada sebuah akumulasi (kumpulan) muatan-muatan.

Ide dasarnya sangat sederhana, anggap kita memiliki sebuah tali dipol (Gambar 2.9).

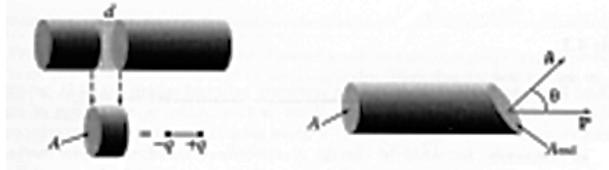
Gambar 2. 9 Dipol pada sebuah tali



Di sepanjang garis, kepala dari salah satu dipol adakan meniadakan ekor dipol tetangganya. Sehingga hanya tersisa dua muatan pada setiap ujung (hanya tersedia satu ekor dan satu kepala). Kedua sisa muatan ini lah yang menentukan besar muatan netto, Kedua muatan ini kemudian kita sebut sebagai muatan terikat, karena kedua muatan ini tidak dapat dikeluarkan dari material. Dalam pengertian bahan dielektrin, muatan terikat adalah muatan yang terikat secara spesifik pada sebuah atom atau molekul.

Untuk menghitung besar muatan terikat yang sesungguhnya jika diberikan polarisasi, maka kita akan menganalogikan polarisasi pada tali ini seperti sebuah tabung dielektrik, dengan arah dipol paralel terhadap P. Momen dipol kita gambarkan seperti sebuah potongan kecil dari P (Gambar 2.10), dengan  $P = Ad$ .

Gambar 2. 10 Analogi Polarisasi Dielektrik dengan sebuah tabung



Dengan A adalah luas penampang lintang dan d adalah panjang potongan (komponen dipol). Dalam bentuk q pada kedua ujung-ujung momen dipol ini dapat kita tuliskan sebagai  $q = Pd$ , sehingga besar muatan terikat yang diambil pada bagian kanan tabung adalah

$$q = PA$$

Jika pada bagian ujung tali dipotong tegak lurus, maka muatan permukaannya akan menjadi

$$\sigma_b = \frac{q}{A} = P$$

Untuk sebuah irisan miring (Gambar 2.9 kanan), maka besar muatannya adalah sama, namun penampang lintangnya diberikan oleh

$$A = A_{end} \cos \theta$$

Sehingga

$$\sigma_b = \frac{q}{A_{end}} = P \cos \theta = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}}$$

Efek dari polarisasi kemudian adalah untuk menggambarkan keberadaan muatan terikat  $\sigma_b = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}}$  pada seluruh permukaan bahan. Dengan demikian kita telah mengetahui darimana asalnya muatan terikat.

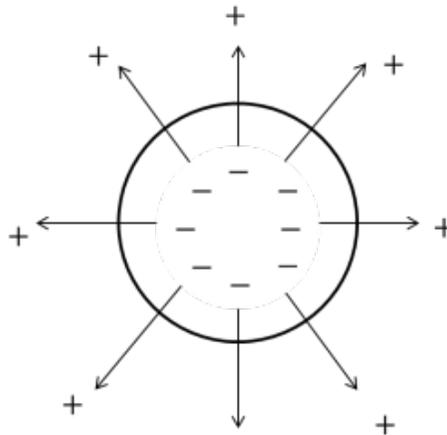
Jika polarisasi tidak seragam, maka kita memperoleh akumulasi muatan terikat diseluruh permukaan sama dengan di seluruh material. Divergensi dai  $\mathbf{P}$  akan menunjukkan sumber dari muatan negatif di bagian dalam (Gambar 2.11). Besar muatan terikat netto (negatif) pada volume yang diberikan juga setara dengan besar muatan positif yang ada di bagian luar permukaan. Dengan demikian, besar  $\mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}}$  per satuan luas diberikan oleh

$$\int_V \rho_b d\tau = - \oint_S \mathbf{P} \cdot d\mathbf{a} = - \int_V (\nabla \cdot \mathbf{P}) d\tau$$

Karena berlaku untuk seluruh volumen , maka

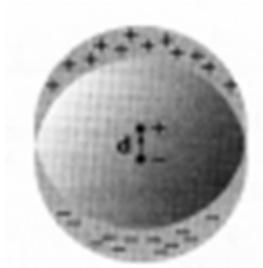
$$\rho_b = - \nabla \cdot \mathbf{P}$$

Gambar 2. 11 Polarisasi Tak Seragam dari Sebuah Bola



### Contoh

Ada cara lain dalam menganalisis bola terpolarisasi seragam, yaitu dengan menggunakan muatan terikat. Pada bola terpolarisasi seragam sebenarnya terdapat dua bagian distribusi muatan, yaitu di bagian atas (+) dan bawah (-). Dua bola (+) dan (-) ini saling tumpang tindih pada bagian tengah bola, sehingga tampak seperti kelopak (+) dan (-). Bagian kelopak yang agak keluar dari bola inilah yang disebut sebagai muatan terikat.



Besar medan pada bagian overlap (tumpang tindih) antara dua muatan seragam dari bola kita tulis sebagai

$$E = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qd}{R^3}$$

Dengan  $q$  adalah muatan total bola positif,  $d$  adalah vektor posisi dari pusat bola (+) ke pusat bola (-) dan  $R$  adalah jari-jari bola. Kita dapat menyatakan persamaan diatas dalam bentuk bola terpolarisasi sebagai berikut

$$\mathbf{p} = q\mathbf{d} = \left(\frac{4}{3}\pi R^3\right) \mathbf{P}$$

Sebagai

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{3\epsilon_0} \mathbf{P}$$

Sementara pada titik di luar bola, seluruh muatan terkonsentrasi pada masing-masing bola dan besar potensial kita nyatakan sebagai

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p} \cdot \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

## Rangkuman

1. Medan listrik pada bahan non konduktor (dielektrik dan isolator)
  - a. konduktor adalah bahan yang memiliki suplai elektron bebas yang tak terbatas, elektron pada bahan konduktor tidak terikat pada satu atom secara khusus. Sebaliknya pada bahan dielektrik, seluruh elektron terikat pada satu atom atau molekul khusus.
  - b. Ada dua mekanisme yang dapat dihasilkan saat bahan dielektrik diberikan medan elektrik luar, yaitu pemuluran (stretching) dan rotasi (rotating).
2. Induksi dipol
  - a. pada atom netral
    - 1) Medan listrik eksternal ini akan memberikan pengaruh pada atom netral, yaitu atom netral akan menjadi terpolarisasi dan memiliki momen dipol
    - 2) Hubungan momen dipol dengan medanlistrik eksternal

$$\mathbf{p} = \alpha \mathbf{E}$$

Pada molekul netral, dengan medan seragam, besar momen dipolnya diberikan oleh

$$\mathbf{p} = \alpha_{\perp} \mathbf{E}_{\perp} + \alpha_{\parallel} \mathbf{E}_{\parallel}$$

### 3. Susunan molekul polar

#### a. Pada medan listrik eksternal seragam

Sebuah molekul polar yang memiliki momen dipole  $p = dq$  pada medan listrik eksternal seragam akan mengalami torsi sebesar:

$$\mathbf{N} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$$

#### b. pada medan listrik eksternal tak seragam

akan mengalami translasi sebesar

$$\mathbf{F} = (\mathbf{p} \cdot \nabla) \mathbf{E}$$

Dan rotasi sebesar

$$\mathbf{N} = (\mathbf{p} \times \mathbf{E})(\mathbf{r} \times \mathbf{F})$$

### 4. Polarisasi

$\mathbf{P} \equiv$  momen dipol per unit volum

### 5. Medan dari objek terpolarisasi

Potensial (dan juga medan) dari sebuah material terpolarisasi juga dihasilkan dari muatan terikatnya, yaitu muatan ruang  $\rho_b$  ditambah muatan permukaan  $\sigma_b$

#### a. muatan terikat

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \oint_S \frac{\sigma_b}{r} \cdot d\mathbf{a} + \int_V \frac{\rho_b}{r} d\tau \right]$$

#### b. Interpretasi fisis dari muatan terikat

hubungan Besar muatan permukaan dengan Polarisasi  $\mathbf{P}$  adalah :

$$\sigma_b = \frac{q}{A_{end}} = P \cos \theta = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}}$$

Muatan terikat adalah muatan yang terikat pada bahan dan tidak dapat meninggalkan bahan, muatan terikat ini berasal (ditunjukkan oleh) dari fenomena polarisasi.

# Uji Formatif

## Pilihan Ganda

1. Dipol terbentuk saat material dielektrik ditempatkan pada ....

- A. Lingkungan inert
- B. Medan listrik
- C. Medan Magnet
- D. Keadaan Vakum
- E. Lingkungan berpotensi tinggi

2. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) karbon dioksida adalah dielektrik polar
- (2) molekul air adalah dielektrik polar
- (3) atom netral adalah atom yang tidak bermuatan
- (4) Atom netral adalah atom yang memiliki jumlah muatan netto sama dengan nol

Pernyataan yang benar adalah

- A. (1), (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

3. Besar torsi induksi pada sebuah dipol ketika ditempatkan oleh medan listrik  $E$  adalah

- A.  $E \sin \theta$
- B.  $p \cdot E \sin \theta$
- C.  $E \cos \theta$
- D.  $p E \cos \theta$
- E.  $\frac{E}{p} \cos \theta$

4. Dipol akan menjadi stabil ketika sudut antara dipol dan medan eksternal adalah

- A.  $0^\circ$
- B.  $45^\circ$
- C.  $60^\circ$
- D.  $90^\circ$
- E.  $180^\circ$

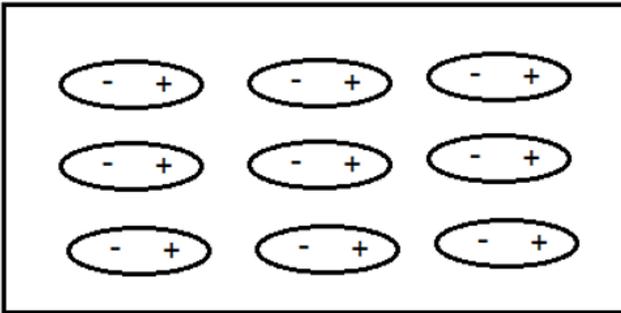
5. Polarisasi didefinisikan sebagai ...

- A. momen dipol per unit muatan titik
- B. momen dipol per unit panjang
- C. momen dipol per unit luas
- D. momen dipol per unit volume
- E. momen dipol per unit waktu

6. Pada sebuah tetesan air dengan jari – jari 1 mm , semua molekul dipol memiliki arah yang sama. Jika momen dipol dari sebuah molekul air adalah  $6 \times 10^{-30}$  C. m , maka besar polarisasi dari tetesan air adalah ....

- A. 0  
 B.  $6,4 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2}$   
 C.  $7,4 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2}$   
 D.  $8,4 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2}$   
 E.  $9,4 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2}$

7. Jika diberikan dipol –dipol bahan dielektrik sebagai berikut



Arah medan listrik eksternal yang diberikan pada bahan adalah ....

- A. dari kanan ke kiri  
 B. Dari atas ke bawah  
 C. Dari bawah ke atas  
 D. Dari kiri ke kanan  
 E. dari kiri atas ke kanan bawah

8. Diberikan pernyataan berikut

- (1) Muatan terikat adalah muatan yang tidak dapat meninggalkan bahan
- (2) Muatan terikat adalah muatan yang terikat pada satu atom atau molekul khusus.
- (3) Muatan terikat ditunjukkan oleh terjadinya polarisasi
- (4) Potensial dari sebuah material terpolarisasi juga ditentukan dari muatan terikatnya ( $\rho_b$  dan  $\sigma_b$ )

Pernyataan yang benar tentang muatan terikat adalah ....

- A. (1), (2) dan (3)  
 B. (1) dan (3)  
 C. (2) dan (4)  
 D. (4) saja  
 E. Semua benar

9. Sebuah model primitif terdiri dari sebuah nukleus ( $+q$ ) dikelilingi oleh awan bola elektron ( $-q$ ) dengan jari – jari  $a$  (Gambar 2.1). Polarisabilitas atom ini dinyatakan dengan persamaan ...

- A.  $4\pi\epsilon_0 a$   
 D.  $4\pi\epsilon_0 a^4$

B.  $4\pi\epsilon_0 a^2$   
C.  $4\pi\epsilon_0 a^3$

E.  $4\pi\epsilon_0 a^5$

10. Besar medan listrik yang dihasilkan oleh sebuah bola yang terpolarisasi secara seragam, dengan jari – jari R adalah ....

A. 0

B.  $-\frac{P}{\epsilon_0} \hat{z}$  di dalam bola

C.  $-\frac{P}{2\epsilon_0} \hat{z}$  di dalam bola

D.  $-\frac{P}{3\epsilon_0} \hat{z}$  di dalam bola

E.  $-\frac{P}{4\epsilon_0} \hat{z}$  di dalam bola

### Essay

1. Jelaskanlah apa yang dimaksud dengan :

a. induksi muatan

Jawab

b. polarisasi

Jawab

c. polaritas

Jawab

d. dipol

Jawab

e. bahan dielektrik

Jawab

f. permitivitas dielektrik

Jawab

2. Tentukan besar medan listrik yang dihasilkan oleh sebuah bola yang terpolarisasi secara seragam, dengan jari – jari bola adalah  $R$ , pada:

a. kulit bola

Jawab

b. di dalam bola

Jawab

c. di luar bola

Jawab

## Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan

pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

Griffiths, D. J. (2005). Introduction to electrodynamics 3<sup>rd</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.

Resnick, R., Walker, J., & Halliday, D. (1988). Fundamentals of physics (Vol. 1). Hoboken: John Wiley.

<https://mcqslearn.com/a-level/physics/mcq/electric-field-multiple-choice-questions-answers.php>

<https://www.sanfoundry.com/engineering-physics-questions-answers-dielectric-polarisation/>



# Kegiatan Pembelajaran 2 Pergeseran Elektrik dan Dielektrik Linear

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa mampu menjelaskan tentang pergeseran elektrik dan fenomena dielektrik linear	a. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang hubungan besaran pergeseran dielektrik $D$ , vektor polarisasi $P$ , medan total $E$ b. Mahasiswa mampu menentukan besar medan listrik di luar bahan dielektrik. c. Mahasiswa dapat menentukan besar kapasitansi, energi dan muatan pada kapasitor keping sejajar yang diisi material dielektrik.

## Uraian Materi

### A. Pergeseran Elektrik

Pada kegiatan pembelajaran 2.1 kita telah mempelajari bagaimana terjadinya polarisasi pada atom/ molekul yang non polar dan yang polar. Dari kegiatan pembelajaran 2.1 juga kita telah mempelajari bahwa di dalam bahan dielektrik tidak terdapat muatan bebas, sehingga muatan – muatan dalam bahan dielektrik tidak berkontribusi terhadap proses konduksi. Muatan – muatan ini terikat pada atom / molekulnya dan hanya mengalami sedikit pergeseran yang arahnya ditentukan oleh medan eksternal. Muatan – muatan terikat ini kemudian akan menghasilkan medan internal dari dalam bahan dielektrik ini sendiri. Keberadaan muatan – muatan terikat ini juga nantinya menyebabkan bahan dielektrik dapat berfungsi sebagai bahan pengisi kapasitor.

#### 1. Hukum Gauss pada bahan dielektrik

Pada kegiatan pembelajaran 2.1 kita telah mempelajari bagaimana pengaruh polarisasi dalam memproduksi muatan terikat pada volume bahan dielektrik. Pengaruh polarisasi dan hasilnya berupa muatan terikat ini kita tuliskan dalam bentuk persamaan:

$$\rho_b = -\nabla \cdot \mathbf{P}$$

Polarisasi juga menghasilkan muatan terikat pada permukaan bahan.

$$\sigma_b = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}}$$

Muatan terikat ini selanjutnya akan memproduksi medan yang berasal dari bahan dielektrik ini. Medan yang dihasilkan dari material dielektrik adalah medan yang berasal dari polarisasi pada medium.

**a. Muatan terikat dan muatan bebas**

Kini kita akan mempelajari medan yang dihasilkan dari **muatan terikat** dan dari muatan lainnya (yaitu **muatan bebas**). Muatan bebas dapat terdiri dari elektron dari sebuah konduktor atau ion yang terikat pada material dielektrik, atau muatan lainnya yang tidak menghasilkan polarisasi. Pada seluruh dielektrik, besar densitas muatan totalnya kemudian dapat dituliskan sebagai:

$$\rho = \rho_b + \rho_f \tag{2.14}$$

Dalam bentuk hukum gauss menjadi

$$\epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E} = \rho = \rho_b + \rho_f$$

$$\epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E} = -\nabla \cdot \mathbf{P} + \rho_f$$

Dengan  $\mathbf{E}$  adalah medan total, yang bukan seluruhnya dihasilkan dari polarisasi.

**b. Pergeseran elektrik / rapat fluks dalam dielektrik**

Akan lebih mudah untuk mengkombinasikan divergensi dua suku diatas menjadi:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = \rho_f$$

Kemudian suku di dalam kurung kita definisikan sebagai  $\mathbf{D}$

$\mathbf{D} \equiv \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$	2.15
--	------

Dengan  $\mathbf{D}$  adalah **pergeseran elektrik** yang bisa didefinisikan menggunakan persamaan 2.15. Dalam persamaan 2.15 ini secara umum digambarkan bagaimana hubungan pergeseran elektrik  $\mathbf{D}$ , medan  $\mathbf{E}$  dan vektor polarisasi  $\mathbf{P}$ .

Vektor polarisasi didefinisikan sebagai jumlah vektor momen dipol listrik per satuan volum (baca kembali kegiatan pembelajaran 2.1). Vektor pergeseran elektrik ini dalam banyak literatur juga disebut sebagai **vektor kerapatan fluks dalam bahan dielektrik** atau biasa disebut saja dengan **vektor kerapatan fluks**.

Vektor  $\mathbf{D}$  disebut juga rapat fluks karena dapat dimodifikasi ke dalam bentuk hukum Gauss, pergeseran elektrik dituliskan:

$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f$	2.16
------------------------------------	------

Atau dalam bentuk integral dituliskan menjadi

$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{a} = Q_{f(enc)}$	2.17
---	------

Dengan  $Q_f(enc)$  menunjukkan muatan bebas yang berada pada volume tertutup. Sehingga persamaan 2.16 dan 2.16 secara khusus adalah persamaan Hukum Gauss yang digunakan pada bahan dielektrik.

Kehadiran vektor rapat fluks listrik dalam medium menyebabkan momen – momen dipol listrik dari setiap atom atau molekul dalam bahan / medium mengalami polarisasi. Vektor-vektor momen dipol akan bergerak menyesuaikan / mengikuti arah dari vektor rapat fluks listrik. Dengan demikian, vektor rapat fluks listrik adalah penyebab dari terjadinya polarisasi dalam bahan dielektrik. Pada bahan feromagnetik, rapat fluks magnet akan membuat terjadinya proses magnetisasi. Proses magnetisasi adalah proses dimana vektor- vektor momen magnet yang ada pada atom – atom bahan feromagnet menjadi searah dengan vektor fluks magnet penyebabnya.

Namun perhatikan, persamaan ini menunjukkan muatan bebas  $Q_f$  bpada ruang tertutup dan muatan bebas adalah variabel yang kita kontrol. Artinya ketika kita menempatkan muatan bebas di suatu tempat, maka terjadi polarisasi tertentu akan secara otomatis menghasilkan muatan terikat. Pada bagian ini kita baru mengetahui  $\rho_f$  tapi kita tidak bisa mengetahui dengan pasti berapakah  $\rho_b$ . Persamaan 2.17 membawa kita untuk mengerjakan dengan benar informasi yang diperoleh secara khusus, yaitu ketika kita menemukan keadaan simetri, maka kita dapat langsung menghitung  $\mathbf{D}$  dengan menggunakan hukum Gauss.

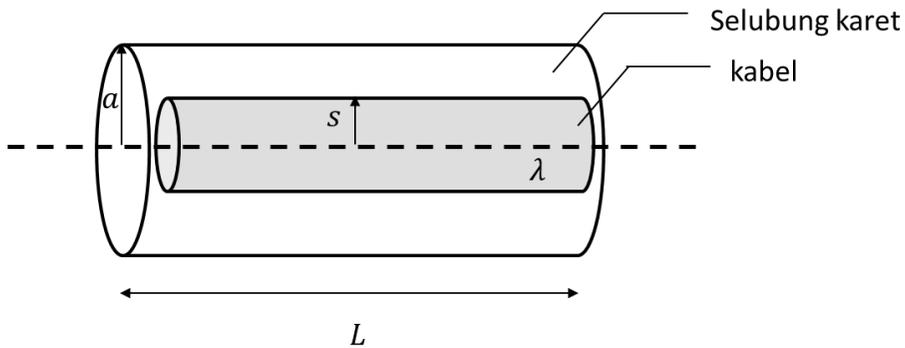
### **Contoh**

Sebuah kabel lurus dan panjang dengan densitas muatan garis  $\lambda$  diselubungi oleh karet dengan jari – jari  $a$ . Tentukan besar pergeseran elektriknya!

### **Jawab:**

Gambarkan permukaan gauss berbentuk silinder dengan radius  $s$  dan panjang  $L$  (Gambar 2.12)

Gambar 2. 12 Pergeseran dielektrik pada kawat lurus dengan selubung



kemudian terapkan ke persamaan 2.17, sehingga diperoleh

$$D(2\pi sL) = \lambda L$$

Sehingga

$$D = \frac{\lambda L}{2\pi s} \hat{s} \quad 2.18$$

Perhatikan bahwa persamaan ini berlaku pada bagian isolator (karet) dan bagian luarnya, pada region ini berlaku  $\mathbf{P} = 0$ , sehingga

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \mathbf{D} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\lambda L}{2\pi s} \hat{s}, \text{ untuk } s > a$$

Di dalam karet, medan listrik tidak dapat ditentukan, karena kita tidak mengetahui  $\mathbf{P}$ .

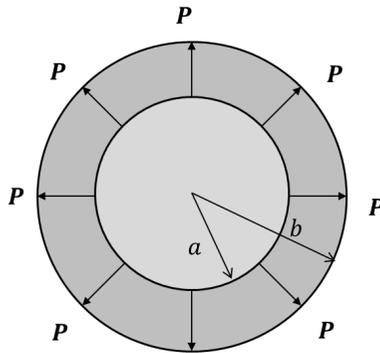
### Tugas

Sebuah bola berongga dengan ketebalan kulit bola diperhitungkan (jari jari dalam a dan jari- jari luar b) Bola berongga ini terbuat dari bahan dielektrik dengan polarisasi “froze- in”

$$\mathbf{P}(\mathbf{r}) = \frac{k}{r} \hat{r}$$

Dengan k adalah konstanta dan r adalah jarak dari pusat (Gambar 2.12) (Tidak ada muatan bebas pada kasus ini).

Gambar 2. 13 Menentukan medan listrik dari bahan dielektrik berbentuk bola berongga



Tentukan besar medan listrik pada ketiga daerah , dengan menggunakan persamaan 2.17 untuk menentukan  $D$ , dan kemudian gunakan  $E$  (Persamaan 2.15).

<b>Jawab</b>

### 2. Tipuan Paralel

Persamaan 2.16 memiliki bentuk mirip hukum Gauss, hanya saja total densitas muatan ruang  $Q$  diganti dengan muatan bebas pada permukaan tertutup  $Q_f$  dan  $D$  digantikan dengan  $\epsilon_0 E$ . Dari persamaan ini, mungkin kamu menarik kesimpulan bahwa  $D$  memiliki kemiripan sifat dengan medan  $E$ . Saat kamu menyelesaikan sebuah kasus tentang dielektrik, maka kamu harus menyatakannya dalam , daripada menggunakan  $E$ . Hal ini disebabkan karena tidak ada bentuk hukum Coulomb yang dinyatakan dalam  $D$ .

Nilai curl dari  $D$  dinyatakan dengan

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \epsilon_0 (\nabla \times \mathbf{E}) + (\nabla \times \mathbf{P}) = \nabla \times \mathbf{P} \tag{2.19}$$

Sehingga nilai curl  $D$  tidak nol.

### 3. Syarat Batas

Syarat batas pada keadaan elektrostatik pada bahan dielektrik dapat dinyatakan ulang dalam bentuk  $D$ , dengan mengulangi kembali bahwa komponen pada arah normal adalah diskontinu

$$D_{above}^\perp - D_{below}^\perp = \sigma_f \tag{2.20}$$

Dengan persamaan 2.19 juga memberikan diskontinuitas pada komponen paralel

$$D_{above}^\parallel - D_{below}^\parallel = P_{above}^\parallel - P_{below}^\parallel \tag{2.21}$$

Pada kehadiran dielektrik, maka syarat batas dapat diterapkan, yaitu

$$E_{above}^{\perp} - E_{below}^{\perp} = \frac{1}{\epsilon_0} \sigma$$

Dan

$$E_{above}^{\parallel} - E_{below}^{\parallel} = 0$$

## B. Dielektrik Linear

Pada Kegiatan Pembelajaran 2.1 kita telah mempelajari tentang terjadinya polarisasi pada bahan. Kita telah mengetahui bahwa polarisasi pada bahan dielektrik dihasilkan dari medan listrik eksternal yang diberikan pada bahan dielektrik. Polarisasi pada bahan ditunjukkan dengan terbentuknya barisan dipol atomik atau dipol molekul. Pada Kegiatan Pembelajaran ini kita akan mempelajari tentang efek yang timbul akibat polarisasi  $\mathbf{P}$ .

### 1. Suseptibilitas, Permittivitas dan Konstanta Dielektrik

Untuk beberapa bahan, polarisasi  $\mathbf{P}$  akan sebanding dengan medan listrik  $\mathbf{E}$ , biasanya pada medan listrik  $\mathbf{E}$  yang tidak terlalu kuat, sehingga:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \quad 2.22$$

Konstanta dari proporsi polarisasi  $\mathbf{P}$  dan medan  $\mathbf{E}$  dinyatakan dalam  $\chi_e$  yang disebut sebagai **suseptibilitas** elektrik dari sebuah medium. Nilai suseptibilitas  $\chi_e$  bergantung pada struktur mikroskopik dari bahan dan biasanya bergantung pada temperatur. Semakin besar nilai suseptibilitas, makin besar polarisasi pada suatu medan listrik tertentu. Material yang mematuhi persamaan 2.22 disebut bahan **dielektrik linear**, artinya hubungan antara medan  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{P}$  adalah linear. Vektor  $\mathbf{P}$  dan  $\mathbf{E}$  selalu sejajar, berapapun besar  $\mathbf{E}$ .

Catat bahwa  $\mathbf{E}$  pada persamaan 2.22 adalah medan listrik total, yaitu medan listrik yang dihasilkan dari muatan bebas dan muatan terikat. Jika kita menempatkan bahan dielektrik linear pada medan eksternal  $\mathbf{E}_o$ , maka medan eksternal  $\mathbf{E}_o$  ini tidak boleh langsung dimasukkan ke dalam persamaan 2.22. Medan eksternal ini akan menghasilkan polarisasi pada bahan (material), dan polarisasi ini akan menghasilkan medan internal sendiri. Untuk menjelaskan fenomena yang diakibatkan oleh polarisasi ini, pendekatan paling sederhana yang dapat digunakan adalah keberadaan pergeseran dielektrik  $\mathbf{D}$ , yang dapat diturunkan dari distribusi muatan bebas.

Pada media linear kita telah memperoleh:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$\begin{aligned}
 &= \varepsilon_0 \mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \\
 &= \varepsilon_0 \mathbf{E} (1 + \chi_e)
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

Karena  $\mathbf{D}$  juga sebanding dengan  $\mathbf{E}$ , maka

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}
 \tag{2.24}$$

Persamaan 2.24 ini menunjukkan hubungan antara  $\mathbf{D}$  dan  $\mathbf{E}$  tanpa menggunakan vektor polarisasi, momen dipol, dan muatan terikat. Dengan

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + \chi_e)
 \tag{2.25}$$

Konstanta  $\varepsilon$  kemudian disebut sebagai **permitivitas** dari sebuah bahan yang merupakan hasil perkalian antara **permitivitas relative** dengan **permitivitas vakum**.

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

Pada keadaan vakum dimana material tidak mengalami polarisasi maka susceptibilitas adalah nol, sehingga permitivitasnya adalah  $\varepsilon_0$ . Inilah kenapa  $\varepsilon_0$  disebut sebagai permitivitas pada ruang hampa yang bernilai  $8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$  atau dalam SI dinyatakan dalam farad per meter (F / m).

Jika kita menghilangkan faktor  $\varepsilon_0$ , maka kita memperoleh kuantitas (besaran) tak berdimensi yang dinyatakan dengan

$$\boxed{\varepsilon_r = 1 + \chi_e = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}
 \tag{2.26}$$

Konstanta  $\varepsilon_r$  ini kemudian disebut sebagai **permitivitas relatif** atau **permitivitas dielektrik** atau disebut sebagai **konstanta dielektrik**. **Konstanta dielektrik** menunjukkan kemudahan suatu bahan dielektrik untuk terpolarisasi. Semakin mudah suatu bahan terpolarisasi, maka akan semakin mudah untuk meredam meredam intensitas medan listrik yang melalui medium itu relatif terhadap ruang vakum.

Kemampuan bahan dielektrik meredam kuat medanlistrik disebut sebagai kekuatan dielektrik (*dielectric strength*). Apabila medan listrik telah menembus bahan dielektrik, maka bahan dielektrik tidak lagi bersifat sebagai isolator, melainkan konduktor. Kondisi ini disebut sebagai *dielectric breakdown*. Besar konstanta dielektrik untuk beberapa bahan diberikan pada Tabel 3.

Pada bahan yang tidak seragam atau tidak isotrop, yaitu sebuah bahan yang memiliki sifat dielektrik yang berbeda untuk arah yang berbeda, maka koefisien-koefisien dielektrik relatifnya dinyatakan dalam  $\varepsilon_{r1}$ ,  $\varepsilon_{r2}$ ,  $\varepsilon_{r3}$  atau  $\varepsilon_{rx}$ ,  $\varepsilon_{ry}$ ,  $\varepsilon_{rz}$ . Dengan notasi  $\varepsilon_{r1}$  menunjukkan permitivitas relatif medium pertama,  $\varepsilon_{r2}$  menunjukkan permitivitas relatif medium ke dua, dan  $\varepsilon_{r3}$  menyatakan permitivitas relatif medium ke tiga.

Tabel 2. 2 Konstanta Dielektrik untuk Beberapa Bahan

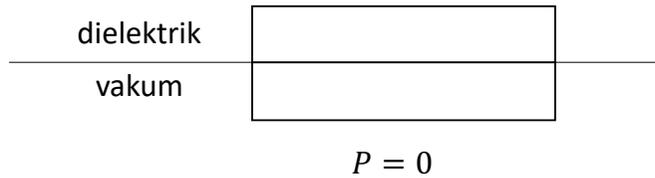
Bahan	Konstanta Dielektrik $\epsilon_r$
Vakum	1
Nitrogen	1,00055
Uap air 100°C	1,00587
Berlian	5,7
Garam	5,9
Silikon	11,8
Air	80,1

### a. Teorema Stokes pada polarisasi dan pergeseran elektrik

Karena vector polarisasi  $\mathbf{P}$  dan pergeseran elektrik  $\mathbf{D}$  sebanding dengan medan  $\mathbf{E}$ , maka mungkin kamu akan menyangka bahwa  $\mathbf{P}$  dan  $\mathbf{D}$  juga memiliki pengaruh yang dirasakan hingga keluar dari bahan. Telah diketahui sebelumnya bahwa  $\text{div } \mathbf{E}$  adalah besar muatan tertutup dibagi dengan permitivitas ruang hampa, dan  $\text{curl } \mathbf{E}$  adalah nol. Artinya medan listrik disebabkan oleh bahan yang bermuatan dan pengaruh medan listrik ini dirasakan pada daerah di sekitar muatan itu hingga di luar bahan. Namun bagaimana dengan efek dari vector polarisasi  $\mathbf{P}$  dan pergeseran dielektrik  $\mathbf{D}$ ? Apakah memiliki pengaruh hingga di luar bahan? Ternyata jawabannya tidak. Vektor  $\mathbf{D}$  dan  $\mathbf{P}$  hanya berpengaruh di dalam bahan. Untuk memahami pernyataan ini, mari kita simak penjelasannya sebagai berikut.

Sebuah bahan dielektrik diletakkan pada ruang vakum, sehingga batas antara bahan dielektrik dengan ruang vakum diberikan pada Gambar 2.14 berikut. Dari gambar kita melihat bahwa pada sisi pahan dielektrik, vector polarisasinya tidak nol. Sementara pada bagian daerah vakum, vector polarisasi bernilai nol. Kemudian bagaimana dengan vector polarisasi pada daerah tepat diantara perbatasan bahan dielektrik dan vakum? Hasil integral garis pada loop tertutup yang terdapat di ruang batas antara dielektrik dan vakum tidak nol ( $\oint \mathbf{P} \neq 0$ ), meskipun integral medan  $\mathbf{E}$  dengan loop yang sama pada daerah batas ini adalah nol. Kenapa? Karena factor proporsional (kesebandingan)  $\epsilon_0 \chi_e$  pada kedua daerah tidak sama. Sehingga dalam teorema Stokes  $\text{curl}$  dari  $\mathbf{P}$  juga tidak nol pada seluruh titik di dalam loop tersebut.

Gambar 2. 14 Teorema Stokes pada Polarisasi  
 $P \neq 0$



Namun jika bahan merupakan dielektrik linear yang homogen, maka berlaku:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f \text{ dan } \nabla \times \mathbf{D} = 0$$

Sehingga  $\mathbf{D}$  dapat diperoleh dari muatan bebas, yang tidak terdapat dalam bahan dielektrik dan berlaku

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}_{vac}$$

Dimana  $\mathbf{E}_{vac}$  adalah medan yang dihasilkan dari muatan bebas di luar bahan dielektrik. Sehingga berdasarkan persamaan 2.24 dan 2.26 kita peroleh

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon} \mathbf{D} = \frac{1}{\epsilon_r} \mathbf{E}_{vac} \tag{2.27}$$

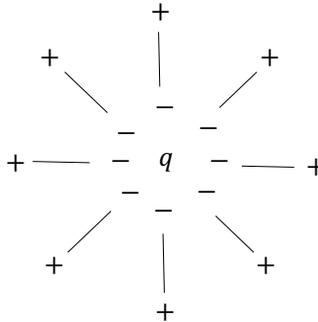
Kesimpulan: Ketika semua ruang diisi oleh bahan dielektrik linier yang homogen, maka medan di daerah manapun di dalam ruang tersebut akan direduksi oleh konstanta dielektrik (Pers. 2.27). Namun apabila bahan dielektrik berada pada medan nol, maka agak lebih sulit untuk menentukan apakah terdapat pergeseran elektrik  $\mathbf{D}$  atau tidak, karena polarisasi bisa saja sudah terjadi, misalnya pada molekul polar.

Sebagai contoh misalnya, jika sebuah muatan bebas  $q$  dilekatkan pada bahan dielektrik, maka besar medan listrik yang dihasilkannya adalah

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{r^2} \hat{r} \tag{2.28}$$

Perhatikan kita menggunakan  $\epsilon$  dan bukan  $\epsilon_0$  dan gaya coulomb yang dialaminya juga dapat kita turunkan dari persamaan 2.28 ini. Yang membedakan dengan bahan bermuatan biasa adalah polarisasi pada bahan akan membuat “sekat” atau “selubung” antara muatan positif dan muatan negative pada kedua sisi (Gambar ). Perhatikan bahwa muatan positif dan negative saling berjauhan. Muatan negative berada di bagian dalam (dekat dengan muatan  $q$ ) sementara muatan positif berada di kulit luar).

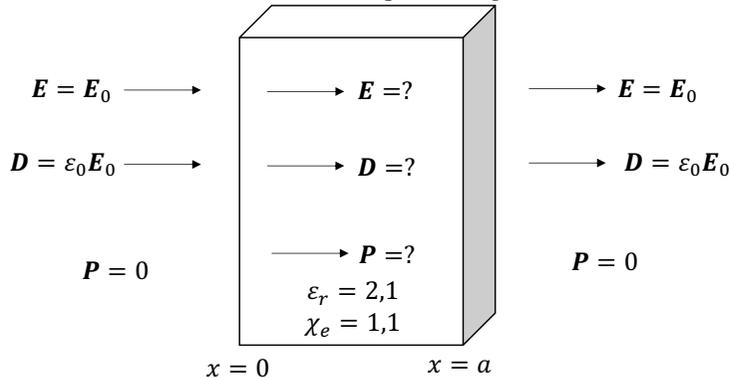
Gambar 2. 15 Muatan dalam bahan dielektrik



**Contoh**

Sepotong bahan Teflon diletakkan pada ruang vakum. Pada Teflon kemudian diberi medan eksternal  $E_0$  (Gambar). Jika diberikan konstanta dielektrik Teflon sebesar 2,1 dan suseptibilitasnya sebesar 1,1 maka tentukan

Gambar 2. 16 Teflon pada ruang vakum



- a. Besar medan dari teflon
- b. Besar rapat fluks listrik dari Teflon
- c. Besar vektor polarisasi dari Teflon

**Jawab:**

Untuk menghitung  $D$ ,  $P$ , dan  $E$  dalam teflon maka kita akan menggunakan kontinuitas  $D_N$  dengan  $D_N$  adalah vektor rapat fluks pada komponen normal, yang pada perbatasan vakum – teflon menyebabkan

$$D_{tef} = D = \epsilon_0 E_0 \hat{a}_x$$

Karena  $D$  telah diketahui, maka selanjutnya kita mencari  $E$

$$E_{tef} = \frac{D_{tef}}{\epsilon} = \frac{\epsilon_0 E_0}{\epsilon_r \epsilon_0} \hat{a}_x D = 0,48 E_0 \hat{a}_x$$

Untuk mencari  $P$  kita gunakan

$$D_{tef} = \epsilon_0 E_{tef} + P_{tef}$$

Sehingga

$$\mathbf{P}_{tef} = \mathbf{D}_{tef} - \varepsilon_0 \mathbf{E}_{tef} = \varepsilon_0 E_0 \hat{a}_x - 0,48 E_0 \hat{a}_x = 0,52 E_0 \hat{a}_x$$

Dengan demikian

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 E_0 \hat{a}_x \text{ untuk } x < 0 \text{ dan } x > a$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 E_0 \hat{a}_x \text{ untuk } 0 \leq x \leq a$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \hat{a}_x \text{ untuk } x < 0 \text{ dan } x > a$$

$$\mathbf{E} = 0,48 E_0 \hat{a}_x \text{ untuk } 0 \leq x \leq a$$

$$\mathbf{P} = 0 \text{ untuk } x < 0 \text{ dan } x > a$$

$$\mathbf{P} = 0,52 E_0 \hat{a}_x \text{ untuk } 0 \leq x \leq a$$

## b. Kapasitas kapasitor yang diisi material dielektrik

Secara prinsip, kapasitor terdiri dari dua keping konduktor yang ruang tengahnya diisi dielektrik (penyekat). Kedua konduktor diberi muatan yang sama besar tapi jenisnya berlawanan (yang satu positif (+) yang satu lagi negatif (-). Kemampuan kapasitor untuk menyimpan muatan listrik dinyatakan oleh besaran kapasitansi C) dengan satuan farad (F). Farad adalah ukuran kapasitansi yang cukup besar, sehingga akan dinyatakan dalam mikrofard ( $\mu F$ ), nanofard ( $nF$ ) dan picofard (pF).

$$1 \mu F = 1 \times 10^{-6} F, 1 nF = 1 \times 10^{-9} F; 1 pF = 1 \times 10^{-12} F$$

### 1) Pengisian Kapasitor

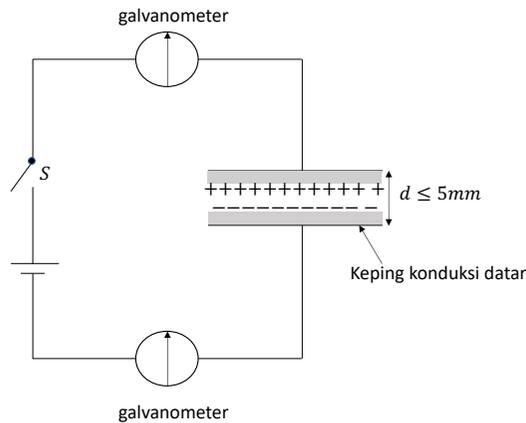
Bagaimana caranya kapasitor dapat menjadi komponen penyimpan muatan listrik? Mari lakukan pengamatan berikut !

### Lembar Pengamatan

Tujuan : Mengamati cara kerja pengisian muatan pada kapasitor

Langkah Kerja: Susunlah rangkaian seperti Gambar 2.16 Hubungkan sakelar S dan amatilah gerak jarum galvanometer. Dari hasil pengamatan, kemudian buat grafik kuat arus terhadap selang waktu semenjak sakelar S ditutup. Ulangi dengan menggunakan sebuah kapasitor  $1000 \mu F$  sebagai ganti kapasitor dua pelat sejajar.

Gambar 2. 17 Proses pemuatan kapasitor



### Hasil Pengamatan

Jawab

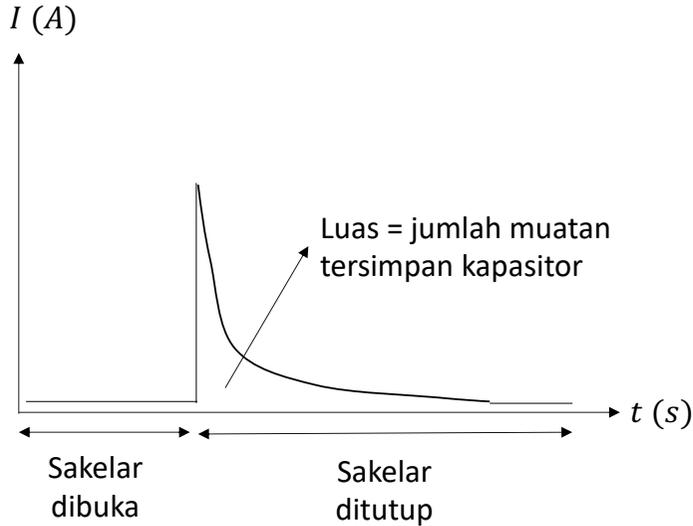
Ketika sakelar S terbuka, galvanometer menunjuk nol. Ketika saklar ditutup, maka akan diamati jarum galvanometer menyimpang sesaat sebelum kembali lagi ke nol. Ketika sakelar telah tertutup dalam waktu yang lama, jarum galvanometer akan menunjuk ke angka nol. Kenapa? Karena jika kita amati, rangkaian pada Gambar 2.16 adalah rangkaian terbuka. Pada dasarnya tidak ada electron yang dapat melewati celah antara kedua pelat.

Hal yang mengejutkan adalah saat jarum galvanometer menyimpang sesaat setelah sakelar S ditutup. Kenapa? Karena ketika kita menutup sakelar S, baterai akan terhubung dengan kapasitor. Keping bawah akan terhubung dengan kutub negatif, sehingga akan menolak electron. Sementara keping atas akan terhubung dengan kutub positif, sehingga menarik electron. Elektron-elektron ini akan tersebar ke seluruh keping kapasitor. Selama sesaat, arus electron mengalir keluar dari keping bawah menuju keping atas. Arus sesaat inilah yang menyebabkan jarum galvanometer menyimpang sesaat setelah sakelar S ditutup. Arus ini disebut sebagai **arus pengisian kapasitor**. Apabila kita buat kedalam grafik, maka besar arus ini akan tampak seperti kurva yang melandai (Gambar 2.18), dengan luas daerah kurva menunjukkan jumlah electron yang tersimpan di dalam kapasitor.

Pulsa arus hanya akan terjadi jika dalam kapasitor terjadi pengisian, pulsa arus ini akan menjadi nol Ketika kapasitor sudah termuati secara penuh (*Full*

*charge*). Begitu beda potensial antar keping  $V$  sama dengan beda potensial baterai pengisi, maka kapasitor dinyatakan penuh (biasa disebut keadaan tunak). Pada keadaan tunak ini, hubungan antara kapasitor dengan baterai adalah terbuka, arus DC tidak dapat masuk lagi ke dalam kapasitor.

Gambar 2. 18 Grafik arus pengisian terhadap waktu

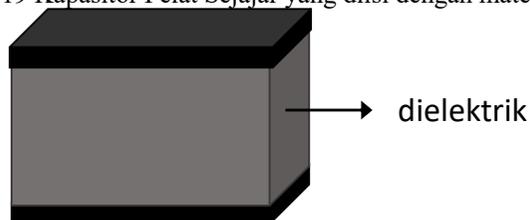


## 2) Pengaruh dielektrik pada kapasitor

Jika sebuah kapasitor pelat sejajar diisi dengan bahan dielektrik (Gambar 2.16) dengan konstanta dielektrik  $\epsilon_r$ , maka besar kapasitas kapasitornya adalah sebesar

$$C = \epsilon_r C_{vac} \quad 2.29$$

Gambar 2. 19 Kapasitor Pelat Sejajar yang diisi dengan material dielektrik

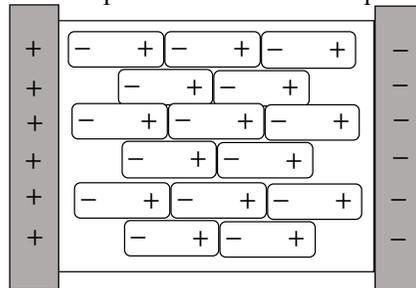


Besar kapasitas kapasitor ini diakibatkan karena medan dalam kapasitor dibatasi oleh ruang antar pelat. Keberadaan dielektrik akan mereduksi medan  $E$  dan juga potensial  $V$  (pers 2.27), dengan hubungan antara kapasitansi dan potensial  $V$  diberikan oleh persamaan  $C = Q/V$ . Dengan demikian besar kapasitansi akan semakin besar saat diisi bahan dielektrik.

Mengapa Ketika ruang antar keping disisipi dielektrik maka kapasitor dapat menyimpan lebih banyak muatan? Ini dapat dijelaskan dengan fenomena polarisasi muatan pada dielektrik. Ingat kembali bahwa polarisasi muatan adalah pemisahan muatan pada suatu atom atau molekul, sementara atom atau molekulnya tetaplah netral. Saat telah terpolarisasi, pusat muatan positif tidak lagi berimpit dengan pusat muatan negatif.

Selambar bahan dielektrik dipasang di antara keping-keping kapasitor (Gambar 2.19). Muatan – muatan pada keping kapasitor akan menginduksi muatan pada bahan dielektrik sehingga terpolarisasi. Polarisasi terjadi pada keseluruhan bahan hingga muatan positif menggeser relative terhadap muatan positif. Di seluruh bahan dielektrik jumlahmuatan negatif dan positif tetap sama. Pengaruh total polarisasi dari bahan dielektrik adalah terjadinya konsentrasi muatan positif pada satu sisi bahan dan konsentrasi muatan negatif pada sisi lainnya (Gambar 2. 19). Tiap keping konduktor berhadapan dengan konsentrasi muatan yang tak sejenis.

Gambar 2. 20 Polarisasi pada bahan dielektrik kapasitor keping sejajar



Konsentrasi muatan tak sejenis yang diinduksikan pada bahan dielektrik akan menarik lebih banyak lagi muatan ke keping konduktor untuk beda potensial antar keping yang sama dengan saat vakum.

Sebagai tambahan, material kristal secara umum lebih mudah terpolarisasi dalam beberapa arah jika dibandingkan dengan material lain. Sehingga persamaan 2.22 akan menjadi :

$$\begin{aligned}
 P_x &= \epsilon_0 (\chi_{e_{xx}} E_x + \chi_{e_{xy}} E_y + \chi_{e_{xz}} E_z) \\
 P_y &= \epsilon_0 (\chi_{e_{yx}} E_x + \chi_{e_{yy}} E_y + \chi_{e_{yz}} E_z) \\
 P_z &= \epsilon_0 (\chi_{e_{zx}} E_x + \chi_{e_{zy}} E_y + \chi_{e_{zz}} E_z)
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

Dengan sembilan koefisien  $\chi_{e_{xx}} E_x, \chi_{e_{xy}} E_y, \dots$  disebut sebagai **tensor suseptibilitas**.

## 2. Beberapa contoh kasus pada lapis batas dua medium dielektrik linear

Pada sebuah ruang yang terdiri dari dielektrik linear homogen, densitas muatan terikat  $\rho_b$  sebanding dengan densitas muatan bebas  $\rho_f$ , secara matematis didefinisikan sebagai berikut:

$$\rho_b = -\nabla \cdot \mathbf{P} = -\nabla \cdot \left( \epsilon_0 \frac{\chi_e}{\epsilon} \mathbf{D} \right) = -\left( \frac{\chi_e}{1 + \chi_e} \right) \rho_f \quad 2.31$$

Secara khusus, seluruh muatan terikat berada dan melekat di dalam material dan muatan netto pasti berada pada permukaan. Pada bahan dielektrik berlaku persamaan Laplace dan syarat batas hanya merujuk pada muatan bebas, atau dapat kita tuliskan:

$$\epsilon_{above} \mathbf{E}_{above}^\perp - \epsilon_{below} \mathbf{E}_{below}^\perp = \sigma_f \quad 2.32$$

Atau dalam bentuk potensial diberikan dengan

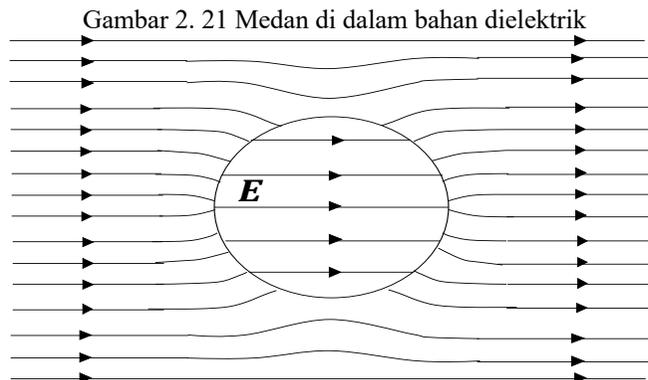
$$\epsilon_{above} \frac{\partial V_{above}}{\partial n} - \epsilon_{below} \frac{\partial V_{below}}{\partial n} = \sigma_f \quad 2.33$$

Dengan potensial adalah kontinu

$$V_{above} - V_{below} \quad 2.34$$

### Contoh

Sebuah bola yang terbuat dari bahan dielektrik linear homogen ditempatkan dalam medan eksternal seragam  $\mathbf{E}_0$  (Gambar 2.17). Tentukan besar medan elektrik di dalam bola!



### Jawaban:

Apabila sebuah bola konduksi ditempatkan dalam medan eksternal seperti kasus ini, maka muatan terinduksi akan menetralkan  $\mathbf{E}_0$  di dalam bola, namun pada

bahan dielektrik, kegiatan penetralan ini hanya dapat dilakukan sebagian dan hanya dilakukan oleh muatan terikat.

Dalam kasus ini kita dapat menyelesaikan persamaan Laplace, dengan menerapkan untuk  $V_{in}(r, \theta)$  ketika  $r \leq R$  dan  $V_{in}(r, \theta)$  Ketika  $r \geq R$  pada keadaan batas, sehingga berlaku

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad & V_{in} = V_{out}, \text{ pada } r = R \\ \text{(ii)} \quad & \varepsilon \frac{\partial V_{in}}{\partial r} = \varepsilon_0 \frac{\partial V_{out}}{\partial r}, \text{ pada } r = R \\ \text{(iii)} \quad & V_{out} \rightarrow E_0 r \cos \theta, \text{ untuk } r \gg R \end{aligned} \quad 2.35$$

Persamaan (ii) mengikuti persamaan 2.33 karena tidak ada muatan bebas di dalam bahan dielektrik. Di bagian dalam bola berlaku persamaan:

$$V_{in}(r, \theta) = \sum_{\ell=0}^{\infty} A_{\ell} r^{\ell} P_{\ell}(\cos \theta) \quad 2.36$$

Dan pada bagian luar bola berlaku persamaan (iii),

$$V_{out}(r, \theta) = -E_0 r \cos \theta + \sum_{\ell=0}^{\infty} \frac{B_{\ell}}{r^{\ell+1}} P_{\ell}(\cos \theta) \quad 2.37$$

Syarat batas (i) memerlukan

$$\sum_{\ell=0}^{\infty} A_{\ell} r^{\ell} P_{\ell}(\cos \theta) = -E_0 r \cos \theta + \sum_{\ell=0}^{\infty} \frac{B_{\ell}}{R^{\ell+1}} P_{\ell}(\cos \theta)$$

Maka

$$\left. \begin{aligned} A_{\ell} R^{\ell} &= \frac{B_{\ell}}{R^{\ell+1}} && \text{untuk } \ell \neq 1 \\ A_{\ell} R &= -E_0 R + \frac{B_{\ell}}{R^2} \end{aligned} \right\} \quad 2.38$$

Sementara, syarat (ii) menunjukkan

$$\varepsilon_r \sum_{\ell=0}^{\infty} \ell A_{\ell} R^{\ell-1} P_{\ell}(\cos \theta) = -E_0 \cos \theta - \sum_{\ell=0}^{\infty} \frac{(\ell+1)B_{\ell}}{R^{\ell+2}} P_{\ell}(\cos \theta)$$

Maka

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r \ell A_{\ell} R^{\ell-1} &= -\frac{(\ell+1)B_{\ell}}{R^{\ell+2}} && \text{untuk } \ell \neq 1 \\ \varepsilon_r A_{\ell} &= -E_0 - \frac{2B_{\ell}}{R^3} \end{aligned} \right\} \quad 2.39$$

Yang diikuti dengan

$$\left. \begin{aligned} A_{\ell} &= B_{\ell} = 0 && \text{untuk } \ell \neq 1 \\ A_{\ell} &= -\frac{3}{\varepsilon_r + 2} E_0 && B_{\ell} = \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} R^3 E_0 \end{aligned} \right\} \quad 2.40$$

Dan kemudian dapat diperoleh

$$V_{in}(r, \theta) = -\frac{3E_0}{\epsilon_r + 2} r \cos \theta = -\frac{3E_0}{\epsilon_r + 2} z$$

Dan kemudian medan di dalam bola ternyata adalah seragam, sebesar

$$\mathbf{E} = \frac{3}{\epsilon_r + 2} \mathbf{E}_o \quad 2.41$$

### Contoh

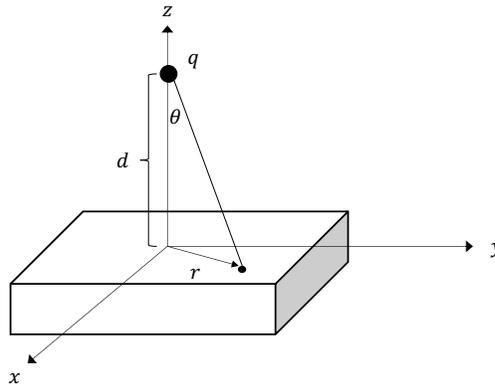
Anggap pada daerah dibawah bidang  $z = 0$  dalam Gambar 2.18 diisi oleh material dielektrik seragam dengan suseptibilitas  $\chi_e$ . Hitung gaya di atas muatan titik  $q$  yang berada pada jarak  $d$  di atas origin.

### Jawaban:

Muatan terikat pada permukaan bidang  $xy$  memiliki tanda yang berlawanan dengan  $q$ , sehingga gayanya adalah tarik menarik. Pertama-tama mari kita hitung densitas muatan terikat pada bidang  $xy$  ini.

$$\sigma_b = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}} = P_z = \epsilon_0 \chi_e E_z$$

Gambar 2. 22 Gaya listrik pada bahan dielektrik



Dengan  $E_z$  adalah medan total yang berasal dari bagian dalam bahan dielektrik pada komponen  $z$ , yaitu dari  $z = 0$ . Medan ini berasal dari  $q$  dan berasal dari muatan terikat di dalamnya. Dari hukum Coulomb, maka kita dapat memformulasikan besar medan ini sebesar

$$-\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r^2 + d^2)} \cos \theta = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qd}{(r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Dimana  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  adalah jarak dari origin. Medan pada komponen  $z$  dari muatan terikat adalah  $-\frac{\sigma_b}{2\epsilon_0}$

$$\sigma_b = \epsilon_0 \chi_e \left[ -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qd}{(r^2 + d^2)^{3/2}} - \frac{\sigma_b}{2\epsilon_0} \right]$$

Dengan  $\sigma_b$  diselesaikan dengan

$$\sigma_b = -\frac{1}{2\pi} \left( \frac{\chi_e}{\chi_e + 2} \right) \frac{qd}{(r^2 + d^2)^{3/2}} \quad 2.42$$

Terpisah dari factor  $\frac{\chi_e}{\chi_e + 2}$ , bentuk persamaan ini mirip dengan muatan terinduksi pada bidang konduksi tak hingga di bawah keadaan yang sama. Kemudian kita dapat memperoleh total muatan terikat pada bahan ini sebesar

$$q_b = -\left( \frac{\chi_e}{\chi_e + 2} \right) q \quad 2.43$$

Kemudian dengan menerapkan  $\sigma_b$  dengan integral langsung maka diperoleh

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \left( \frac{\hat{r}}{r^2} \right) \sigma_b da$$

Tapi pada kasus bidang konduksi, ada solusi yang lebih mudah dilakukan, yaitu menggunakan metode bayangan. Kita menempatkan bagian dielektrik dengan buah muatan titik  $q_b$  pada posisi bayangan

### 3. Energi pada sistem dielektrik

Pengisian (charging) kapasitor memerlukan kerja sebesar:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

Telah dijelaskan sebelumnya, bahwa apabila kapasitor diisi oleh material dielektrik linear, maka kapasitansinya akan lebih besar dibandingkan pada keadaan vakum. Artinya kapasitansi kapasitor saat diberi bahan dielektrik akan menjadi berkali lipat dari kapasitansi vakumnya, dengan factor pengalinya adalah konstanta dielektrik.

$$C = \epsilon_r C_{vac}$$

Secara eksperimen ternyata usaha yang diperlukan untuk mengisi (charging) kapasitor berisi dielektrik juga akan mengalami peningkatan sesuai dengan factor pengalinya. Alasannya cukup jelas, yaitu karena kamu perlu memompa lebih banyak muatan untuk mencapai tegangan (potensial) yang telah diberikan. Karena sebagian medan akan ditiadakan oleh muatan terikat,

Pada Modul 1 kita telah mempelajari tentang persamaan umum energi yang tersimpan dalam kapasitor, yaitu

$$W = \frac{\epsilon_0}{2} \int E^2 d\tau \quad 2.44$$

Pada kasus kapasitor yang telah diisi dengan dielektrik, kita akan mensubstitusikan besar E dengan menambahkan komponen pergeseran dielektrik atau juga dikenal sebagai rapat fluks dalam bahan dielektrok ( $\mathbf{D}$ ) :

$$W = \frac{\epsilon_0}{2} \int E^2 d\tau = \frac{1}{2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} d\tau \quad 2.45$$

$$W = \frac{1}{2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} d\tau$$

Untuk membuktikan persamaan 2.45 kita akan menguraikannya sebagai berikut:

Asumsikan kita menggunakan sebuah material dielektrik yang terikat pada sebuah posisi, kemudian kita ambil sebuah muatan bebas. Distribusi muatan terikat  $\rho_f$  akan mempengaruhi polarisasi bahan dan distribusi muatan terikat. Besar usaha yang dilakukan dalam saat peningkatan muatan bebas adalah

$$\Delta W = \int (\Delta \rho_f) V d\tau \quad 2.46$$

Karena  $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f$  dan  $\Delta \rho_f = \nabla \cdot (\Delta \mathbf{D})$ , dimana  $\Delta \mathbf{D}$  adalah perubahan dari  $\mathbf{D}$ , sehingga:

$$\Delta W = \int [\nabla \cdot (\Delta \mathbf{D})] V d\tau$$

Kemudian

$$\int \nabla [(\Delta \mathbf{D})V] = [[\nabla \cdot (\Delta \mathbf{D})]V + \Delta \mathbf{D} \cdot (\nabla V)]$$

Setelah dilakukan integral parsial, kita temukan:

$$\Delta W = \int \nabla \cdot [(\Delta \mathbf{D})V] d\tau + \int (\Delta \mathbf{D}) \cdot \mathbf{E} d\tau$$

Teorema divergensi mengembalikan suku pertama kedalam bentuk integral permukaan, yang menjadi nol saat kita integralkan ada seluruh ruang. Dengan demikian, usaha yang dilakukan sebesar

$$\Delta W = \int (\Delta \mathbf{D}) \cdot \mathbf{E} \, d\tau \quad 2.47$$

Persamaan 2.47 ini kita terapkan pada semua material, sekarang kita gunakan material dielektrik linear. Pada dielektrik linear berlaku:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

Sehingga

$$\frac{1}{2} \Delta (\mathbf{D} \cdot \mathbf{E}) = \frac{1}{2} \Delta (\epsilon E^2) = \epsilon (\Delta \mathbf{E}) \cdot \mathbf{E} = (\Delta \mathbf{D}) \cdot \mathbf{E}$$

Untuk peningkatan tak hingga maka

$$\Delta W = \Delta \int \frac{1}{2} (\mathbf{D}) \cdot \mathbf{E} \, d\tau \quad 2.48$$

Sehingga

$$W = \frac{1}{2} \int \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} \, d\tau$$

Maka persamaan 2.45 sudah terbukti.

Persamaan 2.45 berlaku pada bahan dielektrik linear, kondisi sebenarnya hanyalah bentuk pengidealan karena faktanya akan terdapat disipasi atau kehilangan energi.

#### 4. Gaya Elektrostatis pada bahan dielektrik

Sebagaimana bahan konduktor yang ditarik oleh medan listrik, maka demikian pulan bahan dielektrik. Kenapa? Karena muatan terikat akan cenderung berkumpul di dekat muatan bebas yang berlainan tanda. Tapi perhitungan gaya elektrostatis yang dialami bahan dielektrik juga sedikit rumit.

Kita ambil contoh sepotong bahan dielektrik linear diisikan ke dalam kapasitor keping sejajar. Kita selalu mengasumsikan bahwa medan listrik di dalam kapasitor adalah searah, sementara medan listrik di luar kapasitor adalah nol. Namun jika anggapan ini benar, maka tidak akan ada gaya netto pada bahan dielektrik, karena hanya ada medan yang tegak lurus terhadap pelat. Meskipun demikian, pada kenyataannya masih terdapat **medan tepi** pada setiap ujung-

ujung, yang juga tidak dapat diabaikan. Medan tepi inilah yang menarik bahan dielektrik terhadap kapasitornya.

Medan tepi terkenal sulit untuk dihitung; untungnya kita dapat menghindari ini dengan mengikuti metode cerdas berikut. Dengan  $W$  adalah energi system, jika kita menarik bahan dielektrik dari jarak tak hingga  $dx$ , maka energi adalah besar perubahan dari usaha yang dilakukan, sebesar:

$$dW = F_{me} dx \quad 2.49$$

Dengan  $F_{me}$  adalah gaya ( $F$ ) yang harus keluar (*must exert*) yang berfungsi untuk menetralkan gaya listrik pada dielektrik, atau dapat dituliskan :

$$F_{me} = -F$$

Maka besar gaya listrik pada keping adalah sebesar:

$$F = \frac{dW}{dx} \quad 2.50$$

Kemudian dengan besar energi yang tersimpan dalam kapasitor adalah

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad 2.51$$

Maka besar kapasitansi dalam kasus ini adalah sebesar

$$C = \frac{\epsilon_0 \omega}{d} (\epsilon_r \ell - \chi_e x) \quad 2.52$$

Dengan  $\ell$  adalah panjang keping (Gambar). Mari kita asumsikan total muatan pada keping ( $Q = CV$ ) adalah tetap, maka dalam bentuk  $Q$  menjadi

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad 2.53$$

Maka

$$F = -\frac{dW}{dx} = -\frac{1}{2} \left(\frac{Q}{C}\right)^2 \frac{dC}{dx} = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{dx} \quad 2.54$$

Namun karena

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{\epsilon_0 \chi_e \omega}{d} \quad 2.55$$

Maka

$$F = -\frac{\epsilon_0 \chi_e \omega}{2d} V^2 \quad 2.56$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa gaya listrik memiliki arah berlawanan (negatif, yang membuat bahan dielektrik tertarik ke arah kapasitor).

Kekeliruan (error) yang paling umum dilakukan adalah menggunakan persamaan 2.51 (dengan  $V$  konstan) dibandingkan dengan persamaan 2.53

(dengan  $Q$  konstan) dalam menghitung gaya. Karena jika menggunakan persamaan 2.51 akan menghasilkan

$$F = -\frac{1}{2}V^2 \frac{dc}{dx}$$

Yang membedakan adalah tanda negatifnya. Hal ini dimungkinkan untuk memperlakukan kapasitor pada potensial yang tetap, misalnya dengan menghubungkan dengan sebuah baterai. Namun kita perlu mengingat bahwa baterai juga melakukan usaha dalam pergerakan dielektrik, sehingga kita peroleh:

$$dW = F_{me} dx + V dQ \quad 2.57$$

Dimana  $V dQ$  adalah usaha yang dilakukan oleh baterai. Dengan mengikuti persamaan diatas maka

$$F = -\frac{dW}{dx} + V \frac{dQ}{dx} = -\frac{1}{2}V^2 \frac{dC}{dx} + V^2 \frac{dC}{dx} = \frac{1}{2}V^2 \frac{dC}{dx} \quad 2.58$$

Nah, dengan demikian persamaan 2.58 ini sudah sama dengan persamaan 2.54 (dengan tanda yang betul).

Untuk dapat dipahami, gaya pada dielektrik tidak mungkin bergantung pada nilai  $Q$  dan  $V$ , melainkan ditentukan oleh distribusi muatan bebas dan terikat. Akan lebih mudah untuk menghitung gaya dengan mengasumsikan  $Q$  konstan, karena kita tidak perlu menghitung besar usaha yang dilakukan oleh baterai, namun cara ini akan menjadi keliru dalam penentuan tandanya.

## Rangkuman

### 1. Pergeseran elektrik / rapat fluks dalam dielektrik $\mathbf{D}$

- Merupakan sebuah vektor yang menjadi penyebab dan menentukan arah dipol – dipol pada atom / molekul mengalami pergeseran dan terpolarisasi dalam medan.
- Rapat fluks dalam dielektrik searah dengan besar medan yang ditimbulkan dari muatan – muatan terikat akibat polarisasi.
- Hubungan antara rapat fluks, medan dan polarisasasi diberikan oleh:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

dengan  $\epsilon_0$  adalah permitivitas vakum atau permitivitas pada ruang hampa.

- Hukum gauss pada bahan dielektrik diberikan oleh

$$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{a} = Q_{f(enc)}$$

### 2. Nilai curl dari $\mathbf{D}$ dinyatakan dengan

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \varepsilon_0(\nabla \times \mathbf{E}) + (\nabla \times \mathbf{P}) = \nabla \times \mathbf{P}$$

Sehingga nilai curl  $\mathbf{D}$  tidak nol.

### 3. Syarat batas pada bahan dielektrik

Syarat batas pada keadaan elektrostatik pada bahan dielektrik dapat dinyatakan ulang dalam bentuk  $\mathbf{D}$ , dengan mengulangi kembali bahwa komponen pada arah normal adalah diskontinu

$$D_{above}^\perp - D_{below}^\perp = \sigma_f$$

### 4. Dielektrik linear

- Pada material **dielektrik linear** berlaku hubungan antara medan  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{P}$  adalah linear. Vektor  $\mathbf{P}$  dan  $\mathbf{E}$  selalu sejajar, berapapun besar  $\mathbf{E}$ .
- Konstanta dari proporsi polarisasi  $\mathbf{P}$  dan medan  $\mathbf{E}$  dinyatakan dalam  $\chi_e$  yang disebut sebagai **suseptibilitas** elektrik dari sebuah medium. Nilai suseptibilitas  $\chi_e$  bergantung pada struktur mikroskopik dari bahan dan biasanya bergantung pada temperatur. Semakin besar nilai suseptibilitas, makin besar polarisasi pada suatu medan listrik tertentu.
- Hubungan  $\mathbf{D}$  dan  $\mathbf{E}$  secara langsung (tanpa melibatkan vektor polarisasi) dinyatakan dengan

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \tag{2.24}$$

Dengan  $\varepsilon$  adalah permitivitas

- Permitivitas adalah hasil perkalian konstanta dielektrik dengan permitivitas vakum.

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

Hubungan antara permitivitas dan suseptibilitas:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}$$

### 5. Terorema stokes dan pengaruh dielektrik pada kapasitor

- Vektor  $\mathbf{D}$  dan  $\mathbf{P}$  hanya berpengaruh di dalam bahan
- Ketika semua ruang diisi oleh bahan dielektrik linier yang homogen, maka medan di daerah manapun di dalam ruang tersebut akan direduksi oleh konstanta dielektrik, atau dalam matematis ditulis

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon} \mathbf{D} = \frac{1}{\varepsilon_r} \mathbf{E}_{vac}$$

### 6. Kapasitansi dengan dielektrik

- Besar kapasitas kapasitor akan mengalami peningkatan dengan konstanta dielektrik  $\varepsilon_r$  sebagai factor pengalinya

$$C = \varepsilon_r C_{vac}$$

- b. Efek yang ditimbulkan dari penambahan dielektrik pada kapasitor keping sejajar ini menunjukkan aksi dari medan listrik terhadap dipol permanen atau dipol terinduksi di dalam pelat dielektrik, yang menyebabkan pelemahan dari medan di dalam dielektrik sesuai jumlah tertentu dari muatan bebas pada pelat.
- d. Energi dalam kapasitor (dinyatakan dalam  $\mathbf{D}$  dan  $\mathbf{E}$ )

$$W = \frac{1}{2} \int \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} d\tau$$

- e. dan gaya elektrostatik pada bahan dielektrik diberikan oleh

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{dx}$$

## Uji Formatif

### Pilihan Ganda

1. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Bahan dielektrik berfungsi sebagai material pembatas antara dua lempeng konduktor, yang dapat mereduksi (melemahkan) medan di dalam kapasitor.
- (2) Bahan dielektrik hanya memiliki muatan terikat
- (3) Penyisipan bahan dielektrik pada kapasitor akan mengakibatkan peningkatan kapasitas kapasitor.
- (4) Bahan dielektrik memiliki muatan terikat dan muatan bebas

Pernyataan berikut yang sesuai dengan bahan dielektrik adalah ....

- |                  |                |
|------------------|----------------|
| A. (1), (2), (3) | D. (4) saja    |
| B. (1) dan (3)   | E. Semua benar |
| C. (2) dan (4)   |                |

2. Diberikan persamaan berikut:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

Kemudian perhatikan pernyataan – pernyataan berikut :

- (1) Menunjukkan hubungan antara pergeseran elektrik dengan medan yang dihasilkan dari dalam bahan dielektrik
- (2) Menunjukkan hubungan antara pergeseran elektrik dengan medan eksternal



Pernyataan yang sesuai dengan suseptibilitas adalah

- A. (1) , (2) , (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

6. Perhatikan pernyataan berikut:

- (1) Hubungan antara suseptibilitas dengan konstanta dielektrik diberikan oleh persamaan  $\epsilon_r = 1 + \chi_e$
- (2) Hubungan permitivitas, konstanta dielektrik, dan permitivitas ruang hampa diberikan oleh persamaan  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$
- (3) Pergeseran elektrik  $\mathbf{D}$ , medan  $\mathbf{E}$  dan suseptibilitas  $\chi_e$  dihubungkan dengan persamaan  $\mathbf{D} = (1 + \chi_e)\epsilon_0 \mathbf{E}$
- (4) Nilai suseptibilitas  $\chi_e$  bergantung pada struktur mikroskopik dari bahan dan biasanya bergantung pada temperatur.

Pernyataan yang sesuai dengan suseptibilitas adalah

- A. (1) , (2) , (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

7. Perhatikan pernyataan berikut

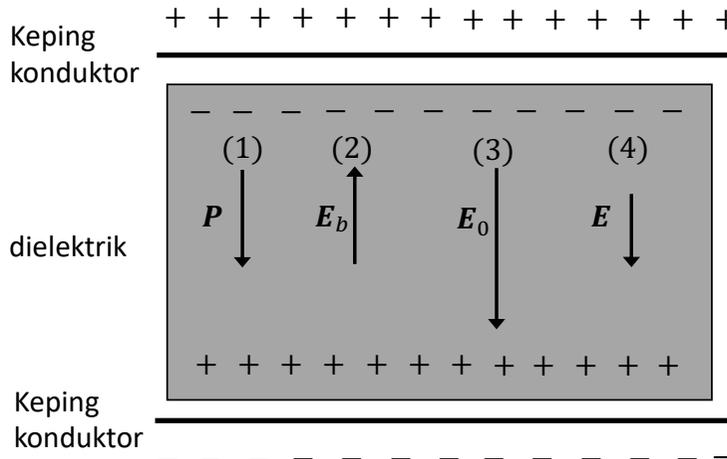
- (1) Kapasitansi pelat konduktor sejajar akan semakin meningkat jika celah antar dua pelat disisipkan bahan dielektrik, dengan factor pengali berupa konstanta dielektrik.
- (2) Keberadaan muatan terikat yang terinduksi pada bahan dielektrik akan meningkatkan jumlah muatan yang dapat disimpan dalam kapasitor dibandingkan saat vakum.
- (3) Medan listrik yang dihasilkan oleh bahan dielektrik dalam kapasitor akan berlawanan arah dengan medan listrik dari keping-keping konduktor sejajar
- (4) Arus transien adalah arus yang mengakibatkan pengisian muatan pada kapasitor. Saat arus transien mengalir maka kapasitor akan berperan seperti baterai yang sedang diisi ulang (charging).

Pernyataan yang benar tentang kapasitor dan bahan dielektrik adalah ...

- A. (1) , (2) , (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

8. Sebuah kapasitor keping sejajar yang diisi bahan dielektrik diberi tegangan (dihubungkan dengan baterai). Bahan dielektrik di dalam kapasitor kemudian mengalami polarisasi seperti Gambar 2.23 berikut.

Gambar 2. 23 Polarisasi pada bahan dielektrik dalam kapasitor keping sejajar

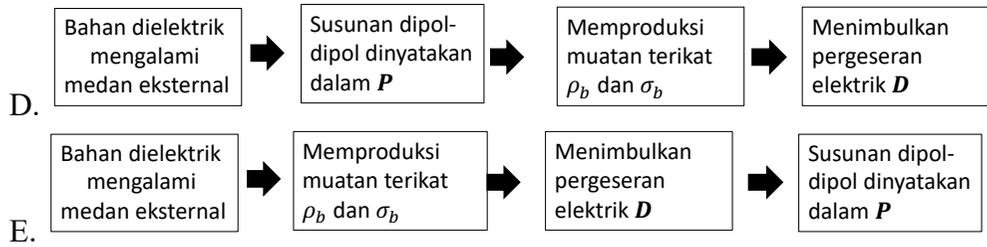


Vektor yang menunjukkan keterangan yang benar tentang vektor polarisasi ( $P$ ), Medan dari muatan terikat ( $E_b$ ), medan eksternal ( $E_0$ ), dan medan total ( $E$ ) adalah ...

- A. (1) , (2) , (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

9. Gambar berikut yang menggambarkan skema konsep polarisasi pada bahan dielektrik adalah ....





10. Besar energi yang dapat tersimpan kapasitor yang telah diisi dengan dielektrik dinyatakan dengan ....

A.  $W = \frac{1}{2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} d\tau$

B.  $W = \frac{1}{2} \mathbf{P} \cdot \mathbf{E} d\tau$

C.  $W = \frac{1}{2} \epsilon \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} d\tau$

D.  $W = \frac{1}{2\epsilon} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} d\tau$

E.  $W = \frac{1}{2\epsilon} \mathbf{P} \cdot \mathbf{E} d\tau$

### Essay

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan

a. rapat fluks listrik

Jawab

b. vektor polarisasi

Jawab

c. konstanta dielektrik

Jawab

d. susceptibilitas

Jawab

2. Buktikan bahwa untuk kapasitor keping sejajar besar kapasitansinya dinyatakan dengan

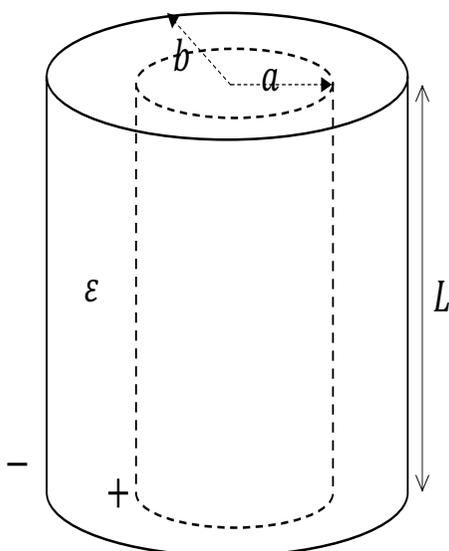
$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

Dengan  $C$  adalah kapasitansi (F),  $\epsilon$  adalah permitivitas,  $d$  adalah jarak antar keping dan  $S$  adalah luas keping.

Jawab

3. Dua buah silinder koaksial terbuat dari bahan konduktor dengan jari – jari silinder bagian dalam  $a$  dan jari – jari silinder bagian luar  $b$ . Panjang kedua silinder sama yaitu  $L$  dan di antara kedua silinder terdapat bahan dielektrik dengan permitivitas  $\epsilon$  (Gambar 2.23).

Gambar 2. 24 kapasitor silinder koaksial



Buktikan besar kapasitansi persatuan panjang pada system ini adalah sebesar

$$\frac{C}{L} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \text{ (farad / meter)}$$

Jawab

4. Luas keping – keping pelat sejajar memiliki luas keping  $5\text{cm}^2$  dan terpisah sejauh 5 mm, dengan bakelit berada dalam ruang antarkepingnya. Konstanta dielektrik bakelit adalah 5. Jika kapasitor ini dihubungkan dengan baterai 20 V, tentukan:

a. Kapasitas

Jawab

b. Muatan yang tersimpan

Jawab

c. Beda potensial

Jawab

d. Kuat medan listrik dari kapasitor itu

Jawab

5. Dua bola konduktor kosong yang kosentris dan di antara keduanya terdapat medium dielektrik akan berfungsi sebagai kapasitor. Jari – jari bola bagian dalam adalah  $a$  dan jari – jari bola bagian luar adalah  $b$ . Bila bola bagian dalam

bermuatan  $+Q$  dan bola bagian luar bermuatan  $-Q$  ., Buktikanlah besar kapasitas kapasitor bola dinyatakan dengan

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{4\pi\epsilon ab}{b-a} \text{ (Farad)}$$

Dengan  $a$  dan  $b$  dalam satuan  $m$  ,  $Q$  dalam satuan Coulomb dan  $\epsilon$  dalam farad per meter.

Jawab

## Referensi

- Effendi, R., dkk. (2007). Medan Elektromagnetika terapan. Jakarta: Erlangga.
- Griffiths, D. J. (2005). Introduction to electrodynamics 3<sup>rd</sup> Edition. New Jersey: Prentice Hall
- Halliday, D., dkk. (2005). Fisika Dasar Edisi 7 Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Kustija, J., dkk. (2019). Medan Elektromagnetik Teori dan Aplikasinya. Bandung: Refika.
- Wangsness, R. K., & Wangsness, R. K. (1986). *Electromagnetic fields* 2<sup>nd</sup> edition. New York: Wiley.



# Kegiatan Pembelajaran 3 Penerapan Bahan Dielektrik dalam Teknologi Ramah Lingkungan

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa mampu menjelaskan tentang aplikasi dielektrik pada teknologi ramah lingkungan ( <i>green technology</i> ).	a. Mahasiswa mampu menjelaskan fenomena dielektrik dan hubungannya dengan material semikonduktor b. Mahasiswa dapat menjelaskan penerapan dielektrik pada sel PV c. Mahasiswa dapat menjelaskan penerapan dielektrik pada SOFC d. Mahasiswa dapat menjelaskan penerapan dielektrik pada pengolahan air limbah e. Mahasiswa dapat menjelaskan penerapan dielektrik pada super kapasitor dan baterai

## Uraian Materi

### A. Bahan Dielektrik dan Semikonduktor

Telah disebutkan pada kegiatan pembelajaran 2.2 bahwa nilai suseptibilitas, konstanta dielektrik dan permitivitas mempengaruhi sifat listrik dari suatu bahan, terutama bahan dielektrik. Kenapa bahan dielektrik? Coba perhatikan kembali kegiatan pembelajaran 2.1 dan 2.2. Ketika bola konduktor diletakkan pada ruang yang diberi medan seragam, maka besar medan total di dalam bola konduktor ini adalah nol. Sementara jika diberikan bola dengan bahan dielektrik homogen, yang diletakkan pada medan seragam, maka di dalam bola itu sendiri akan tetap ada medan total  $E$ . keberadaan medan total ini menunjukkan adanya polarisasi yang memproduksi muatan terikat pada bahan. Keberadaan muatan terikat ini kemudian akan meningkatkan jumlah muatan yang tersimpan di dalam kapasitor.

Kemampuan bahan dielektirk dalam menyimpan muatan ini sebenarnya tidak hanya diterapkan dalam pengisi kapasitor, namun ada banyak kegunaan lainnya, mari kita simak satu persatu.

Apa itu bahan dielektrik ?

Tontonlah video berikut dengan mengklik *link* dibawah ini atau dengan melakukan *scan* pada kode QR disamping

<https://www.youtube.com/watch?v=XrTJUAYolvE>



Bahan dielektrik adalah bahan yang isolator yang dapat mengalami polarisasi. Bahan dielektrik akan mengalami polarisasi saat diberikan medan listrik eksternal. Ada tiga jenis polarisasi, yaitu polarisasi elektronik (atau atomik), ionik dan orientasi. Waktu yang diperlukan untuk bahan hingga terpolarisasi disebut sebagai waktu relaksasi. Waktu relaksasi ini dapat kita jelaskan sebagai waktu yang diperlukan bagi dipol – dipol material untuk menyusun dirinya agar sesuai dengan medan eksternal. Pada keadaan yang telah sesuai dengan medan eksternal, kutub positif material akan berdekatan dengan elektroda negatif dan sebaliknya.

Dengan mengetahui waktu relaksasi  $\tau$ , maka kita dapat menentukan batas frekuensi kritisnya atau frekuensi relaksasinya  $f_c$ . Frekuensi relaksasi adalah frekuensi yang diberikan dari keadaan awal (tidak terpolarisasi) hingga jenuh (telah terpolarisasi). Apabila material diberikan medan eksternal dengan frekuensi melebihi frekuensi kritis maka tidak akan terjadi polarisasi. Dipol – dipol hanya melakukan polarisasi jika diberikan frekuensi tegangan eksternal yang lebih kecil atau sama dengan frekuensi kritisnya.

Perubahan yang terjadi pada material dari keadaan sebelum dan setelah terpolarisasi ini akan menyebabkan terjadinya perubahan konduktivitas dalam bahan. Pada saat dari keadaan awal hingga dipol – dipol mulai terpolarisasi dan akhirnya tersusun sesuai dengan medan listrik eksternal, maka bahan dielektrik berperan sebagai penyimpan muatan listrik dan tidak mengalirkan muatan (bersifat isolator). Namun jika kemudian diberikan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi kritis, maka sifat “penyimpan atau penahan” muatan ini tidak akan ada, karena tidak ada polarisasi. Pada saat muatan tidak tersimpan, maka muatan akan mengalir dan bahan dielektrik berubah menjadi konduktor. Perubahan fase dari isolator menjadi konduktor ini lah yang dialami oleh bahan semikonduktor.

Bahan semikonduktor dikenal sebagai sifat bahan yang dapat mengalami transisi dari isolator menjadi konduktor. Perubahan sifat ini ditentukan oleh proses polarisasi (dielektrik) dalam bahan. Selain oleh medan eksternal, perubahan fase dari isolator menjadi konduktor ini juga dapat diubah dengan

variabel temperature dan bisa juga oleh tekanan, misalnya pada beberapa semikonduktor akan berubah menjadi konduktor Ketika dipanaskan.

Perubahan sifat dari isolator menjadi konduktor dan sebaliknya ini digunakan dalam banyak bidang di kehidupan. Riset tentang material kini juga diarahkan untuk mensintesis bahan semikonduktor, terutama diaplikasikan pada teknologi yang ramah lingkungan (*green technology*). Untuk memahami penerapannya, mari kita mempelajarinya dengan antusias.

## **B. Aplikasi dielektrik dalam teknologi berbasis pelestarian lingkungan**

### **1. Sel Surya**

Sel surya atau *Photovoltaic Cell* (PV cell) adalah komponen yang dapat memproduksi energi listrik dari energi radiasi matahari. PV cell menggunakan fenomena eksitasi elektron saat diberi energi luar yang melebihi energi ambangnya. Singkatnya PV cell mengeksitasi electron saat disinari matahari. Bahan yang dapat mengeksitasi electron ini adalah bahan semikonduktor atau bahan dielektrik. Produksi electron pada PV cell terjadi karena adanya komponen PN junction.

Gambar 2. 25 PV Cell



Sumber: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic\\_cell](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_cell)

Untuk saat ini, material PV *cell* tidak hanya terbatas pada silicon saja, namun ada banyak jenis material lain yang dapat digunakan sebagai PV cell. PV cell juga telah banyak digunakan pada masyarakat dengan harga yang lebih

terjangkau. Energi matahari adalah energi terbarukan, penggunaan PV cell tidak hanya hemat ongkos, namun juga ramah lingkungan, karena tidak menghasilkan emisi karbon.

### Tugas

Tontonlah video berikut, dengan mengklik [https://www.youtube.com/watch?v=L\\_q6LRgKpTw](https://www.youtube.com/watch?v=L_q6LRgKpTw) atau melakukan scan pada kode QR disamping!



Kemudian jawablah pertanyaan berikut:

1. Bagaimana peranan (cara kerja) bahan dielektrik pada PV cell? Jelaskan!

Jawab

--

2. Apa saja kriteria material yang sesuai menjadi kandidat PV cell? Berapa besar permitivitas dan konduktivitas material dielektrik terbaik yang bisa digunakan untuk PV cell (bisa dinyatakan dalam kisaran) ?

Jawab

--

3. Lakukan penelusuran internet, material dielektrik apa yang saat ini paling banyak dan paling baik dimanfaatkan sebagai PV Cell? Kenapa ?

Jawab

--

## 2. Sel Bahan Bakar Padat (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

Untuk lebih memahami tentang SOFC, kamu dapat menonton video berikut

Untuk lebih memahami tentang SOFC, silahkan menonton video dengan link berikut, atau scan kode QR disamping  
<https://www.youtube.com/watch?v=XRxnNWVqgz8>



Solid oxide fuel cell (SOFC) atau sel bahan bakar padat adalah komponen elektrokimia yang menghasilkan energi listrik dengan mengoksidasi bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar gas berupa metana ( $\text{CH}_4$ ), hidrokarbon ( $\text{CO}$ ) dan hidrogen ( $\text{H}_2$ ). Pesawat ulang alik milik NASA yang bernama “space shuttle” menggunakan SOFC agar hydrogen bisa dipakai sebagai bahan bakarnya. SOFC merupakan sumber energi listrik yang ramah lingkungan, memiliki tingkat efisiensi tinggi, dan memiliki stabilitas jangka panjang. Kelemahan dari SOFC adalah dapat bekerja pada suhu tinggi ( $500\text{-}1000^\circ\text{C}$ ).

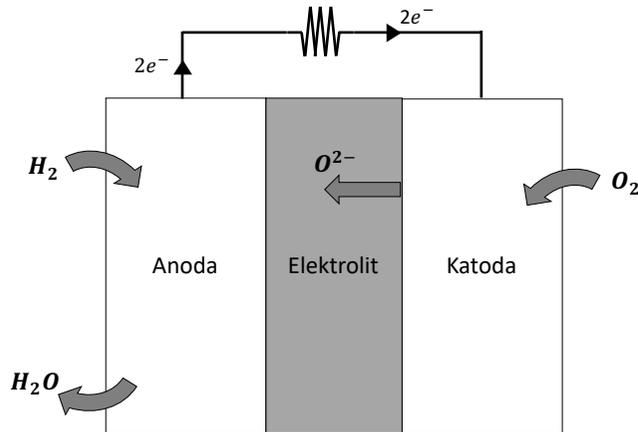
Gambar 2. 26 SOFC untuk menerbangkan Space Shuttle



Sumber: <https://www.idntimes.com/science/discovery/dodi-bayu-wijoseno/pesawat-ulang-alik-nasa-c1c2>

SOFC terdiri atas anoda, katoda dan bahan elektrolit (Gambar 2.27). Elektrolit yang digunakan merupakan material ionic konduktif. Bahan bakar dioksidasi di anoda, sementara oksigen direduksi di katoda. Lempeng katoda menginput oksigen dan bahan bakar dioksidasi di anoda. Dengan demikian ion oksigen akan bergerak dari katoda ke anoda.

Gambar 2. 27 Skema dasar SOFC



Proses oksidasi dan reduksi ini dapat terjadi jika ada pergerakan electron dari anoda ke katoda yang dapat diatas dengan membuat rangkaian luar, yang bertindak sebagai penghubung anoda dan katoda. Pada rangkaian eksternal inilah terjadi perpindahan electron dan terjadi arus listrik, sehingga timbul energi listrik.

Setelah melalui komponen pada rangkaian eksternal, electron kemudian memasuki katoda dan kembali mereduksi oksigen dari luar, sehingga mudah bereaksi dengan bahan bakar yang masuk dari anoda. Oksigen yang telah tereduksi bereaksi dengan hydrogen menghasilkan uap air yang menjadi residu dari produksi energi listrik. Pada dasarnya SOFC terdiri dari tiga bagian, yaitu katoda, anoda dan elektrolit.

### a. Katoda

Bagian katoda merupakan material dielektrik dalam bentuk keramik berporos yang memiliki konduktivitas ionic dan elektronik, artinya ion dan electron berkontribusi pada penghantaran listrik di dalam bahan, contohnya material perovskite lanthanum – strontium manganate oksida  $(La,Sr)MnO_3$ .

Bahan katoda berhubungan dengan oksidan, yaitu oksigen, artinya oksigen akan masuk ke SOFC melalui katoda. Di dalam katoda oksigen akan mengalami proses reduksi karena bereaksi dengan electron yang berasal dari rangkaian listrik eksternal. Persamaan reduksi oksigen pada katoda diberikan oleh:



Bagian katoda adalah salah satu bagian yang penting bagi keberhasilan SOFC dalam menghasilkan energi listrik. Pada bagian katoda akan dipilih material dielektrik yang sifatnya paling mudah menangkap oksigen dan

mereduksinya menjadi ion oksigen  $O^{2-}$ , ion oksigen yang dihasilkan pada katoda ini disebut sebagai oxygen reduction reaction (ORR). Semakin tinggi ORR maka material dielektrik tersebut akan semakin cocok menjadi katoda pada SOFC.

### **b. Elektrolit**

Bagian elektrolit berada diantara katoda dan anoda. Bagian elektrolit merupakan material keramik dengan konduktivitas ionic yang tinggi karena berfungsi untuk menghantarkan ion oksigen dari katoda ke anoda, contoh bahan elektrolit SOFC adalah zirconia (zirconium oksida,  $ZrO_2$ ) dan yttria (yttrium oksida,  $Y_2O_3$ ). Komponen elektrolit adalah material dielektrik, misalnya perovskite atau senyawa oksida logam. Bagian elektrolit juga haruslah sangat padat, agar dapat menahan gas hydrogen atau metana tetap berada di lempeng katoda.

Bagian elektrolit ini merupakan membran yang hanya dapat melewatkan ion oksigen  $O^{2-}$ , sehingga bahan elektrolit harus merupakan bahan dielektrik dengan konduktivitas ion yang tinggi. Material dielektrik pada bagian elektrolit tidak boleh memiliki sifat penghantaran listrik elektronik, agar electron hanya melalui kawat penghubung pada rangkaian luar.

### **c. Anoda**

Bagian anoda adalah lapisan material berporos (berpori) bermuatan positif, yang berfungsi sebagai katalis. Bagian ini berhubungan langsung dengan bahan bakar SOFC berupa gas, misalnya helium dan metana. Contoh bahan anoda adalah bahan yang berbasis nikel dan zircon, misalnya  $Ni-ZrO_2$  dan  $Co-ZrO_2$ . Bahan bakar (ambil contohnya helium) akan masuk kedalam anoda dan kemudian mengalami oksidasi dengan persamaan:



Dari persamaan diatas kita lihat bahwa hasil buangan dari SOFC adalah air  $H_2O$  dan electron. Buangan berupa air ini lah yang menyebabkan SOFC menjadi sumber energi yang ramah terhadap lingkungan. Elektron yang dihasilkan selanjutnya akan mengalir kembali ke katoda melalui rangkaian eksternal dan kembali mereduksi oksigen pada bagian katoda. Proses pengulangan siklus ini menyebabkan SOFC menjadi sumber energi listrik yang stabil pada jangka panjang dan memiliki tingkat efisiensi yang tinggi.

### **Tugas**

1. Apa yang membuat SOFC menjadi sumber energi masa depan yang menjanjikan?

Jawab

2. Apa kontribusi material dielektrik pada SOFC?

Jawab

3. Kenapa bahan dielektrik bisa berperan sebagai penghasil reaksi reduksi oksigen (ORR) pada bagian katoda SOFC?

Jawab

### 3. Pengolahan air limbah

Pengolahan air limbah kini menjadi salah satu focus dalam upaya pelestarian lingkungan. Kebutuhan akan air bersih tidak sebanding dengan ketersediaan air bersih. Pemakaian air oleh rumah tangga dan industri telah menghasilkan menurunnya kualitas air. Dengan demikian kita juga perlu mengupayakan pengolahan air limbah untuk keberlanjutan ketersediaan air bersih.

Ada dua jenis pengolahan air, yaitu pengolahan air dan pengolahan air limbah. Pengolahan air (*water treatment*) adalah proses pengolahan air untuk kebutuhan tertentu, misalnya air mentah menjadi air layak minum. Sedangkan pengolahan air limbah adalah pengolahan air yang telah digunakan (limbah) agar kualitasnya menjadi lebih baik dapat digunakan kembali untuk proses lainnya atau memiliki kualitas yang baik saat dialirkan kembali ke sungai atau laut.

Sebagai salah satu upaya untuk mengolah kembali air limbah, sehingga dapat digunakan untuk keperluan di bidang lainnya, para ilmuwan dan insinyur mengembangkan material dielektrik dalam dengan menggunakan teknik fotokatalis dan filtrasi (membran) pada air limbah. Sebenarnya, selain fotokatalis dan filtrasi, masih ada teknik atau metode lainnya, namun kali ini kita batasi pada dua teknik diatas saja.

### a. Fotokatalis

Untuk lebih memahami tentang fotokatalis, kamu dapat menonton video berikut

silahkan menonton video dengan link berikut, atau scan kode QR disamping, perhatikan bagian yang diberi methylene blue  
<https://www.youtube.com/watch?v=nG4ghy2Hs8w>



Fotokatalis, sebagaimana terminologinya yang berasal dari kata foto dan katalis, artinya bahan katalis yang digunakan untuk mempercepat reaksi kimia dengan bantuan sinar matahari. Proses fotokatalis bisa digunakan untuk pengolahan limbah cair yang mengandung senyawa organik, misalnya fenol. Sehingga fotokatalis dapat dimanfaatkan sebagai metode untuk mengolah air limbah menjadi air yang bebas dari bakteri, fungi dan alga. Teknik fotokatalisis juga dapat mengurangi kadar COD dan BOD, pengurangan kadar ini yang menunjukkan kualitas air yang semakin baik.

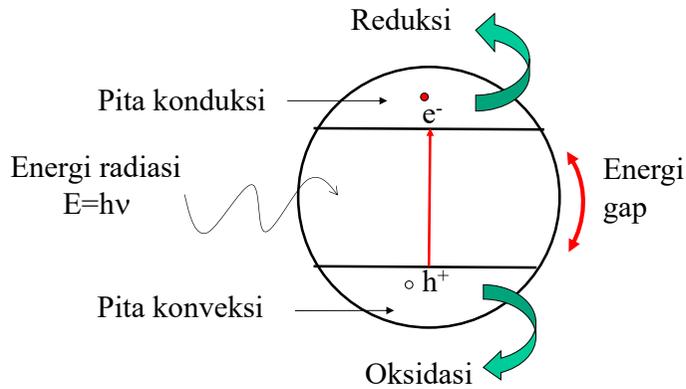
Senyawa yang sering digunakan sebagai fotokatalis untuk pengolahan air limbah adalah titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ), methylene blue, perovskite dan double perovskite, yang merupakan bahan dielektrik. Senyawa fotokatalis ini berupa serbuk yang kemudian diaduk (dicampurkan) dengan air limbah, yang selanjutnya diiberi paparan sinar matahari (alami) atau sinar UV (buatan). Karakteristik bahan yang cocok digunakan untuk fotokatalis pada umumnya adalah bahan semikonduktor (dielektrik) yang bersifat seperti diode emisi cahaya dan material konduksi transparan. Material konduksi transparan ini memiliki sifat kelistrikan yang baik dan memiliki tingkat adsorpsi optic (cahaya) yang tinggi.

Sifat kelistrikan yang sesuai digunakan untuk fotokatalis biasanya dilihat dari energi calah (energy gap) yang setara atau lebih kecil dari panjang gelombang cahaya tampak, untuk  $\text{TiO}_2$  energi gap nya 3,2 eV. Untuk perovskite energi gapnya lebih kecil, sekitar 0,01 hingga 1,9 eV. Energi gap adalah calah energi yang terpada antara pita konduksi dan pita valensi pada struktur atom. Semakin kecil energi gap maka sifat benda akan lebih konduktif. Sedangkan sebaliknya, semakin besar energi gap maka sifat benda akan lebih menjadi isolator.

Energi gap yang relatif kecil ini akan memudahkan terjadinya electron tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi. Pada air limbah yang diberikan fotokatalis, electron dari fotokatalis akan teksitasi saat diberi paparan sinar UV. Eksitasi electron ini mennandakan fotokatalis menjadi aktif dan dapat

mempercepat proses dekomposisi zat organik dalam limbah tersebut. Skema fotokatalis diberikan pada gambar berikut:

Gambar 2. 28 Skema dasar proses fotokatalis



Eksitasi ini akan menghasilkan *hole* ( $h^+$ ) di pita valensi dan electron ( $e^-$ ) di pita konduksi. Hole ( $h^+$ ) adalah pengoksidasi yang kuat dan electron ( $e^-$ ) adalah pereduksi yang kuat. Keberadaan hole electron ( $h^+$ ) akan mengoksidasi polutan organik beracun untuk diuraikan menjadi komponen yang lebih sederhana dan lebih aman untuk dilepas ke lingkungan dengan persamaan



Dalam proses fotokatalis terjadi peristiwa reduksi dan oksidasi, yaitu proses serah terima electron, yang terjadi karena radiasi sinar UV yang mengaktifkan eksitasi electron dari fotokatalis. Metode fotokatalis ini merupakan bagian dari teknologi pengolahan air limbah yang ramah lingkungan dan sangat cocok pada daerah tropis yang mendapat paparan sinar matahari sepanjang tahun.

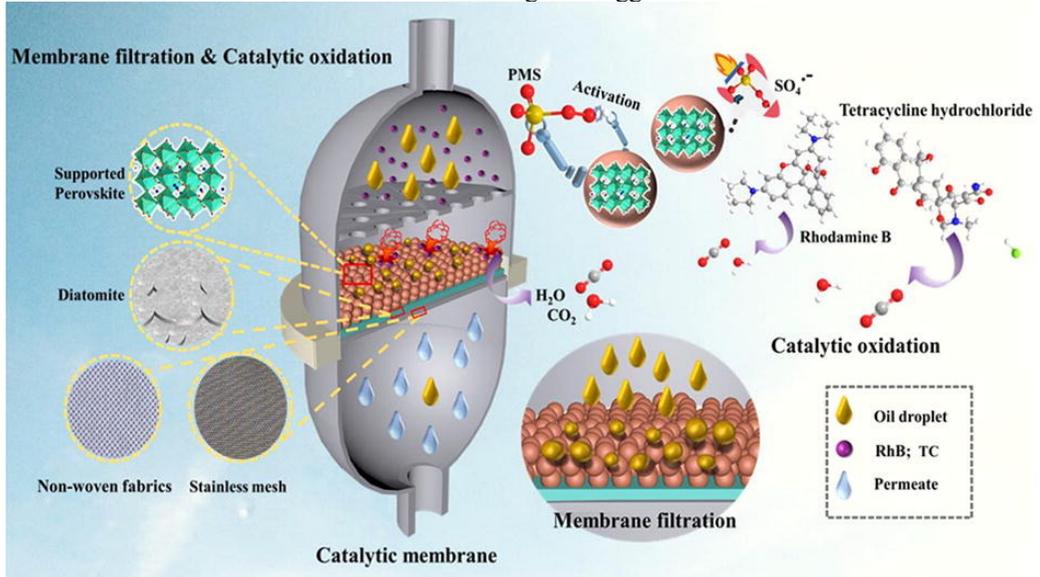
### b. Teknologi Membran pada Pengolahan Air Limbah

Membrane adalah bagian yang dapat memisahkan dua bagaian atau dua fase pada suatu larutan atau senyawa. Membrane berlaku seperti sebuah saringan, ia dapat menyeleksi material, fase, atau senyawa apa yang dapat melewatinya dan yang tidak. Bahan dielektrik dikenal sebagai bahan yang dapat menyimpan muatan jika diberikan medan listrik luar, atau perlakuan luar yang sesuai. Sifat ini kemudian dimanfaatkan sebagai membrane penyaringan air.

Bahan semikonduktor (dielektrik) yang banyak digunakan sama halnya dengan bahan yang digunakan sebagai fotokatalis. Bahan dielektrik, misalnya perovskite dan double perovskite, zirconium oksida dan titanium oksida, atau

aluminium oksida dimodifikasi dengan senyawa lain yang lebih kuat, misalnya silikon dan titanium, agar strukturnya menjadi lebih kuat saat dilewati arus air (gambar 2.27). Air limbah yang digambarkan seperti tetesan minyak ini akan “disaring” oleh membrane katalis berbasis perovskite.

Gambar 2. 29 Filtrasi membran dengan menggunakan bahan dielektrik



Sumber: Zhang, L, 2021

Penggunaan membran untuk filtrasi air ada yang menggunakan pompa mekanis saja dan ada juga yang menambahkan lagi dengan listrik. Air limbah dilewatkan pada sistem membran dengan memberi tekanan eksternal dan membran dari bahan dielektrik diberi medan listrik luar atau diberi tegangan listrik luar. Proses seperti ini dinamakan filtrasi dengan melibatkan proses elektrokatalisis. Sama halnya dengan fotokatalisis, proses elektrokatalisis adalah proses reduksi dan oksidasi yang berguna untuk mempercepat dekomposisi senyawa polutan, namun menggunakan energi listrik.

Pada proses elektrokatalisis bahkan dapat melakukan pemisahan pada senyawa non organik, misalnya pada limbah logam berat dan limbah yang terpapar senyawa reaktif. Logam berat akan diikat oleh proses oksidasi dan kemudian ditahan oleh “penampung muatan” pada bahan dielektrik.

#### 4. Kapasitor, Superkapasitor dan Teknologi Baterai

Pernah mendengar siapakah elon musk?  
Pernahkan mendengar merek TESLA? Tesla mengembangkan sebuah mobil yang dapat digunakan selama 25 tahun tanpa melakukan isi ulang energi!  
Tonton video berikut untuk mencari tahu tentang super kapasitor  
<https://www.youtube.com/watch?v=XjX3deXDtnQ>



Peranan material dielektrik pada teknologi penyimpanan energi ini sudah sangat dikenal. Penyimpanan energi ini diaplikasikan pada kapasitor dan baterai. Teknologi yang dikembangkan saat ini adalah super kapasitor yang kini sudah dipakai oleh mobil listrik atau mobil tenaga surya. Teknologi superkapasitor dan baterai ini membantu penyimpanan energi alternatif, yang lebih ramah lingkungan (*green technology*).

### Tugas

Jelaskan bagaimana bahan dielektrik bisa menjadi bahan yang sangat cocok sebagai kandidat untuk bahan pengisi baterai dan bahan super kapasitor !

Jawab

## Rangkuman

### 1. Bahan semikonduktor dan dielektrik

- Bahan dielektrik adalah bahan yang isolator yang dapat mengalami polarisasi.
- Bahan semikonduktor dikenal sebagai sifat bahan yang dapat mengalami transisi dari isolator menjadi konduktor yang ditentukan oleh proses polarisasi (dielektrik) dalam bahan.
- Selain oleh medan eksternal, perubahan fase dari isolator menjadi konduktor ini juga dapat diubah dengan variable temperature dan bisa juga oleh tekanan.
- Perubahan sifat dari isolator menjadi konduktor dan sebaliknya ini digunakan dalam banyak bidang di kehidupan.

### 2. Sel PV

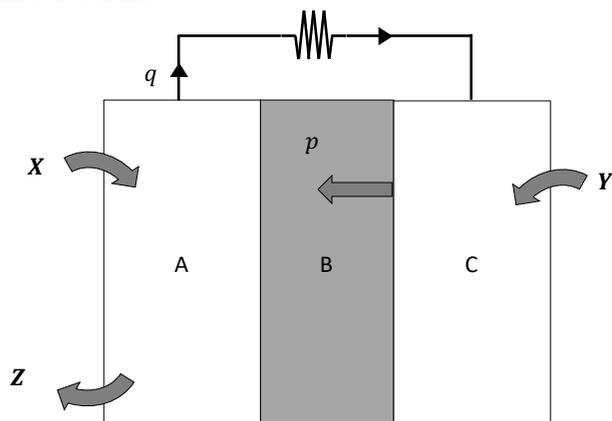
- a. Sel surya atau photovoltaic cell (PV cell) adalah komponen yang dapat memproduksi energi listrik dari energi radiasi matahari.
  - b. PV cell menggunakan fenomena eksitasi elektron saat diberi energi luar yang melebihi energi ambangnya.
3. Solid oxide fuel cell (SOFC)
- a. Solid oxide fuel cell (SOFC) atau sel bahan bakar padat adalah komponen elektrokimia yang menghasilkan energi listrik dengan mengoksidasi bahan bakar.
  - b. Bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar gas berupa metana ( $\text{CH}_4$ ), hidrokarbon dan karbon monoksida ( $\text{CO}$ ) dan hidrogen ( $\text{H}_2$ ).
  - c. Pada dasarnya SOFC terdiri dari tiga bagian, yaitu katoda, anoda dan elektrolit. Bagian katoda menggunakan material dielektrik tempat reduksi oksigen. Bagian anoda adalah bagian yang mengoksidasi hydrogen atau metana. Bagian elektrolit adalah bagian dari bahan dielektrik yang menghantarkan ion oksigen dari katoda ke anoda.
4. Pengolahan Air limbah
- Sebagai salah satu upaya untuk mengolah kembali air limbah, sehingga dapat digunakan untuk keperluan di bidang lainnya, para ilmuwan dan insinyur mengembangkan material dielektrik dalam dengan menggunakan teknik fotokatalis dan filtrasi (membran) pada air limbah.
5. Kapasitor, superkapasitor, dan baterai
- Peranan material dielektrik pada teknologi penyimpanan energi ini sudah sangat dikenal. Penyimpanan energi ini diaplikasikan pada kapasitor, superkapasitor dan baterai.

# Uji Formatif

## A. Pilihan Ganda

1. Yang merupakan fungsi bahan dielektrik pada teknologi ramah lingkungan adalah ....
  - a. Super konduktor, SOFC dan PV cell
  - b. Super kapasitor, super konduktor dan PV cell
  - c. SOFC, PV cell dan membrane filtrasi pengolahan air limbah
  - d. SOFC, super konduktor dan membrane elektrokatalisis
  - e. fotokatalitik, elektrokatalitik dan super konduktor
2. Transisi isolator menjadi konduktor pada bahan semikonduktor terjadi saat ...
  - a. sebelum terpolarisasi
  - b. setelah terpolarisasi
  - c. setelah termagnetisasi
  - d. sebelum termagnetisasi
  - e. sebelum dipanaskan
3. Prinsip dasar dari PV cell adalah....
  - a. menggunakan bahan bakar gas
  - b. mendekomposisi polutan organik
  - c. menggunakan pn junction
  - d. memanfaatkan energi listrik
  - e. memanfaatkan energi kinetik
4. Sebuah mobil menggunakan SOFC pada sistem penyedia energinya, maka bahan bakar dari mobil tersebut adalah ....
  - a. tenaga surya
  - b. hydrogen atau metana
  - c. bensin
  - d. diesel
  - e. listrik
5. Bagian dari SOFC yang merupakan material dielektrik yang bersifat sebagai reduktor oksigen adalah ....
  - a. katoda
  - b. anoda
  - c. elektrolit
  - d. fotokatalitik
  - e. dioda
6. Yang merupakan bahan fotokatalitik adalah ....
  - a. titanium oksida
  - b. besi oksida
  - c. silicon
  - d. mangan oksida
  - e. kertas

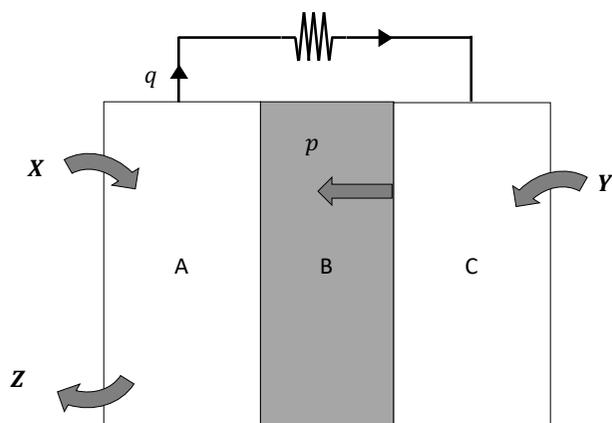
7. Perhatikan gambar berikut



Pernyataan yang benar dari gambar diatas adalah

- bagian A terjadi reduksi dan bagian C terjadi oksidasi
- bagian A terjadi oksidasi dan bagian C terjadi reduksi
- Bagian B terjadi transport elektron
- bagian A terjadi reduksi dan bagian B terjadi oksidasi
- bagian A terjadi oksidasi dan bagian B terjadi reduksi

8. Perhatikan gambar berikut



Pernyataan yang benar dari gambar diatas adalah

- bagian A, B dan C menggunakan material dielektrik
- bagian A saja yang menggunakan material dielektrik
- bagian B saja yang menggunakan material dielektrik
- bagian C saja yang menggunakan material dielektrik
- bagian A, B dan C menggunakan material konduktif

9. Faktor yang menentukan besar energi yang tersimpan dalam kapasitor adalah

...

- a. massa jenis
- b. massa
- c. permitivitas
- d. adsorpsi optic
- e. kekuatan mekanis

10. Dalam pengolahan air, material dielektrik dapat dimanfaatkan pada teknologi

....

- a. elektrokatalitik, filtrasi , dan fotokatalitik
- b. elektrokatalitik dan konduksi
- c. koagulasi dan filtrasi
- d. filtrasi dan pewarna air
- c. optoelektronik dan pendingin

## B. Essay

1. Apa hubungan semikonduktor dan dielektrik ?

Jawab

2. Bagaimana peranan (cara kerja) bahan dielektrik pada PV cell? Jelaskan!

Jawab

3. Apa kontribusi material dielektrik pada SOFC?

Jawab

4. Jelaskan bagaimana bahan dielektrik bisa menjadi bahan yang sangat cocok sebagai kandidat untuk bahan pengisi baterai dan bahan super kapasitor !

Jawab

--

## Refleksi

Menurut pendapatmu, setelah membaca dan mempelajari kegiatan pembelajaran ini,

1. apakah kegiatan pembelajaran ini penting dan berguna bagi kehidupan mu sehari – hari ? kenapa ? kemukakan alasanmu!

Jawab

2. apa yang dapat kamu lakukan untuk melestarikan lingkungan dengan menggunakan bahan dielektrik? Kenapa ?

Jawab

## Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

- Griffiths, D. J. (2005). Introduction to electrodynamics 3<sup>rd</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Bodzek, M., & Rajca, M. (2012). Photocatalysis in the treatment and disinfection of water. Part I. Theoretical backgrounds/Fotokataliza w oczyszczaniu i dezynfekcji wody część i. podstawy teoretyczne. Ecological Chemistry and Engineering S, 19(4), 489-512.

Zhang, L., Zhang, Y., Wei, J., & Liu, W. (2021). Perovskite  $\text{LaFe}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3-\lambda$  deposited  $\text{SiO}_2$  catalytic membrane for deeply cleaning wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 403, 126386.

Masta, N., Triyono, D., & Laysandra, H. (2019, March). Investigation of electrical conductivity and dielectric properties of  $\text{Sr}_2\text{FeTiO}_6$ . In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 496, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.

<https://www.youtube.com/watch?v=XrTJUAYolvE>

[https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic\\_cell](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_cell)

[https://www.youtube.com/watch?v=L\\_q6LRgKpTw](https://www.youtube.com/watch?v=L_q6LRgKpTw)

<https://www.youtube.com/watch?v=XRxnNWVqgz8>

<https://www.idntimes.com/science/discovery/dodi-bayu-wijoseno/pesawat-ulang-alik-nasa-clc2>

<https://www.youtube.com/watch?v=nG4ghy2Hs8w>

<https://www.youtube.com/watch?v=XjX3deXDtnQ>

# Kegiatan Pembelajaran 4 Metode Spektroskopi Impedansi

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa mampu menjelaskan tentang spektroskopi impedansi	Mahasiswa mampu menjelaskan prinsip dasar karakterisasi dielektrik menggunakan spektroskopi impedansi

## Uraian Materi

### A. Definisi dan Peran Spektroskopi Impedansi

Pada kegiatan pembelajaran 2.3 kamu telah mengetahui bagaimana mengaplikasikan atau memanfaatkan dielektrik pada kehidupan sehari – hari, terutama pada teknologi ramah lingkungan. Kemudian sekarang kita akan mempelajari, bagaimana mempelajari atau mengukur sifat (property) dielektrik dari sebuah bahan.

Untuk menghasilkan material dielektrik yang sesuai dengan harapan kita, maka material itu harus melalui tes (ujian) yang kemudian akan menggambarkan sifat dielektrik dari bend aitu. Salah satu teknik yang bisa kita gunakan untuk menguji (karakterisasi) sifat dielektrik adalah dengan menggunakan teknik impedansi spektroskopi atau electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

Sebenarnya teknik EIS menggunakan spektroskopi impedansi. Spektroskopi berasal dari kata spektrum, yang artinya sebaran. Sebaran data impedansi yang diperoleh bisa berupa sebaran data impedansi terhadap frekuensi dan / atau temperature. Impedansi adalah bentuk yang lebih kompleks dari resistansi. Impedansi bisa dilihat jika sebuah bahan diberi gangguan berupa tegangan listrik ac, kemudian kita beri variasi frekuensi dan temperaturnya.

Pada kegiatan pembelajaran kali ini kita akan mempelajari teori dasar dari EIS dan penggunaannya secara praktis, diantaranya prinsip dasar dari teknik EIS dan menggunakan formula matematis untuk memverifikasi keakuratan data.

Spektroskopi impedansi atau biasa juga dikenal dengan Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) adalah teknik non- invasive yang sangat bermanfaat untuk menginvestigasi proses elektrokimia yang berlangsung pada material, biasanya impedansi dibaca menggunakan RLC Meter (Gambar 2.30). Teknik non-invasif, artinya dapat dilakukan tanpa memasukkan alat ke dalam material dan tanpa menyebabkan kerusakan pada material.

Gambar 2. 30 RLC Meter



Sumber : <https://www.tequipment.net/InstekLCR-8101G.html>

EIS dapat digunakan untuk melakukan karakterisasi sifat listrik material dengan menggunakan data impedansi sebagai fungsi waktu  $t$  atau sebagai fungsi frekuensi  $\omega$  yang dipandang sebagai bilangan kompleks, untuk menggambarkan proses elektrokimia berlangsung dalam material. Data impedansi yang selanjutnya dapat dikonversi ke dalam parameter lain sehingga bisa digunakan untuk mempelajari adsorpsi, transport muatan dan massa, sifat dielektrik, cacat atau defek pada material, studi tentang mikrostruktur dan pengaruh komposisi pada konduktansi material.

EIS diterapkan pada studi tentang korosi, properti (sifat) elektronik dan ion konduksi pada polimer; koloid dan *coating*, pengukuran pada penyimpanan energi; baterai, sistem yang berhubungan dengan *fuel-cell*, analisa biologis dan sensor biomedis; dan pengukuran pada semikonduktor dan elektrolit. Pada cakupan yang lebih luas, EIS dapat digunakan lebih luas untuk mempelajari kinetika elektrokimia pada interface (pertemuan) media-elektroda dan mendeterminasi mekanisme konduksi pada beragam material melalui elektron terikat atau electron bebas, ion, semikonduktor, dan muatan campuran.

EIS telah dipakai secara luas untuk mengembangkan perangkat sensor, mempelajari laju korosi logam dan biofouling dari perangkat medis yang *di-implant*-kan. EIS dapat digunakan sebagai prosedur menjaga kualitas dan juga dapat dipakai untuk menginterpretasikan proses elektronik dan elektrokimia pada material. Bidang yang secara umum berhubungan dengan teknik EIS adalah kimia, material science, koloid, electrochemical renewable energy dan sumber daya, elektronika, biomedis, farmasi dan industry lainnya.

## B. Sejarah singkat EIS

Konsep impedansi listrik pertama kali diperkenalkan oleh Oliver Heaviside pada tahun 1880. A. E. Kennelly dan C.P. Steinmetz kemudian mengembangkan EIS dalam bentuk diagram vektor dan representasi bilangan

kompleks. Semenjak itu, riset di bidang elektrokimia dan instrumentasi teknik EIS semakin berkembang dan semakin luas diaplikasikan.

Randles dan Warburg mengembangkan pemodelan rangkaian ekuivalen untuk merepresentasikan data impedansi. Studi ini kemudian berkembang untuk mempelajari reaksi elektrokimia dipasangkan dengan fenomena difusi (Greisher) dan adsorpsi (Eppelboin), efek dari permukaan berporos pada kinetika elektrokimia (de Levie), dan arus non seragam dan disperse distribusi potensial (Newman), penemuan – penemuan ini menghasilkan perkembangan pada penelitian yang menggunakan teknik EIS

Sejalan dengan perkembangan teori impedansi elektrokimia, metode matematika juga semakin berelaborasi dengan teori impedansi elektrokimia, misalnya hubungan Kramers-Kronig dan regresi kompleks non linear. Transformasi kedalaman perengkapan elektrokimia dn teknologi komputer telah muncul sekitar 30 tahun yang lalu membawa pengukurna impedansi secara digital terotomatisasi untuk menghasilkan kualitas yang lebih tinggi secara sigiifan, control yang lebih tinggi dan kebermanfaatan yang lebih banyak jika dibandingkan teknis EIS sebelumnya. Otomatisasi digital ini benar-benar telah merevolusi teknik EIS sehingga membuat teknik ini menjadi semakin banyak diaplikasikan lebih praktis

## **C. Prinsip Dasar dari Teknik EIS**

### **1. Impedansi**

Teknik EIS menggunakan konsep dasar dari impedansi sebagai respon sistem terhadap medan listrik searah dan/atau bolak -balik yang diterapkan terhadapnya. Impedansi adalah konsep yang lebih umum jika dibandingkan dengan resistansi. Impedansi dapat didefinisikan sebagai resistansi kompleks, karena impedansi mengakomodir perbedaaan fase antara kegangan input dan arus output ke dalam perhitungan. Karena berperan sebagai resistansi kompleks, maka secara matematis dapat dinyatakan sebagai rasio antara tegangan dan arus.

$$Z = \frac{V_{in}}{I_{out}} \quad 2.61$$

Kenapa impedansi dapat dinyatakan sebagai resistansi kompleks? Saat sebuah tegangan input diaplikasikan pada rangkaian tertutup, maka pada rangkaian akan muncul arus listrik. Karena yang diaplikasikan berupa tegangan AC, maka sinyal tegangan akan berbentuk sinusoidal sebagai bentuk persamaan gelombang harmonic.

$$V(t) = V_A \sin(2\pi ft) = V_A \sin(\omega t) \quad 2.62$$

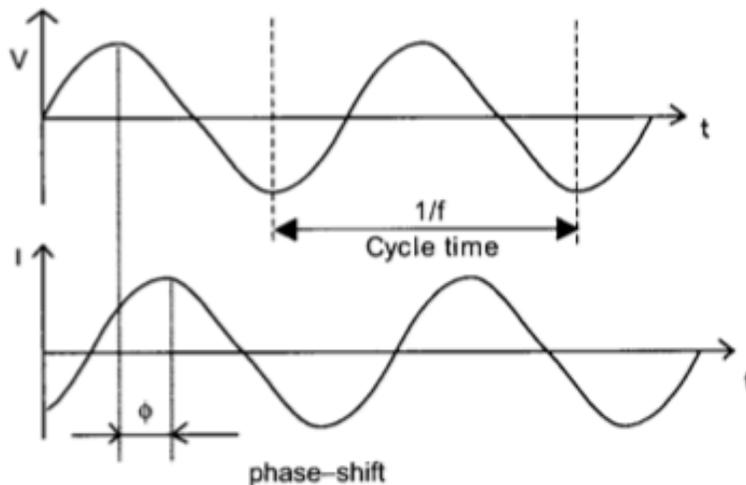
Percobaan yang dilakukan pada teknik EIS normalna menggunakan tegangan AC dengan amplitude yang kecil  $V_A$  (volt) yang diberikan dalam bentuk frekuensi  $f$  (*hz atau 1 / detik*). Pada persamaan ini “frekuensi radial”  $\omega$  (radial / detik) adalah frekuensi dari sinyal tegangan AC yang diterapkan yang dinyatakan dalam  $\omega = 2\pi f$ .

Tegangan input ini akan menyebabkan arus output juga berbentuk sinusoidal dengan frekuensi yang sama, namun dengan ada “pergeseran fase”. Pergeseran fase ini menunjukkan arus output terdiri dari dua komponen. Pergeseran fase( $\phi$ ) ini menunjukkan rasio komponen kapasitif dan resistif dari arus output, dengan persamaan

$$I(t) = I_A \sin(\omega t + \phi) \quad 2.63$$

Satu bagian menyebabkan arus mengalir dengan fase yang sama (*in phase*) dengan tegangan, sementara bagian yang lain menyebabkan arus tertinggal / mendahului (*out phase*) tegangan sebesar  $90^\circ$  (Gambar 2.31). Karena sifat impedansi ini mirip dengan bilangan kompleks, maka impedansi dinyatakan sebagai bilangan kompleks

Gambar 2. 31 tegangan input sinusoidal pada ferkuensi tunggal terhadap arus responnya I



Karena mpedansi kompleks adalah rasio tegangan input  $V(t)$  dan arus output yang terukur  $I(t)$ , maka

$$Z^* = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{V_A \sin(\omega t)}{I_A \sin(\omega t + \phi)} = Z_A \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \phi)} \quad 2.64$$

Dengan menggunakan relasi euler

$$\exp(i\phi) = \cos \phi + i \sin \phi \quad 2.65$$

Persamaan diatas menunjukkan impedansi juga dapat dinyatakan dalam fungsi kompleks, sehingga potensial  $V(t)$  dapat dideskripsikan sebagai :

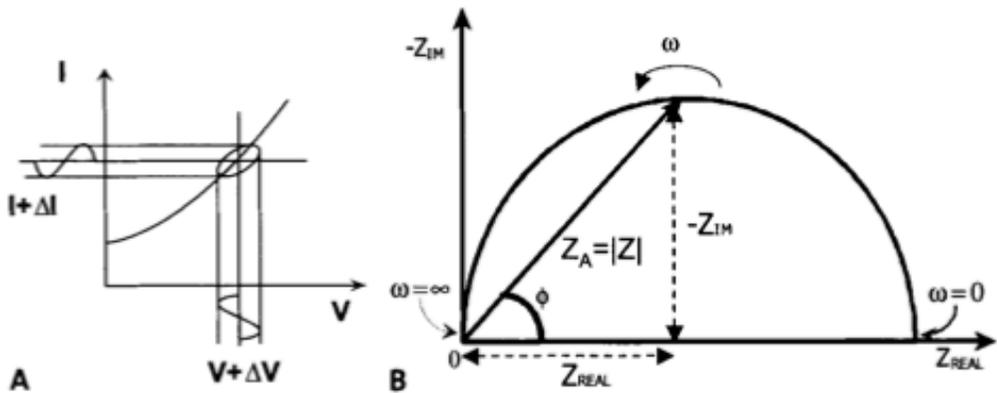
$$V(t) = V_A e^{i\omega t} \quad 2.66$$

Dan arus responnya sebagai

$$I(t) = I_A e^{i\omega t - i\phi} \quad 2.67$$

Jika kita membuat plot tegangan pada sumbu x dan arus output  $I(t)$  pada sumbu y, maka hubungan keduanya akan dinyatakan dalam bentuk Gambar Lissajous (Gambar 2.32)

Gambar 2. 32 Representasi data impedansi A. Gambar Lissajous; B : plot impedansi kompleks



Dari gambar 2.27 di sebelah kanan kita melihat bentuk plot Impedansi sebagai fungsi frekuensi dalam bentuk setengah lingkaran. Pola setengah lingkaran ini dapat ekuivalen dengan model rangkaian sederhana dari parallel R//C tunggal. Impedansi sebagai fungsi kompleks terbagi dari dua jenis, yaitu impedansi riil (sumbu y) dan impedansi imajiner (sumbu x). dengan besar impedansi dinyatakan dalam nilai mutlak  $Z_A = |Z|$  dan sudut fase  $\phi$ .

Impedansi kemudian direpresentasikan sebagai bilangan kompleks yang juga dapat diekspresikan dalam bagian riil atau “ dalam fase” ( $Z_{riil}$ ) dan bagian imajiner atau “ diluar fase” ( $Z_{im}$ ) (Gambar 2.32). Impedansi riil merepresentasikan kemampuan sebuah rangkaian untuk menghambat aliran arus listrik. Sementara impedansi imajiner menunjukkan kemampuan material untuk menyimpan energi listrik. Dengan hubungan antara  $Z_{riil}$  dan  $Z_{im}$  diberikan oleh

$$Z^* = \frac{V}{I} = Z_A e^{i\phi} = Z_A (\cos \phi + i \sin \phi) = Z_{RIIL} + i Z_{IM} \quad 2.68$$

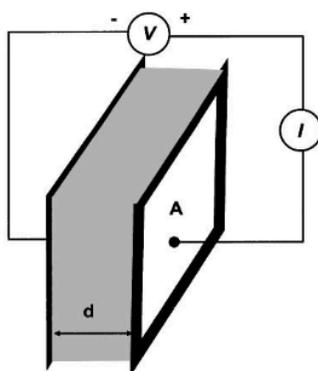
Dan sudut fase  $\phi$  pada frekuensi radial yang terpilih  $\omega$  adalah rasio dari impedansi imajiner dan riil:

$$\tan \phi = \frac{Z_{IM}}{Z_{RIL}} \quad 2.69$$

## 2. Skema dasar percobaan

Percobaan pada teknik EIS dilakukan dengan menghubungkan material yang ingin dianalisis dengan elektroda yang terhubung dengan tegangan input (V) (Gambar 2.33). Untuk karakterisasi sifat listrik, material berupa pellet (seperti kancing baju) di-*coating* dengan karbon pada kedua permukaan yang dimodelkan sebagai kapasitor keping sejajar. Kemudian kedua permukaan keping dihubungkan dengan *probe* yang bertindak sebagai konduktor.

Gambar 2. 33 Skema Dasar Eksperimen Impedansi

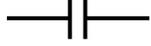


Rangkaian dihubungkan dengan instrumen RLC meter untuk mengukur respon material berupa impedansi kompleks  $Z^*$ , sudut fase  $\phi$  dan kapasitansi  $C$ . Kita asumsikan material yang dianalisis adalah homogen dan benar-benar memenuhi volume antara dua konduktor eksternal (elektroda) yang menampilkan luas  $A$  yang ditempatkan saling paralel dengan jarak  $d$ . Tegangan AC kemudian diaplikasikan pada rangkaian dengan amplitude tegangan yang rendah. Frekuensi dari tegangan input dan / atau temperature kemudian divariasikan sebagai variabel bebas.

Data yang diperoleh berupa impedansi, arus output dan sudut fase yang merupakan fungsi frekuensi radial atau sebagai fungsi temperatur. Data ini kemudian dikonversi oleh peneliti ke dalam parameter yang ingin dipelajari, misalnya ke dalam permitivitas relatif, kapasitansi dan konduktivitas. Dalam melakukan konversi, data impedansi ini juga dikonversi kedalam rangkain ekuivalen (model rangkaian listrik) yang terdiri dari resistor ideal dangan

resistansi R, kapasitor ideal dengan kapasitansi C dan bisa juga induktor ideal dengan induktansi L (Tabel).

Tabel 2 1 Elemen Rangkaian pada Nilai Impedansi

Elemen	Gambar	Persamaan impedansi	
Resistor murni (R)		$Z = R + 0i$	$i = \sqrt{-1}$
Kapasitor murni (C)		$Z = 0 - i \frac{1}{\omega C}$	$\omega = 2\pi f$
Induktor murni (L)		$Z = 0 + i \omega L$	$\omega = 2\pi f$
Rangkaian parallel RC		$Z = \frac{R}{1 + (\omega CR)^2} - i \frac{\omega C R^2}{1 + (\omega CR)^2}$	

Sumber: basic EIS Princeton <http://www.princetonappliedresearch.com>

Resistansi menyatakan aliran konduktif yang bisa menunjukkan konduktivitas bulk dari material atau bahkan mekanisme yang terkait dengan elektroda. Sementara induktansi dan kapasitansi menunjukkan daerah-daerah (regime) yang mengalami polarisasi muata ruang, proses adsorpsi, transport muatan dan elektrokristalisasi khusus pada suatu elektroda. Dengan demikian impedansi riil dan imajiner untuk rangkaian tunggal R/C parallel dinyatakan dengan

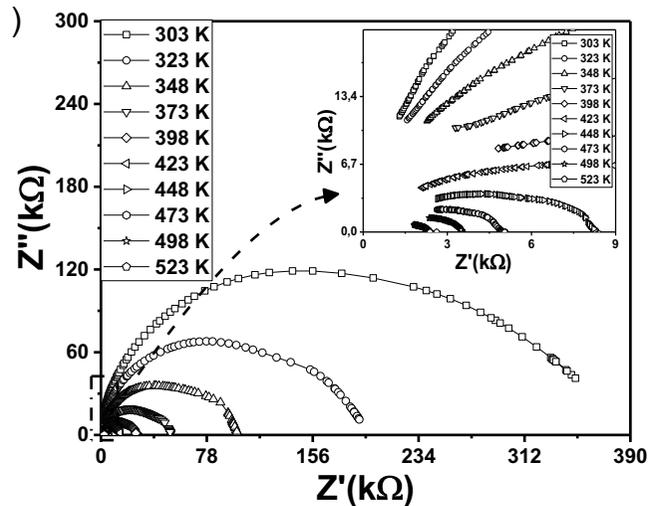
$$Z = Z_{RIIL} + i Z_{IM} = \frac{R}{1 + (\omega CR)^2} - i \frac{\omega C R^2}{1 + (\omega CR)^2} \quad 2.70$$

$$Z_{RIIL} = \frac{R}{1 + (\omega CR)^2} \quad 2.71$$

$$Z_{IM} = \frac{\omega C R^2}{1 + (\omega CR)^2} \quad 2.72$$

Bagian riil diplot pada sumbu - x dan bagian imajiner diplot pada sumbu - y. bila kedua polot dibuat kedalam grafing bidang, maka akan diperoleh Nyquist plot yang berbentuk setengah lingkaran atau *semicircle* (Gambar 2.32 sebelah kanan). Biasanya pada percobaan, akan dicari spektrum impedansi terhadap frekuensi atau spektrum impedansi terhadap temperature (Gambar 2.34).

Gambar 2. 34 Spektrum impedansi double perovskite SFTO pada jangkauan suhu ruang hingga 523 K



Sumber: (N. Masta, 2017)

Setiap *semicircle* pada spektrum impedansi akan mewakili rangkaian parallel R/C yang ekivalen dengan komponen individu dari material bulk dan batas grain. Apabila Nyquist plot menampilkan satu *semicircle* maka mempresentasikan sifat elektronis dari marterial bulk, namun jika menampilkan dua *semicircle* maka mempresentasikan sifat elektronis dari material bulk dan *grain boundary*.

### 3 Resistansi ( $R$ ) dan resistivitas ( $\rho$ )

Resistansi listrik  $R$  menunjukkan kemampuan elemen dari sebuah rangkaian listrik untuk menghambat atau menahan (resist) aliran listrik. Berdasarkan hukum Ohm, maka resistansi dinyatakan sebagai rasio perbandingan antara tegangan input  $V$  dengan arus keluaran  $I$ :

$$R = \frac{V}{I} \quad 2.73$$

persaman ini hanya berlaku pada rangkaian yang hanya memiliki resistor ideal. Sebuah resistor ideal mengikuti hukum Ohm pada seluruh rentang tegangan frekuensi tegangan AC. Karakteristik dari resistor dinyatakan dalam nilai resistansi  $R$  (ohm) yang nilainya tidak bergantung pada frekuensi AC. Ketika kegangangan eksternal  $V$  diaplikasikan, arus seragam  $I$  akan melalui sampel, dan resistansi kapasitor ini didefinisikan sebagai

$$R = \rho \frac{d}{A} \quad 2.74$$

Dimana  $\rho$  (ohm cm) adalah resistivitas atau hambat jenis yang menunjukkan karakteristik material. Resistivitas menunjukkan kemampuan menahan setiap bagian arus. Kebalikan dari resistivitas adalah konduktivitas  $\sigma$  ( $1/(\text{ohm cm})$ ) atau ( $\text{Sm/cm}$ ), yang menunjukkan kemampuan material untuk menghantarkan (mengkonduksi-kan) arus antara dua elektroda yang saling terpisah.

#### 4. Kapasitansi

Sebuah resistor ideal dapat diganti oleh sebuah komponen ideal lainnya yang benar-benar menghalangi atau menolak aliran arus. Elemen ini dianggap sebagai sebuah kapasitor ideal jika menyimpan energi listrik atau induktor yang menyimpan energi magnet, yang dihasilkan saat diberi medan listrik eksternal. Ketika dua elektroda terpisah oleh sebuah medium non konduksi (dielektrik), maka besar kapasitansi  $C$  dapat dinyatakan dengan:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{d} \quad 2.75$$

Dengan nilai kapasitansi  $C$  dinyatakan dalam Farad (F) yang besarnya bergantung pada luas elektroda  $A$ , jarak antara elektroda  $d$  dan konstanta dielektrik atau permitivitas yang dinyatakan dalam  $\epsilon$ . Dimana  $\epsilon_0$  adalah konstanta permitivitas pada ruang vakum ( $8,85 \times 10^{-14} \text{ F.cm}$ ). Nilai dari permitivitas  $\epsilon$  menunjukkan kemampuan dari material untuk menyimpan energi listrik.

Setiap material memiliki nilai permitivitas relatif masing-masing, sehingga permitivitas relatif ini dapat menjadi parameter yang diinvestigasi dalam mendeterminasikan sifat listrik bahan. Parameter ini biasanya disebut juga sebagai factor pengali dari konstanta permitivitas yang setara dengan rasio dari permitivitas material terhadap keadaan vakum. Nilai permitivitas berbeda-beda untuk setiap media, misalnya 80,1 untuk air, 8 untuk beberapa polimer, dan 1 untuk keadaan vakum.

### D. Dielektrik kompleks

Spektrum impedansi dapat dikonversi lagi ke dalam dua karakter dasar dari material, yaitu permitivitas  $\epsilon$  dan konduktivitas  $\sigma$  sebagai fungsi waktu, temperature, dan frekuensi radial AC ( $\omega$ ). Permitivitas bertanggung jawab pada kemampuan material menyimpan energi listrik. Konduktivitas menunjukkan kemampuan material dalam melakukan transfer muatan listrik.

Bahan dielektrik ideal bersifat isolator yang tidak memiliki muatan bebas, sehingga material ini memiliki kemampuan untuk menyimpan energi listrik yang berhubungan dengan fenomena polarisasi. Persamaan Debye menghubungkan

permitivitas dengan konsep densitas polarisasi material atau vektor polarisasi  $P$  ( $C/m^2$ ), atau momen dipol listrik ( $C \cdot m$ ) per unit volum ( $m^3$ ) dan tegangan yang diaplikasikan

$$P = (\epsilon - 1)\epsilon_0 V \quad 2.76$$

Fenomena polarisasi pada bahan bergantung pada jenis material yang diuji dan frekuensi yang diaplikasikan. Polarisasi dapat berupa polarisasi elektronik atau atomic dan polarisasi orientasi dipol. Polarisasi elektronik atau atomik terjadi dalam jangkauan frekuensi THz, yang ditandai dengan adanya perpindahan translasi yang sangat kecil dari awan electron. Polarisasi orientasi dipol terjadi pada jangkauan frekuensi kHz – MHz untuk molekul polar permanen dan pada jangkauan Hz – kHz untuk ion.

Analisa sifat dielektrik material dilihat dari permitivitas dan konduktivitas. Permitivitas dinyatakan dalam permitivitas kompleks atau  $\epsilon^*$  yang analog dengan konsep impedansi kompleks  $Z^*$  (Gambar 2.27). Sehingga permitivitas juga dapat dinyatakan dalam permitivitas riil dan imajiner, yang hubungannya diberikan oleh persamaan berikut

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad 2.77$$

Permitivitas riil ( $\epsilon'$ ) menunjukkan permitivitas atau konstanta dielektrik, sementara permitivitas imajiner ( $\epsilon''$ ) biasanya disebut sebagai atau factor kehilangan.

Pada bahan dielektrik, permitivitas riil ( $\epsilon'$ ) merepresentasikan terjadinya reorientasi susunan dipol, yang merupakan lokasi komponen penyimpan energi. Permitivitas riil ( $\epsilon'$ ) ekuivalen dengan invers  $Z_{IM}$ . Permitivitas riil dan imajiner dapat dihitung berdasarkan resistansi  $R$ , konduktivitas  $\sigma$ , kapasitansi  $C$  (Gambar 2. 26) dengan menggunakan persamaan:

$$\epsilon' = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad 2.78$$

Dan

$$\epsilon'' = \frac{d}{RA\omega\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} = \frac{1}{\rho\omega\epsilon_0} \quad 2.79$$

Permitivitas dan konduktivitas bergantung pada temperatur material dan frekuensi tegangan input AC.

Spektroskopi dielektrik berbeda dengan spektroskopi impedansi, walaupun menggunakan data elektrik yang sama. Perbedaannya terdapat dalam analisa dan pendekatan representasi data. Dielektrik berhubungan dengan konsep penyimpanan energi dan menghasilkan “relaksasi” proses pelepasan energi oleh setiap komponen pada sistem. Konsep relaksasai dielektrik diperkenalkan oleh

Maxwell dan dikembangkan oleh Debye. Debye menggunakan relaksasi dielektrik untuk mendeskripsikan waktu relaksasi. Waktu relaksasi adalah waktu yang diperlukan dipol molekuler polar untuk mengorientasikan dirinya secara terbalik (reversible) dibawah pengaruh medan listrik AC eksternal.

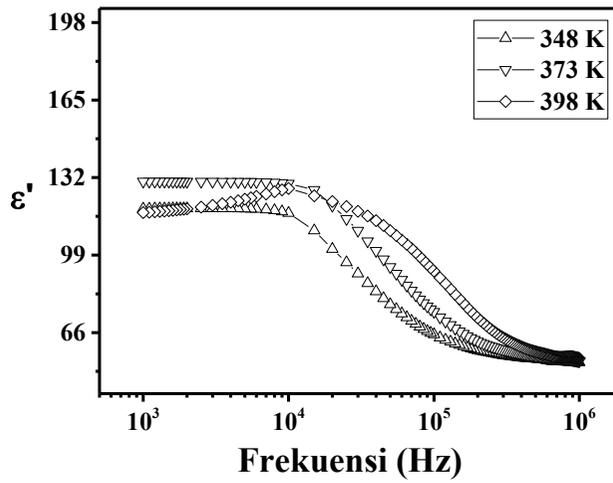
Waktu relaksasi adalah waktu yang diperlukan material mulai dari keadaan “istirahat” hingga mencapai ekuilibrium setelah eksitasi dihilangkan. Waktu relaksasi dinyatakan dalam  $\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$  yang merupakan invers dari “frekuensi relaksasi kritis”  $f_c$ . Spektroskopi dielektrik menginvestigasi waktu relaksasi berdasarkan data permitivitas kompleks terhadap frekuensi  $\omega$ , dan frekuensi kritis  $f_c$  yang diperoleh dari posisi puncak plot  $\epsilon^* = f(t)$  plot.

Bentuk grafik permitivitas sebagai fungsi frekuensi akan mengikuti hukum relaksasi. Akan menggambarkan karakteristik permitivitas terhadap frekuensi. Dari hasil penelitian, diperoleh bahwa saat frekuensi meningkat, maka akan terlihat penurunan pada permitivitas kompleks (Gambar 2.35). Kecenderungan penurunan seperti “langkah tangga” ini menunjukkan adanya fenomena polarisasi yang berbeda dengan saat diaplikasikan frekuensi AC yang lebih rendah.

Pada molekul polar, frekuensi yang tinggi akan mengubah arah susunan dipol dengan cepat. Dipol-dipol ini akan kembali mengalami relaksasi ke posisi tak tersusun ketika tidak menyimpan energi. Molekul non polar biasanya kehilangan orientasi pada frekuensi rendah dan mengalami waktu relaksasi pada orde beberapa sekon. Sedangkan beberapa ion polar akan mengalami relaksasi pada frekuensi kHz-MHz dan menunjukkan waktu relaksasi pada mili sekon atau mikrosekond.

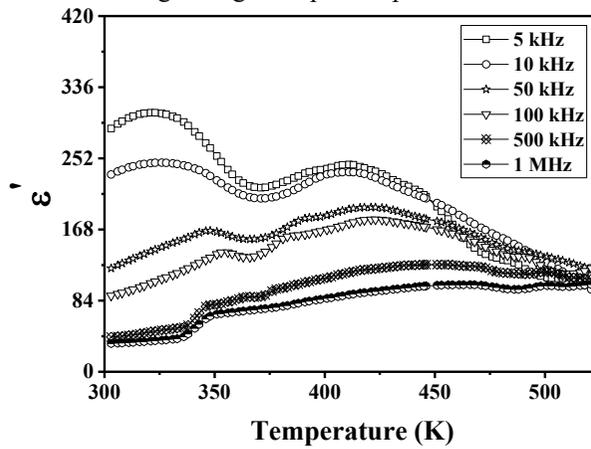
Pada umumnya material akan memiliki permitivitas tinggi atau kapasitansi yang tinggi saat berada pada rentang frekuensi rendah (Gambar 2.36). Hal ini disebabkan ada lebih banyak dipol dalam molekul yang dapat tersusun secara penuh, sehingga kemungkinan penyimpanan energi menjadi maksimum. Namun frekuensi tinggi, hanya ada sedikit energi tersimpan, kapasitansi dan permitivitas rendah.

Gambar 2. 35 Kecenderungan permitivitas riil yang menurun terhadap frekuensi yang meningkat pada material double perovskite SFTO



Sumber: (N. Masta, 2017)

Gambar 2. 36 Dielektrik riil sebagai fungsi temperatur pada material double perovskite SFTO



Sumber: (N. Masta, 2017)

# Rangkuman

## 1. Definisi dan peran Spektroskopi impedansi

- a. Spektroskopi impedansi atau biasa juga dikenal dengan Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) adalah teknik non- invasive yang sangat bermanfaat untuk menginvestigasi proses elektrokimia yang berlangsung pada material, biasanya impedansi dibaca menggunakan RLC Meter
- b. EIS dapat digunakan untuk melakukan karakterisasi sifat listrik material dengan menggunakan data impedansi sebagai fungsi waktu  $t$  atau sebagai fungsi frekuensi  $\omega$  yang dipandang sebagai bilangan kompleks, untuk menggambarkan proses elektrokimia berlangsung dalam material.

## 2. Sejarah singkat EIS

Konsep impedansi listrik pertama kali diperkenalkan oleh Oliver Heaviside pada tahun 1880. A. E. Kennelly dan C.P. Steinmetz kemudian mengembangkan EIS dalam bentuk diagram vektor dan representasi bilangan kompleks. Semenjak itu, riset di bidang elektrokimia dan instrumentasi teknik EIS semakin berkembang dan semakin luas diaplikasikan.

## 3. Prinsip dasar dari teknik EIS

### a. Impedansi

Impedansi dapat didefinisikan sebagai resistansi kompleks, karena impedansi mengakomodir perbedaan fase antara tegangan input dan arus output ke dalam perhitungan.

### b. Skema dasar percobaan

- 1) Percobaan pada teknik EIS dilakukan dengan menghubungkan material yang ingin dianalisis dengan elektroda yang terhubung dengan tegangan input (V).
- 2) Data yang diperoleh berupa impedansi, arus output dan sudut fase yang merupakan fungsi frekuensi radial atau sebagai fungsi temperatur.
- 3) Data ini kemudian dikonversi oleh peneliti ke dalam parameter yang ingin dipelajari, misalnya ke dalam permitivitas relatif, kapasitansi dan konduktivitas.

## 4. Representasi data

data yang dihasilkan dari EIS ditampilkan dalam 2 bentuk :

- a. Nyquist Plot, bentuknya semisirkuler.
- b. Bode Plot, biasanya berupa grafik hubungan antara parameter sebagai fungsi frekuensi dan atau temperature.

# Evaluasi Formatif

## A. Pilihan Ganda

- EIS adalah teknik yang dapat digunakan untuk mendeskripsikan sifat ...
  - impedansi, dielektrik, dan konduktivitas
  - dielektrik saja
  - impedansi saja
  - konduktivitas listrik saja
  - magnetic
- Kurva permitivitas dan bahkan polarisasi dapat diperoleh dengan menggunakan teknik ...
  - Electrochemical impedance spectroscopy
  - pengukuran potensial rangkaian terbuka
  - linear sweep voltametry
  - scanning electron microscopy
  - Semua jawaban benar
- Sebuah komponen dengan area (luas) spesifik dari resistansi adalah sebesar  $2,569 \Omega \text{ cm}^2$  dengan potensial yang terbaca 9 mV. Besar arus outputnya adalah ....
  - 23,1 A.  $\text{cm}^{-2}$
  - 3,3 A.  $\text{cm}^{-2}$
  - 23,1 A.  $\text{cm}^{-2}$
  - 3,5 A.  $\text{cm}^{-2}$
  - nol
- Persamaan yang menggambarkan hubungan antara impedansi riil dan imajiner adalah ...
  - $V = I.R$
  - $Z = Z_{IM} + Z_{REAL}$
  - $Z = iZ_{IM} + Z_{REAL}$
  - $Z = Z_{IM} + iZ_{REAL}$
  - $Z = R_{IM} + R_{REAL}$
- Impedansi dapat dinyatakan dalam bilangan kompleks karena ...
  - komponen arus output selalu sefase dengan tegangan input
  - komponen arus output selalu tidak sefase dengan tegangan input
  - ada komponen arus output yang sefase dengan tegangan input, dan ada yang diluar fase ( $90^\circ$ ) tegangan input
  - merupakan penjumlahan vektor dari impedansi riil dan imajiner
  - menghasilkan grafik semisirkuler
- Nama alat yang dapat digunakan untuk membaca impedansi, kapasitansi dan sudut fase pada teknik EIS adalah ....
  - amperemeter
  - RLC meter

- b. voltmeter
- c. stabiliator

e. potensiometer

7. kemampuan elemen dari sebuah rangkaian listrik untuk menghambat atau menahan (resist) aliran listrik disebut ....

- a. resistansi
- b. resistivitas
- c. induktansi
- d. impedansi
- e. kapasitansi

8. hambat jenis yang menunjukkan karakteristik material dalam menahan setiap bagian arus di komponen disebut ....

- a. resistansi
- b. resistivitas
- c. induktansi
- d. impedansi
- e. kapasitansi

9. Apabila Nyquist plot menampilkan satu semicircle maka ...

- a. pada material hanya terjadi konduktivitas listrik dari material bulk
- b. pada material hanya terjadi konduktivitas listrik dari grain boundary
- c. pada material hanya terjadi konduktivitas listrik dengan elektroda
- d. tidak terjadi konduktivitas listrik
- e. terjadi konduktivitas listrik di bulk dan grain boundary

10. Material akan memiliki permitivitas tinggi saat berada pada rentang frekuensi rendah. Hal ini disebabkan karena ....

- a. mayoritas dipol dalam molekul telah tersusun secara penuh
- b. mayoritas dipol baru akan terpolarisasi
- c. mayoritas dipol telah melalui fase relaksasi
- d. mayoritas dipol tidak mengalami polarisasi
- e. mayoritas dipol mengumpulkan diri

## B. Essay

1. Apa yang dimaksud dengan teknik spektroskopi impedansi ? Jelaskan cara kerjanya !

Jawab:

2. Risetapa saja yang menggunakan teknik spektroskopi impedansi ? Sebutkan minimal 5 macam.

Jawab:

## Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

- Griffiths, D. J. (2005). Introduction to electrodynamics 3<sup>rd</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Masta, N. (2017). Sifat listrik double perovskite Sr<sub>2</sub>FeTiO<sub>6</sub> dengan metode spektroskopi impedansi
- Randviir, E. P., & Banks, C. E. (2013). Electrochemical impedance spectroscopy: an overview of bioanalytical applications. *Analytical Methods*, 5(5), 1098-1115.
- Lvovich, V. F. (2012). Impedance spectroscopy: applications to electrochemical and dielectric phenomena. John Wiley & Sons.
- Barsoukov, E., & Macdonald, J. R. (Eds.). (2018). Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications. John Wiley & Sons.

# Penutup

## 1. Rangkuman

Medan listrik pada bahan non konduktor (dielektrik dan isolator)

- a. konduktor adalah bahan yang memiliki suplai elektron bebas yang tak terbatas, elektron pada bahan konduktor tidak terikat pada satu atom secara khusus. Sebaliknya pada bahan dielektrik, seluruh elektron terikat pada satu atom atau molekul khusus.
- b. Ada dua mekanisme yang dapat dihasilkan saat bahan dielektrik diberikan medan elektrik luar, yaitu pemuluran (stretching) dan rotasi (rotating).

### 2. Induksi dipol

a. pada atom netral

- 1) Medan listrik eksternal ini akan memberikan pengaruh pada atom netral, yaitu atom netral akan menjadi terpolarisasi dan memiliki momen dipol
- 2) Hubungan momen dipol dengan medan listrik eksternal

$$\mathbf{p} = \alpha \mathbf{E}$$

Pada molekul netral, dengan medan seragam, besar momen dipolnya diberikan oleh

$$\mathbf{p} = \alpha_{\perp} \mathbf{E}_{\perp} + \alpha_{\parallel} \mathbf{E}_{\parallel}$$

## 2. Daftar Istilah

DC	:	Arus searah
AC	:	Arus bolak-balik
Medan listrik	:	Efek yang ditimbulkan oleh keberadaan muatan listrik di dalam suatu ruang
Potensial Listrik	:	usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan positif sebesar 1 satuan dari tempat tak terhingga ke suatu titik tertentu
Energi Potensial listrik	:	energi potensial yang dihasilkan dari gaya-gaya Coulomb konservatif dan diasosiasikan dengan konfigurasi sejumlah muatan-muatan titik dalam sebuah sistem yang didefinisikan
Torka	:	Besaran laju perubahan momentum sudut dalam sistem
Elektroda	:	konduktor yang digunakan untuk bersentuhan dengan bagian atau media non-logam.
Anoda	:	elektroda di mana listrik mengalir ke dalamnya (masuk) atau kutub negatif Katoda = elektroda di mana listrik mengalir ke luar atau kutub positif

- Semikonduktor : sebuah bahan dengan konduktivitas listrik yang berada di antara isolator dan konduktor
- Isolator : bahan yang tidak bisa atau sulit melakukan perpindahan muatan listrik
- Konduktor : bahan yang mudah melakukan perpindahan muatan listrik
- Elektron : partikel subatom yang bermuatan negatif dan umumnya ditulis sebagai e-
- Dielektrik : sejenis bahan Isolator listrik yang dapat dikutubkan atau polarisasikan dengan cara menempatkannya di dalam medan listrik
- Fluks listrik : ukuran aliran medan listrik yang melalui sebuah permukaan.

### 3. Referensi

- Griffiths, D. J. (2012). *Introduction to electrodynamics* 4th edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Kanginan, Marthen. (2018). *Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan Matematika dan Ilmu-Ilmu Alam*. Jakarta: Erlangga
- Halliday, Resnick. (2005) *Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Effendi, Rustam, dkk. (2007). *Medan Elektromagnetika terapan*. Jakarta: Erlangga.
- Sailah, Siti, dkk. (2014). *Medan Eleltromagnetik, Teori dan contoh soal*. Yogyakarta: ANDI.

# Modul 3

## Medan Elektromagnetik

### Pendahuluan

**Hai Physics Learners!** Selamat datang di Modul 3 yang berjudul “Teori Medan Elektromagnetik”. Pada modul ini kita akan mempelajari tentang: 3.1) Magnetostatik, 3.2) Elektrodinamika, 3.3) Gelombang Elektromagnetik, 3.4) Aplikasi Gelombang Elektromagnetik pada teknologi ramah lingkungan

Pada bagian polarisasi kita akan mempelajari tentang gejala elektromagnetik, dalam medan magnet konstan (Magnetostatik), medan dinamis (elektrodinamika) dan perambatannya (Gelombang elektromagnetik) . diakhir pembelajaran kita akan mengaplikasikannya dalam teknologi ramah lingkungan.

Teori medan elektromagnetik telah menjadi kajian yang sangat vital dalam kehidupan sehari-hari. Pembelajaran ini dapat menjadi dasar jika kamu berkecimpung sebagai periset atau sbagai guru dalam menjelaskan kebermanfaatannya dari gejala elektromagnetik. Setelah menyelesaikan Modul 3, kamu diharapkan dapat menerapkan dalam kehidupan sehari-hari ya. Mari pelajari dengan antusias!

### 1. Capaian Pembelajaran Lulusan

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki:

Ranah	Capaian Pembelajaran Lulusan
<b>Sikap (S)</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6)</li><li>2. Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8)</li></ol>
<b>Keterampilan Umum (KU)</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 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-1)</li><li>2. Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi ; (KU-9)</li></ol>
<b>Keterampilan Khusus (KK)</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Mampu Mendayagunakan IPTEKS dalam Kegiatan Pembelajaran Fisika; (KK-3)</li></ol>

Ranah	Capaian Pembelajaran Lulusan
	2. Mampu Mendayagunakan IPTEKS yang Berorientasi dalam Kehidupan Sehari-Hari; (KK-4)
<b>Pengetahuan (PG)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mengetahui dan Memahami Konsep dan Prinsip Keilmuan Fisika; (P-3)</li> <li>2. Mengetahui dan Memahami Konsep dan Prinsip Terapan Fisika (P-4)</li> <li>3. Mampu Menguasai Konsep Perkembangan Fisika secara Mikroskopik; (P-6)</li> </ol>

## 2. Kemampuan Akhir

Ranah	Kemampuan Akhir (KA)
<b>Pengetahuan</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mampu menganalisis muatan listrik dan gaya listrik, serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>2. Mampu menganalisis kuat medan listrik serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>3. Mampu menganalisis divergensi dan curl dari kuat medan listrik, garis gaya listrik, fluks serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>4. Mampu menganalisis potensial listrik serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> <li>5. Mampu menganalisis usaha dan energi elektrostatik serta penerapannya dalam berbagai kasus</li> </ol>
<b>Sikap</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif.</li> <li>2. Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik.</li> <li>3. Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.</li> </ol>
<b>Psikomotor</b>	Mahasiswa mampu melakukan percobaan berikut presentasi medan elektromagnetik dan manfaatnya dalam teknologi ramah lingkungan

## 3. Prasyarat kompetensi

Prasyarat untuk mata kuliah ini antara lain:

- a. Mahasiswa mampu menganalisis gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang Gerak (Fisika Gerak dan Praktikum).
- b. Mahasiswa mampu menggunakan diferensiasi dan integral pada kalkulus (Matematika I)
- c. Mahasiswa mampu menggunakan analisis vektor berupa divergensi dan curl (Metode Matematika untuk Fisika I)

#### 4. Kegunaan Modul

Modul elektromagnetik berguna bagi mahasiswa calon pendidik untuk memperkuat dasar pengetahuannya dalam kajian listrik magnet. Materi magnetostatik, elektrodinamika dan gelombang elektromagnetik adalah materi yang akan diajarkan di kelas XII SMA. Seluruh materi dalam modul ini juga merupakan kajian fisika universitas yang akan berguna jika mahasiswa menjadi peneliti pada bidang sifat listrik bahan atau melanjutkan pendidikannya pada bidang fisika murni dan terapan.

#### 5. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

Materi Pokok	Sub Materi Pokok
A. Magnetostatik	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Arus listrik</li> <li>2. Hukum Biot-Savart</li> <li>3. Div dan Curl B</li> <li>4. gaya Magnet</li> <li>5. Potensial vektor dan scalar</li> <li>6. ringkasan dan syarat batas</li> </ol>
B. Elektrodinamika	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. gaya elektromotif</li> <li>2. induksi elektromagnetik</li> <li>3. Persamaan Maxwell</li> </ol>
C. Gelombang Elektromagnet	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. hukum Konservasi</li> <li>2. Gelombang satu dimensi</li> <li>3. Elektromagnetik pada vakum</li> </ol>
D. Aplikasi dalam teknologi ramah lingkungan	PROYEK



# Kegiatan Pembelajaran 1 Magnetostatik

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa mampu menjelaskan tentang fenomena Magnetostatik	a. Mahasiswa mampu menjelaskan konsep-konsep dasar dari arus steady (arus tunak). b. Mahasiswa mampu menjelaskan fenomena magnetostatik menggunakan hukum Biot-Savart c. Mahasiswa mampu menjelaskan fenomena magnetostatik menggunakan Hukum Ampere d. Mahasiswa dapat menjelaskan gaya magnet e. Mahasiswa dapat menjelaskan potensial vektor dan potensial scalar magnetic f. Mahasiswa dapat membandingkan elektrostatik dan magnetostatik g. Mahasiswa dapat membuat diagram yang merangkum persamaan-persamaan pada magnetostatik h. Mahasiswa dapat menjelaskan syarat batas magnetostatik.

## Uraian Materi

### A. Arus listrik (Listrik Dinamis)

#### 1. Arus Listrik

Arus listrik ( $I$ ) yang mengalir pada suatu kawat konduktor adalah banyaknya muatan yang mengalir per satuan waktu pada satu titik. Satuan dari arus listrik ( $I$ ) adalah Ampere (A) atau Coulomb / sekon ( $\frac{C}{s}$ ).

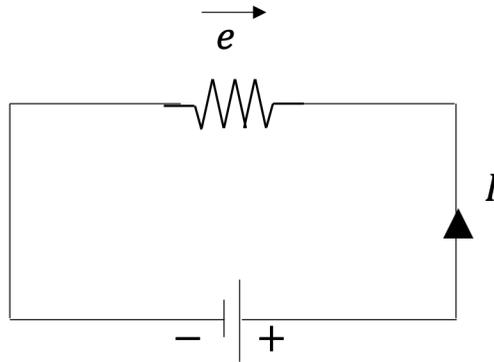
$$I = \frac{Q}{t} \quad 3.1$$

Arus listrik mengalir pada rangkaian tertutup yang diberi beda potensial  $V$ . Muatan yang bergerak pada rangkaian listrik sebenarnya adalah electron. Electron ini mengalir dari elektroda negatif menuju positif. Hanya saja saat electron meninggalkan pita valensinya, ia juga menghasilkan kekosongan yang disebut sebagai “hole”. Hole ini sebenarnya bukan partikel sejati, tapi lebih sebagai “kuasi partikel” atau “seperti partikel” atau “partikel semu”.

Hole ini bermuatan positif. Ketika elektron bergerak, dengan arah sebaliknya terbentuk hole, sehingga seakan – akan tampak hole ini juga mengalir dengan arah yang berlawanan dengan aliran elektron. “Aliran” hole inilah yang

menyebabkan arus listrik dikatakan mengalir dari potensial yang lebih tinggi (+) menuju rendah (–) (Gambar 3.1)

Gambar 3. 1 Perbandingan arah aliran arus listrik dan elektron



Apabila sebuah muatan garis  $\lambda$  mengalir di sepanjang kawat dengan kecepatan  $v$ , maka besar arusnya dapat kita nyatakan sebagai

$$I = \lambda v \quad 3.2$$

Karena komponen panjang kawat dapat kita nyatakan dengan  $v dt$ , yang membawa muatan sebesar  $\lambda v dt$  saat melalui titik P pada saat  $dt$ , maka besaran arus sebenarnya adalah besaran vektor. Dengan catatan,  $\lambda$  pada persamaan ini adalah densitas arus yang bergerak searah, yang terjadi pada rangkaian yang telah diberi beda potensial ( $V$ ).

## 2. Densitas Arus ( $I, K, J$ )

Kita ingat bahwa muatan bisa dinyatakan sesuai dengan dimensinya dalam bentuk densitas muatan, yaitu: muatan garis  $\lambda$ , muatan permukaan  $\sigma$  dan muatan ruang  $\rho$ . Bentuk – bentuk densitas (kerapatan) muatan ini bisa digunakan pada muatan yang statis (diam) maupun dinamis (bergerak). Densitas muatan yang bergerak ini selanjutnya akan menimbulkan arus, yang juga bisa dinyatakan dalam densitas arus.

Densitas arus terbagi tiga, densitas arus linear ( $I$ ), densitas arus bidang ( $K$ ) dan densitas arus ruang (atau volume) ( $J$ ). Besar densitas arus pada satu dimensi ( $I$ ), sudah dinyatakan pada persamaan 3.2.

Untuk densitas arus yang mengalir pada permukaan (bidang atau 2 dimensi), dinyatakan dengan :

$$K = \sigma v \quad 3.3$$

Dan densitas arus yang mengalir pada ruangan (3 dimensi) dinyatakan dengan:

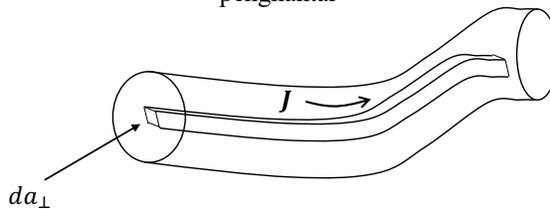
$$J = \rho v \quad 3.4$$

Dengan catatan pada persamaan 3.2, 3.3 dan 3.4, muatan garis  $\lambda$ , muatan permukaan  $\sigma$  dan muatan ruang  $\rho$  yang digunakan menunjuk pada muatan yang bergerak (dinamis).

Dengan muatan ruang adalah muatan yang mengalir dengan kecepatan aliran tegak lurus terhadap penampang cross section  $da_{\perp}$  dari kawat (Gambar 3.2), yang definisinya dapat dinyatakan dengan:

$$J \equiv \frac{dI}{da_{\perp}} \quad 3.5$$

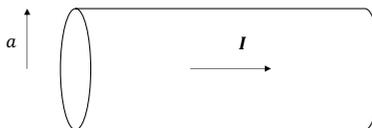
Gambar 3. 2 Aliran distribusi arus  $J$  terhadap penampang tegak lurus  $da_{\perp}$  pada kawat penghantar



### Contoh Kasus – Distribusi Arus pada kawat silinder

Sebuah arus  $I$  secara seragam terdistribusi diseluruh penampang tegak lurus kawat, dengan radius  $a$  (Gambar 3.3).

Gambar 3. 3 Arus  $I$  pada penampang tegak lurus



- Tentukan besar distribusi arus  $J$  !
- asumsikan bahwa densitas arus dalam kawat sebanding dengan jaraknya terhadap sumbu ,

$$J = ks$$

(untuk konstanta  $k$ ). tentukan arus total pada kawat!

#### Jawaban :

- Luas penampang kawat dinyatakan dengan :

$$da = \pi a^2$$

Maka densitas arus dinyatakan dengan

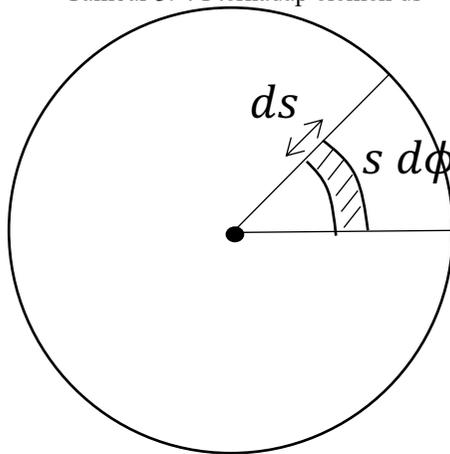
$$J = \frac{dI}{da_{\perp}} = \frac{I}{\pi a^2}$$

b. Karena  $J$  bervariasi terhadap  $s$ , maka kita dapat menintegrasikan persamaan 3.5

$$\int J = \int \frac{dI}{da_{\perp}}$$

Arus yang dimaksud ditunjukkan oleh daerah yang diarsir (Gambar 3.4) adalah sebesar

Gambar 3. 4  $I$  terhadap elemen  $ds$



$$I = \int J da_{\perp}$$

Dengan

$$da_{\perp} = s ds d\phi$$

Sehingga

$$I = \int J da_{\perp} = \int J s ds d\phi$$

$$= \int (ks) (s ds d\phi)$$

$$I = \int (ks) (s ds d\phi)$$

$$= 2\pi k \int_0^a s^2 ds = \frac{2\pi k a^3}{3}$$

### 3. Persamaan Kontinuitas

Steady atau tunak artinya aliran yang memiliki kecepatan konstan. Berdasarkan persamaan 3.5, arus yang mengalir melintasi permukaan  $S$  dapat dituliskan sebagai

$$I = \int_S J da_{\perp} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a} \quad 3.6$$

Perkalian dot (*dot product*) yang ada pada persamaan 3.6 diatas mengacu pada komponen  $da$ . Secara khusus, muatan total per satuan waktu yang meninggalkan sebuah volume  $V$  diberikan oleh

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a} = \int_V (\nabla \cdot \mathbf{J}) d\tau \quad 3.7$$

Karena muatan mengikuti hukum konservasi, maka pada setiap titik pada permukaan haruslah memiliki jumlah muatan sebesar :

$$\int_V (\nabla \cdot \mathbf{J}) d\tau = -\frac{d}{dt} \int_V \rho d\tau = -\int_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right) d\tau \quad 3.8$$

Tanda negatif menunjukkan aliran yang mengarah keluar akan mengurangi muatan yang tersimpan dalam  $V$ . Karena dapat diaplikasikan pada semua titik dalam volume, dan dapat dimanfaatkan pada semua bentuk volume, maka

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad 3.9$$

Persamaan 3.9 ini disebut sebagai **persamaan kontinuitas** dari densitas arus listrik, yang menunjukkan bahwa densitas muatan (dalam volume)  $\mathbf{J}$  itu bersifat konservasi (kekal). Artinya debit muatan ( densitas muatan volume) yang masuk sama dengan yang keluar dari titik adalah kekal.

### 4. Arus Tunak (*Steady*)

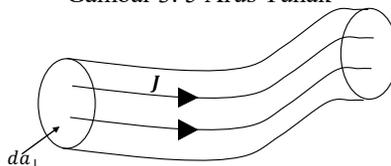
Elektrostatika adalah fenomena dimana muatan statis ( $\rho_{statis}$ ) menghasilkan medan listrik ( $\mathbf{E}$ ) yang konstan terhadap waktu (elektrostatika).

Sementara magnetostatik adalah fenomena dimana distribusi muatan mengalir ( $J$ ) dengan kecepatan konstan (arus tunak) akan menimbulkan medan magnet ( $B$ ) yang konstan terhadap waktu.

**ELEKTROSTATIKA : Muatan Listrik Statis → Medan Listrik Konstan**  
**MAGNETOSTATIKA: Densitas Arus Listrik Steady → Medan Magnet Konstan**

Arus tunak artinya : arus listrik yang memiliki aliran secara terus menerus, tidak terdapat perubahan pada besar dan arah kecepatan aliran (debit) dan tidak terdapat tumpukan muatan. Arus tunak digambarkan sebagai aliran yang konstan, dimana aliran kecepatannya saling parallel satu sama lain (tidak ada aliran kecepatan yang saling berpotongan (Gambar).

Gambar 3. 5 Arus Tunak



Pada alam semesta tidak ada keadaan yang benar-benar tunak, sehingga aliran yang tunak ini hanya merupakan sebuah peng-ideal-an, untuk mempermudah studi tentang keadaan elektrostatis dan magnetostatis. Karena tidak ada perubahan densitas arus pada magnetostatis  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ , maka persamaan 3.9 menjadi

$$\nabla \cdot J = 0 \tag{3.10}$$

Persamaan 3.10 adalah **persamaan kontinuitas** untuk arus tunak yang menghasilkan fenomena medan magnet konstan (**magnetostatik**)

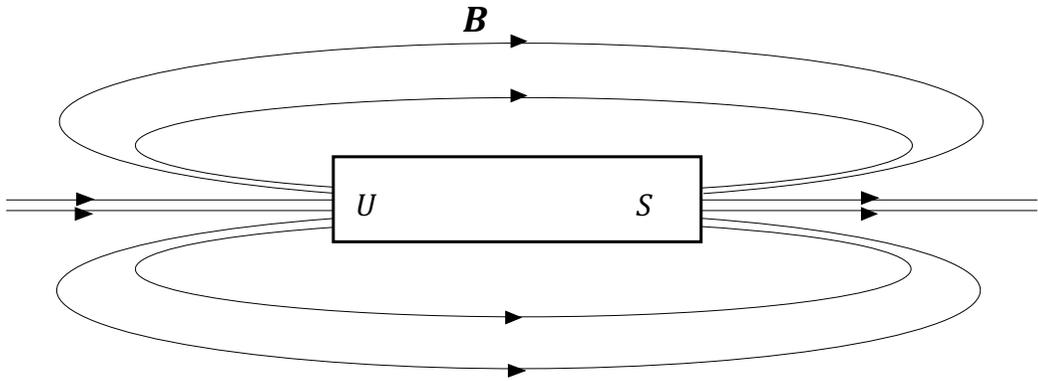
## B. Hukum Biot – Savart

### 1. Medan Magnet

Fenomena medan magnet konstan (magnetostatik) ditandai dengan keberadaan medan magnet  $B$  yang tetap ( tidak berubah terhadap waktu). Medan magnet  $B$  adalah besaran vektor yang menunjukkan pengaruh yang ditimbulkan oleh sebuah benda magnetic. Medan magnetic memiliki arah dari utara ke selatan (Gambar 3.6). Satuan dari medan magnetic adalah Tesla. Benda magnetic

memiliki dua kutub, yaitu utara dan selatan. Benda magnetic akan mengalami gaya tarik terhadap kutub yang berbeda jenis dan gaya tolak pada kutub yang sejenis.

Gambar 3. 6 Medan Magnet pada benda Magnetik



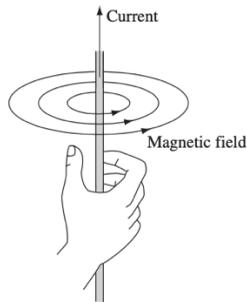
Medan magnet  $B$  ini akan menimbulkan gaya magnet pada benda – benda disekitarnya benda yang mengalami medan magnet yang kuat disebut feromagnetik, misalnya besi dan baja. Benda yang dipengaruhi medan magnet dengan lemah disebut diamagnetic. Benda yang sama sekali tidak dipengaruhi medan magnet disebut sebagai paramagnetic.

## 2. Percobaan Hans Christian Oersted

Fenomena magnetostatik diformulasikan dengan lebih baik oleh Jean Baptiste Biot dan Felix Savart, sehingga hukumnya disebut Biot-Savart. Eksperimen dan persamaan – persamaan yang diperoleh Biot dan Savart sebenarnya melanjutkan hasil eksperimen Hans Christian Oersted. Oersted menemukan fenomena dimana jarum kompas mengalami penyimpangan saat berada didekat kawat berarus. Penyimpangan ini ternyata ditimbulkan oleh medan magnet  $B$  yang dihasilkan / diproduksi oleh kawat berarus.

Arah medan magnet yang ditimbulkan oleh kawat lurus berarus ini dapat digambarkan menggunakan kaidah tangan kanan (Gambar 3.7).

Gambar 3. 7 Kaidah Tangan Kanan Oersted

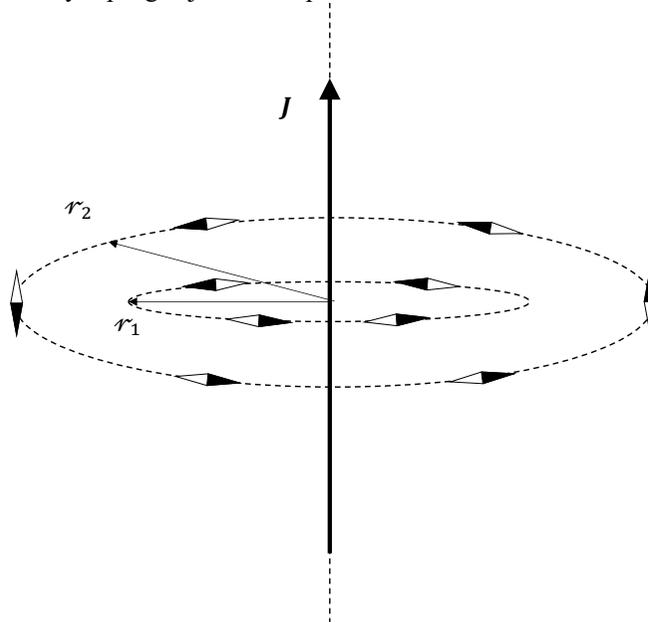


Sumber: (Griffith, 2012)

Oersted kemudian menemukan bahwa besar medan magnet  $B$  yang dihasilkan / diproduksi oleh kawat berarus (Gambar 3.8) ini berbanding terbalik dengan posisinya dengan pusat kawat lurus ( $r$ ).

$$|B| \propto \frac{1}{r} \tag{3.11}$$

Gambar 3. 8 Penyimpangan jarum kompas saat berada disekitar kawat lurus berarus



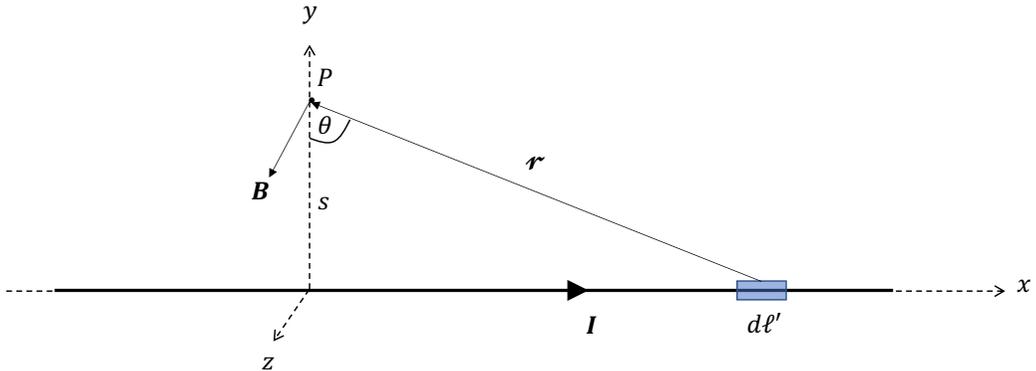
Hasil kuantitatif berikutnya, jika arus yang digunakan diperbesar, maka medan magnet induksinya juga akan semakin besar

$$|B| \propto I \tag{3.12}$$

### 3. Percobaan Biot-Savart

Percobaan pada Gambar 3.8 ini kemudian dilanjutkan oleh Biot dan Savart. Mereka mengalirkan arus  $I$  pada sebuah kawat panjang  $\ell$ . Kawat ini terletak pada sumbu  $x$  dari  $-\infty$  (Gambar 3.9).

Gambar 3. 9 Percobaan Biot-Savart



Mereka kemudian memformulasikan medan magnet induksi  $B$  yang dihasilkan oleh kawat lurus berarus dengan persamaan:

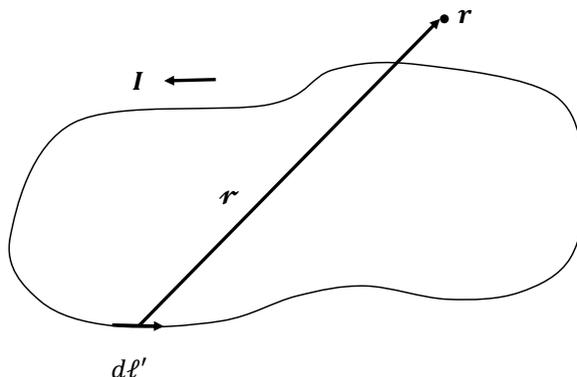
$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{I} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} d\ell' = \frac{\mu_0}{4\pi} \mathbf{I} \int \frac{d\ell' \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad 3.13$$

Persamaan 3.13 ini kemudian dikenal dengan Hukum Biot-Savart.

Hukum Biot Savart:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \mathbf{I} \int \frac{d\ell' \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

Gambar 3. 10 skema notasi pada hukum Biot-Savart



Integrasi yang dilakukan pada persamaan 3.13 adalah integrasi disepanjang lintasan arus, sesuai arah arus listrik.  $d\ell'$  adalah komponen dari panjang sepanjang kawat.  $\mathbf{r}$  adalah vektor posisi dari sumber arus ke titik  $\mathbf{r}$  (Gambar). Konstanta  $\mu_0$  disebut sebagai **permeabilitas ruang hampa**

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$$

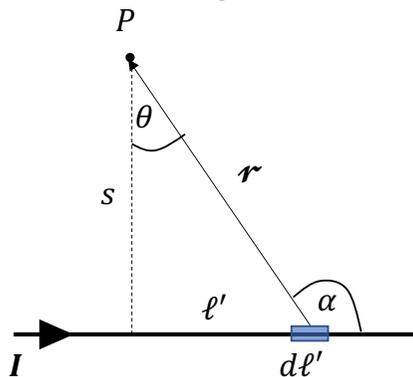
### Contoh Kasus – Medan Magnet Induksi pada Kawat Lurus Berarus

Tentukan besar medan magnet pada sebuah titik yang berada sejauh  $s$  dari kawat lurus panjang yang dialiri arus tunak  $I$  (Gambar 3.11)

#### Jawab:

Kasus pada Gambar 3.11 dan 3.10 adalah sama, sehingga pada keadaan ini dihasilkan medan magnet  $B$  yang arahnya keluar dari bidang halaman kertas (searah dengan sumbu  $z$ ), perhatikan arah  $B$  pada Gambar 3.10. arah medan  $B$  yang keluar dari bidang ini ditimbulkan sebagai hasil perkalian silang komponen panjang kawat terhadap vektor posisi ( $d\ell' \times \hat{r}$ )

Gambar 3. 11 Menentukan medan magnet dari sebuah kawat lurus berarus



Sehingga

$$d\ell' \sin \alpha = d\ell' \cos \theta$$

Karena

$$\ell' = s \tan \theta$$

Maka

$$d\ell' = \frac{s}{\cos^2 \theta} d\theta$$

Dan karena  $s = r \cos \theta$ , maka

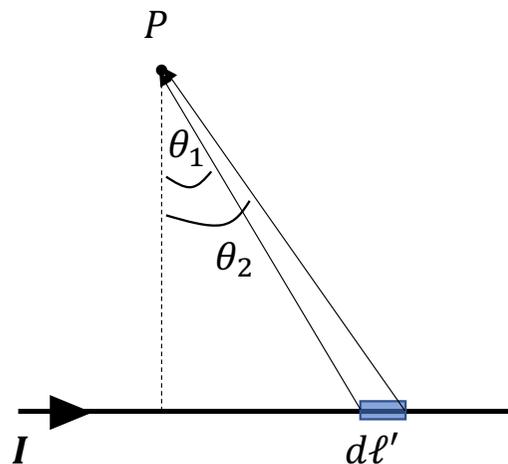
$$\frac{1}{r^2} = \left(\frac{\cos \theta}{s}\right)^2$$

Sehingga

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\cos \theta}{s}\right)^2 \left(\frac{s}{\cos^2 \theta}\right) \cos \theta d\theta \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi s} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta d\theta \\ \mathbf{B} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi s} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \end{aligned} \quad 3.14$$

Koefisien sudut  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  pada Persamaan 3.14 menunjukkan bahwa kita dapat menentukan besar medan magnetik induksi yang dihasilkan pada setiap komponen pada kawat (Gambar 3.12).

Gambar 3. 12 Medan induksi dari ujung ke ujung dari sebuah kawat berarus



Jika kita anggap kawat pada Gambar 3.11 dan 3.12 adalah sebuah rangkaian tertutup, maka

$$\theta_1 = -\frac{\pi}{2} \text{ dan } \theta_2 = \frac{\pi}{2}$$

Sehingga kita peroleh :

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi s} \quad 3.15$$

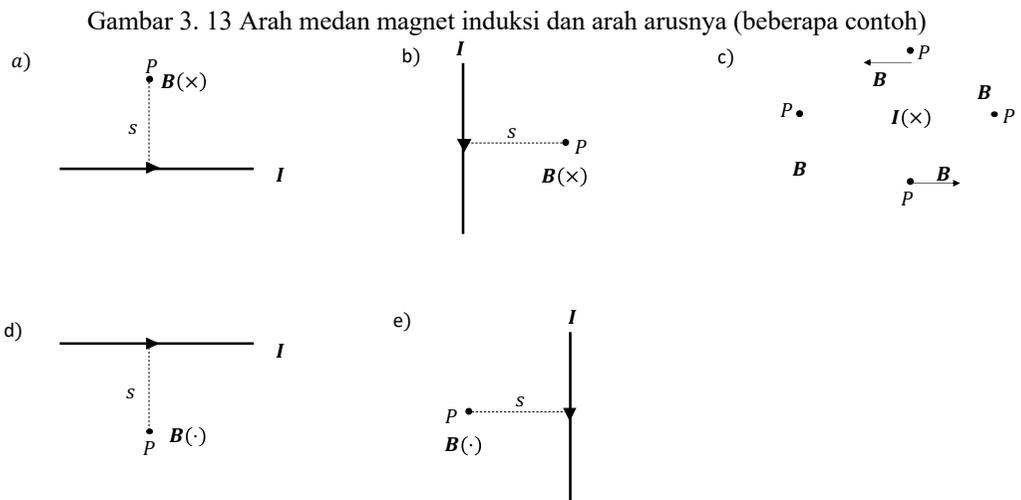
Perhatikan bahwa medan yang dihasilkan berbanding terbalik dengan jarak terdekat dari titik P ke kawat

Dengan demikian besar medan magnet induksi dari sebuah kawat lurus panjang tak hingga dengan arah arus dari kiri ke kanan seperti gambar 3.11 dan 3.11 sesuai persamaan 3.15.

Medan induksi dari kawat lurus tak hingga:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi s}$$

Jika titik P berada di bagian atas kawat, maka arah medan magnet induksi yang dihasilkannya adalah seperti gambar 3.10, yaitu dengan arah keluar dari bidang ( $\times$ ). Sementara jika titik P berada di bagian bawah kawat, maka arah medan magnet induksi yang dihasilkan adalah masuk bidang ( $\cdot$ ). Berikut adalah beberapa gambar hubungan antara arah arus  $I$  dan medan magnet induksi  $B$  pada kawat lurus berarus (Gambar 3.13).



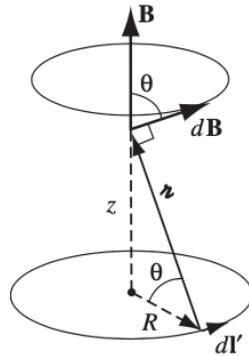
### Contoh Kasus – Medan Magnet Induksi pada Kawat Melingkar (Loop)

Tentukan besar medan magnet yang dihasilkan pada jarak  $z$  diatas pusat sebuah loop melingkar dengan radius  $R$ , yang dialiri arus tunak  $I$  (Gambar 3.14)

**Jawaban:**

Medan  $dB$  dihasilkan dari setiap elemen  $d\ell'$ , hasil integrasi  $d\ell'$  pada seluruh loop adalah medan B yang arahnya keluar dari Loop (Gambar 3.14).

Gambar 3. 14 Medan Magnet Induksi dari Kawat Melingkar (Loop) Berarus



Dengan demikian total medan pada arah horizontal akan saling meniadakan, sementara total medan pada arah vertical diberikan pada persamaan berikut:

$$\mathbf{B}(z) = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{d\ell'}{r^2} \cos \theta \quad 3.16$$

Perhatikan bahwa antara komponen  $d\ell'$  dan  $\mathbf{r}$  saling tegak lurus satu sama lain dan  $\cos \theta$  menunjukkan komponen vertical saja yang dihitung. Sekarang, karena  $\cos \theta$  dan  $r^2$  konstan dan  $\int d\ell'$  adalah satu keliling lingkaran  $= 2\pi R$ , maka persamaan 3.16 kemudian menjadi :

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(z) &= \frac{\mu_0}{4\pi} I \left( \frac{\cos \theta}{r^2} \right) 2\pi R \\ \mathbf{B}(z) &= \frac{\mu_0}{2\pi} I \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad 3.17$$

Persamaan 3.17 menunjukkan besar medan magnet induksi yang dihasilkan oleh loop berarus pada titik P yang berjarak sejauh z dari pusat lingkaran.

$$\boxed{\mathbf{B}(z) = \frac{\mu_0}{2\pi} I \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}}}$$

Persamaan 3.17 dalam bentuk distribusi arus permukaan menjadi :

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{K}(\mathbf{r}') \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} da' \quad 3.18$$

Dan dalam bentuk distribusi arus ruang menjadi :

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} d\tau' \quad 3.19$$

## C. Div dan Curl dari B

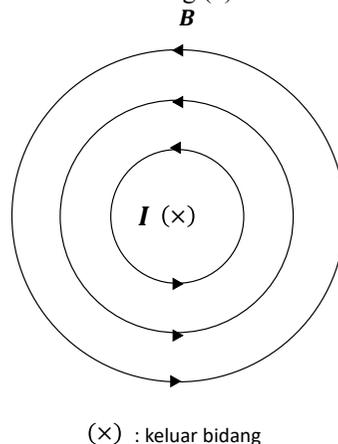
Untuk lebih memahami tentang div dan curl dari Medan elektrostatik dan Medan Magnetostatik, klik link berikut:  
[https://www.youtube.com/watch?v=UzW\\_jAJzlgI](https://www.youtube.com/watch?v=UzW_jAJzlgI)



### 1. Curl dari Medan Magnet B

Curl tidak menunjukkan bagaimana bentuk dari sebuah medan, melainkan bagaimana bentuk pengaruh yang diakibatkan dari sebuah medan. Medan magnet dari sebuah kawat lurus berarus dengan panjang tak hingga (Gambar 3.15), menunjukkan bahwa medan magnet ini memiliki nilai curl (tidak nol), karena menyebabkan suatu pengaruh yang sifatnya sirkular (melingkar).

Gambar 3. 15 Ilustrasi Medan Magnetik sirkular (melingkar) terhadap arah arus listrik keluar bidang (x)



Medan listrik melingkari kawat lurus berarusnya. Jika kita ibaratkan sebelumnya, seperti kaidah tangan kanan. Sekarang mari kita hitung berapa nilai dari curl B !

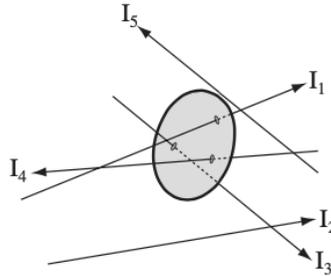
Berdasarkan persamaan 3. 15, maka integral B disekeliling lintasan melingkar dengan jari- jari s, pada pusat kawat adalah

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \oint \frac{\mu_0 I}{2\pi s} d\boldsymbol{\ell}$$

$$= \frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2\pi s} \oint d\ell = \mu_0 \mathbf{I} \quad 3.20$$

Kemudian kita anggap kita memiliki sekumpulan kawat panjang (Gambar 3.16) yang dibatasi oleh loop

Gambar 3. 16 Medan Magnet dari sekumpulan kawat lurus berarus



Sumber: (Griffith, 2012)

Setiap kawat yang melalui loop berkontribusi menyumbang  $\mathbf{B}$  sebesar  $\mu_0 \mathbf{I}$ , sementara kawat diluar loop tidak berkontribusi sebagai penyumbang  $\mathbf{B}$ . Besar integral garis ini kemudian menjadi

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\ell = \mu_0 \mathbf{I}_{enc} \quad 3.21$$

Dengan  $\mathbf{I}_{enc}$  merepresentasikan arus total yang dilingkupi oleh lintasan integral.

Jika arus muata direpresentasikan oleh densitas muatan volum  $\mathbf{J}$ , maka besar arus linier yang dilingkupi adalah

$$\mathbf{I}_{enc} = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a} \quad 3.22$$

Dengan melakukan integral pada seluruh permukaan yang diikat oleh loop, aplikasi teorema Stokes menjadi:

$$\int (\nabla \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{a} = \mu_0 \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a} \quad 3.23$$

Sehingga

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad 3.24$$

Persamaan 3.24 adalah persamaan tentang hasil operasi curl terhadap medan magnet  $\mathbf{B}$ .

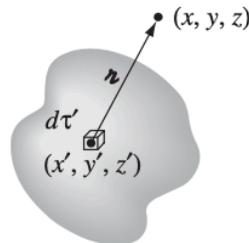
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

Curl tidak menunjukkan bagaimana bentuk dari sebuah medan, melainkan bagaimana bentuk pengaruh yang diakibatkan dari sebuah medan. Dengan demikian kita memperoleh kesimpulan bahwa curl dari medan magnet  $\mathbf{B}$  adalah hasil perkalian permeabilitas vakum dengan distribusi arus volume. Atau dengan kata lain, sumber dari medan magnet konstan  $\mathbf{B}$  (magnetostatik) yang memiliki efek sirkular yang berpusat pada densitas arus tunak  $\mathbf{J}$ .

## 2. Div dari Medan Magnet $\mathbf{B}$

Distribusi muatan ruang  $\mathbf{J}$  ditempatkan pada sebuah titik (Gambar 3.17).

Gambar 3. 17 Induksi magnet dari distribusi arus volume



Sumber: (Griffith, 2012)

Pada titik  $P$  yang berjarak  $\mathbf{r}$  kemudian dikalkulasi medan magnet induksinya. Untuk memudahkan perhitungan, kita kemudian akan melakukan beberapa perjanjian

$\mathbf{B}$  adalah fungsi dari  $x, y, z$

$\mathbf{J}$  adalah fungsi dari  $x', y', z'$

$$\mathbf{r} = (x - x')\hat{\mathbf{x}} + (y - y')\hat{\mathbf{y}} + (z - z')\hat{\mathbf{z}}$$

$$d\tau' = dx' dy' dz'$$

Dari hukum **Biot-Savart** kita memperoleh hubungan antara densitas arus volume  $\mathbf{J}$  dan medan magnet induksi  $\mathbf{B}$  adalah

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} d\tau' \quad 3.25$$

Persamaan 3.25 kemudian kita lakukan operasi divergensi, sehingga diperoleh

$$\text{div } \mathbf{B} = \nabla \cdot \mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \nabla \cdot \left( \frac{\mathbf{J} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \right) d\tau' \quad 3.26$$

Kemudian kita fokuskan pada operasi curl di suku paling kanan dari persamaan 3.26, kita peroleh

$$\nabla \cdot \left( \frac{\mathbf{J} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \right) = \frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2} \cdot (\nabla \times \mathbf{J}) - \mathbf{J} \cdot \left( \nabla \times \frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2} \right) \quad 3.27$$

Karena  $\nabla \times \frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2} = 0$  dan  $\nabla \times \mathbf{J} = 0$ , maka

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad 3.28$$

Persamaan 3.28 adalah persamaan dari operasi divergensi terhadap medan magnet  $\mathbf{B}$ .

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Div  $\mathbf{B}$  adalah nol artinya efek yang ditimbulkan dari medan magnet bukan merupakan sebaran radial. Persamaan 3.28 tentang div  $\mathbf{B}$  juga menunjukkan ketiadaan monopol magnet.

### 3. Aplikasi div dan curl pada Hukum Ampere

Hukum Ampere adalah bentuk hukum Biot-Savart dalam operasi Vektor. Hukum Ampere pada magnetostatik analog dengan hukum Gauss pada elektrostatik, sehingga dalam penerapannya hukum Ampere menggunakan simetri.

Elektrostatik : Hukum Coulomb  $\rightarrow$  hukum Gauss  
 Magnetostatik : Hukum Biot-Savart  $\rightarrow$  Hukum Ampere

Persamaan hukum Biotsavart kita tulis ulang

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} d\tau$$

Maka persamaan dari Hukum Ampere adalah

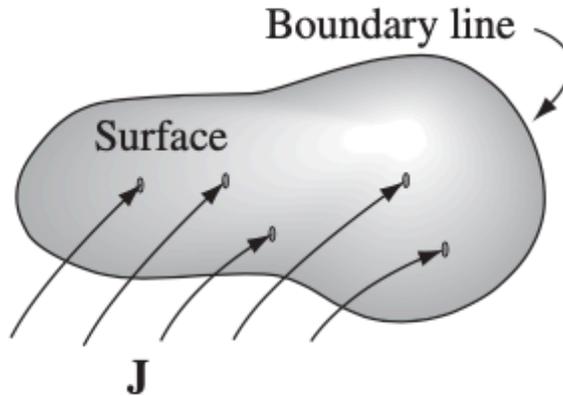
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad 3.29$$

Persamaan 3.29 sama dengan persamaan 3.24 adalah persamaan Hukum Ampere dalam bentuk diferensial. Persamaan diatas dapat dikonversi kedalam bentuk integral menjadi

$$\int (\nabla \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{a} = \oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a} \quad 3.30$$

$\int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a}$  menunjukkan total arus yang melalui permukaan (Gambar 3.18), yang kemudian kita sebut sebagai jumlah arus  $I$  yang terlingkupi

Gambar 3. 18 makna dari  $\int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a}$



Sumber: (Griffith, 2012)

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 I_{enc} \quad 3.31$$

Persamaan 3.31 adalah bentuk integral dari Hukum Ampere.  
Bentuk integral dari Hukum Ampere:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 I_{enc}$$

### Tugas

Dengan menggunakan hukum Ampere,

1. Buktikanlah besar medan Magnet Induksi pada Solenoida adalah

$$\mathbf{B} = \begin{cases} \mu_0 n \mathbf{I} \hat{\mathbf{z}} & \text{di dalam solenoid} \\ \mathbf{0} & \text{di luar solenoid} \end{cases} \quad 3.32$$

(untuk mengerjakannya, bisa perhatikan persamaan 5.59 (Griffith edisi 4, Hal 237))

**Jawab:**

--

2. Buktikanlah besar medan magnet induksi pada toroida adalah

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{\mu_0 N I}{2\pi s} \hat{\phi} & \text{di dalam toroida} \\ \mathbf{0} & \text{di luar toroida} \end{cases} \quad 3.33$$

Dengan N adalah jumlah kumparan. (untuk mengerjakannya, bisa perhatikan persamaan 5.60 (Griffith edisi 4, Hal 239))

**Jawab:**

## D. Gaya Magnet

### 1. Gaya magnet pada muatan yang bergerak di medan Magnet $\mathbf{B}$

Gaya magnet adalah gaya yang terjadi (Tarik-menarik atau tolak menolak) antara dua benda magnetic. Oleh Lorentz, diperoleh bahwa benda bermuatan  $Q$  yang bergerak dengan kecepatan  $\mathbf{v}$  juga dapat mengalami gaya magnet saat diletakkan pada daerah yang memiliki medan magnet  $\mathbf{B}$ . Oleh Lorentz, besar medan magnet ini diformulasikan dengan

$$\mathbf{F}_{mag} = Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad 3.34$$

Apabila ada medan listrik  $\mathbf{E}$  dan medan magnet  $\mathbf{B}$ , maka gaya Lorentz menjadi

$$\mathbf{F}_{mag} = Q[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})] \quad 3.35$$

### Tugas

3. Buktikan bahwa pada gerak siklotron berlaku

$$Q\mathbf{v}\mathbf{B} = m \frac{v^2}{R} \quad 3.36$$

(Perhatikan Persamaan 5.3 (Griffith, hal 212))

**Jawaban:**

Satu sifat dari medan magnetic adalah medan magnetic tidak menghasilkan kerja. Jika total  $Q$  yang bergerak sejumlah  $d\ell = \mathbf{v} dt$ , maka usaha yang dilakukan adalah

$$dW_{mag} = \mathbf{F}_{mag} d\ell = Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} dt = 0 \quad 3.37$$

## 2. Gaya Magnet pada kawat panjang berarus

Besar gaya magnet yang dialami oleh kawat panjang berarus yang diletakkan pada medan magnet  $\mathbf{B}$  dinyatakan dengan

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{mag} &= \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) dq \\ &= \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \lambda d\ell \\ &= (\mathbf{I} \times \mathbf{B}) d\ell \end{aligned} \quad 3.38$$

Jika diintegrasikan menjadi

$$\mathbf{F}_{mag} = \int (\mathbf{I} \times \mathbf{B}) d\mathbf{I} \quad 3.39$$

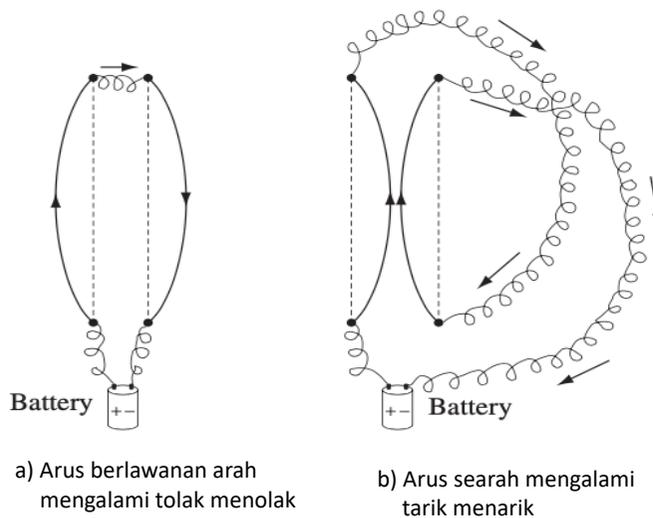
Jika kuat arus  $I$  adalah konstan, maka

$$\mathbf{F}_{mag} = I \int (d\mathbf{I} \times \mathbf{B}) \quad 3.40$$

### Tugas

4. Dua kawat diberikan arus dengan arah seperti Gambar 3.19. Ternyata terjadi gaya Tarik menarik (b) dan tolak menolak (a).

Gambar 3. 19 Induksi Magnet pada Percobaan Biot-Savart



Sumber: (Griffith, 2012)

- a. Jelaskan bagaimana terjadinya gaya tolak menolak pada gambar a)
- b. Jelaskan bagaimana terjadinya gaya tarik menarik pada gambar b)
- c. buktikan bahwa besar gaya magnet per satuan panjang dari Gambar 3.18 adalah sebesar

$$\frac{F}{l} = f = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi d} \quad 3.41$$

(Petunjuk : Persamaan 5.40 (Griffith, Halaman 226)).

<b>Jawaban</b>

## E. Perbandingan Elektrostatik dan Magnetostatik

Curl dan div dari medan listrik statis diberikan oleh

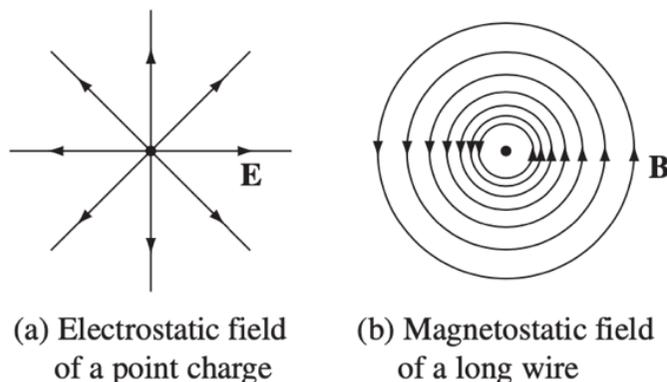
$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \text{ dan } \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

Curl dan div dari medan magnetostatik diberikan oleh

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_o \mathbf{J} \text{ dan } \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Perbandingan medan elektrostatik dan medan magnetostatik diberikan oleh Gambar 3.20 berikut

Gambar 3. 20 Perbandingan Medan Listrik dan Medan Magnet



Sumber: (Griffith, 2012)

## F. Potensial Vektor Magnetik

### 1. Potensial Vektor

Sebagaimana  $\nabla \times \mathbf{E} = 0$  menunjukkan adanya potensial elektrostatik, atau potensial skalar  $V$  dari elektrostatik. Hubungan medan listrik  $\mathbf{E}$  dengan potensialnya diberikan oleh

$$\mathbf{E} = -\nabla V$$

Maka, pada magnetostatik keadaan  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  menunjukkan adanya potensial vektor magnet.

Potensial vektor magnet  $\mathbf{A}$  dan medan magnet  $\mathbf{B}$  memiliki hubungan dengan persamaan

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad 3.42$$

Persamaan hubungan  $\mathbf{A}$  dan  $\mathbf{B}$  pada persamaan 3.42 dapat diuraikan dengan persamaan berikut

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{B} &= \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) \\ &= \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \end{aligned} \quad 3.43$$

$$= \mu_0 \mathbf{J} \quad 3.44$$

Dengan

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad 3.45$$

Dan

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J} \quad 3.46$$

Serta dalam persamaan Poisson, dengan mengasumsikan  $\mathbf{J}$  menjadi nol pada tak hingga menjadi

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{r} d\tau \quad 3.47$$

Untuk densitas arus permukaan menjadi

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{K}(\mathbf{r}')}{r} da \quad 3.48$$

Dan untuk densitas arus garis menjadi

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I(\mathbf{r}')}{r} d\ell \quad 3.48$$

Perlu dicatat bahwa  $\mathbf{A}$  pada magnetostatik analog dengan  $V$  pada elektrostatik.

## 2. Potensial Skalar

Potensial skalar ( $U$ ) dari medan magneti diberikan oleh

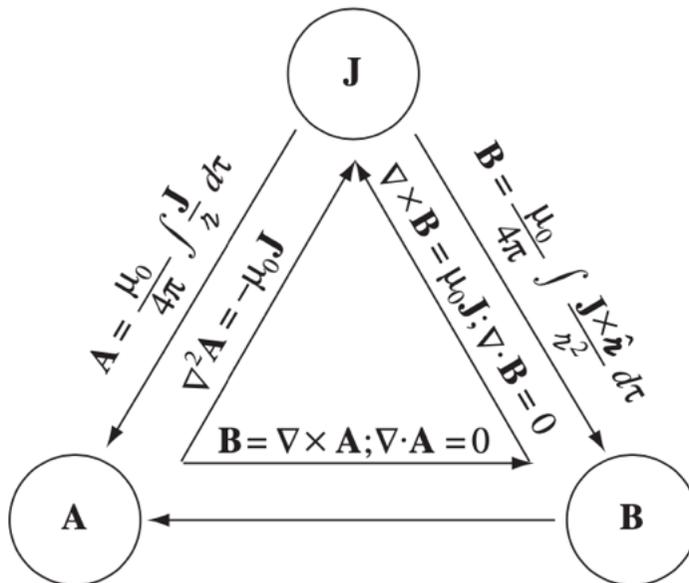
$$\mathbf{B} = \nabla U \quad 3.49$$

Potensial skalar ini dapat digunakan dalam perhitungan menggunakan Hukum ampere.

## G. Ringkasan persamaan dan syarat batas magnetostatic

Dari keseluruhan materi yang telah dipelajari pada kegiatan pembelajaran ini, diagram (Gambar 3.21) yang dapat merangkum secara umum hubungan antar besaran pada magnetostatik adalah

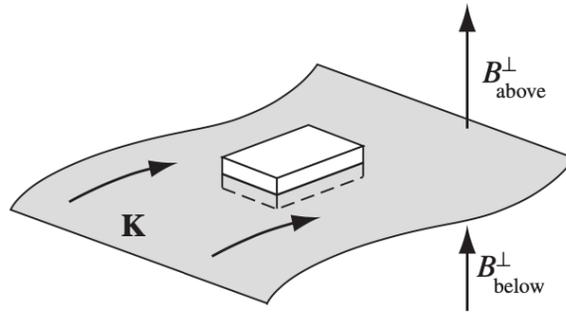
Gambar 3. 21 Rangkuman Magnetostatik



Sumber: (Griffith, 2012)

Dengan syarat batas (Gambar 3.212) yang juga analog dengan elektrostatik: medan magnet diskontinu pada bidang yang terdapat densitas arus listrik  $\mathbf{J}$ . Yang berbeda adalah medan pada komponen tangensial mengalami perubahan

Gambar 3. 22 Syarat batas magnetostatik



Sumber: (Griffith, 2012)

$$\mathbf{B}_{above} - \mathbf{B}_{below} = \mu_0(\mathbf{K} \times \hat{\mathbf{n}}) \quad 3.50$$

Dengan

$$\mathbf{B}_{above}^\perp = \mathbf{B}_{below}^\perp \quad 3.51$$

Dan

$$\mathbf{B}_{above}^\parallel - \mathbf{B}_{below}^\parallel = \mu_0 \mathbf{K} \quad 3.52$$

$\mathbf{K}$  adalah densitas arus pada bidang (dua dimensi)

## Rangkuman

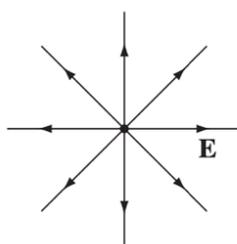
1. Curl dan div dari medan listrik statis diberikan oleh

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \text{ dan } \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

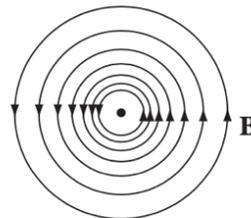
2. Curl dan div dari medan magnetostatik diberikan oleh

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \text{ dan } \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

3. Perbandingan medan elektrostatis dan medan magnetostatik diberikan oleh Gambar berikut

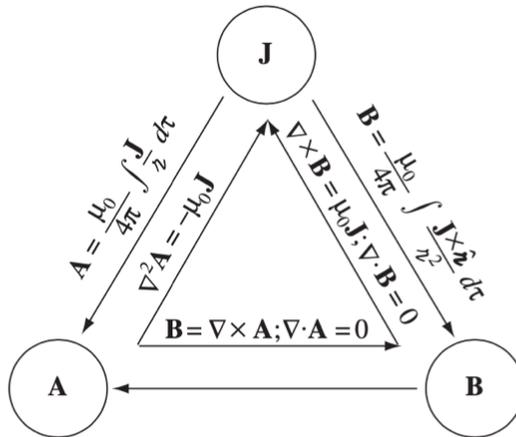


(a) Electrostatic field of a point charge



(b) Magnetostatic field of a long wire

4. Dari keseluruhan materi yang telah dipelajari pada kegiatan pembelajaran ini, diagram yang dapat merangkum secara umum hubungan antar besaran pada magnetostatik adalah



## Tes Formatif

### A. Pilihan Ganda

- Yang dimaksud dengan magnetostatik adalah ....
  - tidak ada medan magnet
  - tidak ada medan listrik
  - medan listrik konstan
  - medan magnet konstan
  - medan magnet berubah terhadap waktu
- Pernyataan yang benar tentang elektrostatik dan magnetostatik adalah ....
  - elektrostatik dihasilkan oleh muatan stasioner, sementara magnetostatik dihasilkan oleh distribusi arus tunak
  - medan magnet berbentuk sirkular, sedangkan medan listrik bersifat radial
  - pada medan elektrostatik berlaku  $\nabla \cdot E = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$  dan  $\nabla \times E = 0$
  - pada medan magnetostatik berlaku  $\nabla \cdot B = 0$  dan  $\nabla \times B = \mu_0 J$
  - semua jawaban benar
- Persamaan yang menunjukkan hukum Biot-Savart adalah ....
  - $\nabla^2 A = -\mu_0 J$
  - $B = \nabla \times A$
  - $B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J \times \hat{r}}{r^2} d\tau$
  - $\nabla \times B = \mu_0 J$
  - $\nabla \cdot B = 0$

4. Persamaan yang menunjukkan hukum Ampere adalah ....

a.  $\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}$

d.  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$

b.  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$

e.  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

c.  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} d\tau$

5. Syarat batas magnetostatik yang benar ditunjukkan oleh

a. medan magnet diskontinu pada permukaan yang dialiri arus listrik

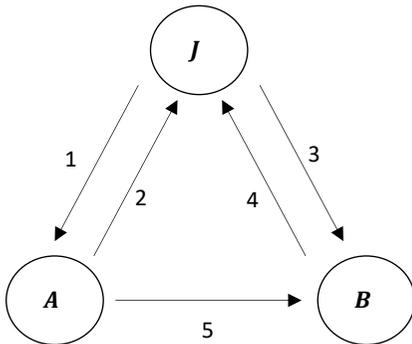
b. medan magnet kontinu pada permukaan yang dialiri arus listrik

c. medan magnet diskontinu pada permukaan yang terdapat muatan statis

d. medan magnet kontinu pada permukaan yang terdapat muatan statis

e. mengalami fluktuasi

6. Perhatikan skema berikut:



Persamaan yang sesuai untuk no. 3 adalah ....

a.  $\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}$

d.  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$

b.  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$

e.  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

c.  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} d\tau$

7. Faktor-faktor yang mempengaruhi besar medan magnet induksi yang dihasilkan oleh sebuah kawat lurus berarus adalah ....

a. Kuat medan magnet (B)

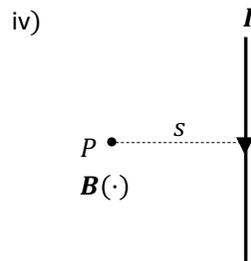
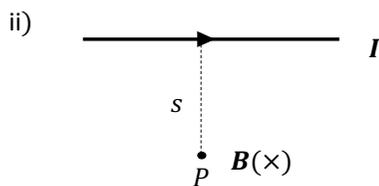
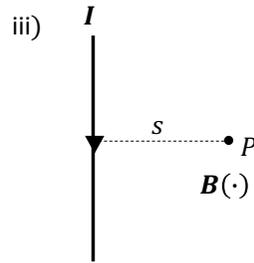
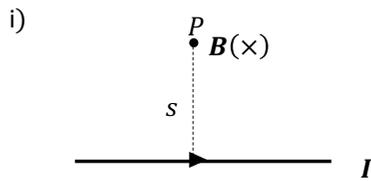
d. Permeabilitas

b. Kuat arus listrik

e. semua benar

c. jarak terpendek titik dari kawat

8. Perhatikan gambar berikut.



Gambar yang sesuai dengan gaya Lorentz adalah ....

- |                         |                |
|-------------------------|----------------|
| a. (i), (ii), dan (iii) | d. (iv) saja   |
| b. (i) dan (iii)        | e. semua benar |
| c. (ii) dan (iv)        |                |

9. Faktor- Faktor yang mempengaruhi besar gaya magnet pada muatan yang bergerak di medan magnet adalah ....

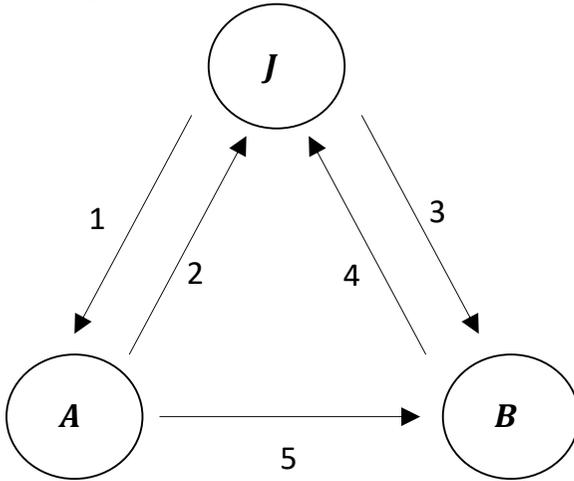
- |  |                            |
|--|----------------------------|
| a. Kuat medan magnet (B)               | d. Medan Listrik eksternal |
| b. Besar muatan (Q)                    | e. semua benar             |
| c. kecepatan gerak benda bermuatan (v) |                            |

10. Dua kawat sejajar dialiri arus listrik dengan arah berlawanan. Besar arus pada kawat masing -masing  $I_1 = 2A$  dan  $I_2 = 3A$  terpisah pada jarak a. sebatang kawat penghantar lurus lainnya ( $I_3$ ) yang berarus listrik akan diletakkan disekitar kedua kawat ini sehingga kawat tidak mengalami gaya magnetic. Kawat ketiga ini harus diletakkan pada jarak ....

- |                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| a. $0,5 a$ di kiri $I_1$ | d. $a$ di kanan $I_2$  |
| b. $a$ di kiri $I_1$     | e. $2a$ di kanan $I_2$ |
| c. $2a$ di kiri $I_1$    |                        |

## B.Essay

1. Rangkuman dari magnetostatik diberikan oleh diagram berikut



Tuliskan persamaan lengkap dari no. 1 hingga 5 yang ditunjukkan oleh diagram diatas!

**Jawaban**

2. Bagaimana perbandingan dari magnetostatik dan elektrostatik! Dalam hal apa saja yang sama dan dalam hal apa yang berbeda ? Jelaskan!

**Jawaban**

## Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

- Griffiths, D. J. (2012). Introduction to electrodynamics 4<sup>th</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Kanginan, Marthen. (2018). Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan Matematika dan Ilmu-Ilmu Alam. Jakarta: Erlangga
- Halliday, Resnick. (2005) Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Effendi, Rustam, dkk. (2007). Medan Elektromagnetika terapan. Jakarta: Erlangga.
- Sailah, Siti, dkk. (2014). Medan Eleltromagnetik, Teori dan contoh soal. Yogyakarta: ANDI



# Kegiatan Pembelajaran 2 Elektrodinamika

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa mampu menjelaskan tentang fenomena, hukum-hukum, konsep – konsep dasar, dan persamaan – persamaan yang berhubungan dengan Elektrodinamika.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mahasiswa mampu menjelaskan prinsip dasar dari gaya elektromotif (gaya gerak listrik)</li> <li>2. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang arus induksi berdasarkan Hukum Faraday</li> <li>3. Mahasiswa mampu menjelaskan keempat Hukum Maxwell</li> <li>4. Mahasiswa mampu menjelaskan koreksi Maxwell pada hukum Ampere</li> <li>5. Mahasiswa dapat menjelaskan induktansi dan energi listrik yang tersimpan pada komponen induktif</li> <li>6. Mahasiswa mampu menjelaskan Hukum Maxwell pada bahan</li> <li>7. Mahasiswa mampu menjelaskan syarat batas medan elektromagnetik dalam bentuk hukum Maxwell.</li> </ol>

## Uraian Materi

### A. Gaya Elektromotif

#### 1. Hukum Ohm

Pada konduktor, electron telah bergerak secara bebas di seluruh ruang dalam bahan. Namun gerak electron-elektron ini masih acak (ke segala arah), sehingga belum muncul arus listrik. Untuk menghasilkan arus listrik, maka diperlukan “gaya pendorong”, sehingga electron- electron bergerak ke satu arah saja. “gaya pendorong” ini kemudian kita simbolkan dengan  $f$ .  $f$  adalah besar gaya per satuan muatan. Hubungan densitas arus  $J$  dengan gaya pendorong persatuan muatan ini diberikan sebagai berikut:

$$J = \sigma f \quad 3.53$$

Dengan

$$f = \frac{F}{q} \quad 3.54$$

Dengan densitas arus  $J$  adalah kerapatan muatan pada volume dan  $\sigma$  pada persamaan 3.53 ini menunjukkan konduktivitas material (hati – hati, karena

simbolnya sama dengan densitas muatan bidang). Konduktivitas adalah kebalikan dari resistivitas:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad 3.55$$

Sekali lagi, hati – hati karena  $\rho$  pada persamaan ini menunjukkan resistivitas bahan (tidak menunjukkan muatan ruang,  $\rho$ , meski simbolnya sama).

Gaya yang menimbulkan arus ini bisa apa saja, bisa merupakan gaya gravitasi, kimia, atau pemberian medan listrik luar. Dengan menggunakan gaya elektromagnetik yang telah kita bahas pada kegiatan pembelajaran sebelumnya, maka kita dapat menuliskan kembali persamaan 3.53 dengan

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})) \quad 3.54$$

Biasanya muatan bergerak dengan kecepatan yang kecil, sehingga suku kedua yang berkaitan dengan medan magnet  $\mathbf{B}$  dapat diabaikan, sehingga persamaan 3.54 menjadi

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad 3.55$$

Persamaan 3.55 ini disebut sebagai **Hukum OHM**. Jika arus total mengalir dari satu elektroda ke elektroda lain, maka besa arus sebanding dengan besar perbedaan potensial antar elektroda.

$$V = IR \quad 3.56$$

Persamaan 3.56 ini adalah bentuk Hukum OHM yang lebih familiar, dengan  $R$  adalah resistansi . Untuk arus tunak dan konduktivitas seragam berlaku:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\sigma} \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad 3.57$$

Dari persamaan 3.57 diperoleh bahwa densitas muatan adalah nol, dan sisa muatan (muatan netto) semuanya terdapat di permukaan. Dengan daya yang ditimbulkan oleh arus listrik diberikan oleh :

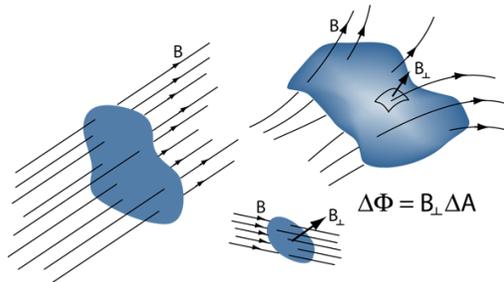
$$P = VI = I^2 R \quad 3.58$$

Dengan  $P$  adalah daya, yang memiliki satuan Joule/ Sekon atau Watt (W).

## 2. Fluks Medan Magnet ( $\Phi$ )

Fluks medan magnet analog dengan fluks medan listrik. Fluks medan magnet dapat didefinisikan sebagai aliran medan magnet yang menembus suatu permukaan tertentu (Gambar 3.23).

Gambar 3. 23 Fluks Magnetik



Sumber: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/fluxmg.html>

Fluks medan magnet ( $\Phi$ ) yang menembus bidang  $da$  dinyatakan dengan

$$\Phi \equiv \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad 3.59$$

Fluks medan magnet dapat mengalami keadaan statis dan dinamis. Fluks medan magnet yang statis disebut dengan fenomena magnetostatik. Namun jika ada perubahan fluks medan magnet, sehingga fluks medan berubah (dinamis) terhadap waktu ini akan menimbulkan arus yang juga dinamis. Arus dinamis ini akan memiliki muatan yang menghasilkan medan listrik dinamis. Fenomena yang ditandai dengan adanya dinamika medan listrik dan magnet, baik penyebab atau akibat yang ditimbulkannya ini disebut sebagai elektrodinamika.

### 3. Gaya elektromotif / gaya gerak listrik (GGL)

Semua komponen / benda yang menghasilkan energi listrik akan memiliki gaya elektromotif (emf,  $\mathcal{E}$ ). Gaya emf didefinisikan sebagai

$$\mathcal{E} \equiv \oint \mathbf{f} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \oint \mathbf{f}_s \cdot d\boldsymbol{\ell} \quad 3.60$$

Gaya elektromotif  $\mathcal{E}$  ini sebenarnya adalah tegangan sumber yang menyearahkan muatan muatan didalam kawat.

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{f}_s \cdot d\boldsymbol{\ell} = \int_a^b \mathbf{f}_s \cdot d\boldsymbol{\ell} = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = V \quad 3.61$$

Karena merupakan integral garis dari  $\mathbf{f}_s$ , maka  $\mathcal{E}$  juga dapat diinterpretasikan sebagai usaha per satuan muatan oleh sumber tegangan. Penyebab emf adalah perubahan fluks magnetic (akan kita bahas dalam hukum faraday). Emf yang dihasilkan di dalam loop adalah negatif dari laju perubahan. Fluks diseluruh lop

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad 3.62$$

Persamaan diatas adalah **aturan fluks** sebagai penyebab emf.

## B. Induksi Elektromagnetik

### 1. Hukum Faraday

Tahun 1831 Michael Faraday melaporkan serangkaian percobaannya, termasuk ketiga fenomena ini, yang kemudian mengubah sejarah peradaban manusia

#### Eksperimen 1

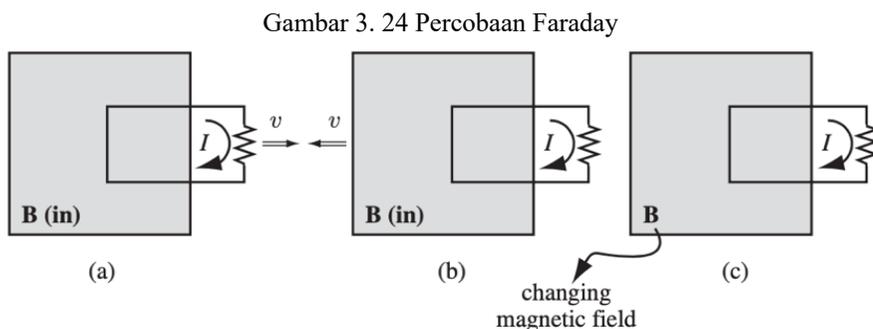
Ia menarik loop kawat berarus ke kanan disepanjang daerah yang diberri medan magnet (Gambar 3.24). Kemudian ternyata arus mengalir di dalam loop.

#### Eksperimen 2

Ia menggerakkan magnet ke kiri, dengan membiarkan loop dalam keadaan diam (Gambar 3.24). Ternyata ada arus yang mengalir yang berhasil diobservasi dari dalam loop.

#### Eksperimen 3

Dengan membiarkan loop dan magnet dalam keadaan diam, kemudian ia mengubah kuat medan magnet dengan menggunakan variasi arus dalam kumparan. Sekali lagi arus berhasil diobservasi muncul di dalam loop.



Sumber: (Griffith, 2012)

Perubahan medan magnet akan menginduksi medan listrik

Dari percobaan ini, faraday menemukan bahwa emf yang dihasilkan setara dengan laju perubahan fluks medan magnet.

$$\varepsilon = \oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad 3.63$$

Kemudian  $\mathbf{E}$  ini berhubungan dengan perubahan  $\mathbf{B}$  oleh persamaan:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = - \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{a} \quad 3.64$$

Persamaan diatas adalah persamaan dari **Hukum Faraday** dalam bentuk integral. Kita dapat mengkonversi persamaan diatas dengan menggunakan teorema Stokes:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad 3.65$$

Dengan catatan : Hukum Faraday mereduksi (menghapus) aturan yang lama pada keadaan elektrostatik, yaitu

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = 0 \text{ dan } \nabla \times \mathbf{E} = 0$$

Sehingga yang berlaku adalah persamaan. Pada eksperimen ketiga medan magnet mengalami perubahan oleh sebab yang berbeda (melakukan variasi arus pada loop), namun berdasarkan hukum Faraday bahwa medan listrik kembali terinduksi, dan menaikkan gaya elektromotif (ggl) sebesar  $-\frac{d\Phi}{dt}$ . Maka kita dapat menyimpulkan besar ggl yang terjadi pada ketiga eksperimen Faraday adalah.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Dengan makna fisis: dimanapun dan kapanpun (dan apapun penyebabnya), ggl induksi dalam loop (kumparan) akan muncul jika terjadi perubahan fluks medan magnet terhadap waktu.

**Hukum Faraday: Perubahan fluks medan magnet akan menghasilkan ggl induksi**

## 2. Medan Listrik Induksi

Penemuan Faraday dari eksperimennya ini mengantarkan kita pada dua jenis medan listrik, yaitu bersumber dari muatan listrik dan berhubungan (terasosiasi) dengan perubahan medan magnet. Sumber dari medan listrik kita peroleh dari hukum gauss, sementara hubungan medan listrik dan medan magnet diberikan oleh **Hukum Faraday** sebagai berikut:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Curl dari medan  $\mathbf{E}$  tidak nol jika medan  $\mathbf{E}$  adalah medan Faraday, yang dihasilkan dari perubahan  $\mathbf{B}$  (dengan  $\rho = 0$ ). Pada keadaan elektrostatik lalu kita menuliskan curl  $\mathbf{E}$  adalah nol karena ketiadaan medan magnet.

Dan hukum Ampere memberikan

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

Tentu saja, curl saja tidak cukup untuk mendeterminasikan sebuah medan, kita juga harus mendefinisikan divergensinya. Div  $\mathbf{E}$  didefinisikan dari hukum Gauss sebagai berikut:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

Dengan divergensi medan magnet

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Hukum ampere dapat kita tuliskan dalam bentuk integral sebagai berikut:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 I_{enc}$$

Dan hukum Faraday dibuat dalam bentuk integral menjadi :

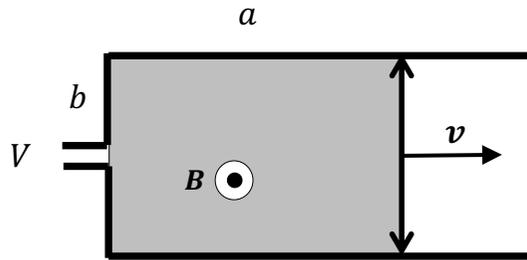
$$\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad 3.66$$

Persamaan diatas menunjukkan bahwa laju perubahan fluks magnet terhadap waktu pada lintasan loop Amperian akan menghasilkan arus sejumlah  $\mu_0 I_{enc}$ .

### **Contoh Kasus - GGL Induksi pada struktur yang diam di dalam medan magnet yang berubah terhadap waktu**

Sebuah loop berbentuk persegi panjang dengan dimensi  $a \times b$  (Gambar 3.25) dibiarkan dalam keadaan diam tapi diberi medan magnet  $\mathbf{B}$  yang dinamis (berubah terhadap waktu).

Gambar 3. 25 loop persegi pada mdan magnet yang berubah terhadap waktu



Jika besar  $B$  dinyatakan dengan

$$B(t) = B_0 \sin \omega t$$

Maka tentukan besar tegangan induksi yang dihasilkan pada fenomena ini !

**Penyelesaian:**

Medan magnet yang berubah terhadap waktu ini menembus permukaan statis, yang kemudian akan menghasilkan tegangan atau ggl induksi.

GGL induksi akan dihasilkan pada kutub sebelah kiri dari rangkaian sebesar:

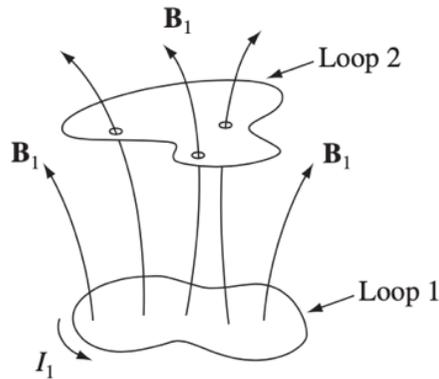
$$\begin{aligned} \varepsilon &= \oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{a} \\ &= - \frac{\partial B}{\partial t} \int_s d\mathbf{a} = - \frac{\partial B}{\partial t} (ab) \\ &= -(ab)\omega B_0 \cos \omega t \end{aligned}$$

**3. Induktansi**

**a. Mutual Induktansi (Induktansi Silang)**

Anggap kita memiliki dua loop (Gambar 3.26), dengan arus  $I_1$  dan  $I_2$  pada masing – masing loop. Masing- masing loop juga akan menghasilkan medan magnet induksi masing – masing, yaitu  $B_1$  dan  $B_2$ . Medan  $B_1$  dialami oleh loop 2 dan Medan  $B_2$  dialami oleh loop 1.

Gambar 3. 26 Induktansi pada dua loop berarus



Sumber: (Griffith, 2012)

Besar medan  $\mathbf{B}_1$  oleh hukum Biot-Savart adalah

$$\mathbf{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 \oint \frac{d\boldsymbol{\ell}_1 \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

Maka besar fluks medan magnet yang dialami oleh loop 2

$$\Phi_2 = \int \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{a}_2 \quad 3.67$$

Maka

$$\Phi_2 = \int \mathbf{M}_{21} \cdot I_1 \quad 3.68$$

Dimana  $\mathbf{M}_{21}$  adalah konstanta perbandingan, yang dikenal dengan **Induktansi Mutual** / Induktansi Silang dari dua loop.

Induktansi mutual ini dalam teorema Stokes diberikan oleh

$$\Phi_2 = \int \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{a}_2 = \int (\nabla \times \mathbf{A}_1) \cdot d\mathbf{a}_2 = \oint \mathbf{A}_1 \cdot d\boldsymbol{\ell}_1 \quad 3.69$$

Kemudian

$$\mathbf{A}_1 = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \oint \frac{d\boldsymbol{\ell}_1}{r} \quad 3.70$$

Dan

$$\Phi_2 = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \oint \left( \oint \frac{d\boldsymbol{\ell}_1}{r} \right) \cdot d\boldsymbol{\ell}_2 \quad 3.71$$

Kemudian

$$M_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \oint \frac{d\ell_1 \cdot d\ell_2}{r} \quad 3.72$$

Persamaan diatas adalah **persamaan Neumann**, dengan catatan berikut:

1.  $M_{21}$  adalah kuantitas geometri, bergantung pada ukuran, bentuk dan posisi antara dua loop
2. hubungan induktansi mutual kedua loop berlaku

$$M_{21} = M_{12} \quad 3.73$$

Bagaimanapun bentuk, ukuran dan posisi dari kedua loop, fluks yang dialamo loop 2 sama besarnya dengan fluks yang dialami oleh loop 1.

### b. formulasi Induktansi

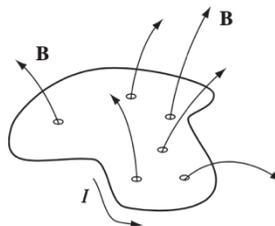
Anggap bahwa saat ini kita akan memvariasikan arus pada loop 1. Fluks yang melalui loop 2 juga akan bervariasi. Perubahan fluks ini (menurut hukum Faraday) akan menginduksi gaya elektromotif (gaya gerak listrik, ggl) dari loop 2 sebesar:

$$\mathcal{E}_2 = \frac{d\Phi_2}{dt} = -M \frac{dI_1}{dt} \quad 3.74$$

Artinya setiap ada perubahan arus pada loop 1, maka akan menghasilkan arus induksi pada loop 2, walaupun pada kedua loop tidak berhubungan secara langsung.

Perubahan arus tidak hanya menghasilkan induksi ggl pada loop terdekat, tapi juga menginduksi ggl pada loop itu sendiri. Induksi seperti ini disebut sebagai **induktansi diri** (Gambar3.27).

Gambar 3. 27 Medan Induksi dari loop berarus



Sumber: (Griffith, 2012)

Besar induktansi diri ini dinyatakan sebagai besar fluks (medan) yang sebanding dengan arusnya.

$$\Phi = LI \quad 3.75$$

Konstanta perbandingan fluks terhadap kuat arus ini disebut sebagai induktansi diri ( $L$ ) atau biasanya juga disebut sebagai induktansi loop, dengan  $M$  bergantung pada geometri (bentuk dan ukuran). Jika terjadi perubahan arus, maka ggl induksi dalam loop adalah sebesar:

$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt} \quad 3.76$$

Induktansi diukur dalam henri (H),  $1 \text{ H} = 1 \text{ volt} \cdot \text{Sekon per ampere}$

#### 4. Energi dalam Medan Magnet

Pada elektrodinamika, diperlukan sejumlah energi untuk memulai aliran arus pada rangkaian. Energi yang dimaksud ini bukan energi digunakan pada resistor dan dapat dikonversi menjadi panas, melainkan energi yang diperlukan agar arus dapat mengalir di sepanjang rangkaian. Usaha yang dilakukan ini sebesar usaha untuk melawan emf agar arus dapat mengalir.

Energi ini memiliki jumlah yang pasti dan dapat dibalikkan, energi ini akan muncul kembali setelah diputus dari tegangan luar. Energi ini juga merepresentasikan energi laten dalam rangkaian, yaitu energi yang tersimpan dalam rangkaian.

Total muatan per satuan waktu yang melewati kawat dinyatakan dengan  $I$ . Sehingga usaha per satuan waktu dinyatakan dengan

$$\frac{dW}{dt} = -\mathcal{E}I = LI \frac{dI}{dt} \quad 3.77$$

Jika kita mulai dengan arus nol hingga mencapai nilai arus akhir  $I$ , maka usaha yang dilakukan dapat diperoleh dari integrasi persamaan terakhir ini terhadap waktu

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad 3.78$$

Besar energi ini bergantung pada seberapa panjang arus yang dapat dipompa, yang bergantung hanya pada geometri loop ( $L$ ) dan arus akhir ( $I$ ).

Cara yang paling nyaman untuk menuliskan  $W$  adalah dalam arus permukaan dan arus volume. Ingat bahwa flux ( $\Phi$ ) yang melalui loop setara dengan  $LI$ . Sehingga diperoleh:

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = \int (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{a} = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad 3.79$$

Dimana integral garis disekeliling perimeter loop memberikan

$$LI = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{I} \quad 3.80$$

Dan juga

$$W = \frac{1}{2} I \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{I} = \frac{1}{2} \oint (\mathbf{A} \cdot \mathbf{I}) dI \quad 3.81$$

Dalam bentuk ini, dalam densitas arus volume menjadi

$$W = \frac{1}{2} \int_V (\mathbf{A} \cdot \mathbf{J}) d\tau \quad 3.82$$

Kemudian kita dapat mengekspersikan  $W$  dalam bentuk medan magnet : Hukum Ampere  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$ , sehingga kita dapat mengeliminasi  $\mathbf{J}$ :

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_V (\mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})) d\tau \quad 3.83$$

Dengan melakukan integrasi bagian demi bagian mengirinkan derivasi dari  $\mathbf{B}$  menjadi  $\mathbf{A}$ , dengan menggunakan aturan produk ke-6 diperoleh

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) - \mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})$$

sehingga

$$\mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot \mathbf{B} - \nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B})$$

Sehingga

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2\mu_0} \left[ \int B^2 d\tau - \int \nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) d\tau \right] \\ &= \frac{1}{2\mu_0} \left[ \int_V B^2 d\tau - \oint_S (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) d\tau \right] \quad 3.84 \end{aligned}$$

Dengan  $S$  adalah permukaan dan  $V$  adalah volume. Kemudian dilakukan integral pada seluruh permukaan dan volume sehingga menghasilkan:

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_{all\ space} B^2 d\tau$$

Persamaan diatas menunjukkan **energi yang tersimpan dalam medan magnet** adalah sebesar  $\frac{B^2}{2\mu_0}$  per satuan volume. Dari persamaan diatas kita juga dapat

menyebutkan bahwa energi yang tersimpan dalam distribusi arus adalah sebesar  $\frac{1}{2}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{J})$  per satuan volume.

$$W_{elec} = \frac{1}{2} \int (V\rho) d\tau = \frac{\epsilon_0}{2} \int E^2 d\tau \quad 3.85$$

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \int (\mathbf{A} \cdot \mathbf{J}) d\tau = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 d\tau \quad 3.86$$

Kedua persamaan diatas menunjukkan perbandingan energi yang tersimpan dari medan listrik dan medan magnet.

## C. Persamaan Maxwell

### 1. Elektrodinamika sebelum Maxwell

Dari kegiatan pembelajaran sebelumnya kita telah memperoleh hukum – hukum yang menjelaskan tentang fenomena elektromagnetik, diantaranya

Tabel 3. 1 Persamaan - Persamaan Elektromagnetik sebelum Maxwell

No	Persamaan	Nama Hukum
(i)	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$	Hukum Gauss
(ii)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	-
(iii)	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Hukum Faraday
(iv)	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$	Hukum Ampere

Persamaan – persamaan pada Tabel 3.1 ini telah menjadiahukum yang menjelaskan fenomena elektromagnetik selama seabad lalu, sebelum Maxwell memulai pekerjaannya. Koreksi untuk persamaan-persamaan diatas muncul saat diuji menggunakan aturan bahwa semua hasil divergensi dari curl haruslah nol. Persamaan yang diuji adalah persamaan (iii) dan (iv).

Hasil divergensi dari persamaan (iii), yaitu tentang Hukum Faraday menunjukkan:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla \cdot \left( -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{B}) \quad 3.87$$

Operasi div pada curl dari persamaan Faraday menunjukkan hasil yang sesuai dengan aturan operasi vektor. Pada ruas sebelah kiri menunjukkan hasil nol. Hal serupa kita peroleh di ruas sebelah kanan juga akan memperoleh nol, karena nilai  $(\nabla \cdot \mathbf{B}) = 0$ .

Masalah mulai tampak saat kita melakukan hal yang sama pada persamaan Ampere (persamaan iv).

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla \cdot (\mu_0 \mathbf{J}) = \mu_0 (\nabla \cdot \mathbf{J}) \quad 3.88$$

Operasi div dari curl pada persamaan diatas menunjukkan hasil yang berbeda pada kedua ruas. Ruas sebelah kanan hanya akan menunjukkan hasil nol pada keadaan aliran arus tunak (steady). Hal ini mungkin terlihat sesuai dengan Hukum Ampere, dengan mengasumsikan bahwa Hukum Ampere hanya berlaku pada keadaan magnetostatik. Namun bagaimana dengan keadaan non magnetostatik? Apakah kita perlu meninjau ulang bentuk persamaan dari Hukum Ampere supaya bisa diterapkan kedalam keadaan non magnetostatik?

Kenapa kita perlu untuk menjelaskan pada keadaan dimana hasil div  $\mathbf{J}$  tidak nol? Karena induksi medan magnet oleh densitas arus tidak hanya terjadi pada arus tunak, tapi juga pada keadaan non-tunak atau non steady. Pada keadaan apa? Misalnya pada keadaan dalam pengisian kapasitor. Saat terjadi pengisian kapasitor terjadi peristiwa dielektrik, yaitu pemisahan dua kutub listrik yang berbeda jenis pada ujung-ujung yang saling berjauhan. Kutub positif terkonsentrasi pada satu ujung, dan kutub negatif terkonsentrasi di ujung lain. Saat div  $\mathbf{J}$  tidak nol, maka kita ikut mengkalkulasikan sumber muatan (baik positif ataupun negatif) pada aliran arus yang terjadi pada dielektrik.

Untuk menjelaskannya, pertama-tama perlu kita ingat kembali bahwa operasi vektor divergensi yang tidak nol menunjukkan sebuah “aliran” yang bersifat tersebar secara radial atau dalam kata lain, tidak steady atau tidak tunak. Sebaran radial ini memiliki dua arah, yaitu tersebar masuk dan tersebar keluar. Jika divergensi suatu medan tersebar masuk, maka nilainya negatif (menunjukkan muatan negatif pada elektrostatik). Namun jika div dari suatu medan tersebar keluar, maka nilainya positif (menunjukkan keberadaan muatan positif pada kasus elektrostatik).

## 2. Koreksi Maxwell pada Hukum Ampere

Telah dijelaskan diatas bahwa Hukum Ampere hanya berlaku pada keadaan magnetostatik. Kemudian bagaimana dengan keadaan non magnetostatik, yang dihasilkan dari arus tidak tunak? Pada masa elektrodinamika klasik saat itu, perkembangan instrument dalam bidang electromagnet masih sangat terbatas, sehingga seluruh hukum-hukumnya baru dibuktikan secara teoritis.

Kemudian Maxwell melakukan koreksi, agar hukum Ampere dapat berlaku juga untuk keadaan non magnetostatik. Tindakan yang diambil oleh

Maxwell adalah melakukan modifikasi pada persamaan Div J. Div J dinyatakan dalam div E yang berlaku pada dielektrik. Bentuk persamaannya adalah sebagai berikut

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E}) = -\nabla \cdot \left( \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad 3.89$$

Dengan  $\mathbf{J}$  adalah densitas arus pada bahan dielektrik. Kemudian persamaan diatas kita tambahkan pada ruas sebelah kanan dari persamaan. Div J dari persamaan akan meniadakan div J dari persamaan. Dengan demikian, diperoleh operasi div dari curl medan magnet (hukum Ampere) adalah nol. Sehingga persamaan Ampere dapat ditulis ulang menjadi:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad 3.90$$

Koreksi Maxwell pada Hukum Ampere mendeteksi fenomena lainnya dari electromagnet. bahwa medan magnet juga menginduksi medan listrik. Mari kita tuliskan ulang bentuk persamaan tambahannya

$$\nabla \times \mathbf{B} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Perhatikan pada ruas kiri terdapat medan magnet  $\mathbf{B}$  dan pada ruas kanan terdapat medan listrik  $\mathbf{E}$ . Curl dari medan magnet ( $\nabla \times \mathbf{B}$ ) adalah medan listrik yang berubah terhadap fungsi waktu  $\left( \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$ . Dengan pengertian yang lebih singkat, medan magnet (yang efeknya berbentuk sirkular) bisa dihasilkan dari medan listrik yang berubah terhadap waktu atau dapat ditulis:

Perubahan medan listrik menginduksi medan magnet

Koreksi Maxwell terhadap Hukum Ampere ini menunjukkan fenomena terbalik dari hukum Faraday. Pada hukum Faraday diperoleh bahwa perubahan fluks medan magnet akan menginduksi medan listrik. Sementara koreksi Maxwell terhadap hukum Ampere menunjukkan perubahan medan listrik menginduksi medan magnet.

Kontribusi arus dari perubahan medan listrik terhadap waktu didefinisikan sebagai:

$$\mathbf{J}_d \equiv \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad 3.91$$

Dengan menggunakan hukum Gauss, kita peroleh

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \sigma = \frac{1}{\epsilon_0} \mathbf{A} \quad 3.92$$

Kemudian kita masukkan dalam persamaan perubahan medan terhadap waktu

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0 A} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\epsilon_0 A} \mathbf{I} \quad 3.93$$

Bentuk koreksi Maxwell terhadap hukum Ampere dalam bentuk integral menjadi:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\ell = \mu_0 I_{enc} + \mu_0 \epsilon_0 \int \left( \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{a} \quad 3.94$$

### 3. Hukum Maxwell

Sebagaimana Hukum Newton menjelaskan tentang gerak (mekanika klasik), maka Hukum Maxwell menjelaskan tentang electromagnet. Sebagaimana Newton merumuskan gerak dalam 3 (tiga) hukum, Maxwell merumuskan 4 (empat) hukum elektrodinamika klasik dengan menggunakan beberapa hukum-hukum lain, yaitu Hukum Gauss, hukum Faraday, dan Hukum Ampere (yang dikoreksi Maxwell) (Tabel 3.2)

Tabel 3. 2 Persamaan - Persamaan Elektromagnetik menurut Maxwell

No	Persamaan	Nama Hukum	Keadaan	Keterangan
(i)	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$	Hukum Gauss	elektrostatik	Medan listrik konstan dihasilkan oleh muatan stasioner
(ii)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	-		Menunjukkan ketiadaan monopol
(iii)	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Hukum Faraday	Elektrodinamika	Medan magnet yang mengalami perubahan akan menghasilkan Medan Listrik, dan sebaliknya
(iv)	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Hukum Ampere dengan koreksi Maxwell	Magnetostatik	Medan magnet statis dihasilkan dari densitas arus tunak $\mathbf{J}$

Dengan hukum gaya magnet

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad 3.95$$

Dengan persamaan kontinuitas diberikan oleh

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad 3.96$$

Dengan persamaan kontinuitas ini sebenarnya bisa diturunkan dari persamaan (iv) dari Hukum Newton.

Persamaan-persamaan yang ada di table 3.3 dan persamaan gaya magnet (gaya Lorentz) ini menjadi persamaan-persamaan yang mendasari elektrodinamika klasik.

Tabel 3. 3 Modifikasi Hukum Maxwell

No	Persamaan	Nama Hukum
(i)	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$	Hukum Gauss
(ii)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	
(iii)	$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$	Hukum Faraday
(iv)	$\nabla \times \mathbf{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{J}$	Hukum Ampere dengan koreksi Maxwell

Dengan menggunakan bentuk persamaan diatas (Tabel), maka kita dapat menyimpulkan bahwa medan elektromagnetik pada intinya berasal dari (atau disebabkan oleh) muatan dan arus listrik. Persamaan – persamaan Maxwell menunjukkan bahwa muatan menghasilkan medan, dan sebaliknya, hukum Lorentz menunjukkan bagaimana medan mempengaruhi muatan.

#### 4. Hukum Maxwell pada bahan

Dari medan elektrostatik dalam dielektrik, kita telah memperoleh polarisasi elektrik menghasilkan muatan terikat.

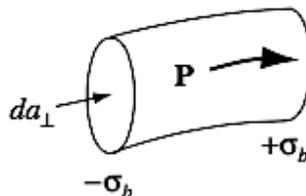
$$\rho_b = -\nabla \cdot \mathbf{P} \quad 3.97$$

Analog dengan persamaan polarisasi elektrik, maka pada polarisasi magnetic (atau magnetisasi,  $M$ ), menghasilkan arus terikat

$$\mathbf{J}_b = \nabla \times \mathbf{M} \quad 3.98$$

Pada keadaan medan non statis, semua perubahan yang terjadi pada polarisasi elektrik akan melibatkan aliran dari muatan terikat (kita sebut Densitas Arus Polarisasi,  $\mathbf{J}_p$ ), yang termasuk pada arus total. Polarisasi akan menimbulkan densitas muatan  $\sigma_b$  pada satu ujung dan  $-\sigma_b$  pada ujung yang lain (Gambar 3.29).

Gambar 3. 28 Densitas Muatan pada bahan yang terpolarisasi



Sumber: (Griffith, 2012)

Jika  $P$  mengalami sedikit peningkatan, maka muatan pada kedua ujung ini juga turut mengalami peningkatan. Sehingga total arus pada keadaan polarisasi kita nyatakan dengan

$$dI = \frac{\partial \sigma_b}{\partial t} da_{\perp} = \frac{\partial P}{\partial t} da_{\perp} \quad 3.99$$

Maka densitas arusnya dapat kita nyatakan dengan

$$J_p = \frac{\partial P}{\partial t} \quad 3.100$$

Densitas arus polarisasi  $J_p$  tidak ada kaitannya dengan densitas muatan terikat  $J_b$ . Densitas arus polarisasi  $J_p$  ini justru berhubungan dengan magnetisasi bahan, yang kamu bisa pelajari pada tingkatan berikutnya atau pada literatur bahan ajar lainnya. Densitas arus polarisasi  $J_p$  ini akan mempengaruhi spin dan orbital dari electron. Densitas arus polarisasi  $J_p$  ini menghasilkan gerak lurus pada muatan ketika terjadi perubahan polarisasi elektrik  $P$ . Jika  $P$  mengarah ke kanan dan mengalami peningkatan, maka setiap muatan positif akan cenderung mengarah ke kanan dan muatan negatif akan cenderung mengarah ke kiri, efek kumulatifnya adalah timbulnya arus polarisasi  $J_p$ . Dengan menggunakan persamaan kontinuitas, kita nyatakan hubungan densitas arus polarisasi  $J_p$  dengan vektor Polarisasi ( $P$ ) sebagai berikut:

$$\nabla \cdot J_p = \nabla \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot P) = -\frac{\partial \rho_b}{\partial t} \quad 3.101$$

Keberadaan densitas arus polarisasi  $J_p$  masih memenuhi konservasi muatan. Artinya perubahan magnetisasi dalam bahan tidak akan berdampak pada perubahan jumlah muatan atau arus. Densitas arus terikat kita nyatakan sebagai

$$J_b = \nabla \times M \quad 3.102$$

Dengan demikian densitas arus yang mengalir dalam bahan terbagi menjadi tiga, yaitu densitas arus terikat  $J_b$ , densitas arus polarisasi  $J_p$ , dan densitas arus bebas  $J_f$ .

$$J = J_f + J_b + J_p = J_f + (\nabla \times M) + \frac{\partial P}{\partial t} \quad 3.103$$

Hukum Gauss kemudian sekarang dapat kita tuliskan

$$\nabla \cdot E = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho_f - \nabla \cdot P) \quad 3.104$$

atau

$$\nabla \cdot D = \rho_f \quad 3.105$$

Dimana  $D$  adalah vektor pergeseran elektrik yang dinyatakan dengan

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad 3.106$$

(buka kembali Modul 2 – Medan elektrostatik dalam bahan dielektrik)

Sementara dalam bentuk persamaan Ampere (yang telah dikoreksi Hukum Maxwell), dapat kita modifikasi menjadi

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{J}_f + (\nabla \times \mathbf{M}) + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} \right) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad 3.107$$

Atau

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad 3.108$$

Dimana  $\mathbf{H}$  telah didefinisikan sebelumnya

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M} \quad 3.109$$

Hukum Maxwell dalam bahan kemudian bisa kita nyatakan dalam bentuk muatan bebas  $\rho_f$  dan arus bebas  $\mathbf{J}_f$  sebagaimana Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3. 4 Hukum Maxwell pada bahan

No	Persamaan	Nama Hukum
(i)	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f$	Hukum Gauss
(ii)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	
(iii)	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Hukum Faraday
(iv)	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	Hukum Ampere dengan koreksi Maxwell

Sebagaimana medan listrik  $\mathbf{E}$  analog dengan medan magnet  $\mathbf{B}$ , demikian pula pergeseran elektrik dalam bahan  $\mathbf{D}$  analog dengan  $\mathbf{H}$ , atau distribusi muatan statis  $\rho$  dengan distribusi arus  $\mathbf{J}$ . Perilaku kelistrikan ini semua bergantung pada jenis media / bahan yang kita dapat nyatakan dengan

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \text{ dan } \mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad 3.110$$

Dan

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \text{ dan } \mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} \quad 3.111$$

Dimana

$$\epsilon \equiv \epsilon_0 (1 + \chi_e)$$

Dan

$$\mu \equiv \mu_0 (1 + \chi_m)$$

## 5. Syarat Batas

Pada umumnya, medan  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{B}$ , dan  $\mathbf{H}$  akan mengalami diskontinuitas pada batas antara dua media yang berbeda atau pada permukaan yang membawa

densitas muatan  $\sigma$  atau densitas arus  $\mathbf{K}$ . Bentuk diskontinuitas dalam Persamaan Maxwell diberikan pada table 3.5 berikut

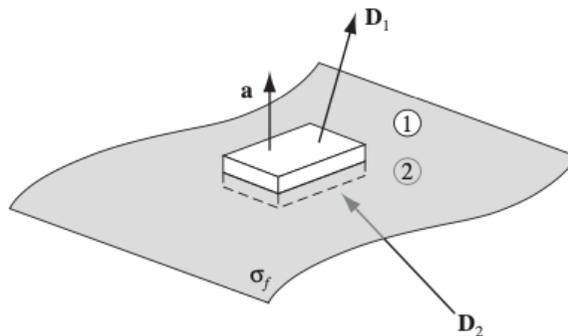
Tabel 3. 5 Diskontinuitas Medan dalam Persamaan Maxwell

No	Persamaan	ket
(i)	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{a} = Q_{enc}$	Pada seluruh permukaan S
(ii)	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = 0$	
(iii)	$\oint \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a}$	Pada seluruh permukaan S yang terikat pada loop tertutup P
(iv)	$\oint \mathbf{H} \cdot d\boldsymbol{\ell} = I_{enc} + \frac{\partial}{\partial t} \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{a}$	

Sumber: (Griffith, 2012)

Pada selembaar permukaan Gaussian tipis ditinjau sebuah kotak kecil (pillbox) (Gambar 3.30).

Gambar 3. 29 Pergeseran Elektrik pada bidang batas



Sumber: (Griffith, 2012)

Pada keadaan ini berlaku

$$\mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{a} - \mathbf{D}_2 \cdot \mathbf{a} = \sigma_f a \quad 3.112$$

Sehingga

$$D_1^\perp - D_2^\perp = \sigma_f \quad 3.113$$

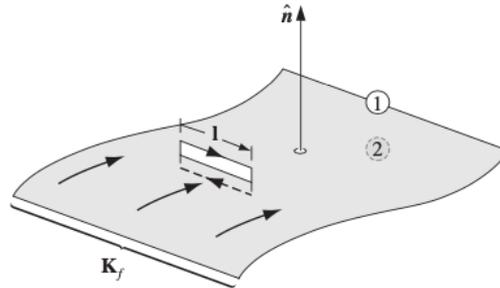
Dengan konsep yang sama, kita dapat menerapkannya kembali pada persamaan (ii),

$$B_1^\perp - B_2^\perp = \sigma_f \quad 3.114$$

Kemudian pada persamaan (iii), Loop Amperian yang berada pada dua bidang batas permukaan (Gambar 3.31), memberikan persamaan:

$$\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{l} - \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad 3.115$$

Gambar 3. 30 Bidang Batas yang dialiri arus bidang K



Sumber: (Griffith, 2012)

Komponen E parallel pada bagian batas adalah kontinu.

$$E_1^{\parallel} - E_2^{\parallel} = 0 \quad 3.116$$

Sehingga (iv) menjadi

$$\mathbf{H}_1 \cdot \mathbf{l} - \mathbf{H}_2 \cdot \mathbf{l} = \mathbf{I}_{f \text{ enc}} \quad 3.117$$

Dimana  $\mathbf{I}_{f \text{ enc}}$  adalah arus bebas yang melalui sepanjang loop Amperian. Tidak ada densitas arus volume yang berkontribusi, yang berkontribusi hanya densitas arus permukaan. Maka pada komponen normal loop Amperian diperoleh:

$$\mathbf{H}_1^{\perp} - \mathbf{H}_2^{\perp} = \mathbf{K}_f \times \hat{\mathbf{n}} \quad 3.118$$

Maka komponen paralel dari H adalah diskontinu pada permukaan berarus.

Pada media linear, medan  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{B}$  dapat dinyatakan sebagai

$$(i) \quad \varepsilon_1 E_1^{\perp} - \varepsilon_2 E_2^{\perp} = \sigma_f \quad 3.119.a$$

$$(ii) \quad B_1^{\perp} - B_2^{\perp} = 0 \quad 3.119.b$$

$$(iii) \quad E_1^{\parallel} - E_2^{\parallel} = 0 \quad 3.119.c$$

$$(iv) \quad \frac{1}{\mu_1} B_1^{\parallel} - \frac{1}{\mu_2} B_2^{\parallel} = \mathbf{K}_f \times \hat{\mathbf{n}} \quad 3.119.d$$

Secara khusus, jika tidak ada muatan bebas atau arus bebas pada interface, maka akan berlaku:

$$(i) \quad \varepsilon_1 E_1^{\perp} - \varepsilon_2 E_2^{\perp} = 0 \quad 3.120.a$$

$$(ii) \quad B_1^{\perp} - B_2^{\perp} = 0 \quad 3.120.b$$

$$(iii) \quad \mathbf{E}_1^{\parallel} - \mathbf{E}_2^{\parallel} = 0 \quad 3.120.c$$

$$(iv) \quad \frac{1}{\mu_1} \mathbf{B}_1^{\parallel} - \frac{1}{\mu_2} \mathbf{B}_2^{\parallel} = 0 \quad 3.120.d$$

## Rangkuman

### A. Gaya Elektromotif (emf, atau Gaya gerak listrik, GGL)

#### 1. Hukum Ohm

Hukum ohm dalam bentuk densitas arus kita tuliskan dalam bentuk

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B}))$$

#### 2. Fluks medan magnet

Fluks medan magnet analog dengan fluks medan listrik. Fluks medan magnet dapat didefinisikan sebagai aliran medan magnet yang menembus suatu permukaan tertentu

#### 3. Gaya elektromotif (emf atau ggl)

Gaya elektromotif adalah usaha per satuan muatan (atau besar tegangan) yang menyearahkan muatan-muatan dalam kawat penghantar (atau media) sehingga mengakibatkan terjadinya arus listrik.

$$\mathcal{E} \equiv \oint \mathbf{f} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \oint \mathbf{f}_s \cdot d\boldsymbol{\ell}$$

### B. Induksi Elektromagnet

#### 1. Hukum Faraday

a. Percobaan yang ggl induksi dari Faraday dilakukan dengan 3 cara

1) menggerakkan loop pada medan magnet

2) menggerakkan magnet terhadap loop

3) melakukan variasi arus yang mengalir pada loop yang berada dalam medan magnet

b. Bunyi Hukum Faraday: perubahan fluks magnet akan menghasilkan ggl induksi.

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

c. Hubungan antara medan listrik dan medan magnet oleh Faraday diberikan oleh persamaan berikut

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Yang makna fisisnya: curl medan listrik dihasilkan dari perubahan medan magnet terhadap waktu

### C. Persamaan Maxwell

1. Hukum Maxwell adalah hukum yang mendeskripsikan elektrodinamika klasik, ada empat persamaan pada hukum maxwell

(i) $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$	Hukum Gauss
(ii) $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	-
(iii) $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Hukum Faraday
(iv) $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Hukum Ampere dengan koreksi Maxwell

2. Persamaan – persamaan Maxwell menunjukkan bahwa muatan menghasilkan medan, dan sebaliknya, hukum Lorentz menunjukkan bagaimana medan mempengaruhi muatan.

3. Hukum Maxwell dalam bahan dinyatakan dengan

(i) $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f$	Hukum Gauss
(ii) $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	
(iii) $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Hukum Faraday
(iv) $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	Hukum Ampere dengan koreksi Maxwell

### 4. Syarat batas

Pada umumnya, medan  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{B}$ , dan  $\mathbf{H}$  akan mengalami diskontinu pada batas antara dua media yang berbeda atau pada permukaan yang membawa densitas muatan  $\sigma$  atau densitas arus  $\mathbf{K}$ .

# Tes Formatif

## A. Pilihan Ganda

1. Perhatikan pernyataan berikut:

- (1) loop kawat berarus ke kanan digerakkan pada sepanjang daerah yang diberi medan magnet.
- (2) magnet digerakkan ke kiri, dengan membiarkan loop dalam keadaan diam
- (3) loop dan magnet dalam keadaan diam, kemudian kuat medan magnet diubah dengan menggunakan variasi arus dalam kumparan.
- (4) loop dan magnet digerakkan dan kuat medan magnet diubah dengan menggunakan variasi arus dalam kumparan

Eksperimen Faraday yang dilaporkan dapat berfungsi sebagai pembangkit listrik dari energi mekanik (gerak) adalah ....

- a. (1), (2), (3)
- b. (1) dan (3)
- c. (2) dan (4)
- d. (4) saja
- e. semua benar

2. Penyebab timbulnya ggl induksi menurut hukum Faraday adalah ....

- a. perubahan medan listrik
- b. perubahan medan magnet
- c. perubahan medan gravitasi
- d. perubahan fluks medan magnet
- e. perubahan densitas arus induksi

3. Persamaan yang menunjukkan Hukum Faraday adalah ....

- a.  $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
- b.  $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
- c.  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
- d.  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$
- e.  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

4. Hukum Newton adalah hukum yang mendeskripsikan mekanika klasik secara umum, sedangkan Hukum Maxwell mendeskripsikan ...

- a. Medan elektostatika
- b. Medan magnet
- c. Medan elektromagnetik
- d. Hidrostatika
- e. Termodinamika

5. Persamaan yang mengalami koreksi pada Hukum Maxwell adalah ....

- a. Hukum Ampere
- b. Hukum Biot-Savart
- c. Hukum Gauss
- d. Hukum Faraday
- e. Hukum Coulomb

6. Persamaan-persamaan yang dirangkum oleh persamaan Maxwell adalah ....

- a. Hukum Ampere dengan koreksi Maxwell
- b. Hukum Faraday
- c. Hukum Gauss
- d. Ketiadaan monopol
- e. semua benar

7. Pernyataan yang benar tentang elektrostatika, magnetostatik dengan elektrodinamika adalah ....

- a. medan magnet konstan pada magnetostatik dihasilkan oleh arus bolak-balik
- b. medan magnet berubah terhadap waktu pada elektrodinamika menghasilkan arus induksi
- c. muatan statis pada elektrostatika menghasilkan medan listrik yang berubah terhadap waktu
- d. medan magnetostatik dihasilkan oleh muatan statis
- e. medan elektrostatik dan medan magnetostatik mempengaruhi medan gravitasi

8. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Densitas arus polarisasi  $J_p$  tidak ada kaitannya dengan densitas muatan terikat  $J_b$ .
- (2) Densitas arus polarisasi  $J_p$  berhubungan dengan magnetisasi bahan.
- (3) Densitas arus polarisasi  $J_p$  ini akan mempengaruhi spin dan orbital dari electron.
- (4) Densitas arus polarisasi  $J_p$  ini menghasilkan gerak lurus pada muatan ketika terjadi perubahan polarisasi elektrik  $P$

Pernyataan yang benar untuk densitas arus polarisasi  $J_p$  adalah ....

- a. (1), (2), (3)
- b. (1) dan (3)
- c. (2) dan (4)
- d. (4) saja
- e. semua benar

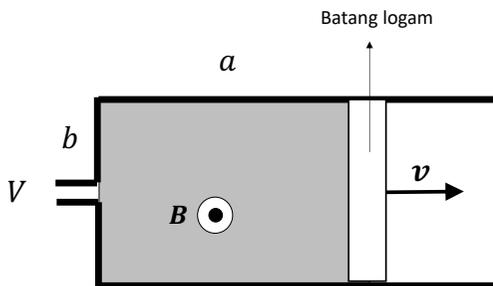
9. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Hukum Maxwell
- (2) Gaya Lorentz
- (3) Hukum kontinuitas (konservasi muatan)
- (4) Hukum Neumann

Hukum- hukum yang menjadi inti dari elektrodinamika klasik adalah ....

- a. (1), (2), (3)
- b. (1) dan (3)
- c. (2) dan (4)
- d. (4) saja
- e. semua benar

10. Perhatikan gambar berikut



Sebuah loop berbentuk persegi panjang dengan dimensi  $a \times b$  (Gambar) dibiarkan dalam keadaan diam tapi diberi medan magnet  $\mathbf{B}$ . Gambar yang paling tepat dalam melukiskan distribusi muatan pada permukaan batang logam adalah....

- a.
- b.
- c.
- d.
- e.

## B. Essay

1. Tuliskanlah keempat persamaan Maxwell, dan jelaskan masing-masing makna fisisnya!

Jawaban:

2. Jelaskan kenapa Maxwell perlu mengoreksi hukum Ampere! Turunkan persamaan Hukum Ampere yang telah dikoreksi oleh Maxwell

Jawaban:

## Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

- Griffiths, D. J. (2012). Introduction to electrodynamics 4<sup>th</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Kanginan, Marthen. (2018). Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan Matematika dan Ilmu-Ilmu Alam. Jakarta: Erlangga
- Halliday, Resnick. (2005) Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Effendi, Rustam, dkk. (2007). Medan Elektromagnetika terapan. Jakarta: Erlangga.
- Sailah, Siti, dkk. (2014). Medan Eleltromagnetik, Teori dan contoh soal. Yogyakarta: ANDI.
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/fluxmg.html>

# Kegiatan Pembelajaran 3 Gelombang Elektromagnetik

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang hukum konservasi yang berlaku pada fenomena elektromagnetik 2. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang fenomena fisis, persamaan gelombang, energi dan momentum gelombang elektromagnetik.	a. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang konservasi muatan pada gejala elektromagnetik b. Mahasiswa dapat menjelaskan tentang konservasi energi pada gejala elektromagnetik c. Mahasiswa dapat menjelaskan tentang konservasi momentum pada gejala elektromagnetik d. Mahasiswa dapat menjelaskan tentang gejala polarisasi elektromagnetik sebagai gelombang transversal e. Mahasiswa dapat menjelaskan tentang kontribusi medan listrik dan magnet elektromagnetik f. Mahasiswa dapat menjelaskan tentang besar energi, densitas fluks energi dan momentum pada gelombang elektromagnetik

## Uraian Materi

### A. Hukum konservasi

Pada kegiatan pembelajaran ini kita akan mempelajari tentang hukum kekekalan (konservasi) dari energi, muatan, dan momentum yang berlaku pada fenomena elektromagnetik. Setelah itu kita akan mempelajari tentang gejala gelombang elektromagnetik, mulai dari persamaan gelombang, syarat batas, polarisasi, energi dan momentum gelombang elektromagnetik.

#### 1. Persamaan kontinuitas pada distribusi arus

Hukum konservasi muatan dinyatakan dengan jumlah arus yang memasuki sebuah titik sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik tersebut. Secara umum, muatan dalam volume dinyatakan dengan

$$Q(t) = \int_V \rho(\mathbf{r}, t) d\tau \quad 3.121$$

Dan besar arus yang mengalir pada bidang batas S adalah  $\int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a}$ , sehingga pada sebuah titik, konservasi muatan menjadi

$$\frac{dQ}{dt} = - \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a} \quad 3.122$$

Dengan menggunakan teorema divergensi diperoleh:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} d\tau = - \int_V \nabla \cdot \mathbf{J} d\tau \quad 3.123$$

Sehingga untuk seluruh volume, berlaku persamaan kontinuitas yang diberikan oleh

$$-\nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad 3.124$$

Dengan  $\mathbf{J}$  adalah distribusi arus ruang, dan  $\rho$  adalah densitas (kepadatan) muatan dalam ruang.

## 2. Teorema Poynting

Dari Modul 1 telah diperoleh besar usaha atau kerja yang diperlukan untuk menyusun sebuah konfigurasi yang terdiri dari distribusi muatan – muatan, sebesar

$$W_e = \frac{\epsilon_0}{2} \int E^2 d\tau \quad 3.125$$

Dengan  $\mathbf{E}$  adalah resultan medan listrik. Dengan melakukan pendekatan yang sama, maka usaha atau kerja yang diperlukan untuk memperoleh arus mengalir (dengan arah berlawanan dengan emf) adalah :

$$W_m = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 d\tau \quad 3.126$$

Dengan  $\mathbf{B}$  adalah resultan medan magnet. Dengan demikian, besar energi yang tersimpan pada medan elektromagnetik adalah sebesar:

$$U_{em} = \frac{1}{2} \int \left( \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) d\tau \quad 3.127$$

Persamaan energi pada medan elektromagnetik ini adalah persamaan energi dalam bentuk hukum konservasi dan akan kita nyatakan kembali dengan bentuk yang lebih umum pada uraian berikutnya.

Sekarang, anggap kita memiliki beberapa muatan dan arus dalam suatu konfigurasi. Pada waktu  $t$ , muatan dan arus ini menghasilkan  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{B}$ . Kemudian pada selang waktu yang sangat kecil berikutnya  $dt$ , muatan-muatan mulai bergerak. Pertanyaannya: Berapa banyak usaha atau kerja  $dW$  yang dilakukan oleh gaya elektromagnetik pada muatan ini dalam interval  $dt$ ? Berdasarkan hukum gaya Lorentz, besar kerja atau usaha yang dilakukan pada sebuah muatan dinyatakan dengan:

$$\mathbf{F} \cdot d\boldsymbol{\ell} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} dt = q \mathbf{E} \cdot \mathbf{v} dt \quad 3.128$$

Sekarang kita masukkan  $q = \rho d\tau$  dan  $\mathbf{J} = \rho\mathbf{v}$ , maka laju perubahan usaha yang dilakukan pada seluruh muatan dalam volume  $V$  adalah

$$\frac{dW}{dt} = \int_V (\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}) d\tau \quad 3.129$$

$\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}$  adalah usaha yang dilakukan per satuan waktu per satuan volume, atau dapat disebut sebagai daya per satuan volume. Kita dapat menyatakan kuantitas ini dalam bentuk medan dengan menggunakan persamaan Hukum Ampere-Maxwell,

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{J} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) - \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad 3.130$$

Dengan menggunakan aturan operasi vektor no. 6

$$\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})$$

Dengan menggunakan hukum Faraday

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Sehingga

$$\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = -\mathbf{B} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{B})$$

Sementara

$$\mathbf{B} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (B^2) \quad 3.131.a$$

Dan

$$\mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (E^2) \quad 3.131.b$$

Sehingga

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{J} = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left( \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) - \frac{1}{\mu_0} \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad 3.132$$

Dengan menerapkan teorema divergensi pada suku kedua diperoleh

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_V \frac{1}{2} \left( \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) d\tau - \frac{1}{\mu_0} \oint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{a} \quad 3.133$$

Dimana  $S$  adalah permukaan pada volume  $V$ . Persamaan 3.133 adalah persamaan **teorema pointing** atau teorema usaha-energi dari elektrodinamika. Integral pertama pada bagian kanan adalah total energi yang tersimpan pada medan, yang kita simbolkan dengan  $U_{em}$ . Suku kedua merepresentasikan energi yang dibawa keluar dari  $V$ , melintasi permukaan batas, oleh medan elektromagnetik.

Bunyi teorema Poynting adalah: “usaha yang dilakukan pada muatan oleh gaya elektromagnetik setara dengan penurunan energi yang tersimpan dalam medan, semakin ia meninggalkan permukaannya maka semakin kecil energi yang tersimpan.

Bunyi teorema Poynting adalah: “usaha yang dilakukan pada muatan oleh gaya elektromagnetik setara dengan penurunan energi yang tersimpan dalam medan, semakin ia meninggalkan permukaannya maka semakin kecil energi yang tersimpan.

Besar energi per satuan waktu, per satuan luas, yang dibawa oleh medan disebut sebagai **vektor Poynting**. Vektor Poynting didefinisikan dengan

$$\mathbf{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad 3.134$$

$$\mathbf{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E} \times \mathbf{B})$$

Secara khusus,  $\mathbf{S} \cdot d\mathbf{a}$  adalah besar energi per satuan waktu yang melalui permukaan tak hingga  $d\mathbf{a}$ , yang kemudian disebut sebagai fluks **energi**. Dengan demikian vektor Poynting  $\mathbf{S}$  adalah **densitas fluks energi**. Persamaan teorema Poynting dituliskan

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{dU_{em}}{dt} - \oint_S \mathbf{S} \cdot d\mathbf{a} \quad 3.135$$

Tentu saja usaha yang dilakukan  $W$  pada muatan akan meningkatkan energi mekanisnya (kinetik dan potensial). Jika kita menuliskan energi mekanik  $u_{mech}$  dalam bentuk densitas energi, maka

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V u_{mech} d\tau \quad 3.136$$

Dan gunakan  $u_{em}$  untuk menunjukkan densitas energi dari medan

$$u_{em} = \frac{1}{2} \left( \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) \quad 3.137$$

Kemudian

$$\frac{d}{dt} \int_V (u_{mech} + u_{em}) d\tau = - \oint_S \mathbf{S} \cdot d\mathbf{a} = - \int_V (\nabla \cdot \mathbf{S}) d\tau \quad 3.138$$

Dan akhirnya

$$\frac{\partial}{\partial t} (u_{mech} + u_{em}) = - \nabla \cdot \mathbf{S} \quad 3.139$$

Persamaan 3.139 adalah bentuk diferensial dari Teorema Poynting. Bentuk diferensial ini kemudian dapat kita bandingkan dengan persamaan kontinuitas yang menyatakan kekekalan muatan:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \nabla \cdot \mathbf{J}$$

Persamaan kontinuitas dan teorema Poynting memiliki bentuk persamaan divergensi yang analog. Muatan pada persamaan kontinuitas menjadi energi pada teorema Poynting. Pada pembahasan berikutnya kita akan melihat bahwa aliran energi ini sama persis dengan aliran muatan pada fenomena elektromagnetik

### Contoh Kasus - Besar Densitas Fluks Energi atau Vektor Poynting ( $\mathbf{S}$ )

Ketika arus melewati sebuah kawat, usaha dilakukan, yang ditunjukkan dengan adanya energi panas dari kawat dengan cara yang mudah dilakukan besar energi per satuan waktu untuk menghantarkan arus pada kawat dapat dihitung menggunakan vektor Poynting. Asumsikan besar medan listrik parallel pada kawat adalah

$$E = \frac{V}{L}$$

Dengan  $V$  adalah tegangan dan  $L$  adalah panjang kawat. Tentukan besar energi per satuan waktu yang diperlukan bagi arus untuk melewati permukaan kawat!

**Jawaban:**

Medan listrik parallel pada kawat dinyatakan dengan

$$\mathbf{E} = \frac{V}{L}$$

Medan magnet yang dihasilkan oleh kawat lurus berarus dinyatakan dengan

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2\pi a}$$

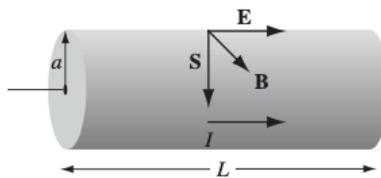
Dengan  $a$  menunjukkan jarak titik terhadap sumbu kawat.

Dengan demikian, besar vektor Poyntingnya adalah

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{V}{L} \right) \left( \frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2\pi a} \right) = \frac{VI}{2\pi aL}$$

Dengan arah keluar dari kawat secara radial (Gambar 3.31).

Gambar 3. 31 Vektor Poynting pada kawat lurus berarus



Besar energi per satuan waktu yang keluar dari permukaan kawat adalah

$$\int \mathbf{S} \cdot d\mathbf{a} = S(2\pi aL) = VI$$

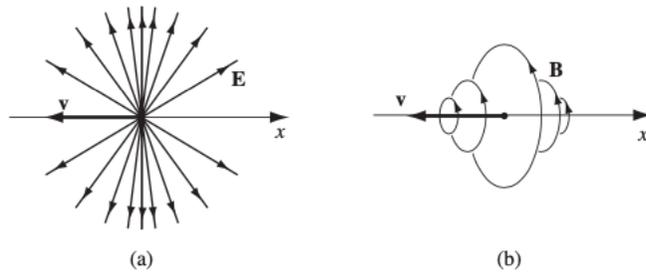
### 3. Momentum

Hukum konservasi yang berlaku pada fenomena elektromagnetik kemudian adalah hukum kekekalan momentum. Momentum secara khusus berhubungan dengan hukum III Newton, tentang aksi – reaksi.

#### a. Hukum ketiga Newton pada Elektrodinamika

Bayangkan sebuah muatan  $q$  melintasi sepanjang sumbu  $x$  dengan kelajuan konstan  $v$ . karena muatan tersebut bergerak, maka medan listrik yang dihasilkannya tidak dinyatakan dengan hukum Coulomb, namun arahnya tetap secara radial keluar dari posisi instan dari muatan (Gambar 3.32.a).

Gambar 3. 32 Medan listrik dan Medan magnet dari kawat lurus berarus

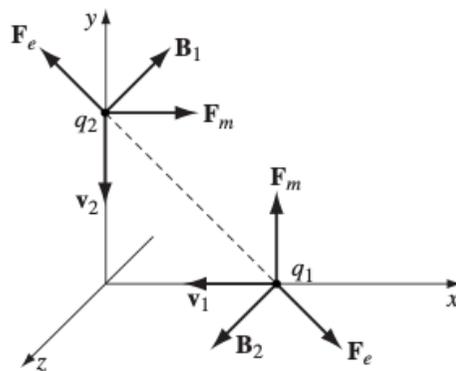


Sumber: (Griffith, 2012)

Muatan titik yang bergerak tidak mengacu pada arus tunak, maka medan magnetic yang dihasilkannya tidak dinyatakan dalam hukum Biot-Savart. Meskipun demikian, bentuk medan magnet yang ditimbulkannya masih berupa lingkaran (Gambar 3.32. b) dan sesuai dengan kaidah tangan kanan.

Sekarang kita masukkan satu buah muatan lain  $q_2$  yang identic dengan muatan semula. Muatan kedua bergerak sepanjang sumbu  $y$  dengan besar kecepatan yang sama dengan muatan pertama. Saat kedua muatan ini saling bergerak bersamaan, tentunya kemudian timbul gaya elektromagnetik antara keduanya. Gaya elektromagnetik ini akan membuat kedua muatan untuk meninggalkan sumbu arah gerak semula nya masing-masing, tapi kemudian kita asumsikan bahwa kedua muatan tetap berada pada lintasannya, sehingga keduanya akan bergerek dengan kecepatan yang sama besar (Gambar 3.33).

Gambar 3. 33 Gaya elektrostatik pada dua muatan yang identic, dengan kecepatan yang sama, masing- masing pada komponen  $x$  dan  $y$



Sumber: (Griffith, 2012)

Gaya elektrostatik yang dialami keduanya adalah tolak menolak, namun bagaimana dengan besar gaya magnetnya?

Untuk menjawabnya, kita perhatikan Gambar 3.33. Besar medan magnetik dari  $q_1$  adalah masuk bidang (pada posisi  $q_2$ ), maka gaya magnetic pada  $q_2$  adalah ke kanan. Sementara medan magnet  $q_2$  mengarah keluar dari bidang (pada posisi  $q_1$ ) dan gaya magnet dari  $q_1$  adalah keatas. Gaya elektromagnetik dari  $q_1$  yang dialami oleh  $q_2$  adalah setara namun tidak berlawanan arah dengan gaya dari  $q_2$  yang dialami pada  $q_1$ . Dengan demikian hukum aksi- reaksi berlaku pada elektrostatika dan magnetostatika, namun tidak berlaku pada elektrodinamika.

### b. Tensor Tegangan Maxwell

Tensor tegangan Maxwell adalah besaran yang berperan dalam menunjukkan besar gaya yang terdapat pada medan elektrodinamika. Mari kita menghitung total gaya elektromagnetik pada muatan-muatan di Gambar 3.33 dalam volume  $V$ .

$$\mathbf{F} = \int_V (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})\rho \, d\tau = \int_V (\rho\mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}) \, d\tau \quad 3.140$$

Besar gaya per satuan volume kemudian menjadi

$$\mathbf{f} = \rho\mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad 3.141$$

Kemudian dalam Hukum Maxwell (i) dan (iv) kita peroleh

$$\mathbf{f} = \rho(\nabla \cdot \mathbf{E})\mathbf{E} + \left(\frac{1}{\mu_0}\nabla \times \mathbf{B} - \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right) \times \mathbf{B} \quad 3.142$$

Kini

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) = \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \times \mathbf{B}\right) + \left(\mathbf{E} \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\right) \quad 3.143$$

Dan hukum Faraday mengatakan

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

Sehingga

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \times \mathbf{B} = \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) + \mathbf{E} \times (\nabla \times \mathbf{E}) \quad 3.144$$

dan menghasilkan

$$\mathbf{f} = \epsilon_0 [(\nabla \cdot \mathbf{E})\mathbf{E} - \mathbf{E} \times (\nabla \times \mathbf{E})] - \frac{1}{\mu_0} [\mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B})] - \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad 3.145$$

Untuk membuat persamaan yang lebih simetris, dengan menggunakan aturan keempat diperoleh

$$\nabla(E^2) = 2(\mathbf{E} \cdot \nabla)\mathbf{E} + 2\mathbf{E} \times (\nabla \times \mathbf{E})$$

Sehingga

$$\mathbf{E} \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \frac{1}{2} \nabla (E^2) - (\mathbf{E} \cdot \nabla) \mathbf{E}$$

Dan hal yang sama kita lakukan dengan  $\mathbf{B}$ , sehingga

$$\begin{aligned} \mathbf{f} = \varepsilon_0 [(\nabla \cdot \mathbf{E})\mathbf{E} + (\mathbf{E} \cdot \nabla)\mathbf{E}] + \frac{1}{\mu_0} [(\nabla \cdot \mathbf{B})\mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{B}] - \frac{1}{2} \nabla \left( \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) \\ - \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \end{aligned}$$

Persamaan diatas sangat panjang, namun dapat dimodifikasi dalam bentuk yang lebih ringkas dengan menggunakan **Tensor tegangan Maxwell**

Tensor tegangan Maxwell dinyatakan dengan

$$T_{ij} \equiv \varepsilon_0 \left( E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) + \frac{1}{\mu_0} \left( B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right) \quad 3.146$$

Dengan indeks I dan j mengacu pada koordinat x, y, dan z. sehingga tensor tegangan memiliki 9 komponen ( $T_{xx}, T_{yy}, T_{zz}, T_{xy}$  dan seterusnya). **Delta kroneker**  $\delta_{ij}$  bernilai 1 jika indeksnya sama ( $\delta_{ii} = \delta_{jj} = \delta_{kk} = 1$ ) dan bernilai nol jika sebaliknya ( $\delta_{ij} = \delta_{jk} = \delta_{ki} = 0$ ). Sehingga

$$\begin{aligned} T_{xx} &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_x^2 - E_y^2 - E_z^2) + \frac{1}{2\mu_0} (B_x^2 - B_y^2 - B_z^2) \\ T_{xy} &= \varepsilon_0 (E_x E_y) + \frac{1}{\mu_0} (B_x B_y) \end{aligned}$$

Dan seterusnya.

Karena tensor membawa dua indeks, dimana vektor hanya memiliki satu. Tensor  $T_{ij}$  biasanya ditulis dalam anak panah dengan dua arah:  $\vec{\mathbf{T}}$ . Bentuk perkalian dot sebuah vektor terhadap tensor dinyatakan dengan

$$(\mathbf{a} \cdot \vec{\mathbf{T}})_j = \sum_{i=x,y,z} a_i T_{ij} \quad 3.147$$

Hasil dari produk ini menghasilkan sebuah indeks, sehingga hasilnya adalah sebuah vektor. Secara khusus, divergensi dari  $\vec{\mathbf{T}}$  memiliki komponen j

$$\begin{aligned} (\nabla \cdot \vec{\mathbf{T}})_j &= \varepsilon_0 \left[ (\nabla \cdot \mathbf{E}) E_j + (\mathbf{E} \cdot \nabla) E_j - \frac{1}{2} \nabla_j E^2 \right] \\ &+ \frac{1}{\mu_0} \left[ (\nabla \cdot \mathbf{B}) B_j + (\mathbf{B} \cdot \nabla) B_j - \frac{1}{2} \nabla_j B^2 \right] \end{aligned}$$

Sehingga gaya per satuan volume dapat dituliskan dalam bentuk yang lebih sederhana

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \vec{\mathbf{T}} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t} \quad 3.148$$

Dimana  $\mathbf{S}$  adalah vektor Poynting.

Maka total gaya pada muatan muatan dalam  $V$  adalah

$$\mathbf{F} = \oint_S \vec{\mathbf{T}} \cdot d\mathbf{a} - \epsilon_0 \mu_0 \int_V \mathbf{S} d\tau \quad 3.149$$

### c. Konservasi Momentum linier

Berdasarkan Hukum II Newton, gaya pada benda setara dengan laju perubahan momentumnya

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}_{mech}}{dt} \quad 3.140$$

Maka momentum mekanik dapat kita turunkan kedalam momentum elektromagnetik sebagai berikut

$$\frac{d\mathbf{p}_{mech}}{dt} = \oint_S \vec{\mathbf{T}} \cdot d\mathbf{a} - \epsilon_0 \mu_0 \int_V \mathbf{S} d\tau \quad 3.141$$

Persamaan 3.141 adalah bentuk umum dari konservasi momentum pada elektrodinamika. Setiap perubahan total momentum (mekanik dan elektromagnetik) setara dengan momentum yang dibawa oleh medan. Integral pertama akan menunjukkan momentum yang tersimpan dalam medan elektromagnetik:

$$\mathbf{p}_{em} = \epsilon_0 \mu_0 \int_V \mathbf{S} d\tau \quad 3.142$$

Sementara integral kedua adalah momentum per satuan waktu saat mengalir di seluruh permukaan.

Berdasarkan konservasi muatan dan konservasi energi, maka konservasi momentum dapat dituliskan dalam bentuk persamaan diferensial. Kita gunakan sebagai densitas dari momentum mekanik  $\wp_{mech}$ , dan sebagai densitas momentum dalam medan  $\wp_{em}$ :

$$\wp_{em} = \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{S} \quad 3.143$$

Dalam bentuk persamaan diferensial menjadi

$$\frac{\partial}{\partial t} (\wp_{em} + \wp_{mech}) = \nabla \cdot \vec{\mathbf{T}} \quad 3.144$$

Dengan  $\vec{\mathbf{T}}$  adalah tensor tegangan Maxwell atau sebagai densitas fluks momentum yang menggambarkan aliran momentum (densitas arus momentum) yang hantarkan oleh medan.

#### d. Konservasi Momentum anguler

Kini kita dapat menyatakan bahwa medan elektromagnetik memiliki energinya sendiri, yaitu sebesar

$$u_{em} = \frac{1}{2} \left( \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) \quad 3.145$$

Dan momentum

$$\wp_{em} = \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{S} = \epsilon_0 (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad 3.146$$

Serta momentum anguler yang dapat kita nyatakan dengan

$$\ell_{em} = \mathbf{r} \times \wp_{em} \quad 3.147$$

## B. Gelombang pada satu dimensi

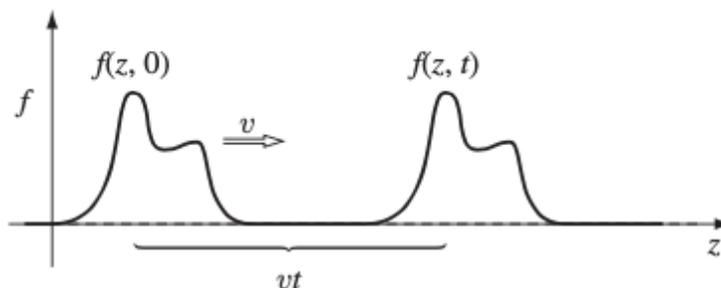
### 1. Persamaan gelombang

Apa yang dimaksud dengan gelombang? Gelombang adalah gangguan (getaran) yang merambat (mengalami propagasi) dengan bentuk yang tetap pada kecepatan konstan. Pada gelombang yang mengalami adsorpsi, maka ukuran dari gelombang akan mengalami penyusutan.

Jika terjadi dispersi, maka gelombang akan merambat pada frekuensi yang berbeda-beda. Pada dimensi dua atau dimensi tiga, gelombang menyebar keluar akan mengalami penyusutan amplitude. Gelombang yang tidak mengalami propagasi disebut sebagai gelombang berdiri.

Studi tentang gelombangkali ini dimulai dengan gelombang dengan bentuk dan kelajuan yang tetap (Gambar 3.34).

Gambar 3. 34 Gelombang dengan bentuk dan kelajuan tetap



Sumber: (Griffith, 2012)

Pada Gambar 3.34 disajikan sebuah gelombang pada waktu yang berbeda, satu pada  $t = 0$  dan satu lagi pada waktu  $t$  kemudian. Stiap titik pada gelombang bergeser ke kanan sejauh  $vt$ , dimana  $v$  adalah kecepatan. Kita anggap gambar

diatas adalah gelombang pada sebuah tali. fungsi  $f(z, t)$  merepresentasikan perpindahan dari tali pada titik  $z$  di waktu  $t$ . dengan memberikan bentuk awal dari tali,  $g(z) \equiv f(z, 0)$ .

Perpindahan pada titik  $z$  pada waktu  $t$  memiliki besar perpindahan yang sama dengan waktu sebelumnya.

$$f(z, t) = f(z - vt, 0) = g(z - vt) \quad 3.148$$

Secara matematis, persamaan diatas adalah esensi dari gerak gelombang. Fungsi  $f(z,t)$  mungkin bergantung pada  $z$  dan  $t$  yang merepresentasikan sebuah gelombang dengan ukuran yang tetap merambat pada arah  $z$  dengan kelajuan  $v$ . Sebagai contoh jika  $A$  dan  $b$  adalah konstanta, maka

$$f_1(z, t) = Ae^{-b(z-vt)^2}$$

$$f_2(z, t) = A \sin[b(z - vt)]$$

$$f_3(z, t) = \frac{A}{b(z - vt)^2 + 1}$$

Semua merepresentasikan gelombang (dengan ukuran yang berbeda), namun

$$f_4(z, t) = Ae^{-b(bz^2+vt)}$$

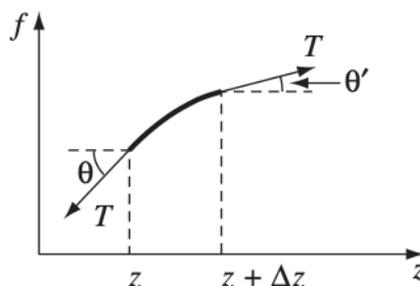
$$f_5(z, t) = A \sin(bz) \cos(bvt)^3$$

Bentuk persamaangelombang 4 dan 5 ini berbeda dengan sebelumnya.

Kenapa tali yang diterikkan mendukung gerak gelombang? Sebenarnya ini mengikuti Hukum II Newton. Bayangkan sebuah tali dengan tegangan  $T$ . jika dipindahkan dari keadaan seimbang, maka gaya transversal netto dari segmen dibawah  $z$  dan  $z + \Delta z$  (Gambar 3.35) adalah

$$\Delta F = T \sin \theta' - T \sin \theta$$

Gambar 3. 35 simpangan terhadap gaya f



Sumber: (Griffith, 2012)

Dimana  $\theta'$  adalah sudut yang dibentuk oleh tali dengan membuat arah  $z$  pada titik  $z + \Delta z$  dan  $\theta$  adalah arah yang dibentuk oleh sudut terhadap titik  $z$ . Jika diberikan

distorsi yang kecil pada tali, maka sudut-sudut ini akan sangat kecil, sehingga dapat digantikan dengan tangen:

$$\Delta F \cong T(\tan \theta' - \tan \theta) = T \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \Delta z$$

Jika massa per satuan panjang dinyatakan dalam  $\mu$ , maka hukum II Newton dapat dinyatakan dalam

$$\Delta F = \mu(\Delta z) \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

Dan

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{\mu}{T} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

Maka gangguan kecil pada tali akan memenuhi

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad 3.149$$

Dengan

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad 3.150$$

Persamaan 3.149 adalah **persamaan umum gelombang**. Karena semua memenuhi

$$f(z, t) = g(z - vt)$$

Persamaan gelombang juga melibatkan  $v$  kuadrat, sehingga kita dapat menghasilkan solusi lain dengan mengganti tanda kecepatan menjadi

$$f(z, t) = h(z + vt) \quad 3.151$$

Dan kemudian ssumasi gelombang dari kiri dan sebuah gelombang dari kanan

$$f(z, t) = g(z - vt) + h(z + vt) \quad 3.152$$

## 2. Gelombang Sinusoidal

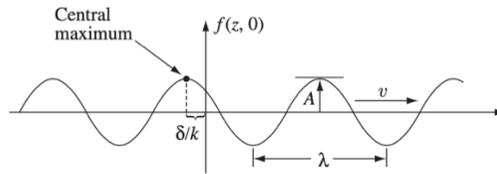
### a) Terminologi

Bentuk sinusoidal adalah bentuk persamaan gelombang yang paling familiar (Gambar 3.36)

$$f(z, t) = A \cos[k(z - vt) + \delta] \quad 3.153$$

Gambar 3.36 menampilkan fungsi gelombang pada waktu  $t=0$ .  $A$  adalah amplitude dari gelombang (nilainya positif dan merepresentasikan perpindahan maksimum dari titik setimbang). Argumen dari cosinus disebut sebagai fase dan  $\delta$  disebut sebagai **konstanta fase**. Konstanta fase ini biasanya dapat ditambahkan pengali  $2\pi$  tanpa harus mengubah  $f(z, t)$ , biasanya dalam rentang  $0 \leq \delta < 2\pi$ ).

Gambar 3. 36 Gelombang Sinusoidal



Sumber: (Griffith, 2012)

Perhatikan bahwa pada  $z = vt - \frac{\delta}{k}$ , fasenya adalah nol; yang kemudian disebut sebagai pusat maksimum. Jika  $\delta = 0$ , pusat maksimum melewati origin pada wktu  $t = 0$ , secara lebih umum,  $\frac{\delta}{k}$  adalah jarak antara pusat maksimum tertinggal. Dengan  $k$  adalah bilangan gelombang, yang berhubungan dengan panjang gelombang  $\lambda$  dengan persamaan.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad 3.154$$

Dengan berjalannya waktu, seluruh proses sudah berjalan ke kanan dengan kelajuan  $v$ . pada titik  $z$ , tali bervibrasi naik dan turun dan melakukan satu periode

$$T = \frac{2\pi}{kv} \quad 3.155$$

Frekuensi  $\nu$  adalah jumlah osilasi per satuan waktu yang dinyatakan dengan

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\nu}{\lambda} \quad 3.156$$

Pada persamaan gelombang akan banyak menggunakan frekuensi angular  $\omega$ , yang dinyatakan sebagai jumlah radian yang disapu per satuan waktu

$$\omega = 2\pi\nu = kv \quad 3.157$$

Biasanya, lebih mudah untuk menuliskan persamaan sinusoidal dalam menyatakan persamaan gelombang dalam bentuk  $\omega$  jika dibandingkan dengan  $\nu$

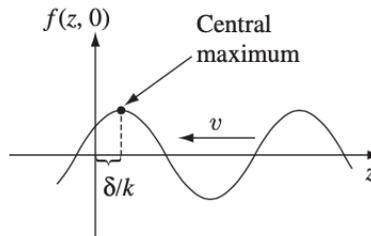
$$f(z, t) = A \cos(kz - \omega t + \delta) \quad 3.158$$

Pada osilasi sinusoidal dari bilangan gelombang  $k$  dan frekuensi angular merambat ke kiri diberikan oleh

$$f(z, t) = A \cos(kz + \omega t - \delta) \quad 3.158$$

Tanda fase konstan dipilih sebagaikonsistensi dengan perjanjian sebelumnya bahwa  $\frac{\delta}{k}$  harus merepresenasikan jarak “tertinggal”. (jika gelombang bergerak ke kanan, maka “ketertinggalan” bergerak ke kiri). Pada  $t=0$  gelombang terlihat seperti Gambar.

Gambar 3. 37 Gelombang dalam fungsi cosinus



Sumber: (Griffith, 2012)

Karena fungsi kosinus genap, maka kita dapat menuliskan bentuknya menjadi

$$f(z, t) = A \cos(-kz - \omega t + \delta) \quad 3.158$$

Perbandingan ini menunjukkan kita dapat menyederhanakan tanda k untuk menghasilkan sebuah gelombang yang memiliki amplitude, konstanta fase, frekuensi, dan panjang gelombang dengan rambatan yang berlawanan arah.

### b) Notasi kompleks

Persamaan gelombang juga dapat ditulis dalam bilangan kompleks

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad 3.159$$

Persamaan sinusoidal dapat dituliskan dalam bentuk

$$f(z, t) = \text{Re}[Ae^{i(kz - \omega t + \delta)}] \quad 3.160$$

Dimana  $\text{Re}(\xi)$  menunjukkan bagian real dari bilangan kompleks  $\xi$ . Persamaan ini mengundang kita untuk berkenalan dengan **fungsi gelombang kompleks**.

$$f(z, t) \equiv Ae^{i(kz - \omega t)} \quad 3.161$$

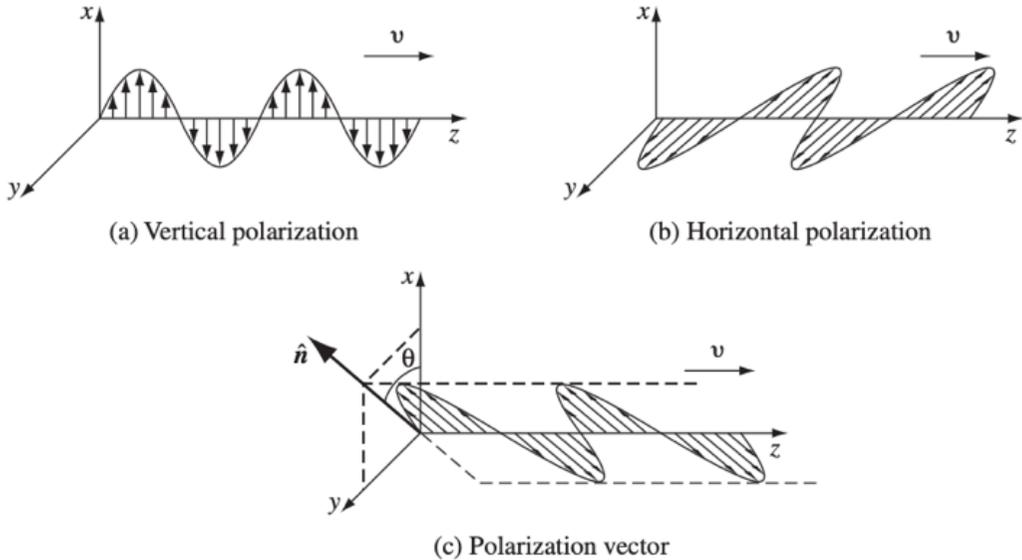
Dengan bilangan kompleks

$$A \equiv Ae^{i\delta} \quad 3.162$$

## 3. Polarisasi

Ada dua jenis gelombang berdasarkan arah rambatnya. Ada gelombang transversal yang arah rambatnya tegak lurus dengan arah getarnya, contohnya gelombang tali. Kemudian ada gelombang longitudinal yang arah rambatnya sejajar dengan arah getar, contoh gelombang bunyi. Gelombang elektromagnetik adalah gelombang transversal. Gelombang elektromagnetik adalah gelombang transversal karena memiliki polarisasi.

Gambar 3. 38Polarisasi pada gelombang elektromagnetik



Sumber: (Griffith, 2012)

Pada gelombang elektromagnetik terjadi **polarisasi** yang disebabkan oleh adanya propagasi yang saling tegak lurus (Gambar. Polarisasi ini memiliki komponen “up” dan “down” (Gambar a), yang kita nyatakan dengan

$$\mathbf{f}_v(z, t) = Ae^{i(kz-\omega t)}\hat{\mathbf{x}} \quad 3.163$$

Dan komponen polarisasi “kiri” dan “kanan” (Gambar b), yang dinyatakan dengan

$$\mathbf{f}_h(z, t) = Ae^{i(kz-\omega t)}\hat{\mathbf{y}} \quad 3.164$$

Atau pada sepanjang arah manapun, pada bidang x-y berlaku.

$$\mathbf{f}(z, t) = Ae^{i(kz-\omega t)}\hat{\mathbf{n}} \quad 3.165$$

**Vektor polarisasi**  $\hat{\mathbf{n}}$  mendefinisikan vibrasi pada bidang karena gelombangnya adalah transversal, maka vektor polarisasi ini juga tegak lurus dengan arah rambatan.

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{z}} = 0 \quad 3.166$$

Dalam bentuk **sudut polarisasi** diberikan

$$\hat{\mathbf{n}} = \cos \theta \hat{\mathbf{x}} + \sin \theta \hat{\mathbf{y}} \quad 3.167$$

Sehingga, gelombang elektromagnetik tampak seperti pada Gambar c dapat dilihat terdiri atas dua gelombang yang saling berpadu, komponen gelombang pertama adalah horizontal sementara komponen gelombang kedua adalah vertical.

$$\mathbf{f}(z, t) = (A \cos \theta)e^{i(kz-\omega t)}\hat{\mathbf{x}} + (A \sin \theta)e^{i(kz-\omega t)}\hat{\mathbf{y}} \quad 3.168$$

## C. Elektromagnetik pada vakum

### 1. Persamaan Gelombang untuk $E$ dan $B$

Pada ruang hampa (tidak ada muatan), maka persamaan Maxwell akan menjadi (Tabel 3.6)

Tabel 3. 6 Persamaan Maxwell pada ruang vakum

No	Persamaan	Nama Hukum
(i)	$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$	Hukum Gauss
(ii)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	-
(iii)	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Hukum Faraday
(iv)	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	Hukum Ampere

Dari Tabel 3.6 dapat diamati bahwa persamaan (iii) dan (iv) adalah pasangan yang saling melengkapi. Kedua persamaan ini kemudian kita lakukan operasi curl sehingga diperoleh

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) &= \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = \nabla \times \left( -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad 3.169$$

dan

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) &= \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} = \nabla \times \left( \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \\ &= -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad 3.170$$

Kemudian kita masukkan  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$  dan  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

Selanjutnya diperoleh

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad 3.171$$

Dan

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad 3.172$$

Persamaan 3.171 dan 3.172 menunjukkan bentuk analog dari medan listrik dan medan magnet. Pada keadaan vakum, setiap komponen kartesian dari  $E$  dan  $B$  memenuhi persamaan gelombang tiga dimensi, yang memenuhi

$$\nabla^2 f = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad 3.173$$

Maka melalui Hukum Maxwell diperoleh bahwa ruang hampa mendukung terjadinya perambatan gelombang elektromagnetik, atau dengan kata lain gelombang elektromagnetik tidak memerlukan medium untuk merambat. Besar kelajuan gelombang elektromagnetik pada ruang hampa adalah sebesar:

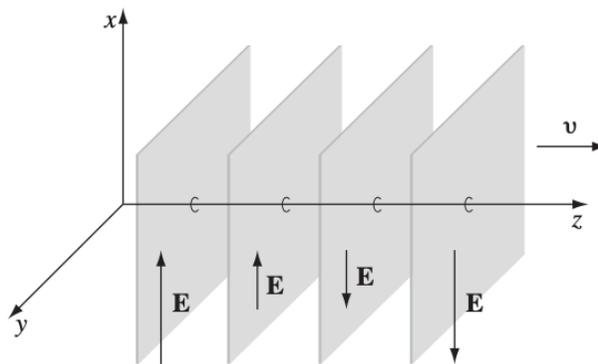
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s} \quad 3.174$$

Pada masa itu, Maxwell dengan pendekatan teori dan matematis telah menemukan laju gelombang elektromagnetik pada ruang hampa. Ia memperoleh gelombang elektromagnetik merambat dengan laju konstan pada ruang hampa. Besar laju ini kemudian baru dibuktikan melalui percobaan beberapa dekade kemudian.

## 2. Gelombang bidang monokromatis

Dengan menggunakan gelombang sinusoidal, maka kemudian kita bisa mendeskripsikan spektrum gelombang elektromagnetik dengan cara menyatakan persamaan gelombang dalam frekuensi. Anggap gelombang merambat pada arah  $z$  dan tidak memiliki kebergantungan pada komponen  $x$  dan  $y$ . gelombang seperti ini disebut sebagai **gelombang bidang**, karena medan pada gelombang adalah seragam, pada seluruh arah tegak lurus terhadap arah propagasinya (Gambar 3.39).

Gambar 3. 39 Arah propagasi pada gelombang bidang



Sumber: (Griffith, 2012)

Medan ini kemudian kita nyatakan dengan

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}_0 e^{i(kz - \omega t)} \quad 3.175$$

Dan

$$\mathbf{B}(z, t) = \mathbf{B}_0 e^{i(kz - \omega t)} \quad 3.176$$

Dimana  $\mathbf{E}_0$  dan  $\mathbf{B}_0$  adalah amplitude dari  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{B}$  masing-masing. Karena  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$  dan  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ , maka berlaku

$$(E_0)_z = (B_0)_z = 0 \quad 3.177$$

Oleh sebab itu, gelombang elektromagnetik adalah gelombang transversal. Medan listrik dan medan magnetic saling tegak lurus terhadap arah propagasi. Sebagai tambahan lagi, hukum Faraday  $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$  menunjukkan sebuah relasi antara medan listrik dan medan magnet, untuk membuktikan:

$$-k(E_0)_y = \omega(B_0)_x \quad 3.178.a$$

Dan

$$-k(E_0)_x = \omega(B_0)_y \quad 3.178.b$$

Atau lebih singkatnya

$$\mathbf{B}_0 = \frac{k}{\omega} (\hat{\mathbf{z}} \times \mathbf{E}_0) \quad 3.179$$

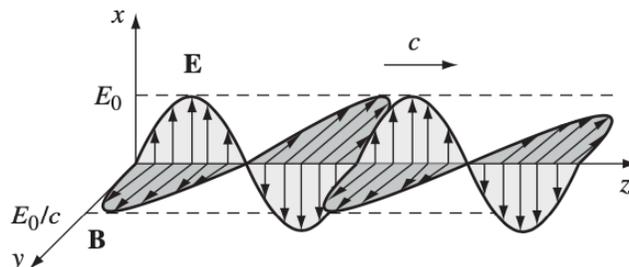
Maka sekarang telah terbukti,  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{B}$  adalah sefase dan saling tegak lurus; amplitude keduanya saling berhubungan dengan persamaan:

$$B_0 = \frac{k}{\omega} E_0 = \frac{1}{c} E_0 \quad 3.180$$

Hukum Maxwell yang keempat,  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right)$  tidak hanya menunjukkan keadaan terbatas, secara sederhananya adalah keduanya saling mereproduksi sesuai persamaan 3.178.

Ilustrasi dari gelombang bidang monokrom dari gelombang elektromagnetik diberikan pada Gambar 3.40.

Gambar 3. 40 Medan  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{B}$  dan arah rambat pada Gelombang Elektromagnetik

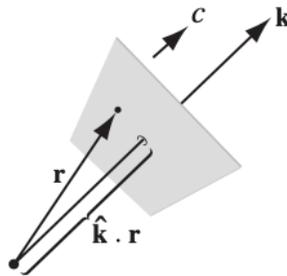


Sumber: (Griffith,2012)

Gelombang sebagai keseluruhan dikatakan terpolarisasi pada arah x (dengan perjanjian, kita gunakan arah E untuk menentukan polarisasi dari gelombang elektromagnetik).

Tidak ada yang khusus dengan arah z, tentu saja kita bisa menggeneralisir arah rambat gelombang bidang monokrom pada sumbu apapun. Notasi ini memfasilitasi kita dengan mengenalkan konsep **vektor propagasi** (atau vektor gelombang,  $\mathbf{k}$ ). Vektor gelombang  $\mathbf{k}$  menunjuk ke arah dimana propagasi gelombang, yang besarnya adalah sebesar bilangan gelombang  $k$ . Produk scalar  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$  sesuai dengan generalisir dari  $kz$  (Gambar 3.41).

Gambar 3. 41 Perkalian produk dari  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$



Sumber: (Griffith, 2012)

Sehingga

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = E_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \hat{\mathbf{n}} \quad 3.181.a$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{c} E_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} (\hat{\mathbf{k}} \times \hat{\mathbf{n}}) = \frac{1}{c} \hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{E} \quad 3.181.b$$

Dimana  $\hat{\mathbf{n}}$  adalah vektor polarisasi. Karena  $\mathbf{E}$  adalah transversal maka

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{k}} = 0 \quad 3.182$$

Transversalitas dari  $\mathbf{B}$  mengikuti persamaan 3.181. Medan listrik dan medan magnet secara aktual adalah gelombang bidang monokromatik dengan vektor propagasi  $\mathbf{k}$  dan polarisasi  $\hat{\mathbf{n}}$  kita nyatakan dengan

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = E_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \delta) \hat{\mathbf{n}} \quad 3.183.a$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{c} E_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \delta) \hat{\mathbf{k}} \times \hat{\mathbf{n}} \quad 3.183.b$$

### 3. Energi dan Momentum dari Gelombang Elektromagnetik

Besar energi per satuan volum yang tersimpan dalam medan elektromagnetik adalah sebesar:

$$u = \frac{1}{2} \left( \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) \quad 3.184$$

Pada kasus gelombang bidang monokromatis berlaku

$$B^2 = \frac{1}{c^2} E^2 = \mu_0 \epsilon_0 E^2 \quad 3.185$$

Sehingga medan listrik dan medan magnet memiliki kontribusi yang setara:

$$u = \epsilon_0 E^2 = \epsilon_0 E^2 \cos^2(kz - \omega t + \delta) \quad 3.186$$

Ketika gelombang merambat, gelombang ini membawa energi bersamanya. Densitas fluks energi (energi per satuan luas) yang dibawa oleh medan diberikan oleh Teorema Poynting.

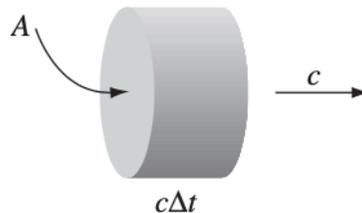
$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad 3.187$$

Untuk gelombang monokrom yang berpropagasi di arah sumbu z

$$\mathbf{S} = c \epsilon_0 E_0^2 \cos^2(kz - \omega t + \delta) \hat{\mathbf{z}} = c u \hat{\mathbf{z}} \quad 3.188$$

Perhatikan bahwa  $\mathbf{S}$  adalah densitas energi ( $u$ ) dikali dengan kecepatan gelombang  $c \hat{\mathbf{z}}$ . Pada sebuah selang waktu  $\Delta t$ , sepanjang  $c \Delta t$  yang melalui permukaan  $A$  (Gambar 3.42), membawa energi sebesar  $u A c \Delta t$ . Energi per satuan waktu yang dipindahkan oleh gelombang adalah sebesar  $uc$

Gambar 3. 42 Propagasi gelombang elektromagnetik dengan laju  $c$



Sumber: (Griffith, 2012)

Medan elektromagnetik tidak hanya membawa energi, tapi juga momentum. Pada kenyataannya densitas momentum yang tersimpan pada medan adalah

$$\wp = \frac{1}{c^2} \mathbf{S} \quad 3.189$$

Untuk gelombang bidang kemudian menjadi

$$\wp = \frac{1}{c} \epsilon_0 E_0^2 \cos^2(kz - \omega t + \delta) \hat{\mathbf{z}} = \frac{1}{c} u \hat{\mathbf{z}} \quad 3.190$$

Pada kasus cahaya, gelombang memiliki panjang gelombang yang sangat pendek ( $\sim 5 \times 10^{-7}$  m) dan periode rambatannya juga sangat singkat ( $\sim 10^{-15}$  s). secara khusus, energi dan momentum pada pembelajaran kali ini tidak dinyatakan dalam bentuk kuadrat kosinus, melainkan dalam bentuk nilai rerata. Kini, rerata dari kuadrat kosinus pada sebuah siklus penuh adalah  $\frac{1}{2}$  sehingga:

$$\langle u \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 \quad 3.191$$

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \hat{\mathbf{z}} \quad 3.192$$

$$\langle \phi \rangle = \frac{1}{2c} \epsilon_0 E_0^2 \hat{\mathbf{z}} \quad 3.193$$

Penggunaan braket disini untuk menunjukkan berapa kali nilai rata-rata diseluruh siklus penuh (atau banyak siklus). Rerata Daya per satuan luas dibawa oleh gelombang elektromagnetik kemudian disebut sebagai **intensitas**, yang dinyatakan dengan:

$$I \equiv \langle S \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \quad 3.194$$

## Rangkuman

### A. Hukum konservasi

#### 1. Persamaan kontinuitas

Pada fenomena elektromagnetik, berlaku hukum kekekalan muatan yang menyatakan bahwa : Jumlah arus yang masuk sama dengan jumlah arus yang keluar.

$$-\nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

#### 2. Teorema Poynting

a. Teorema poynting adalah teorema yang mendefinisikan usaha atau kerja pada medan elektromagnetik.

b. Usaha atau energi pada medan elektromagnetik dinyatakan dengan vektor pointing atau densitas fluks energi.

c. Bentuk vektor poynting menurut hukum konservasi adalah

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_V \frac{1}{2} \left( \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) d\tau - \frac{1}{\mu_0} \oint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{a}$$

d. Bentuk vektor poynting dalam divergensi adalah

$$\mathbf{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E} \times \mathbf{B})$$

#### 3. Momentum

##### a. Hukum Ketiga Newton

elektrostatika dan magnetostatik mematuhi hukum III Newton, sedangkan elektrodinamika tidak.

b. Tensor tegangan Maxwell

1) Tensor tegangan Maxwell adalah total gaya elektromagnetik pada muatan-muatan di dalam volume  $V$ .

2) Tensor tegangan Maxwell dinyatakan dengan

$$T_{ij} \equiv \epsilon_0 \left( E_1 E_2 - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) + \frac{1}{\mu_0} \left( B_1 B_2 - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right)$$

3) Total gaya yang dialami muatan dalam volume dinyatakan dengan

$$\mathbf{F} = \oint_S \vec{\mathbf{T}} \cdot d\mathbf{a} - \epsilon_0 \mu_0 \int_V \mathbf{S} d\tau$$

B. Gelombang satu dimensi

1. Persamaan gelombang

Persamaan umum gelombang dinyatakan dengan

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

2. Gelombang sinusoidal

a. Bentuk sinusoidal adalah bentuk persamaan gelombang yang paling familiar

$$f(z, t) = A \cos[k(z - vt) + \delta]$$

b. Persamaan gelombang juga dapat ditulis dalam bilangan kompleks

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad 3.159$$

c. Persamaan sinusoidal dapat dituliskan dalam bentuk

$$f(z, t) = \text{Re}[Ae^{i(kz - \omega t + \delta)}] \quad 3.160$$

3. Polarisasi

Gelombang elektromagnetik adalah gelombang transversal karena memiliki polarisasi. Polarisasi pada gelombang elektromagnetik ditandai dengan adanya propagasi pada dua arah yang saling tegak lurus.

C. Elektromagnetik pada vakum

1. Gelombang elektromagnetik menurut Maxwell

Hukum Maxwell memperoleh bahwa ruang hampa mendukung terjadinya perambatan gelombang elektromagnetik, atau dengan kata lain gelombang elektromagnetik tidak memerlukan medium untuk merambat.

Besar kelajuan gelombang elektromagnetik pada ruang hampa adalah sebesar:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s} \quad 3.174$$

2. Gelombang bidang monokromatis

Medan listrik dan medan magnet secara aktual adalah gelombang bidang monokromatik dengan vektor propagasi  $\mathbf{k}$  dan polarisasi  $\hat{\mathbf{n}}$  kita nyatakan dengan

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = E_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \delta) \hat{\mathbf{n}}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{c} E_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \delta) \hat{\mathbf{k}} \times \hat{\mathbf{n}}$$

### C. Energi dan Momentum pada Gelombang Elektromagnetik

1. Energi ( $u$ ), densitas fluks energi ( $\mathbf{S}$ ) dan momentum ( $\wp$ ) gelombang elektromagnetik dalam bentuk rerata dinyatakan dengan

$$\langle u \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2$$

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \hat{\mathbf{z}}$$

$$\langle \wp \rangle = \frac{1}{2c} \epsilon_0 E_0^2 \hat{\mathbf{z}}$$

2. Rerata Daya per satuan luas dibawa oleh gelombang elektromagnetik kemudian disebut sebagai **intensitas**, yang dinyatakan dengan:

$$I \equiv \langle S \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$$

## Tes Formatif

### A. Pilihan Ganda

1. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) kekekalan energi
- (2) kekekalan muatan
- (3) kekekalan momentum
- (4) kekekalan medan

Hukum konservasi yang berlaku pada fenomena elektromagnetik adalah...

- |                  |                |
|------------------|----------------|
| a. (1), (2), (3) | d. (4) saja    |
| b. (1) dan (3)   | e. semua benar |
| c. (2) dan (4)   |                |

2. “Usaha yang dilakukan pada muatan oleh gaya elektromagnetik setara dengan penurunan energi yang tersimpan dalam medan, semakin ia meninggalkan permukaannya maka semakin kecil energi yang tersimpan”.

Pernyataan diatas adalah bunyi dari...

- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| a. Teorema Poynting   | d. Teorema Biot-savart |
| b. Teorema pythagoras | e. Teorema Gauss       |

c. Teorema Euler

3. Berikut ini adalah gejala yang menunjukkan bahwa gelombang elektromagnetik adalah gelombang transversal adalah ...

- a. arah propagasi sejajar dengan arah getar
- b. terpolarisasi
- c. dapat menembus benda bening
- d. dapat dipantulkan
- e. dapat ditransmisikan

4. Melalui kajian teoritis, yang diperoleh Maxwell tentang gelombang elektromagnetik adalah ....

- a. hasil superposisi medan listrik dan medan magnet
- b. dapat merambat tanpa memerlukan medium
- c. merambat pada ruang vakum dengan kecepatan konstan
- d. memenuhi persamaan gelombang tiga dimensi
- e. Semua jawaban benar

5. Perhatikan pernyataan berikut:

(1) Gelombang elektromagnetik membawa energi (dalam rerata) sebesar

$$\langle u \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2$$

(2) Momentum yang tersimpan dalam medan elektromagnetik adalah  $\langle \rho \rangle =$

$$\frac{1}{2c} \epsilon_0 E_0^2 \hat{z}$$

(3) Densitas fluks energi ( $\mathbf{S}$ ) dalam medan elektromagnetik adalah sebesar

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \hat{z}$$

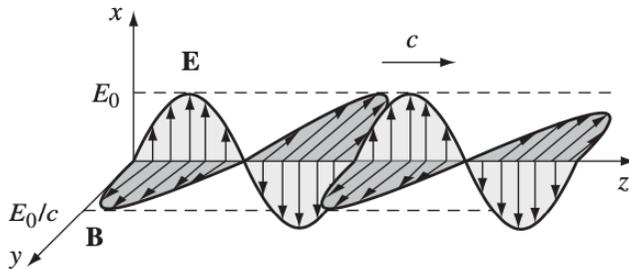
(4) Gelombang elektromagnetik adalah gelombang longitudinal

Pernyataan yang benar adalah ....

- a. (1), (2), (3)
- b. (1) dan (3)
- c. (2) dan (4)
- d. (4) saja
- e. semua benar

## B. Essay

Perhatikan gambar berikut:



Jelaskan bagaimana gelombang elektromagnetik terbentuk dan bagaimana gelombang elektromagnetik merambat. Bagaimana kontribusi medan listrik dan magnet di dalamnya ?

Jawaban

## Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum mencapai, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

## Referensi

- Griffiths, D. J. (2012). Introduction to electrodynamics 4<sup>th</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Kanginan, Marthen. (2018). Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan Matematika dan Ilmu-Ilmu Alam. Jakarta: Erlangga
- Halliday, Resnick. (2005) Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Effendi, Rustam, dkk. (2007). Medan Elektromagnetika terapan. Jakarta: Erlangga.
- Sailah, Siti, dkk. (2014). Medan Eleltromagnetik, Teori dan contoh soal. Yogyakarta: ANDI.



# Kegiatan Pembelajaran 4 Penerapan Medan Elektromagnetik pada Green Technology

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa mampu membuat desain alat yang menerapkan teori, hukum-hukum dan persamaan medan elektromagnetik pada teknologi seserhana tepat guna yang ramah lingkungan	Mahasiswa membuat desain alat yang menerapkan teori, hukum-hukum dan persamaan medan elektromagnetik pada teknologi seserhana tepat guna yang ramah lingkungan

## Proyek

1. Medan elektromagnetik banyak sekali diterapkan pada teknologi mutakhir saat ini, diantaranya maglev, pemerisaian, Efek Hall, Rel electromagnet, dan Magnetic Storage

Lakukanlah studi literatur, berselancarlah dengan internetmu, kemudian coba rancang desain alat berupa Teknologi tepat guna yang memanfaatkan teori, hukum, konsep, dan persamaan- persamaan medan elektromagnetik versimu sendiri, yang wajib sesuai dengan ketentuan berikut:

- alat ini bisa dipakai pada skala rumahan dan berorientasi pada kelestarian alam
- bisa beroperasi dengan medan listrik yang relatif kecil (sesuai dengan skala rumah tangga)
- memanfaatkan barang bekas
- buatlah desain gambarnya
- jelaskan cara kerjanya

Untuk mengerjakan Proyek ini kamu tinggal mengikuti format ini saja :

A. Identitas Nama Alat:
B. Pendahuluan ( jelaskan mengapa kamu memilih desain alat seperti ini)
C. Tujuan Desain Jelaskan apa tujuan yang kamu ingin capai dari desain alat ini.

#### D. Manfaat

Jelaskan apa manfaat apa saja yang diperoleh dari desain alat ini.

#### E. Kajian Teori (minimal 1 halaman)

(Buatlah kajian teori dari desain alat ini. Jika merupakan pengembangan dari penelitian yang sudah ada, jabarkan dimana keunggulan yang kamu adopsi dan dimana modifikasi yang kamu lakukan, sehingga desain yang kamu buat memiliki inovasi. Jangan lupa memasukkan persamaan – persamaan jika menurutmu penting untuk menjelaskan desain yang akan kamu lakukan)

Kajian teori yang boleh digunakan adalah dari jurnal penelitian, skripsi, tesis / disertasi. Boleh juga dari buku – buku teks, jika ada.

Kamu tidak boleh mengutip blog, cuitan, atau bahkan status di media social, karena tidak memenuhi kaidah ilmiah)

#### F. Metode

##### 1. Alat dan Bahan yang diperlukan :

(jangan lupa memanfaatkan barang bekas ke dalam desainmu)

No.	Nama Alat dan Bahan	Jumlah	Harga (estimasi)
1.			
2.			
...			
dst			

##### 2. Alur kerja

(buat diagram alur kerja desain, mulai dari persiapan, desain, pembuatan, dan uji coba alat. Jangan lupa beri penjelasan dari alur kerjanya !)

##### 3. Desain alat

(berikan gambar desain alat, dan jangan lupa beri penjelasan)

##### 4. Uji coba alat

Berikan penjelasan apa saja bentuk uji coba alat yang ingin kamu buat. Ada berapa uji coba yang akan kamu lakukan ? Jelaskan juga bagaimana kamu melakukan uji coba itu.

#### G. Daftar Referensi

(buat dalam format APA)



# Penutup

## 1. Rangkuman

Gelombang elektromagnetik merupakan gelombang yang memiliki muatan energi listrik dan magnet yang dapat merambat tanpa memerlukan medium. Artinya, gelombang elektromagnetik dapat merambat meskipun dalam ruang hampa sekalipun.

## 2. Daftar Istilah

DC	:	Arus searah
AC	:	Arus bolak-balik
Medan listrik	:	Efek yang ditimbulkan oleh keberadaan muatan listrik di dalam suatu ruang
Potensial Listrik	:	usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan positif sebesar 1 satuan dari tempat tak terhingga ke suatu titik tertentu
Energi Potensial listrik	:	energi potensial yang dihasilkan dari gaya-gaya Coulomb konservatif dan diasosiasikan dengan konfigurasi sejumlah muatan-muatan titik dalam sebuah sistem yang didefinisikan
Fluks listrik	:	ukuran aliran medan listrik yang melalui sebuah permukaan.

## 3. Referensi

- Griffiths, D. J. (2012). *Introduction to electrodynamics* 4th edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Kanginan, Marthen. (2018). *Fisika Untuk SMA/MA Kelas XII Kelompok Peminatan Matematika dan Ilmu-Ilmu Alam*. Jakarta: Erlangga
- Halliday, Resnick. (2005) *Fisika Dasar Edisi Ketujuh Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Effendi, Rustam, dkk. (2007). *Medan Elektromagnetika terapan*. Jakarta: Erlangga.
- Sailah, Siti, dkk. (2014). *Medan Eleltromagnetik, Teori dan contoh soal*. Yogyakarta: ANDI.

## Tentang Penulis



**Ngia Masta**, dilahirkan di Pontianak (1990), adalah Dosen di Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Kristen Indonesia. Menulis dan mengajar adalah passion-nya. Penulis memperoleh gelar Sarjana Pendidikan di Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Tanjungpura (2015) dan Magister Sains di bidang Fisika Murni dan terapan peminatan Condensed Matter Physics di Universitas Indonesia (2018). Penulis saat ini juga mengajar mata kuliah Fisika Modern dan Fisika Terapan Material. Saat ini menjabat sebagai Tim Penjamin Mutu Program Studi Pendidikan Fisika. Buku yang pernah ditulis adalah buku ajar Metode Scanning Electron Microscope (2020).



**Manogari Sianturi**, dilahirkan di Ampera (1971), adalah Dosen di Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Kristen Indonesia. Penulis memperoleh gelar Sarjana Sains pada bidang Fisika di Universitas Sumatera Utara (1996) dan Magister Teknik di bidang optoelektronika dan laser di Universitas Indonesia (2004). Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan doktoral bidang Fisika Material di Universitas Indonesia. Kecintaannya terhadap fisika telah tampak saat masih di bangku SMA, terutama dalam eksperimen-eksperimen Fisika. Semenjak semester 4, penulis telah aktif mengajar bimbingan belajar di Medan dan kemudian di Jakarta. Saat ini penulis juga aktif mengajar di fakultas teknik untuk mata kuliah Fisika Gerak dan Fisika Listrik Magnet dan di Fakultas Kedokteran untuk mata kuliah fisika kedokteran. Penulis pernah menjabat sebagai Kepala Laboratorium Fisika Universitas Kristen Indonesia (2007 – 2011) dan Ka. Prodi Pendidikan Fisika FKIP UKI tahun 2015 -2017. Penulis adalah reviewer Jenjang Jabatan Akademik di lingkungan FKIP UKI. Penulis juga merupakan dosen terbaik UKI III tahun 2016 dan telah memperoleh Paten Pompa Air Piston yang bekerja Berdasarkan Ayunan Gelombang Laut (2017).



***Taat Guswanto***, dilahirkan di Boyolali (1987), adalah Dosen di Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Kristen Indonesia. Penulis memperoleh Gelar Sarjana Sains pada bidang Fisika di Universitas Diponegoro (2010) dan Magister Sains pada bidang Fisika Radiasi di Universitas Diponegoro (2014). Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan doctoral bidang Nuklir dan Biofisika di Institut Teknologi Bandung. Kecintaan dan bakatnya pada bidang Fisika telah terlihat semenjak SMA, pada tahun 2003 penulis menorehkan prestasi sebagai Juara I Olimpiade Fisika tingkat Kabupaten dan Juara II Olimpiade Fisika di tingkat Provinsi Jawa Tengah. Prestasi ini berlanjut hingga semasa penulis menjadi mahasiswa, sebagai Finalis Olimpiade Fisika Tingkat Nasional (2008 dan 2009). Penulis merupakan Ketua Prodi Pendidikan Fisika FKIP UKI (2017-sekarang). Penulis juga mengajar mata kuliah Fisika Gerak, Fisika Panas dan Olympisme. Penulis saat ini juga aktif sebagai tim pembina Olimpiade Fisika di Universitas Kristen Indonesia.