

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Akustik pada Ruang secara Umum

Akustik ruang merupakan salah satu aspek arsitektural paling krusial yang menentukan tingkat kenyamanan, fungsi, serta efektivitas komunikasi auditif di dalam sebuah gedung pertemuan berskala besar [18]. Kualitas tata suara yang buruk, untuk mengevaluasi apakah jemaat yang duduk di area paling belakang tetap mendapatkan kejelasan suara yang sama baiknya dengan jemaat di area depan [2]. Melalui metode zonasi audiens ini, perancang dapat menganalisis kelemahan distribusi suara secara spasial dan menentukan penempatan material penyerap suara seperti adanya gema (*reverberation*) yang berlebihan dan gangguan kebisingan latar belakang, dapat mendistorsi informasi penting yang disampaikan dari area panggung [18]. Pada ruangan yang difungsikan sebagai rumah ibadah seperti gereja, tantangan perancangan akustik menjadi jauh lebih kompleks karena harus mengakomodasi dua aktivitas utama sekaligus, yaitu kejelasan suara ucapan (*speech intelligibility*) untuk khotbah dan kualitas resonansi akustik untuk musik [19], Distribusi tingkat tekanan suara (*Sound Pressure Level*) harus dipastikan merata dan mampu menjangkau seluruh area jemaat tanpa mengalami penurunan kualitas yang drastis akibat jarak [19].

Dalam kondisi riil di lapangan, sebaran gelombang suara sering kali mengalami pelemahan energi seiring bertambahnya jarak dari sumber suara (*source*) menuju penerima (*receiver*) [19], [20]. Oleh karena itu, ruangan ibadah perlu dibagi secara terstruktur menjadi beberapa zona jemaat, yaitu Zona A (depan), Zona B (tengah), dan Zona C (belakang) dengan interval linear masing-masing sepanjang 10 meter. Pembagian zona ini berfungsi sebagai parameter titik sampling (*receiver points*) (*absorber*) atau pemantul suara (*reflector*) yang tepat guna mengoptimalkan waktu dengung ruangan [18].

2.2 Sistem Tata Suara Pada Tempat Ibadah

Sistem tata suara merupakan suatu rangkaian peralatan elektronik yang digunakan untuk memperkuat dan mendistribusikan suara agar dapat didengar secara jelas oleh seluruh pendengar dalam suatu ruangan. Sistem ini umumnya terdiri dari sumber suara (*mikrofon*), pengolah sinyal (*mixer*), penguat daya (*amplifier*), serta perangkat keluaran berupa loudspeaker.

Pada tempat ibadah, sistem tata suara memiliki peran penting karena kegiatan ibadah sering melibatkan penyampaian khotbah, doa, maupun pembacaan teks liturgi yang harus terdengar jelas oleh seluruh jemaat. Perencanaan sistem tata suara yang baik harus mempertimbangkan dimensi luas ruang, jumlah jemaat, serta karakteristik akustik ruangan agar distribusi suara dapat merata. Kesalahan dalam perancangan daya dan frekuensi dapat menyebabkan suara tidak jelas, terlalu keras (*bising*) pada titik tertentu, atau terlalu lemah di area lain yang berakibat pada ketidaknyamanan pendengaran.

2.3 Gelombang, Frekuensi, dan Amplitudo pada Sistem Audio

Secara fisis, suara merupakan gelombang mekanik longitudinal yang merambat melalui medium elastis seperti udara, air, atau zat padat, di mana arah getaran partikel medium searah dengan arah rambat gelombangnya. Gelombang suara terbentuk dari getaran mekanis, misalnya dari cone speaker yang mendorong molekul udara di depannya, menciptakan dua daerah energetik yang terjadi secara bergantian, yaitu kompresi (*rapatan*) di mana molekul udara berkerumun rapat menghasilkan tekanan udara lebih tinggi, dan rarefaksi (*renggangan*) di mana molekul udara saling menjauh menghasilkan tekanan udara lebih rendah. Perbedaan tekanan inilah yang ditangkap oleh telinga manusia atau alat ukur seperti *Sound Level Meter* (SLM) sebagai suara. Dalam domain audio elektronik, variasi tekanan udara ini dikonversi menjadi sinyal listrik yang digambarkan dalam grafik dua dimensi (sumbu X sebagai waktu, sumbu Y sebagai tegangan/tekanan), yang disebut *waveform*, yang menentukan timbre atau warna suara sebuah instrumen [2].

Frekuensi merupakan besaran fisika yang mengukur seberapa cepat partikel medium berosilasi atau seberapa banyak siklus gelombang penuh (satu kompresi dan satu rarefaksi) yang terjadi dalam satu detik, dinyatakan dalam satuan Hertz (Hz), dan berbanding lurus dengan persepsi manusia terhadap tinggi rendahnya nada (*pitch*). Manusia secara umum dapat mendengar frekuensi dari 20 Hz hingga 20.000 Hz, yang terbagi menjadi tiga spektrum utama: frekuensi rendah (bass) 20-250 Hz yang menentukan ketebalan dan fondasi suara, frekuensi menengah (*midrange*) 250 Hz - 4 kHz yang merupakan rentang paling sensitif bagi telinga manusia dan menentukan kejelasan vokal utama, serta frekuensi tinggi (*treble*) 4 kHz - 20 kHz yang menangani detail halus dan kejelasan artikulasi. Dalam pengujian akustik ruangan, sinyal pink noise yang merangkum seluruh spektrum frekuensi audio (20 Hz - 20 kHz) menjadi standar utama dalam kalibrasi dan pengujian akustik karena karakteristiknya yang terdengar merata dan natural bagi telinga manusia [2][4]. Sementara itu, amplitudo adalah ukuran simpangan maksimum atau puncak tertinggi gelombang dari titik kesetimbangannya, yang berkorelasi langsung dengan kekuatan energi yang dibawa gelombang dan dipersepsikan oleh manusia sebagai volume atau tingkat kekerasan suara (*loudness*). Karena rentang kepekaan telinga manusia terhadap tekanan suara sangat luas dari 0,00002 Pa (ambang pendengaran) hingga lebih dari 20 Pa (ambang rasa sakit) maka digunakan skala logaritmik bernama Desibel (dB) melalui perhitungan *Sound Pressure Level* (SPL) dengan rumus $SPL = 20 \log_{10} (p/p_0)$, di mana p adalah tekanan suara aktual dalam Pascal dan p_0 adalah tekanan referensi batas minimum pendengaran manusia sebesar 2×10^{-5} Pa [2][8].

Semakin besar daya listrik yang disalurkan oleh amplifier ke *loudspeaker*, semakin besar amplitudo gelombang yang dihasilkan, dan semakin tinggi angka dB SPL yang ditangkap oleh alat *Sound Level Meter*. Dalam rantai sistem audio (*signal chain*), ketiga parameter ini dimanipulasi secara simultan oleh perangkat elektronik, dimulai dari mikrofon yang menangkap gelombang mekanis udara dan mengubahnya menjadi sinyal listrik, dilanjutkan dengan *equalizer* (EQ) yang menaikkan atau menurunkan amplitudo pada pita frekuensi tertentu, kompresor yang membatasi lonjakan amplitudo agar rentang dinamika suara tetap aman di

bawah batas distorsi, hingga amplifier yang mendongkrak amplitudo sinyal tanpa mengubah strukturnya dan menyalurkannya ke loudspeaker yang merekonstruksi kembali gelombang tekanan udara dengan frekuensi dan amplitudo yang tepat [8]. Dengan memahami ketiga elemen dasar ini gelombang, frekuensi, dan amplitudo analisis distribusi tingkat tekanan suara (SPL) pada ruang ibadah, pengaruh dimensi ruang terhadap rambatan gelombang, serta efektivitas penempatan *loudspeaker* dalam mencapai kejelasan suara (*speech intelligibility*) dapat dilakukan secara lebih terukur dan berbasis ilmiah [3][12]. Parameter inilah yang menjadi dasar dalam mengevaluasi kenyamanan audial jemaat serta pemenuhan terhadap regulasi baku mutu lingkungan Kepmen LH No. 48 Tahun 1996 yang menetapkan ambang batas kebisingan sebesar 85 dB untuk tempat ibadah [6].

1. Gelombang Suara (*Sound Wave*)

Gelombang suara adalah getaran fisik yang merambat melalui medium (dalam hal ini adalah udara) dalam bentuk gelombang longitudinal, yang terdiri dari area renggangan (*rarefaction*) dan rapatan (*compression*).

Pada Sistem Audio: Speaker mengubah sinyal listrik (audio) dari *amplifier* menjadi energi mekanik. Getaran konus (*cone*) speaker ini mendorong udara di depannya, menciptakan gelombang suara yang bergerak maju di dalam ruangan hingga menabrak mikrofon atau alat *Sound Level Meter* (SLM).

Karakteristik Gelombang: Di dalam ruangan, gelombang ini tidak hanya merambat lurus, tetapi juga akan memantul saat menabrak dinding keras, diserap oleh material lunak, atau berbelok (*difraksi*) saat melewati rintangan.

2. Frekuensi (*Frequency*)

Frekuensi adalah jumlah getaran atau siklus gelombang yang terjadi dalam satu detik, diukur dalam satuan Hertz (Hz). Frekuensi menentukan tinggi rendahnya nada (*pitch*) suatu suara.

- Rentang Pendengaran Manusia: Manusia secara umum dapat mendengar frekuensi dari 20 Hz hingga 20.000 Hz (20 kHz).
 - Low (Bass): 20 Hz - 250 Hz (suara dentuman, tendangan drum).
 - Mid (Vokal): 250 Hz - 4.000 Hz (frekuensi dominan suara manusia).
 - High (Treble): 4.000 Hz - 20.000 Hz (suara simbal, desis).
- Hubungannya dengan *Pink Noise*: Sinyal *pink noise* yang Anda gunakan dalam pengujian adalah sinyal khusus yang merangkum seluruh spektrum gelombang suara ini.

frekuensi audio (20 Hz - 20 kHz). Karakteristik unik *pink noise* adalah energinya turun sebesar 3 dB per oktaf seiring meningkatnya frekuensi. Hal ini membuat *pink noise* terdengar sangat merata dan natural bagi telinga manusia, sehingga menjadi standar utama dalam kalibrasi dan pengujian akustik ruangan.

3. Amplitudo (*Amplitude*)

Amplitudo adalah tinggi atau simpangan maksimum dari suatu gelombang suara. Amplitudo mengukur seberapa kuat getaran udara yang terjadi, yang secara langsung menentukan tingkat kekerasan suara (*loudness*).

Satuan Ukur: Dalam sistem audio dan akustik, amplitudo gelombang akustik di udara diukur dalam satuan Desibel (*Sound Pressure Level* / dB SPL). Angka-angka desibel yang tertera pada tabel-tabel di Bab IV Anda (seperti 78dB, 85dB, atau 91dB merupakan representasi langsung dari amplitudo

Hubungannya dengan Daya Audio: Semakin besar volume atau daya listrik yang disalurkan oleh *amplifier* ke speaker, semakin besar amplitudo gelombang yang dihasilkan, dan semakin tinggi pula angka dB SPL yang ditangkap oleh alat *Sound Level Meter*.

2.1.1 Gelombang Suara (The Physics of Sound Waves)

Secara fisis, suara adalah gelombang mekanik longitudinal yang merambat melalui medium elastis (seperti udara, air, atau zat padat). Disebut gelombang mekanik karena memerlukan medium fisik untuk merambat (tidak bisa merambat di ruang hampa udara), dan disebut longitudinal karena arah getaran partikel medium searah dengan arah rambat gelombangnya.

2.1.2 Bentuk Gelombang (Waveform) dan Warna Suara

Dalam domain audio elektronik, variasi tekanan udara ini dikonversi menjadi sinyal listrik yang digambarkan dalam grafik dua dimensi (Sumbu X sebagai waktu, Sumbu Y sebagai tegangan/tekanan). Bentuk grafik ini disebut Waveform, yang menentukan Timbre (warna suara) sebuah instrumen:

1. Sine Wave (Sinus): Gelombang murni tanpa distorsi atau harmonik tambahan (contoh: suara garpu tala atau tuning fork).
2. Square Wave (Kotak): Memiliki harmonik ganjil yang sangat kuat, menghasilkan suara tajam dan kasar (sering digunakan pada musik elektronik/synthesizer).
3. Sawtooth Wave (Gigi Gergaji): Kaya akan harmonik genap dan ganjil, menghasilkan suara yang tebal dan menusuk (mirip suara biola atau trompet).

2.1.3 Frekuensi (Frequency & Pitch)

Frekuensi adalah besaran fisika yang mengukur seberapa cepat partikel medium berosilasi atau seberapa banyak siklus gelombang penuh (satu kompresi dan satu rarefaksi) yang terjadi dalam satu detik. Di dalam sistem audio, frekuensi berbanding lurus dengan persepsi manusia terhadap Tinggi Rendahnya Nada (Pitch).

2.1.4 Rumus Dasar Frekuensi

Frekuensi dinyatakan dalam satuan Hertz (Hz) dan berbanding terbalik dengan Periode (T), yaitu waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan satu siklus penuh.

$$f = \frac{1}{T}$$

2.1.5 Hubungan Frekuensi dengan Panjang Gelombang (Wavelength)

Frekuensi menentukan dimensi fisik dari gelombang suara tersebut saat merambat di udara. Hubungan ini dijumpai oleh cepat rambat suara (v), yang nilainya dipengaruhi oleh suhu udara (pada suhu kamar 20°C, nilainya sekitar 343 m/s).

$$v = \lambda f$$

- λ = Panjang gelombang (*Wavelength*) dalam satuan meter (m).
- v = Cepat rambat suara di udara dalam satuan meter per detik (m/s).
- f = Frekuensi gelombang dalam satuan Hertz (Hz).

Implikasi Rekayasa Akustik: Frekuensi rendah memiliki panjang gelombang yang besar (contoh: 20 Hz memiliki $\lambda \approx 17,15$ meter). Akibatnya, suara bass bersifat omnidirectional (menyebar ke segala arah) dan mudah menembus hambatan fisik tembok. Sebaliknya, frekuensi tinggi memiliki panjang gelombang sangat pendek (contoh: 20 kHz memiliki $\lambda \approx 1,7$ cm, sehingga bersifat sangat searah (direksional) dan mudah diredam atau dipantulkan).

2.1.6 Amplitudo (Amplitude & Loudness)

Amplitudo adalah ukuran simpangan maksimum atau puncak tertinggi gelombang dari titik kesetimbangannya (titik tekanan atmosfer normal atau titik 0 Volt pada sinyal listrik). Dalam audio, amplitudo berkorelasi langsung dengan

kekuatan energi yang dibawa gelombang, yang dipersepsikan oleh manusia sebagai Volume atau Tingkat Kekerasan Suara (*Loudness*).

2.2 Skala Logaritmik Desibel (dB) dan Sound Pressure Level (SPL)

Karena rentang kepekaan telinga manusia terhadap tekanan suara sangat luas—dari 0,00002 Pa (ambang pendengaran) hingga lebih dari 20 Pa (ambang rasa sakit)—maka digunakan skala logaritmik bernama Desibel (dB) untuk menyederhanakannya melalui perhitungan SPL:

$$\text{SPL} = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

- p = Tekanan suara aktual yang terukur di udara menggunakan satuan Pascal (Pa).
- p_0 = Tekanan referensi batas minimum pendengaran manusia (2×10^{-5} Pa atau 20 μPa). Amplitudo dalam Domain Audio Digital (dBFS)

Ketika gelombang mekanis diubah menjadi sinyal elektrik digital oleh komponen *Analog-to-Digital Converter* (ADC), amplitudo diukur menggunakan skala dBFS (Decibels relative to Full Scale).

- Titik tertinggi atau batas maksimum level digital adalah 0 dBFS.
- Semakin kecil suara, nilainya akan semakin minus (contoh: -6 dBFS, -18 dBFS).

Clipping (Distorsi): Jika amplitudo sinyal dipaksa melebihi batas 0 dBFS, puncak gelombang akan terpotong mendatar secara paksa karena keterbatasan bit digital. Hal ini memicu *clipping*, yaitu distorsi harmonik ekstrem yang menghasilkan suara pecah, merusak kualitas audio asli, dan dapat menimbulkan beban termal berlebih yang merusak *tweeter* speaker.

2.2.1 Pembagian Spektrum Audio (Pendengaran Manusia: 20 Hz - 20.000 Hz)

Tabel 2.1 Pembagian Spektrum Audio

Rentang Frekuensi	Klasifikasi	Karakteristik Audio & Aplikasi Teknik
20 Hz – 60 Hz	Sub-Bass	Getaran fisik yang lebih banyak dirasakan tubuh daripada didengar (kick drum rendah, efek ledakan).
0 Hz – 250 Hz	Bass	Menentukan ketebalan dan fondasi musik (gitar bass, komponen low-end).
250 Hz – 500 Hz	Low-Midrange	Area kehangatan (warmth), namun jika berlebihan suara akan menjadi keruh (muddy).
500 Hz – 2 kHz	Midrange	Rentang paling sensitif bagi telinga manusia; menentukan kejelasan vokal utama.
2 kHz – 4 kHz	Upper-Midrange	Menangani artikulasi vokal; jika terlalu tinggi dapat memicu kelelahan pendengaran (harsh).
4 kHz – 6 kHz	Presence	Memberikan efek kedekatan (closeness) instrumen dan vokal dengan pendengar.
6 kHz – 20 kHz	High / Brilliance	Menangani detail halus, desisan simbal drum, dan kesan udara (airiness).

2.2.2 Integrasi Parametrik pada Komponen Audio

Dalam sebuah rantai sistem audio (*Signal Chain*), ketiga parameter ini dimanipulasi secara simultan oleh perangkat elektronik:

1. Transduksi Input (*Mikrofon*): Mikrofon menangkap Gelombang mekanis udara, menerjemahkan frekuensinya menjadi laju osilasi arus bolak-balik (AC), dan mengubah amplitudonya menjadi besaran voltase mikro.

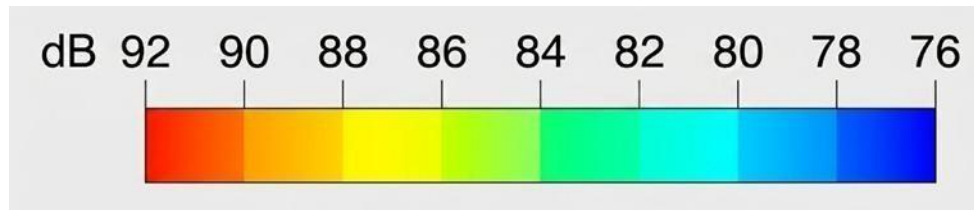
2. Pemrosesan Sinyal (*EQ & Compressor*): Equalizer bekerja dengan cara menaikkan (boost) atau menurunkan (cut) tingkat Amplitudo pada pita Frekuensi tertentu secara spesifik. Sementara itu, Kompresor membatasi lonjakan Amplitudo agar rentang dinamika suara tetap aman di bawah batas distorsi.
3. Amplifikasi dan Transduksi Output (*Power Amp & Speaker*): Amplifier mendongkrak Amplitudo (tegangan dan arus) sinyal tanpa mengubah strukturnya, lalu menyalurkannya ke speaker. Sinyal elektrik yang kuat ini memaksa kumparan speaker bergerak maju mundur, merekonstruksi kembali Gelombang tekanan udara frekuensi dan amplitudo yang tepat sesuai dengan rekaman aslinya.

2.2.3 Tingkat Tekanan Suara (Sound Pressure Level)

Tingkat tekanan suara atau *Sound Pressure Level* (SPL) merupakan ukuran intensitas fluktuasi tekanan udara yang dihasilkan oleh gelombang suara dan diterima oleh pendengar, yang dinyatakan dalam satuan desibel (dB). SPL menjadi parameter kuantitatif paling penting dalam evaluasi sistem tata suara karena berkaitan langsung dengan kenyaringan (loudness) dan kenyamanan pendengaran manusia.

Nilai SPL yang terlalu rendah akan menyebabkan informasi khotbah tidak terdengar jelas, sedangkan nilai SPL yang terlalu tinggi dapat menimbulkan ketidaknyamanan berupa rasa pekak di telinga. Oleh karena itu, pemetaan dan pengukuran nilai SPL di lapangan sangat diperlukan untuk mengetahui efektivitas distribusi suara loudspeaker di seluruh area ruangan serta mengujinya apakah telah sesuai dengan ambang batas nyaman lingkungan.

2.2.4 Pemetaan Visual Distribusi Suara (Heatmap Spl)



Gambar 2. 1 Visualisai heatmap SPL

Visualisasi heatmap SPL pada gambar di menggunakan gradasi warna fungsional untuk mengidentifikasi konsentrasi sebaran tingkat tekanan suara (Sound Pressure Level) di sepanjang area ruangan. Warna merah pekat hingga oranye tua yang mendominasi area tengah grafik menunjukkan zona konsentrasi energi suara tertinggi atau puncak intensitas (peak SPL). Fenomena penumpukan warna merah ini mengindikasikan adanya interferensi konstruktif atau penguatan amplitudo gelombang suara, yang umumnya dipicu oleh pancaran langsung dari speaker utama atau akibat pantulan awal (*early reflections*) yang saling menguatkan karena batas dinding lateral ruangan.

Sebaliknya, transisi menuju warna oranye muda, kuning, hingga hijau muda di area sekitarnya mencerminkan zona persebaran suara yang mulai merata secara gradual seiring bertambahnya jarak rambat horizontal maupun vertikal gelombang. Area berwarna kuning keemasan ini mengindikasikan tingkat tekanan suara yang stabil dan ideal, di mana energi suara langsung dan suara pantulan berada pada rasio seimbang yang memenuhi ambang batas kenyamanan pendengaran jemaat. Sementara itu, kemunculan warna hijau kekuningan di batas paling tepi atau sudut ruangan menandakan area dengan intensitas suara terendah (drop SPL) akibat terjadinya pelemahan energi alami (*attenuation*) seiring menjauhnya posisi penerima dari sumber suara utama (*loudspeaker*).

2.3 Loudspeaker dan Karakteristiknya

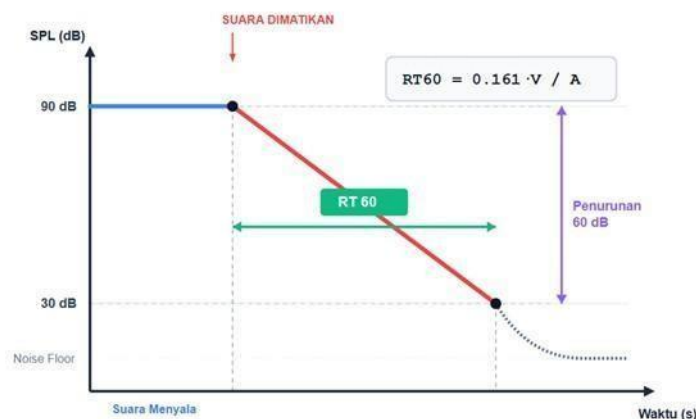
Loudspeaker merupakan komponen utama dalam sistem tata suara yang berfungsi mengubah sinyal listrik menjadi energi suara (akustik) yang dapat didengar manusia. *Loudspeaker* memiliki beberapa karakteristik penting seperti

daya (*power handling*), sensitivitas, respon frekuensi, impedansi, serta pola penyebaran suara (*dispersion*).

Pemilihan jenis loudspeaker harus disesuaikan dengan kebutuhan ruang ibadah. Ruangan dengan luas besar membutuhkan loudspeaker dengan daya lebih tinggi dan pola penyebaran yang lebih luas dibandingkan ruangan kecil demi meminimalkan fenomena penurunan suara terhadap jarak (*Inverse Square Law*). Karakteristik daya dan respon frekuensi tersebut akan menentukan efektivitas distribusi nilai desibel (dB) dalam ruangan ibadah.

2.4 Analisis Karakteristik Waktu Dengung Ruang Berbasis Metode Sabine

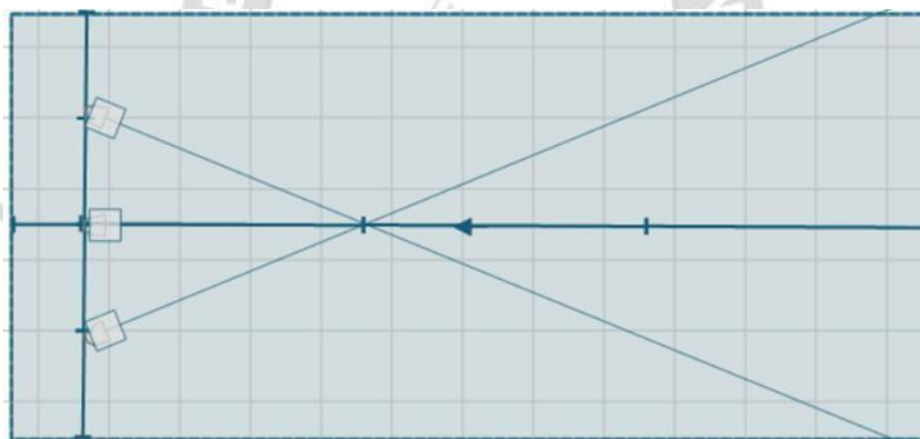
Waktu dengung atau Reverberation Time (RT60) merupakan durasi hitung yang diperlukan oleh tingkat tekanan suara untuk meluruh atau mengalami penurunan intensitas sebesar 60 desibel (dB) setelah sumber suara utama dihentikan secara konstan. Di dalam rekayasa fisik bangunan tertutup (*enclosure acoustics*), estimasi waktu dengung ini secara matematis dihitung menggunakan pendekatan empiris Metode Sabine, di mana nilai waktu dengung (RT60) diperoleh dari hasil perkalian konstanta udara fisis sebesar 0,161 dengan volume total ruangan dalam satuan meter kubik (m³), yang kemudian dibagi secara proporsional dengan total penyerapan rata-rata material interior (A) dalam satuan meter persegi Sabine.



Gambar 2. 2 Teori Dengung

Melalui integrasi rumus yang dinarasikan tersebut, dapat dipahami secara linear bahwa karakteristik gema di dalam rumah ibadah sangat bergantung pada rasio geometri ruangan; semakin besar nilai volume suatu ruangan yang tidak diimbangi dengan luas permukaan absorpsi material yang memadai, maka waktu luruh gelombang pantul akan semakin lama dan berpotensi merusak kejelasan suku kata (*speech intelligibility*) khotbah jemaat.

Penempatan posisi dan orientasi arah hadap (*aiming*) speaker merupakan faktor utama yang memengaruhi kualitas distribusi suara dalam ruangan. Posisi speaker yang tidak tepat dapat menyebabkan terjadinya perbedaan tingkat tekanan suara yang signifikan antar area jemaat, munculnya titik buta (*dead spot*), serta gangguan umpan balik (*feedback*).



Gambar 2. 3 contoh Bagan orientasi sebuah loudspeaker dalam ruangan

2.4.1 Penempatan Speaker dan Orientasi Arah (Aiming)

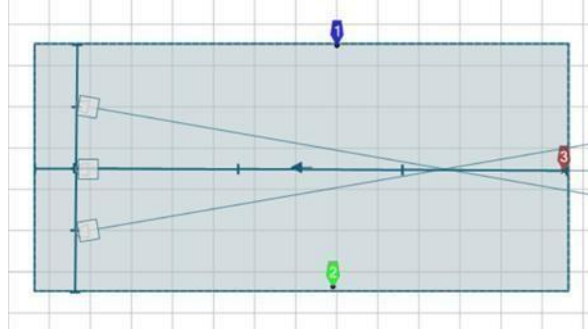
Gambar 2. 3 contoh Bagan orientasi sebuah loudspeaker dalam ruangan

Dalam ruangan ibadah, speaker umumnya ditempatkan di bagian depan menghadap jemaat atau didistribusikan di beberapa titik sisi dinding untuk memastikan pemerataan suara. Penempatan harus mempertimbangkan tinggi pemasangan, sudut arah tembak speaker, jarak antar speaker terhadap jemaat, serta volume ruang setempat. Penempatan dan orientasi yang optimal akan menghasilkan

sebaran suara yang merata dari baris depan hingga baris belakang sehingga meningkatkan kenyamanan pendengar secara objektif.

2.4.2 Bentuk Ruang dan Pola Akustiknya

luar. Ketika kenyamanan akustik ini tidak terpenuhi akibat paparan bising yang



Gambar 2. 4 Bentuk Ruang dan Pola

2.4.3 Kenyamanan Akustik dan Regulasi Baku Mutu Lingkungan

Kenyamanan akustik merupakan suatu kondisi psikologis dan fisiologis di mana manusia merasa betah, tidak terganggu, dan dapat beraktivitas secara optimal tanpa intervensi suara yang tidak dikehendaki atau bising. Kondisi ideal ini tidak melulu berarti keheningan total, melainkan keseimbangan antara tingkat tekanan suara (volume), waktu dengung ruangan yang tepat agar artikulasi suara terdengar jelas, serta kemampuan struktur bangunan dalam mengisolasi gangguan suara dari terus-menerus, manusia dapat mengalami penurunan konsentrasi, stres kronis, gangguan tidur, hingga peningkatan risiko penyakit kardiovaskular akibat lonjakan hormon kortisol. Oleh karena itu, demi melindungi kesehatan publik dan menjaga kualitas hidup masyarakat, pemerintah menetapkan Regulasi Baku Mutu Lingkungan salah satunya melalui Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 48 Tahun 1996 - sebagai instrumen hukum yang membatasi ambang batas maksimal kebisingan yang diizinkan di berbagai kawasan.

Tabel 1.2 klasifikasi tentang kenyamanan suara

Kategori Kawasan / Lingkungan Kegiatan	Batas Maksimal Kebisingan (dBA)	Tujuan Akustik
Rumah Sakit atau Fasilitas Kesehatan	55 dBA	Memastikan lingkungan yang tenang untuk pemulihan pasien dan mencegah stres.
Sekolah atau Fasilitas Pendidikan	55 dBA	Menjaga tingkat konsentrasi dan artikulasi suara agar proses belajar mengajar terdengar jelas.
Tempat Ibadah	55 dBA	Menciptakan suasana hening yang mendukung kekhusyukan tanpa gema berlebih.
Perumahan dan Pemukiman	55 dBA	Menghindari gangguan tidur dan memberikan kenyamanan psikologis saat beristirahat.
Perkantoran	65 dBA	Menjaga produktivitas kerja dan komunikasi antar pegawai tanpa perlu bersuara keras.
Lagangan dan Jasa	70 dBA	Mengakomodasi aktivitas ekonomi yang ramai namun tetap dalam batas toleransi pendengaran.
Kawasan Industri	70 dBA	Menyesuaikan dengan suara mesin dan operasional, seringkali memerlukan perlindungan telinga tambahan bagi pekerja.

Hubungan keduanya sangat erat, di mana regulasi bertindak sebagai standar hukum minimum (misalnya menetapkan batas maksimal 55 dBA untuk area pemukiman, sekolah, dan rumah sakit, serta 70 dBA untuk area industri), sementara prinsip kenyamanan akustik digunakan oleh para insinyur dan arsitek sebagai parameter teknis dalam merancang sistem insulasi, tata ruang, dan rekayasa lingkungan agar aktivitas modern tetap berjalan tanpa mengorbankan hak dasar manusia atas lingkungan yang tenang dan sehat. 2.8 Analisis Penurunan Suara Terhadap Jarak (*Inverse Square Law*)

2.5 Metode Pengukuran Eksperimental Lapangan

Pengukuran akustik lapangan merupakan metode kuantitatif yang digunakan

Di dalam ruang bebas tertutup, intensitas gelombang suara akan mengalami penurunan secara alami seiring dengan bertambahnya jarak pendengar dari sumber suara (*loudspeaker*). Secara hukum fisika akustik, fenomena sebaran energi ini berbanding lurus dengan hukum kuadrat terbalik atau dikenal sebagai Inverse Square Law, yang menyatakan bahwa nilai tingkat tekanan suara (*SPL*) pada titik dengar akan mengalami penyusutan teoritis sebesar 6 desibel (dB) setiap kali jarak jangkauan pengukuran dilipatgandakan dari posisi geometri sumber suara asli.

Pada pengujian riil di rumah ibadah, analisis Inverse Square Law ini digunakan untuk menguji apakah orientasi sudut arah tembak (*aiming*) dan penempatan ketinggian speaker yang dipasang sudah efektif atau belum. Jika penurunan nilai desibel dari zona depan, zona tengah, hingga zona belakang terjadi secara drastis atau justru melonjak naik tidak beraturan, hal tersebut mengindikasikan adanya interferensi gelombang destruktif atau gema dinding ruangan yang merusak pemerataan distribusi suara nyaman bagi jemaat. untuk mengevaluasi kualitas distribusi suara aktual di dalam suatu ruangan. Pengukuran dilakukan secara langsung pada objek riset menggunakan alat ukur presisi berupa *Sound Level Meter* untuk mendapatkan data tingkat tekanan suara (*SPL*) dalam satuan desibel (dB).

Proses pengambilan data eksperimental ini dibagi menjadi dua kondisi pengujian, yaitu pengukuran saat ruangan kosong (*Background Noise*) untuk melihat tingkat kebisingan awal lingkungan, dan pengukuran saat sistem tata suara aktif (*Sound Distribution*) menggunakan variasi frekuensi masukan tertentu. Dengan adanya pemetaan data koordinat ukur yang akurat, analisis komparatif performa tata suara antar-ruangan dapat dilakukan secara objektif berdasarkan parameter ilmiah yang valid. Berdasarkan teori akustik dan hasil eksperimen pada tiga ruang ibadah dengan volume berbeda (Chapel 941,2 m³, Gereja 312 m³, dan Aula 2.160 m³), dapat disimpulkan bahwa daya speaker (watt) TIDAK berbanding

2.6 Mekanisme Perambatan

Ketika sebuah komponen mekanis (seperti membran atau *cone speaker*) bergerak maju mundur, ia memanipulasi molekul udara di depannya dan menciptakan dua daerah energetik yang terjadi secara bergantian:

- Kompresi (Rapatan): Daerah di mana molekul udara berkerumun rapat, menghasilkan tekanan udara yang lebih tinggi daripada tekanan atmosfer normal.
- Rarefaksi (Renggangan): Daerah di mana molekul udara saling menjauh, menghasilkan tekanan udara yang lebih rendah daripada tekanan atmosfer normal.

2.7 Hubungan Daya 200 Watt dengan Luas/Volume Ruangan

lurus (*linier*) dengan luas atau volume ruangan. Hubungan keduanya bersifat logaritmik dan sangat kompleks, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor fundamental berikut:

- a. Skala Logaritmik Pendengaran Manusia

Persepsi pendengaran manusia terhadap kenyaringan bersifat logaritmik, bukan linier. Untuk meningkatkan tingkat tekanan suara (*SPL*) yang terdengar sebesar 3 dB, diperlukan penggandaan daya listrik (watt) pada amplifier. Secara matematis, hubungan ini dinyatakan dalam persamaan:

$$SPL = SPL_1W + 10 \times \log_{10}(P)$$

di mana:

SPL = Tingkat tekanan suara yang dihasilkan (dB)

dari suara langsung dan suara pantulan, yang dinyatakan dalam persamaan:

*SPL*_{1W} = Sensitivitas speaker pada daya 1 Watt dan jarak 1 meter (dB)

P = Daya listrik yang diberikan ke speaker (Watt)

b. Hukum Kuadrat Terbalik (*Inverse Square Law*)

Di dalam ruang terbuka, intensitas suara akan mengalami penurunan sebesar 6 dB setiap kali jarak dari sumber suara dilipatgandakan. Persamaannya adalah:

$$SPL(r_2) = SPL(r_1) - 20 \times \log_{10} (r_2 / r_1)$$

di mana:

*r*₁ = Jarak awal dari sumber suara (meter)

*r*₂ = Jarak akhir dari sumber suara (meter)

c. Dominasi Suara Pantulan dalam Ruang Tertutup

Dalam ruang tertutup, total *SPL* yang diterima pendengar merupakan kombinasi

$$SPL_{total} = PWL + 10 \times \log_{10}(Q / (4\pi r^2) + 4/R)$$

di mana:

PWL = Tingkat daya suara (*Sound Power Level*) speaker (dB) *Q* = Faktor

directivity (tingkat keterarahan speaker)

r = Jarak dari speaker ke titik pengukuran (meter)

R = Konstanta ruangan (kemampuan ruangan menyerap suara)

d. Sensitivitas Speaker

Speaker dengan sensitivitas tinggi (misalnya 95 dB 1W/1m) akan menghasilkan suara yang jauh lebih keras pada daya yang sama dibandingkan speaker dengan sensitivitas rendah (misalnya 85 dB 1W/1m).

e. Akustik Ruangan

Sifat material permukaan ruangan (dinding, lantai, langit-langit) sangat kerangka validasi berbasis perhitungan teoritis yang membandingkan nilai prediksi dari rumus-rumus fisika akustik terhadap nilai aktual yang terukur di ketiga ruang ibadah. Hubungan fundamental antara daya listrik yang disuplai ke speaker dengan tingkat tekanan suara yang dihasilkan dinyatakan dalam persamaan logaritmik $SPL = SPL_1W + 10 \times \log_{10}(P)$, di mana SPL_1W adalah sensitivitas speaker pada daya 1 memengaruhi penyerapan dan pemantulan gelombang suara, sehingga SPL aktual yang diterima pendengar dapat berbeda signifikan dari prediksi teoritis.

Kesimpulan Poin 1

Berdasarkan validasi data lapangan pada penelitian ini, daya 100 W terbukti berlebihan untuk ruangan kecil (Chapel dan Gereja) yang hanya membutuhkan 30-50 W, namun kurang untuk ruangan besar (Aula) yang membutuhkan 150-200 W. mengonfirmasi bahwa peningkatan daya tidak menghasilkan peningkatan kenyaringan yang sebanding dan pemilihan daya harus disesuaikan secara proporsional dengan karakteristik volume, material, dan geometri ruangan.

2.8 hubungan rumus dengan penempatan speaker , daya, secara amplitudo dll, untuk validasi hasil

Untuk memastikan keabsahan dan keakuratan data tingkat tekanan suara (*Sound Pressure Level / SPL*) yang diperoleh dari pengukuran lapangan, diperlukan suatu Watt dan jarak 1 meter, sedangkan P adalah daya listrik yang diberikan. Persamaan ini menunjukkan bahwa peningkatan daya tidak menghasilkan peningkatan *SPL* secara linier, melainkan logaritmik, di mana untuk menaikkan *SPL* sebesar 3 dB,

daya listrik harus dilipatgandakan. Hal ini menjelaskan mengapa pada ruangan kecil seperti Chapel dan Gereja, daya 100 W menghasilkan SPL yang berlebihan hingga 96,3 dBA dan 94,5 dBA, sedangkan pada ruangan besar seperti Aula, daya yang sama hanya menghasilkan SPL 74,12 dBA di area belakang karena energi suara terdisipasi ke volume yang lebih luas. Berdasarkan spesifikasi speaker yang digunakan dengan sensitivitas rata-rata 93 dB 1W/1m, prediksi teoritis SPL pada daya 100 W adalah 113 dB pada jarak 1 meter, namun setelah melalui redaman jarak dan absorpsi ruangan, nilai aktual yang terukur di lapangan hanya berkisar 74-96 dBA, yang menunjukkan adanya faktor-faktor peredaman signifikan di dalam ruang tertutup.

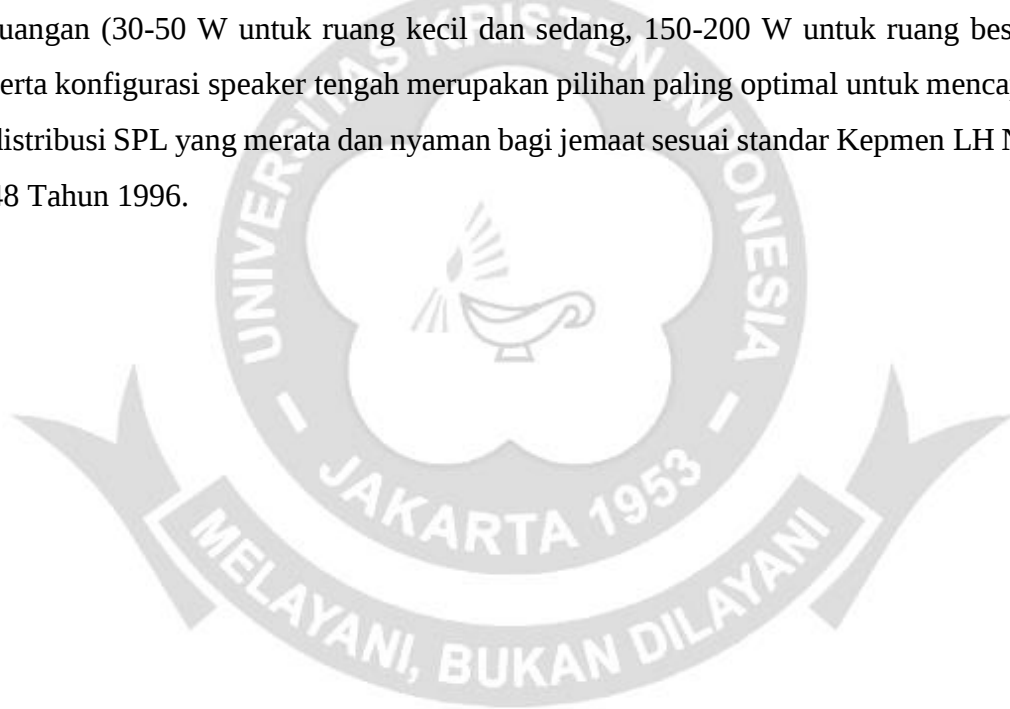
Selain hubungan daya dan SPL, faktor jarak dan penempatan speaker juga memegang peranan penting dalam efektivitas distribusi suara. Hukum Kuadrat Terbalik (*Inverse Square Law*) menyatakan bahwa setiap kali jarak dari sumbu suara dilipatgandakan, intensitas suara akan turun sebesar 6 dB, yang secara matematis dinyatakan sebagai $SPL(r_2) = SPL(r_1) - 20 \times \log_{10}(r_2/r_1)$. Berdasarkan hukum ini, penurunan SPL dari jarak 10 meter ke 30 meter secara teoritis adalah sebesar 9,54 dB. Namun, hasil pengukuran lapangan menunjukkan penurunan SPL aktual yang sangat kecil, yaitu hanya 0,38-1,01 dB untuk ketiga ruangan. Fakta ini secara kuat membuktikan bahwa di dalam ruang tertutup, medan suara pantulan (reverberant field) sangat dominan dan berhasil mengkompensasi penurunan suara langsung (direct sound) akibat jarak. Semakin kecil selisih antara penurunan teoritis dan aktual, semakin besar kontribusi suara pantulan di dalam ruangan tersebut. Pada Ruang Chapel yang memiliki volume 941,2 m³, selisihnya mencapai 9,16 dB, sedangkan pada Ruang Aula yang volumenya sangat besar (2.160 m³), selisihnya 8,53 dB, yang menunjukkan bahwa ruang dengan volume lebih besar memberikan ruang yang lebih luas bagi energi suara untuk terdisipasi.

Penempatan speaker di dalam ruangan sangat memengaruhi pola penyebaran energi suara melalui faktor *directivity* (Q) yang menggambarkan seberapa terarah suara yang dipancarkan. Speaker yang digantung di tengah ruangan memiliki nilai Q=1 karena suara menyebar ke segala arah, sedangkan speaker yang dipasang di dinding

memiliki $Q=2$ karena suara hanya menyebar ke setengah ruang, dan speaker yang dipasang di sudut ruangan memiliki $Q =4$ karena suara terfokus ke seperempat ruang. Pada penelitian ini, konfigurasi speaker tengah yang berada pada posisi relatif lebih bebas memiliki nilai Q yang lebih kecil ($\approx 1-2$) sehingga distribusi suara lebih merata ke segala arah, sementara speaker belakang yang ditempatkan dekat dengan dinding belakang yang reflektif memiliki nilai Q yang lebih tinggi ($\approx 2-4$), sehingga energi suara terfokus dan memicu akumulasi pantulan yang menyebabkan lonjakan SPL ekstrem hingga 96,3 dBA pada Ruang Chapel. Hal ini Ruang Gereja memiliki nilai R terkecil (32,7) karena dominasi material reflektif seperti lantai keramik, dinding bata plester, dan plafon gipsum, yang menyebabkan membuktikan bahwa penempatan speaker yang terlalu dekat dengan dinding reflektif justru kontraproduktif karena memperkuat interferensi konstruktif di area tertentu dan menciptakan ketidaknyamanan audial bagi jemaat.

Formula paling komprehensif untuk memprediksi SPL di dalam ruang tertutup adalah gabungan antara komponen suara langsung dan suara pantulan, yang dinyatakan sebagai $L_p = L_w + 10 \times \log_{10} (Q / (4\pi r^2) + 4/R)$, dimana L_p adalah SPL yang diprediksi di titik pendengar, L_w adalah tingkat daya suara (*Sound Power Level*) speaker, Q adalah faktor directivity, r adalah jarak dari speaker ke titik pengukuran, dan R adalah konstanta ruangan yang dihitung dengan $R = (S \times \alpha) / (1 - \alpha)$, dimana S adalah total luas permukaan seluruh bidang dalam ruangan dan α adalah koefisien serap rata-rata material. Suku $Q/(4\pi r^2)$ mewakili kontribusi suara langsung yang semakin kecil seiring bertambahnya jarak, sedangkan suku $4/R$ mewakili kontribusi suara pantulan yang semakin besar pada ruangan dengan konstanta ruangan kecil (*reflektif*). Berdasarkan perhitungan konstanta ruangan, suara pantulan sangat dominan dan memicu lonjakan SPL ekstrem hingga 94,5 dBA pada konfigurasi speaker belakang. Sebaliknya, Ruang Aula memiliki konstanta ruangan terbesar (113,4) karena volume yang sangat luas memberikan ruang disipasi energi yang lebih besar, sehingga SPL lebih terkendali dengan maksimum 89,9 dBA, sementara Ruang Chapel berada di posisi menengah dengan $R = 70,3$. Berdasarkan seluruh rangkaian validasi ini, diperoleh deviasi sebesar 15-26 dB

antara prediksi teoritis dan pengukuran aktual, yang secara kuantitatif membuktikan adanya faktor-faktor riil di lapangan yang tidak dapat dimodelkan secara sempurna dalam simulasi, meliputi losses sistem pada kabel, konektor, dan crossover, degradasi komponen speaker akibat kelelahan material pada cone dan kumparan suara, perbedaan koefisien serap material aktual dengan nilai standar literatur, serta kondisi lingkungan dinamis seperti fluktuasi suhu, kelembaban, dan kebisingan latar selama pengukuran. Dengan demikian, rumus-rumus akustik yang digunakan terbukti valid sebagai alat prediksi dan analisis, dan hasil validasi ini memperkuat rekomendasi teknis bahwa daya speaker harus disesuaikan dengan karakteristik ruangan (30-50 W untuk ruang kecil dan sedang, 150-200 W untuk ruang besar) serta konfigurasi speaker tengah merupakan pilihan paling optimal untuk mencapai distribusi SPL yang merata dan nyaman bagi jemaat sesuai standar Kepmen LH No. 48 Tahun 1996.



2.6 Pengertian dBA dan Perannya dalam Pengukuran Tingkat Kebisingan

DBA atau lebih tepat ditulis dBA adalah singkatan dari A-weighted decibel. Artinya, dBA merupakan satuan tingkat kebisingan atau tingkat tekanan suara yang sudah disesuaikan dengan cara telinga manusia menangkap suara. Berbeda dengan dB biasa, dBA tidak hanya menunjukkan besar kecilnya suara, tetapi juga memperhitungkan frekuensi suara yang paling peka didengar manusia. Karena itu, dBA sering digunakan untuk mengukur kebisingan mesin, kendaraan, lingkungan kerja, jalan raya, pabrik, dan area industri.

suara mesin, knalpot, atau alat industri dapat menghasilkan nilai dBA yang lebih tinggi. Semakin besar nilai dBA, semakin besar tingkat kebisingan yang diterima. Secara sederhana, dB menunjukkan intensitas suara secara umum, sedangkan dBA menunjukkan intensitas suara berdasarkan respons pendengaran manusia. Telinga manusia tidak mendengar semua frekuensi dengan tingkat kepekaan yang sama. Suara dengan frekuensi sangat rendah atau sangat tinggi biasanya tidak terdengar sekuat suara pada frekuensi tengah. Oleh karena itu, sistem A-weighting digunakan untuk menyaring dan menyesuaikan hasil pengukuran agar lebih mendekati persepsi telinga manusia terhadap kebisingan.

Dalam pengukuran kebisingan, angka dBA biasanya diperoleh menggunakan alat sound level meter. Alat ini menangkap gelombang suara melalui mikrofon, lalu mengubah tekanan suara menjadi nilai desibel. Jika alat menggunakan mode A-weighting, maka hasilnya ditampilkan dalam satuan dBA. Nilai ini lebih relevan untuk menilai kenyamanan, gangguan kebisingan, dan risiko terhadap pendengaran manusia dibandingkan dB biasa.

Contohnya, suara percakapan normal berada pada tingkat sedang, sedangkan telinga. Kenaikan kecil pada angka desibel dapat menunjukkan peningkatan suara yang cukup besar karena skala desibel bersifat logaritmik. Artinya, perubahan dari 70 dBA ke 80 dBA bukan sekadar naik 10 angka biasa, tetapi menunjukkan peningkatan tingkat kebisingan yang jauh lebih besar.