

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA & DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Berdasarkan penelitian yang akan dilakukan, terdapat beberapa penelitian terdahulu yang dirasa memiliki hubungan dengan tema yang di angkat oleh penelitian dengan yang topik *Audio Noise Cancelling*. Berikut adalah karya ilmiah terdahulu yang berkaitan:

Pada penelitian [6], menggunakan aplikasi Matlab untuk mereduksi noise yang ada pada suara, melakukan desain filter *Butterworth* orde dua, dan menganalisis karakternya. Rangkaian *voltagecontrolled voltage source* (VCVS) telah digunakan sebagai pembentuk filter *Butterworth* orde 2, yang disimulasikan untuk menampilkan karakter utama *low pass filter*. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan frekuensi *cut-off* yang diambil sebesar 0,5 KHz diperoleh karakter filter lolos rendah yang magnitudenya relatif datar pada gain VCVS yang diinginkan.

Penelitian [7] menggunakan metode filter *gaussian* merupakan metode yang digunakan dalam menghindari *noise* dalam bentuk gambar. Namun, metode *gaussian* kali ini dianalisis kinerjanya dalam menyaring kebisingan di lingkungan suara. Filter Gaussian diklasifikasikan sebagai filter *low pass* pada fungsi *gaussian*. Didapatkan hasil bahwa dalam menyaring frekuensi suara dengan kebisingan, kebisingan bisa hilang, tetapi suara yang dihasilkan juga menyusut sehingga terdengar lembut. Dalam memfilter *Gaussian* metode untuk menghilangkan kebisingan, proses perekaman suara yang dikombinasikan mencapai rentang dinamis dan puncak *factor* dengan parameter *attack time* = 0.01, *releasetime* = 0.01, *hold time* = 0.05, *lower threshold* = 0.0005, dan *silence threshold* = 0.25. Rentang dinamis, faktor puncak dan parameter dalam penyaringan membutuhkan proses yang sangat panjang sehingga diperlukan metode perbaikan yang optimal.

Pada penelitian [8] ini membahas tentang mengenai pengurangan noise menggunakan low pass filter dengan metode *Chebysev Type II*. Sampel sinyal audio dikumpulkan menggunakan alat perekam suara dengan format .wav. Kemudian, suara yang diproses sinyal diperkuat untuk daya yang lebih tinggi. Filter *lowpass* diharapkan dapat menipiskan *passband* di frekuensi 200 Hz dengan 10 dB dan

stopband di frekuensi 250 Hz, 275 Hz, dan 300 Hz dengan 40 dB. Diantara tiga spesifikasi yang berbeda dari filter, filter yang memiliki frekuensi *stopband* 300 Hz menunjukkan nilai rata-rata terendah dan median *error*.

Penelitian [9] ini di dalam file *audio system female speech.wav* dianalisis dan mengurangi kebisingan yang tidak diinginkan. Kebisingan sinyal audio dapat dikurangi menggunakan metode *Fast Fourier Transform* dengan menyaring filter *high-pass* dan filter *low-pass* yang di dalam *software* Matlab dengan frekuensi sampling 8000 Hz. Menghapus frekuensi yang lebih tinggi dari *audio input* dan *high-pass* yaitu menghapus frekuensi yang lebih rendah dari *audio input*. Pada sistem ini, *background noise* yang tidak diinginkan dari file *audio female speech.wav* dapat mengurangi kebisingan suara dengan cukup baik.

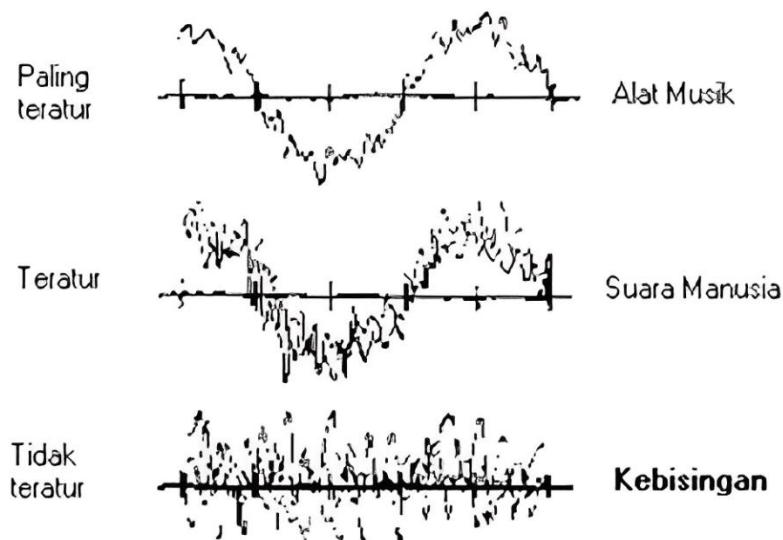
Penelitian [10] ini membahas mengenai analisis performansi pengurangan *audio noise* menggunakan *Kaiser Bessel Derived Window*. Sinyal *audio input* dalam format *.wav* menggunakan *coding software* Matlab. Kinerja jendela sinus dan jendela KBD dianalisis dan hasil yang diperoleh dibandingkan dengan jendela sinus, jendela KBD akan memberikan rekonstruksi yang sempurna. Disini KBD jendela digunakan karena merupakan jendela yang dapat disesuaikan dan bisa mampu melakukan rekonstruksi sempurna melalui skema pengangkatan metode. Kinerja diukur dengan menggunakan *Mean square error* (MSE) dan *Peak Signal to noise ratio* (PSNR).

Studi yang dilakukan penelitian [18] yaitu menyisipkan *watermark audio* kedalam *host audio*, kemudian proses ekstraksi diuji dengan diberikan serangan berupa LPF, dan BPF yang bertujuan untuk mengambil kembali *watermark* yang telah disisipkan agar dapat. Selanjutnya diperoleh kualitas pesan yang dihasilkan. Dalam tahap optimasi yang dilakukan, hasil yang berhasil dihasilkan adalah rata-rata Bit Error Rate (BER) sebesar 0,113, nilai Objective Difference Grade (ODG) sebesar -0,6, Signal-to-Noise Ratio (SNR) mencapai 31,290, dan Subjective Difference Grade (SDG) sebesar 4,6. Terdapat peningkatan sebesar 45% pada nilai BER setelah proses optimasi ini, jika dibandingkan dengan kondisi sebelumnya. Dalam konteks kriteria imperceptibility, hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa *watermark* yang telah disisipkan dalam sinyal audio dapat terdengar secara jelas, namun tidak mengganggu pengalaman pendengaran secara keseluruhan

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kebisingan

Kebisingan adalah bunyi yang tidak diinginkan dari usaha atau kegiatan dalam tingkat dan waktu tertentu yang dapat menimbulkan gangguan kesehatan manusia dan kenyamanan lingkungan. Polusi suara atau kebisingan adalah salah satu isu lingkungan. Polusi suara adalah polusi yang tidak terlihat. Suara atau bunyi dapat dirasakan oleh indra pendengaran akibat adanya rangsangan getaran yang datang melalui media yang berasal dari benda yang bergetar. Semua suara yang tidak dikehendaki yang bersumber dari alat-alat proses produksi dan atau alat-alat kerja yang pada tingkat tertentu dapat menimbulkan gangguan pendengaran [11].



Gambar 2. 1 Pola kebisingan [12]

Pada Gambar 2.1 menunjukkan macam-macam pola kebisingan yaitu dari yang paling teratur seperti di suara alat musik, suara teratur seperti contoh yaitu suara manusia, dan yang tidak tidak teratur yaitu kebisingan. Sumber-sumber kebisingan dapat bersumber dari :

1. Bising Interior (dalam) Bising interior atau bising dalam merupakan sumber bising yang berasal dari manusia, alat-alat rumah tangga, atau mesin- mesing gedung.
2. Bising *Outdoor* (Luar) Bising *outdoor* atau bising luar yaitu sumber yang bersumber dari aktivitas lalu lintas, transportasi, industri dan lain-lain diluar ruangan atau gedung [12]

Kebisingan dibagi menjadi 4 jenis yaitu :

1. Kebisingan yang kontinu dengan spektrum frekuensi yang luas, misalnya mesin-mesin, dapur pijar, dan lain-lain.
2. Kebisingan yang kontinu dengan spektrum frekuensi yang sempit, misalnya gergaji serkuler, katup gas, dan lain-lain.
3. Kebisingan terputus-putus (*intermittent/interupted noise*) adalah kebisingan dimana suara mengeras dan kemudian melemah secara perlahan-lahan, misalnya lalu-lintas, suara kapal terbang di lapangan udara [13].

2.2.2 Noise

Dalam sistem komunikasi, keberhasilan penyampaian informasi dari pengirim (*transmitter*) kepada penerima (*receiver*) tergantung pada seberapa akurat penerima dapat menerima sinyal yang ditransmisikan dengan baik dan benar. Pada kenyataannya, seringkali sinyal informasi yang diterima oleh *receiver* mengalami kerusakan atau kesalahan. Sebagian besar kesalahan pengiriman informasi dalam sistem komunikasi disebabkan oleh *noise*.

Noise adalah sinyal-sinyal yang tidak diinginkan yang selalu ada dalam suatu sistem transmisi. *Noise* akan mengganggu kualitas dari sinyal terima yang diinginkan dan akhirnya mengganggu proses penerimaan dan pengiriman data. Berdasarkan sumbernya, *noise* dibedakan menjadi 2.

1. *Internal Noise* (Derau Internal)

Internal Noise adalah *noise* yang dibangkitkan oleh komponen-komponen dalam sistem komunikasi itu sendiri. *Internal Noise* ini terdiri dari *Thermal Noise*, *Shot Noise*, *Flicker Noise* dan *Transit Time Noise*.

a. *Thermal Noise*

Thermal Noise atau disebut juga dengan *Johnson Noise* ini adalah noise yang dibangkitkan oleh gerakan thermal acak pembawa muatan (biasanya elektron) dalam sebuah konduktor. Amplitudo pada *Thermal Noise* tidak terikat pada frekuensi tertentu sehingga noise ini dapat terjadi pada seluruh jangkauan frekuensi. *Thermal Noise* merupakan noise yang sulit untuk dihindari.

b. *Shot Noise*

Shot Noise atau Derau Tembakan ini terjadi karena adanya penghalang potensial atau *Potential Barrier*. *Shot Noise* umumnya muncul di perangkat atau komponen elektronika aktif seperti Dioda dan Transistor karena pada komponen-komponen aktif tersebut memiliki persimpangan Positif dan Negatif atau PN Junction. Ketika Elektron dan Holes melintasi penghalang, maka akan menimbulkan *noise* yang disebut dengan *Shot Noise* atau Derau Tembakan.

c. *Flicker Noise*

Flicker Noise yang juga dikenal dengan nama $1/f$ *Noise* ini adalah Jenis *noise* yang terjadi pada rentang frekuensi dibawah beberapa kiloHertz (kHz). Densitas daya spektral *noise* jenis ini akan semakin meningkat seiring dengan penurunan frekuensi. Oleh karena itu, *Flicker Noise* ini juga disebut dengan *Low Frequency Noise* atau Derau Frekuensi Rendah. *Flicker Noise* ini juga sering disebut dengan *Contact Noise* atau *Pink Noise*.

d. *Transit Time Noise*

Transit Time adalah waktu yang dibutuhkan untuk pembawa muatan untuk berpindah dari input ke output. Jadi yang dimaksud dengan *Transit Time Noise* adalah *noise* yang timbul pada saat transit time pembawa muatan semikonduktor yaitu pada saat pembawa muatan melintasi persimpangan yang dibandingkan dengan jangka waktu sinyal tersebut. *Transit Time Noise* ini sering disebut juga dengan *High Frequency Noise*.

2. *Eksternal Noise* (Derau Eksternal)

External Noise atau derau *eksternal* adalah derau yang dihasilkan dari luar rangkaian elektronik itu sendiri. *Noise* ini bukan disebabkan oleh komponen dari rangkaian atau perangkat elektronik/listrik. *Eksternal Noise* ini terdiri dari *Atmospheric Noise*, *Industrial Noise*, dan *Extraterrestrial Noise*.

a. *Atmospheric Noise*

Atmospheric Noise atau Derau Atmosfer atau dikenal juga dengan Noise Statis merupakan sumber gangguan elektris yang terjadi secara

alami karena berkaitan dengan atmosfer bumi. Derau Atmosfer ini bisa disebabkan oleh petir, halilintar, badai dan gangguan alam lainnya.

b. *Industrial Noise*

Industrial Noise atau derau industri adalah derau yang dihasilkan oleh manusia seperti menghidupkan motor elektrik, peralihan gigi mesin, mematikan dan menghidupkan lampu listrik melalui saklar, perubahan tegangan dan arus listrik tinggi yang mendadak dan aktivitas manusia lainnya. *Industrial Noise* ini juga sering disebut dengan *Man-Made Noise* (derau yang dihasilkan oleh manusia).

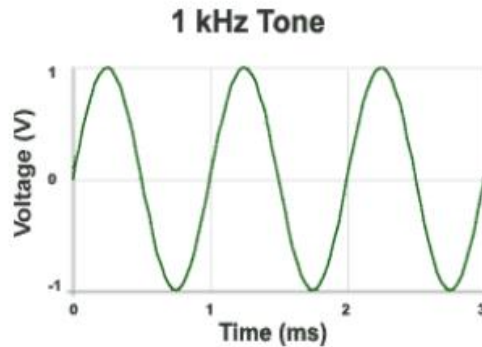
c. *Extraterrestrial Noise*

Extraterrestrial Noise atau derau luar angkasa adalah sinyal elektrik yang berasal dari luar atmosfer bumi. Berdasarkan asalnya, *Extraterrestrial Noise* ini dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu *Solar Noise* yang berasal dari panas matahari dan *Cosmic Noise* yaitu *noise* yang didistribusikan secara berkesinambungan di sepanjang galaksi [25].

2.2.3 Gelombang Suara

Gelombang suara adalah gelombang yang dihasilkan dari sebuah benda yang bergetar. Gambarannya adalah senar gitar yang dipetik, gitar akan bergetar dan getaran ini merambat di udara, atau air, atau material lainnya. Satu-satunya tempat dimana suara tak dapat merambat adalah ruangan hampa udara. Gelombang suara ini memiliki lembah dan bukit, satu buah lembah dan bukit akan menghasilkan satu siklus atau periode. Siklus ini berlangsung berulang-ulang, yang membawa pada konsep frekuensi. Jelasnya, frekuensi adalah jumlah dari siklus yang terjadi dalam satu detik. Satuan dari frekuensi adalah Hertz atau disingkat Hz. Telinga manusia dapat mendengar bunyi antara 20 Hz hingga 20 KHz (20.000Hz) sesuai batasan sinyal *audio*. Pada dasarnya sinyal *audio* adalah sinyal yang dapat diterima oleh telinga manusia. Angka 20 Hz sebagai frekuensi suara terendah yang dapat didengar, sedangkan 20 KHz merupakan frekuensi tertinggi yang dapat didengar. Gelombang suara dapat juga ditunjukkan dalam suatu grafik standar x versus y seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2. Ini memungkinkan untuk memvisualisasi gelombang dengan sudut pandang matematis, menghasilkan kurva

yang dikenal sebagai bentuk gelombang. Gelombang ditunjukkan pada nada konstan frekuensi tertentu [20].



Gambar 2. 2 Gelombang pada nada konstan frekuensi tertentu [20]

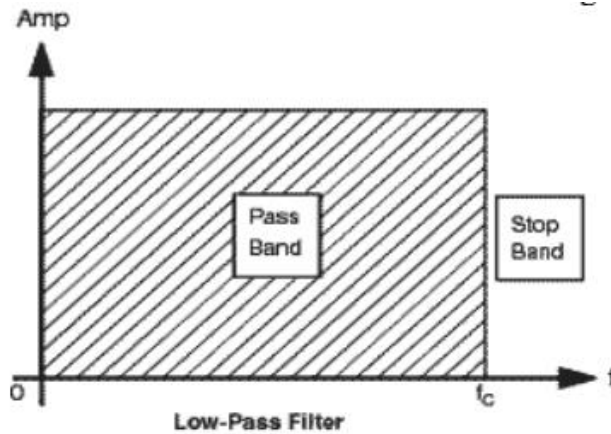
2.2.4 Filter Frekuensi

Filter adalah adalah sebuah rangkaian yang dirancang agar melewati suatu pita frekuensi tertentu seraya memperlemah semua isyarat di luar pita ini. Pengertian lain dari filter adalah rangkaian pemilih frekuensi agar dapat melewati frekuensi yang diinginkan dan menahan (*couple*)/membuang (*by pass*) frekuensi lainnya [14].

Filter sering digunakan untuk meloloskan frekuensi yang dikehendaki atau menghambat frekuensi yang tidak dikehendaki. Filter yang digunakan biasanya terdiri dari empat macam konfigurasi yang dapat dibagi sebagai berikut :

1. *Low Pass Filter* (LPF)

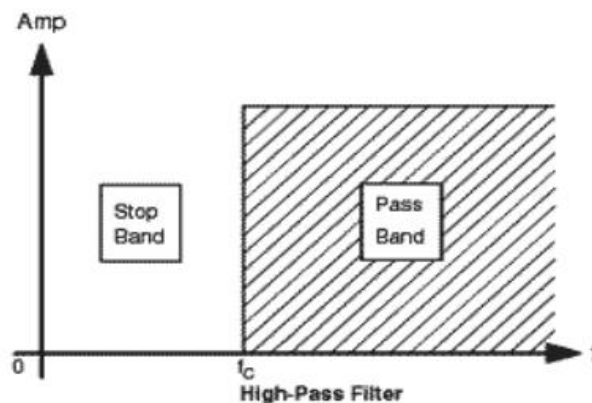
Filter jenis ini merupakan filter yang memiliki respon yaitu meloloskan sinyal dengan frekuensi dibawah frekuensi *cut-off* (F_c) dan meredam (memblokir) sinyal yang memiliki frekuensi diatas frekuensi *cut-off* [15]. *Lowpass* filter ini merupakan filter yang paling umum, yang banyak digunakan untuk mengurangi derau frekuensi tinggi, memungkinkan untuk menghitung frekuensi rendah lebih akurat, dan membatasi bandwidth sinyal sebelum digitalisasi [16]. Terdapat grafik dari LPF seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Grafik *Low Pass Filter* [15]

2. *High Pass Filter* (HPF)

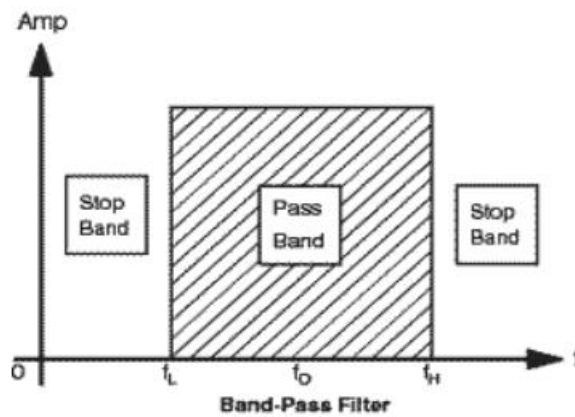
Filter jenis ini merupakan filter yang memiliki respon meloloskan sinyal dengan frekuensi diatas frekuensi *cut-off* (F_c) dan meredam sinyal yang memiliki frekuensi dibawah frekuensi *cut-off*. Terdapat grafik HPF ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Grafik *High Pass Filter* [15]

3. *Band Pass Filter* (BPF)

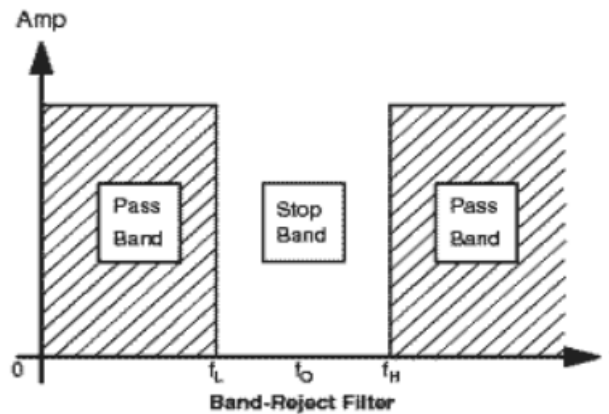
Band Pass Filter (BPF) merupakan jenis filter dari gabungan filter HPF dan LPF sehingga memiliki respon meloloskan sinyal dengan frekuensi diantara frekuensi *cut off* (F_{c1} dan F_{c2}) dan meredam sinyal yang memiliki frekuensi diluar frekuensi *cut off*. Terdapat grafik BPF ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Grafik Band Pass Filter [15]

4. *Band Stop Filter (BSF)*

Berkebalikan dengan filter BPF, Filter BSF merupakan gabungan filter LPF dan HPF sehingga memiliki respon meloloskan sinyal dengan frekuensi diluar frekuensi *cut-off* dan meredam sinyal yang memiliki frekuensi diantara frekuensi *cut-off* (F_{c1} dan F_{c2}). Terdapat grafik BSP ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Grafik Band Stop Filter [15]

Filter analog seringkali didesain melalui pendekatan prototipe filter. Pendekatan ini melibatkan merancang filter analog yang memiliki karakteristik yang diinginkan dalam domain frekuensi dan kemudian mengubah filter tersebut menjadi filter digital menggunakan teknik transformasi. Dalam Tabel 2.1 merupakan persamaan spesifikasi LPF, HPF, BPF, dan BSF dalam analog.

Tabel 2. 1 Filter Analog Didesain Melalui Prototype Filter

LPF	HPF	BPF	BSF
$\delta_p, \delta_s,$ $\Omega_c = 1$ $\Omega_{stop} = \frac{\omega_{stop}}{\omega_c}$	$\delta_p, \delta_s,$ $\Omega_c = 1$ $\Omega_{stop} = \frac{\omega_c}{\omega_{stop}}$	$\delta_p, \delta_s,$ $\Omega_c = 1$ $\Omega_{stop} = \frac{\omega_4 - \omega_3}{\omega_2 - \omega_1}$	$\delta_p, \delta_s,$ $\Omega_c = 1$ $\Omega_{stop} = \frac{\omega_4 - \omega_3}{\omega_2 - \omega_1}$

Dimana δ_p adalah parameter yang mengacu pada frekuensi "*passband*" yang telah dinormalisasi. δ_s adalah parameter yang mengacu pada frekuensi "*stopband*" yang telah dinormalisasi. Ω_c adalah frekuensi cutoff yang dinormalisasi dari prototype filter $\Omega_c = 1$ dapat diartikan sebagai frekuensi cutoff prototype filter yang telah dinormalisasi menjadi 1. Ω_{stop} Ini adalah frekuensi stopband yang dinormalisasi dari prototype filter. ω_c adalah frekuensi *cutoff* dalam satuan radian dari filter LPF. ω_{stop} adalah frekuensi stopband dalam satuan radian.

Spesifikasi filter digital dalam bentuk rad (radian) mengacu pada cara mengungkapkan karakteristik frekuensi dari suatu filter digital dalam domain frekuensi. Radian adalah unit pengukuran sudut dalam sistem matematika, dan dalam konteks filter digital, digunakan untuk menyatakan frekuensi dalam domain frekuensi. Dalam Tabel 2.2 merupakan persamaan spesifikasi LPF, HPF, BPF, dan BSF dalam digital.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Filter Digital dalam Radian

LPF	HPF	BPF	BSF
$\delta_p, \delta_s,$ $\omega_c = 2\pi (f_c)$ $\omega_{stop} = 2\pi (f_{stop})$	$\delta_p, \delta_s,$ $\omega_c = 2\pi (f_c)$ $\omega_{stop} = 2\pi (f_{stop})$	$\delta_p, \delta_s,$ $\omega_1 = 2\pi (f_1)$ $\omega_2 = 2\pi (f_2)$ $\omega_3 = 2\pi (f_3)$ $\omega_4 = 2\pi (f_4)$ $B = \omega_2 - \omega_1$ $\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$	$\delta_p, \delta_s,$ $\omega_1 = 2\pi (f_1)$ $\omega_2 = 2\pi (f_2)$ $\omega_3 = 2\pi (f_3)$ $\omega_4 = 2\pi (f_4)$ $B = \omega_2 - \omega_1$ $\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$

Dimana δ_p Ini adalah parameter yang mengacu pada frekuensi "*passband*" dalam satuan radian. Dalam perancangan filter digital, frekuensi ini merupakan

frekuensi di mana amplitudo sinyal masih diizinkan melewati filter tanpa banyak penurunan. Parameter ini diukur dalam satuan radian. s_s parameter yang mengacu pada frekuensi "stopband" dalam satuan radian. Dalam perancangan filter digital, ini adalah frekuensi di mana penekanan yang signifikan pada sinyal diterapkan, mengurangi komponen frekuensi tinggi yang tidak diinginkan. ω_c adalah frekuensi *cutoff* dalam satuan radian dari filter LPF. ω_{stop} adalah frekuensi stopband dalam satuan radian. f_{stop} merupakan frekuensi stopband dari filter.

2.2.5 Filter Digital

Filter digital merupakan suatu program (algoritma) yang dibuat sedemikian sehingga karakteristiknya menyerupai filter analog yang bersesuaian. Filter digital lebih banyak digunakan dibandingkan filter analog karena beberapa alasan berikut:

1. Filter digital dapat mempunyai karakteristik yang tidak mungkin 5 Matlab Sinyal Suara Mikrofon Suara optimum didapatkan dengan filter analog seperti respons fasa linier.
2. Kinerjanya tidak dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu.
3. Respons frekuensi filter digital dapat dengan mudah disesuaikan (hanya mengganti program atau membuat program untuk filter adaptif). Beberapa sinyal masukan dapat diproses hanya dengan menggunakan satu filter digital.

Namun demikian, beberapa kelemahan filter digital adalah sebagai berikut:

1. Kecepatan dari filter digital (waktu proses) tergantung dari prosesor yang digunakan dan juga kompleksitas algoritma yang digunakan.
2. Perancangan filter membutuhkan waktu yang cukup lama, karena memerlukan beberapa pengetahuan khusus lain, seperti pemrograman dan perangkat keras yang digunakan [19]

2.2.6 Respon Frekuensi

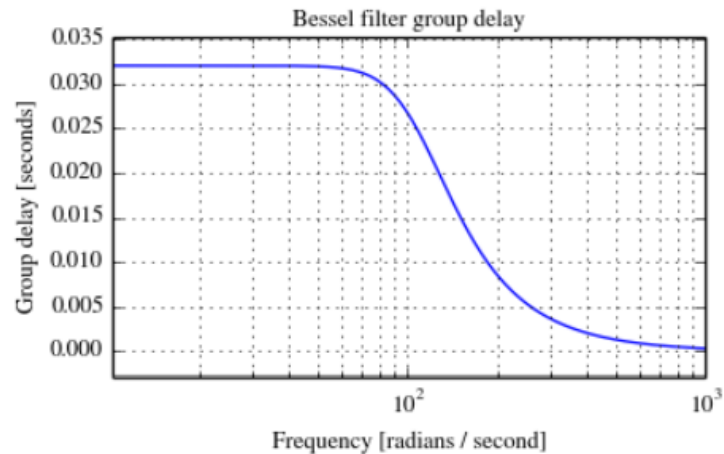
Respon frekuensi adalah respon keadaan *steady state* suatu sistem terhadap masukan sinyal *sinusoida*. Proses mendapatkan respon frekuensi adalah dengan mengolah respon sinyal impuls dari suatu sistem. Respon frekuensi dari sinyal impuls dari $x(n)$, $h(n)$ atau $y(n)$ haruslah diperoleh dengan persamaan 2.1.

$$H(e^{jw}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)e^{-jwn} \quad (2.1)$$

Dimana $h(n)$ adalah sinyal impuls, e^{-jwn} adalah sinyal eksponensial yang dibentuk dari *sinus* dan *cosinus*, dan $H(e^{jw})$ adalah respon frekuensi yang dihasilkan, dan harus diolah sedemikian rupa sampai diperoleh $|H(e^{jw})|$ [21].

2.2.7 Metode Bessel

Filter Bessel adalah jenis filter linier analog dengan *delay* fase maksimum secara maksimal (respon fase linier secara maksimum), yang mempertahankan bentuk gelombang sinyal yang difilter di dalam passband. *Filter Bessel* sering digunakan dalam sistem *audio crossover*. Pada filter ini memberikan keuntungan pada respons fase *in-band* akan menghasilkan respon yang optimal dan memberikan pula respon langkah terbaik. Ini sering digunakan di mana sinyal menggabungkan gelombang persegi, dan gelombang yang lain, oleh karena itu bentuk ini dipertahankan karena menghasilkan bentuk yang paling baik dari jenis yang lain. Pada Gambar 2.7 menunjukkan karakteristik *group-delay Bessel*. filter *Bessel* ini memiliki *group-delay* yang konstan di seluruh rentang frekuensi.



Gambar 2. 7 Karakteristik *group-delay Bessel* [16]

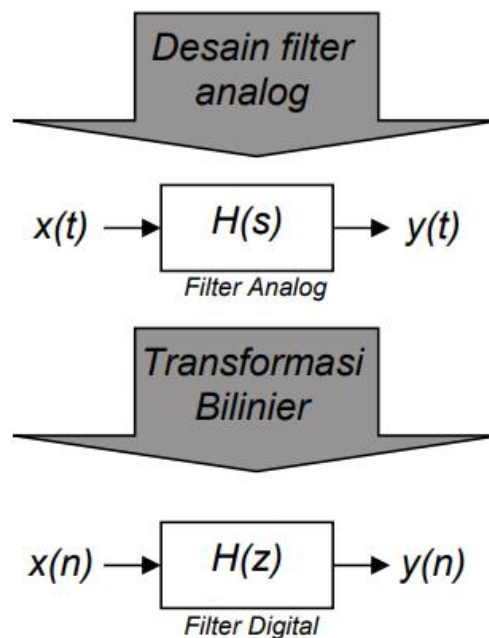
Untuk filter *bessel*, dapat digunakan persamaan fungsi transfer seperti persamaan 2.2.

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b(1) s^n + b(2) s^{n-1} + \dots + b(n+1)}{a(1) s^n + a(2) s^{n-1} + \dots + a(n+1)} \quad (2.2)$$

Dimana,

- 1) $H(s)$ adalah fungsi transfer *bessel*,
- 2) n adalah orde dari filter *Bessel*, dan
- 3) s adalah variabel frekuensi kompleks.
- 4) $b(1), b(2), \dots, b(n + 1)$ adalah koefisien polinomial pembilang (*numerator*) dari fungsi transfer $H(s)$.
- 5) $a(1), a(2), \dots, a(n + 1)$ adalah koefisien polinomial penyebut (*denominator*) dari fungsi transfer $H(s)$ [22].

Transformasi bilinear dimulai dari proses mendesain filter analog. Filter analog ini kemudian ditransformasi menjadi filter digital dengan transformasi bilinear, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Filter *Bessel* merupakan filter linear analog, maka diperlukan konversi menjadi filter digital (sinyal diskrit) untuk digunakan dalam pemrosesan sinyal audio digital yaitu dengan fungsi bilinear [18], untuk transformasi bilinear menggunakan persamaan matematis seperti pada persamaan 2.3.



Gambar 2. 8 Proses Desain Filter Menggunakan Transformasi Bilinear [24]

$$s = \frac{2}{T} \left(\frac{z-1}{z+1} \right) \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3 adalah substitusi yang dilakukan dalam rumus $H(s)$ yang dapat dilihat pada persamaan 2.4 untuk melakukan transformasi dari domain waktu analog (s) ke digital dalam domain waktu diskret (z) menggunakan transformasi bilinear.

Dimana:

- 1) z : Ini adalah variabel kompleks dalam domain waktu diskret.
- 2) T : Ini adalah periode sampling (waktu antara dua sampel) dalam filter digital.
- 3) s : Ini adalah variabel kompleks dalam domain waktu analog.

$$H(z) = H(s) \quad (2.4)$$

Dimana:

- 1) $H(z)$ adalah fungsi transfer filter digital dalam domain waktu diskret (z).
 - 2) $H(s)$ adalah fungsi transfer filter analog dalam domain waktu kontinu (s).
- Fungsi transfer ini adalah karakteristik respons frekuensi filter analog [23].

2.2.8 Subjective Difference Grade (SDG)

SDG adalah metrik yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas sinyal audio. SDG merupakan ukuran subyektif yang diperoleh melalui tes pendengaran perseptual dengan partisipan manusia. Skala SDG memiliki rentang nilai dari 1 hingga 5. SDG diperoleh melalui uji pendengaran manusia kemudian dievaluasi kualitas yang dirasakan dari sinyal *audio*. Dengan menilai perbedaan kualitas pada skala subyektif. Nilai SDG yang lebih tinggi menunjukkan perbedaan kualitas yang lebih mencolok antara kedua sinyal. Metode ini dapat digunakan untuk mengevaluasi kualitas suara pada berbagai aplikasi, seperti pemrosesan suara, sistem komunikasi, dan pemutaran musik [17]. Terdapat tabel kualitas rentang dari SDG yang dapat dilihat pada Tabel 2.3. Untuk menganalisa dan mengevaluasi hasil kualitas suara dapat menggunakan nilai rata-rata dari penilaian SDG dari tiap frekuensi *cut-off*, terdapat rumus rata-rata SDG seperti persamaan 2.5.

$$\bar{x} = \frac{\Sigma \text{nilai skala}}{\Sigma \text{responden}} \quad (2.5)$$

Dimana:

- 1) \bar{x} adalah simbol yang digunakan dalam statistik untuk menunjukkan rata-rata dari sekumpulan data
- 2) $\Sigma \text{ nilai skala}$ adalah jumlah penilaian skala dari seluruh responden
- 3) $\Sigma \text{ responden}$ adalah jumlah responden [17]

Tabel 2. 3 Penilaian Rentang Kualitas Suara SDG

Skala SDG	Kualitas	Deskripsi
1	Sangat Buruk	<i>Noise</i> sangat mengganggu
2	Buruk	<i>Noise</i> mengganggu
3	Cukup	<i>Noise</i> sedikit mengganggu
4	Baik	<i>Noise</i> terdengar, tetapi tidak mengganggu
5	Sangat Baik	<i>Noise</i> tidak terdengar