



# Teknik Pengolahan Sinyal

## Konsep Filter

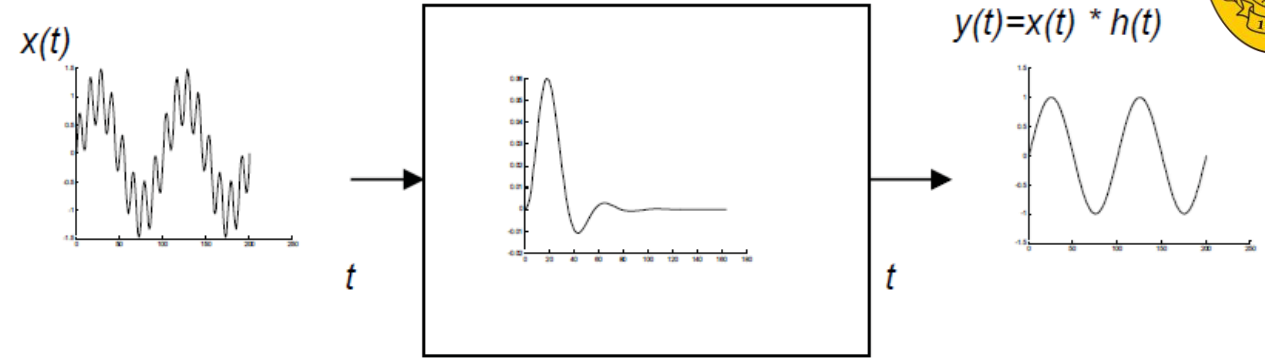
Aqil Aqthobirrobbany, S.T., M.Eng.



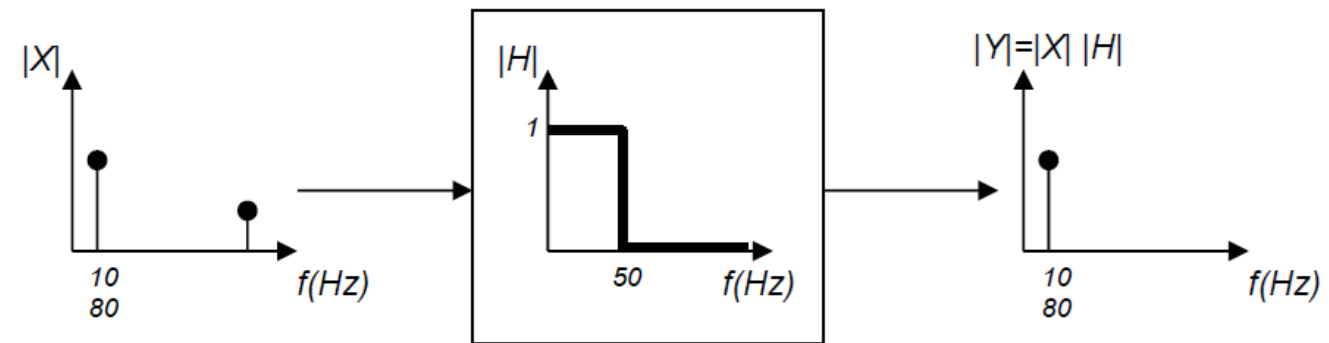
# Konsep Filter

Definisi umum dari filter adalah **sistem yang secara selektif melakukan modifikasi pada sinyal input baik berupa modifikasi bentuk, amplitudo, dan fase**. Filter pada umumnya digunakan untuk meningkatkan kualitas dari sinyal input.

Secara sederhana, filter dapat diartikan sebagai **suatu sistem yang berfungsi untuk menyaring sinyal yang masuk**. Suatu filter menentukan komponen sinusoidal mana saja dari sinyal input tersebut yang dapat diteruskan ke output.



**Gambar 10.1**  
**Filter dalam domain waktu**



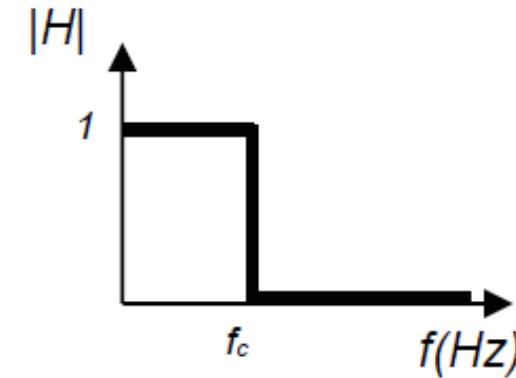
**Gambar 10.2**  
**Filter dalam domain frekuensi**



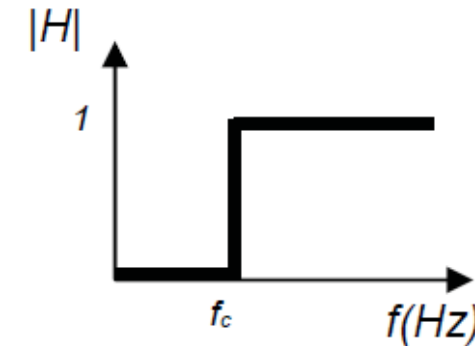
# Jenis Filter

Filter dapat diklasifikasi berdasarkan *range frekuensi* yang disaring atau diteruskan. Secara umum kita mengenal beberapa jenis filter yaitu:

1. **Lowpass Filter (LPF)** adalah filter yang hanya meneruskan komponen sinusoidal dari sinyal input yang berfrekuensi rendah ( $< f_c$ ). Filter ini akan menghentikan komponen sinusoidal berfrekuensi tinggi ( $> f_c$ ). Gambar 10.3 menunjukkan respon frekuensi dari LPF.
2. **Highpass Filter (HPF)** adalah filter yang hanya meneruskan komponen sinusoidal dari sinyal input yang berfrekuensi tinggi ( $> f_c$ ). Filter ini akan menghentikan komponen sinusoidal berfrekuensi rendah ( $< f_c$ ). Gambar 10.4 menunjukkan respon frekuensi dari HPF



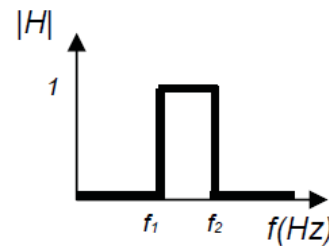
**Gambar 10.3**  
**Respon Frekuensi dari LPF**



**Gambar 10.4**  
**Respon Frekuensi dari HPF**

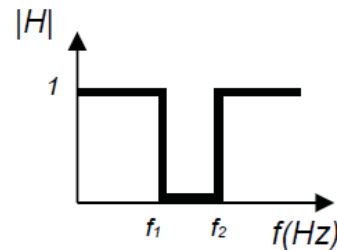


3. **Bandpass Filter (BPF)** adalah filter yang hanya meneruskan komponen sinusoidal dari sinyal input yang frekuensinya **terletak pada range tertentu ( $f_1 < f < f_2$ )**. Filter ini akan menghentikan komponen sinusoidal yang berada di luar range frekuensi tersebut ( $f < f_1$  atau  $f > f_2$ ). Gambar 10.5 menunjukkan respon frekuensi dari BPF.



Gambar 10.5  
Respon Frekuensi dari BPF

4. **Bandstop Filter (BSF)** adalah filter yang hanya tidak meneruskan komponen sinusoidal dari sinyal input yang frekuensinya terletak pada range tertentu ( $f_1 < f < f_2$ ). Filter ini akan meneruskan komponen sinusoidal yang berada di luar range frekuensi tersebut ( $f < f_1$  atau  $f > f_2$ ). Gambar 10.6 menunjukkan respon frekuensi dari BSF.

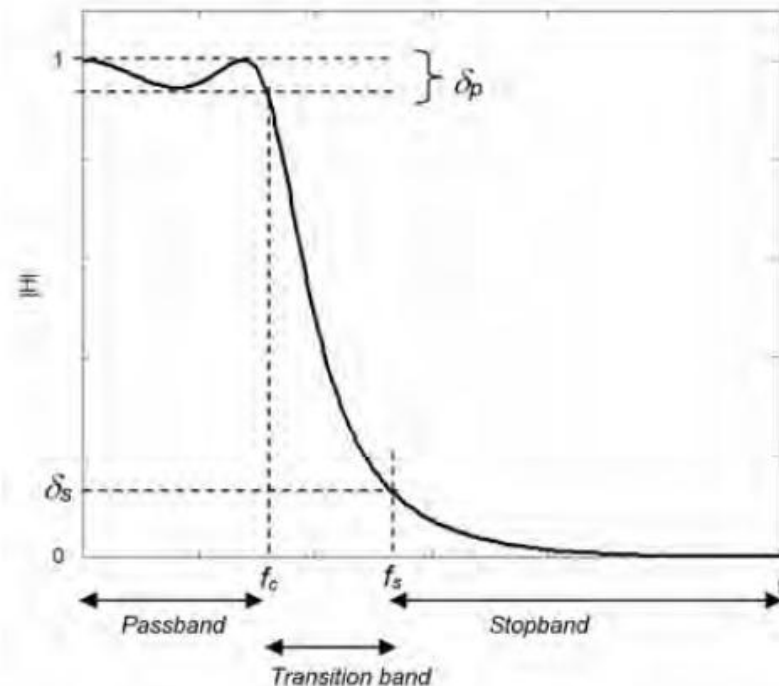


Gambar 10.6  
Respon Frekuensi dari BSF

# Parameter Filter



Respon frekuensi dari filter-filter yang ditunjukkan pada Gambar 10.3 sampai 10.6 adalah respon frekuensi yang ideal. Secara praktis, respon frekuensi dari filter memiliki bentuk yang tidak persis sama dengan respon frekuensi ideal. Selain parameter standar dari suatu filter yaitu frekuensi cut-off ( $f_c$  atau  $f_1$  dan  $f_2$ ), kita masih membutuhkan beberapa parameter lain yang menunjukkan kedekatan respon frekuensi dari suatu filter ke respon frekuensi ideal. Gambar 10.7 menunjukkan respon frekuensi dari suatu filter LPF.



**Gambar 10.7**  
**Parameter pada respon frekuensi LPF**



Parameter-parameter penting dari suatu LPF:

1. **Passband** adalah daerah frekuensi yang akan diteruskan oleh filter.
2. **Stopband** adalah daerah frekuensi yang tidak akan diteruskan oleh filter. Komponen sinusoidal pada daerah ini tidak benar-benar disaring oleh filter melainkan telah sangat dilemahkan dengan pelemahan lebih besar atau sama dengan  $\delta_s$ .
3. **Transition band** adalah lebar daerah frekuensi maksimum yang ditoleransi sebagai daerah transisi dari passband ke stopband. Komponen sinusoidal pada daerah ini masih dilewatkan oleh filter tetapi sudah mengalami sedikit pelemahan.
4. **Frekuensi cut-off ( $f_c$ )** adalah frekuensi yang menentukan batas komponen sinusoidal yang dapat diteruskan oleh filter tersebut. Parameter ini juga dikenal sebagai frekuensi passband edge ( $F_p$ ).
5. **Frekuensi stopband edge ( $f_s$ )** adalah frekuensi yang menentukan batas komponen sinusoidal yang dapat dianggap tidak diteruskan oleh filter tersebut.
6. **Passband ripple ( $\delta_p$ )** adalah ripple yang masih dapat ditoleransikan pada daerah passband. Passband ripple ini biasanya dinyatakan dalam bentuk desibel (dB).
7. **Stopband attenuation ( $\delta_s$ )** adalah pelemahan minimum untuk komponen sinusoidal yang ada di wilayah stopband. Stopband attenuation ini biasanya dinyatakan dalam bentuk desibel (dB).

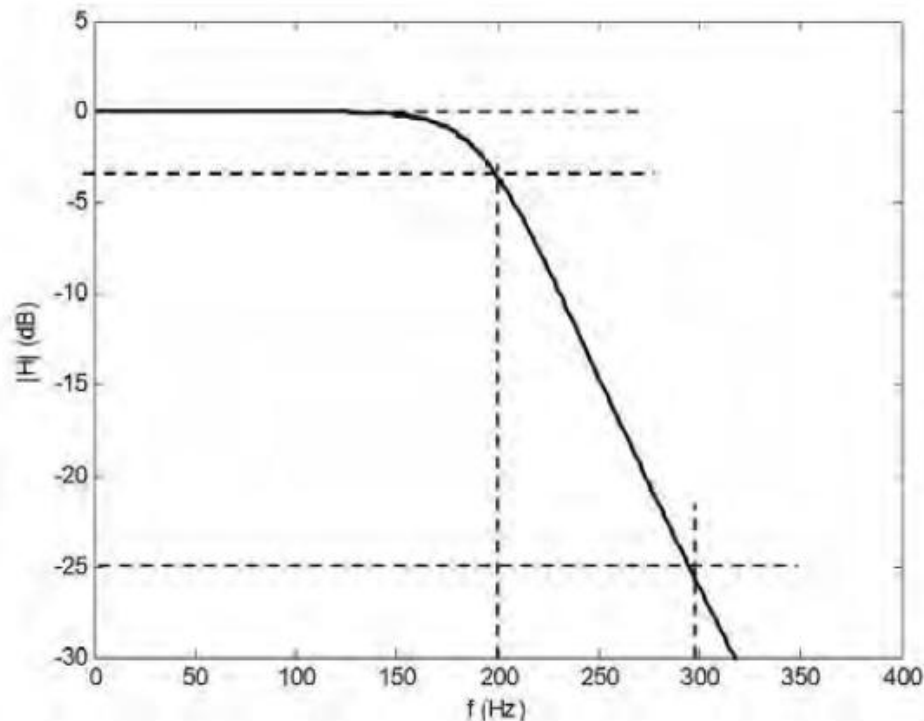


# Parameter Filter

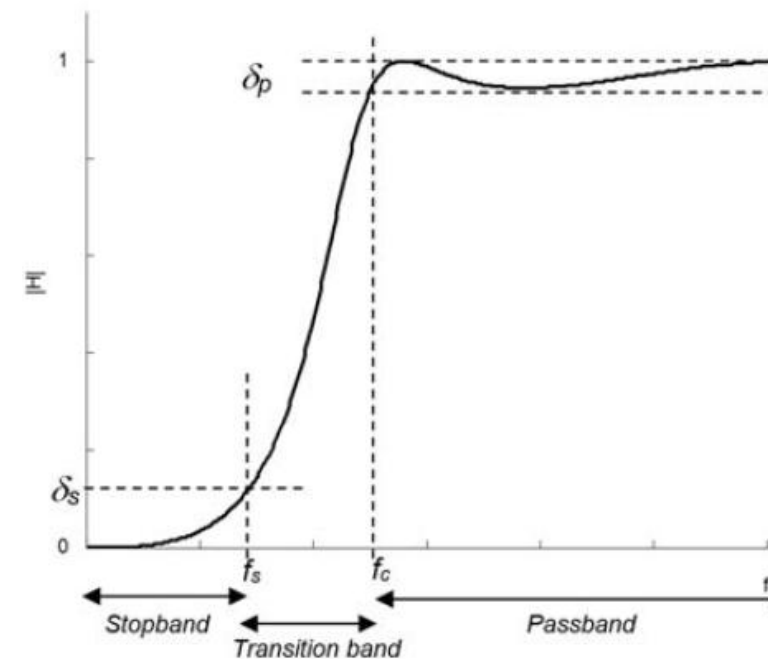


Gambar 10.8 menunjukkan contoh suatu filter LPF dengan  $\delta_p = 3 \text{ dB}$ ,  $f_c = 200 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 300 \text{ Hz}$ , dan  $\delta_s = -25 \text{ dB}$

Contoh respon frekuensi LPF Parameter yang sama juga berlaku pada filter HPF seperti ditunjukkan pada Gambar 10.9.



**Gambar 10.8**  
Contoh respon frekuensi LPF

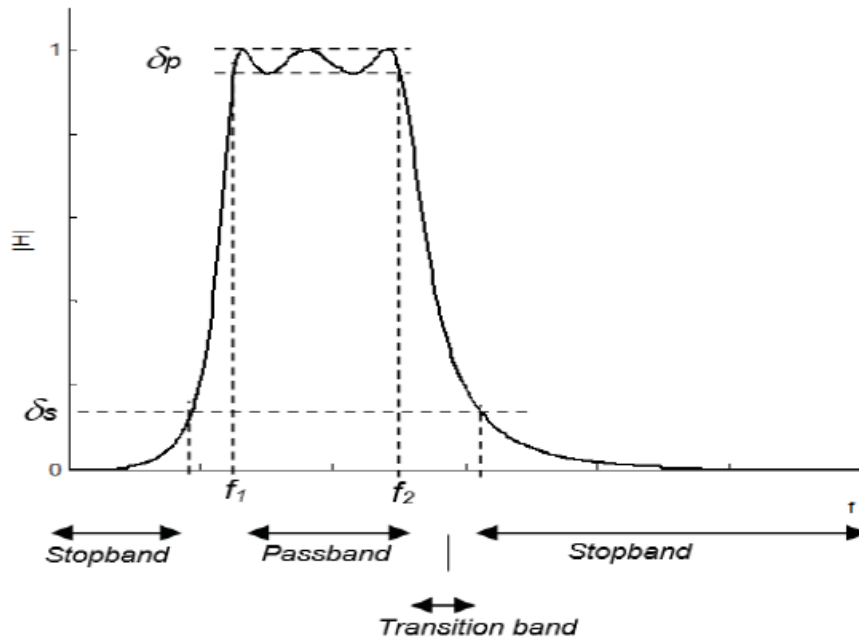


**Gambar 10.9**  
Parameter pada respon frekuensi HPF

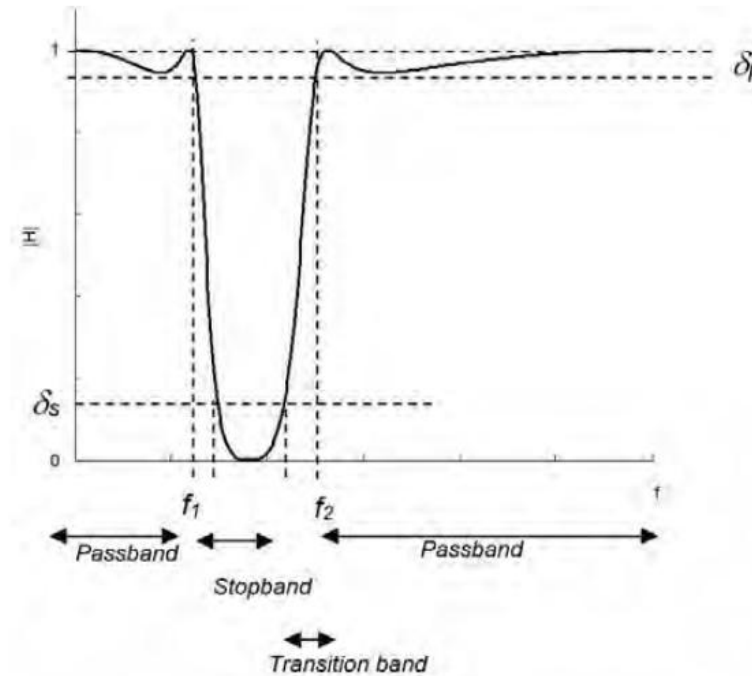
# Parameter Filter



Parameter untuk filter BPF dan BSF ditunjukkan pada Gambar 10.10 dan 10.11



**Gambar 10.10**  
Parameter pada respon frekuensi BPF



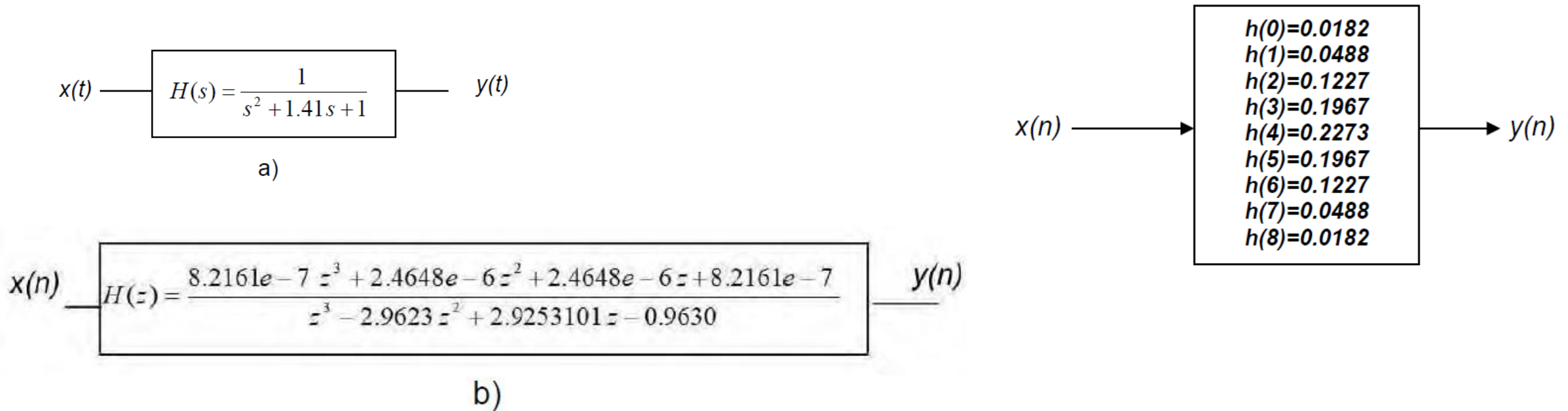
**Gambar 10.11**  
Parameter pada respon frekuensi BSF



# Orde dari Filter



Orde dari filter ditentukan oleh banyaknya koefisien dalam persamaan *transfer function*-nya. Jika suatu filter analog dinyatakan dalam bentuk  $H(s)$ , maka orde dari filter tersebut adalah pangkat tertinggi dari  $s$  pada persamaan  $H(s)$ . Jika suatu filter digital dinyatakan dalam bentuk transfer function,  $H(z)$ , maka orde dari filter itu adalah pangkat tertinggi dari  $z$ . Suatu filter digital yang dinyatakan dalam bentuk *impulse response* memiliki orde sebesar  $N-1$ , dimana  $N$  adalah panjang dari  $h(n)$ . Filter pada Gambar 10.12 menunjukkan contoh filter dengan berbagai orde.



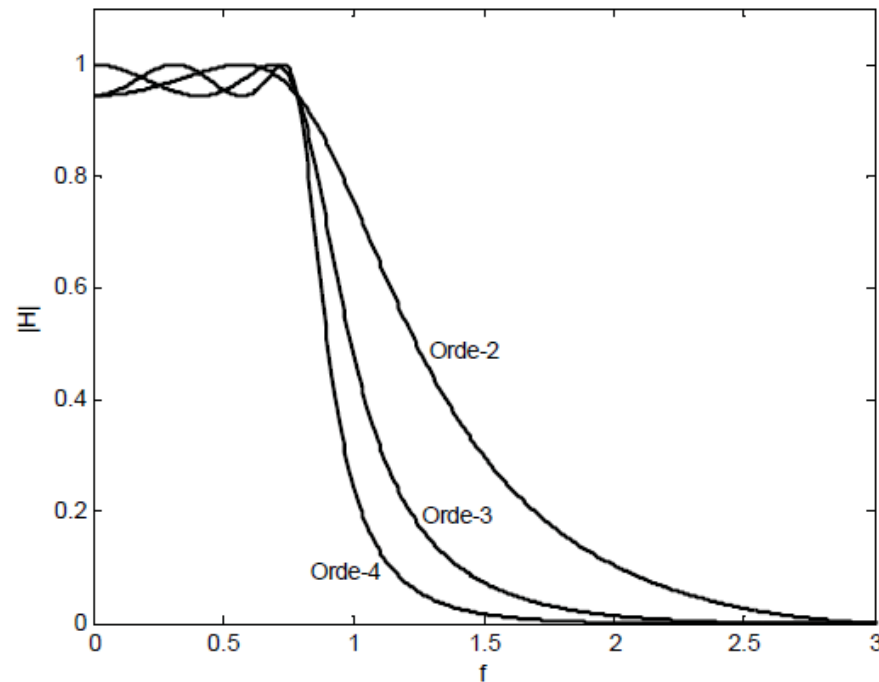
Gambar 10.12

a) Filter analog orde-2, b) Filter digital orde-3, c) Filter digital orde-8

# Orde dari Filter



Orde dari filter menentukan kemiripan respon frekuensi suatu filter dengan respon ideal. Semakin tinggi orde suatu filter, semakin sempit pula transition band-nya. Filter yang baik memiliki transition band yang sempit seperti ditunjukkan pada Gambar 10.13. Di sisi lain, semakin tinggi orde dari suatu filter, semakin kompleks persamaan transfer function-nya, yang akan berakibat pada rumitnya proses implementasi dari filter tersebut.



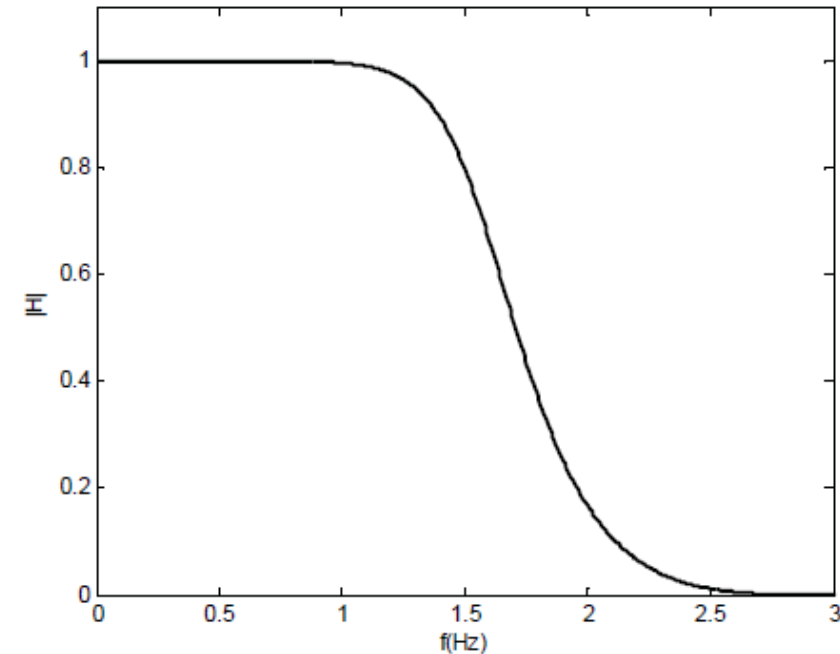
**Gambar 10.13**  
**Respon frekuensi filter LPF orde-2, orde-3, dan orde-4**



Filter dapat diimplementasikan berupa filter analog atau filter digital. Filter analog menggunakan komponen elektronika seperti resistor, kapasitor, dan induktor. Teori tentang filter pertama-tama dikembangkan pada filter analog sehingga untuk dapat memahami konsep lengkap dari filter digital, diperlukan pemahaman karakteristik filter analog. Filter analog dapat dibedakan atas beberapa tipe berdasarkan karakteristik dari parameter-parameternya.

## 1. Filter Butterworth

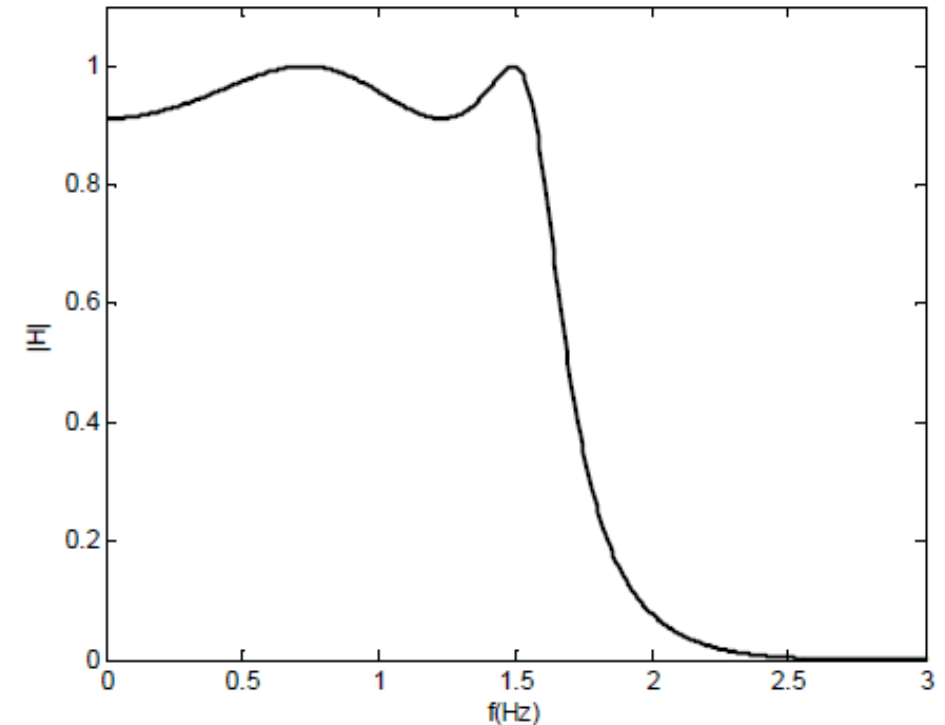
Filter Butterworth diperkenalkan oleh seorang ilmuwan Inggris bernama Stephen Butterworth pada 1930. Filter Butterworth memiliki **passband yang rata (flat passband)** sehingga filter ini melakukan penguatan yang sama terhadap hampir semua komponen sinusoidal pada daerah passband. Kelemahan dari filter ini adalah memiliki kemiringan di daerah **transition band** yang sangat landai sehingga diperlukan orde yang sangat tinggi untuk mempersempit transition band. Gambar 10.14 menunjukkan respon frekuensi dari suatu filter LPF Butterworth.



**Gambar 10.14**  
**Filter LPF Butterworth orde-4**

## 2. Filter Chebyshev Tipe I

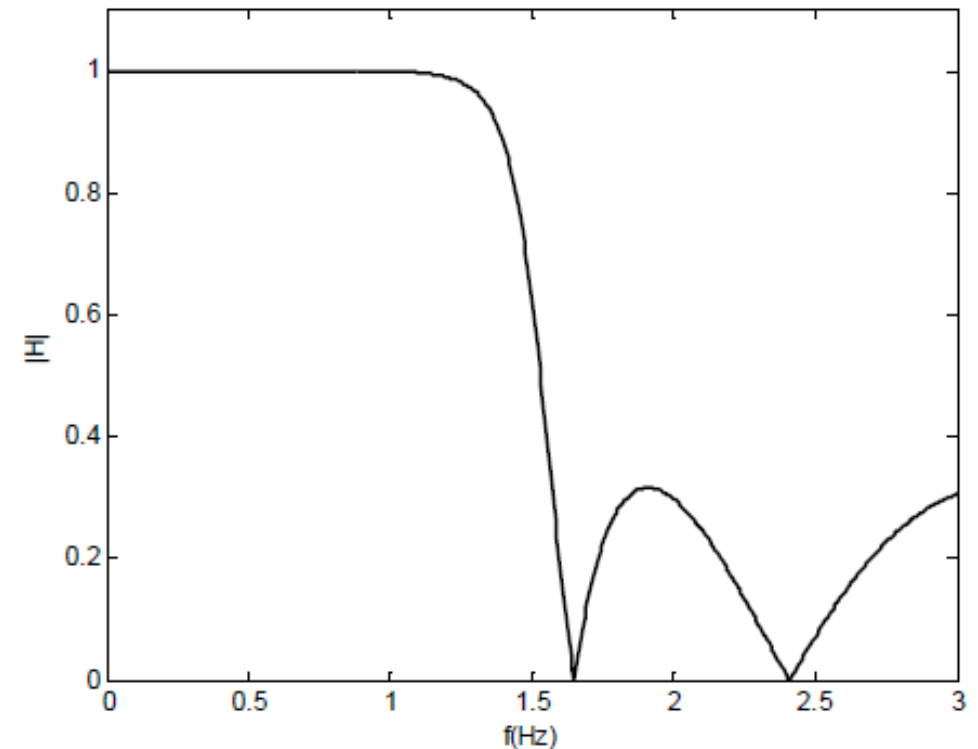
Filter Chebyshev Tipe I diturunkan dari persamaan polinomial yang diperkenalkan oleh Pafnuty Chebyshev. Filter Chebyshev Tipe I ini memiliki ripple pada daerah passband sehingga filter ini melakukan penguatan yang tidak sama terhadap komponen sinusoidal pada daerah passband. Kelebihan filter ini adalah memiliki kemiringan di daerah transition band yang lebih curam sehingga dapat memiliki transition band yang sempit pada orde kecil. Gambar 10.15 menunjukkan respon frekuensi dari suatu filter LPF Chebyshev Tipe I.



**Gambar 10.15**  
**Filter LPF Chebyshev Tipe I orde-4**

## 3. Filter Chebyshev Tipe II

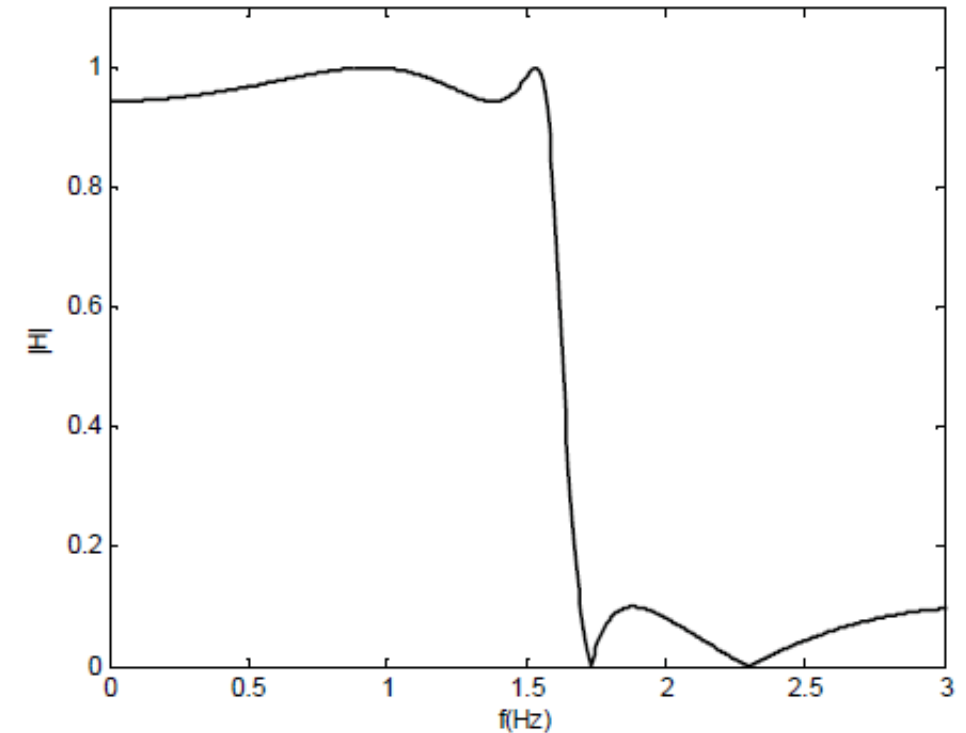
Filter Chebyshev Tipe II diturunkan dari persamaan inverse polinomial Chebyshev. Filter Chebyshev Tipe II bertujuan untuk membuat filter dengan karakteristik transition band yang sama curam dengan Chebyshev Tipe I, tetapi memiliki passband yang rata. Sebagai konsekuensinya, filter ini memiliki ripple pada daerah stopband sehingga pelemahan pada daerah stopband & tidak cukup baik untuk memfilter komponen sinusoidal yang tidak ingin dilewatkan. Gambar 10.16 menunjukkan respon frekuensi dari suatu filter LPF Chebyshev Tipe II



**Gambar 10.16**  
**Filter LPF Chebyshev Tipe II orde-4**

## 4. Filter Elliptic

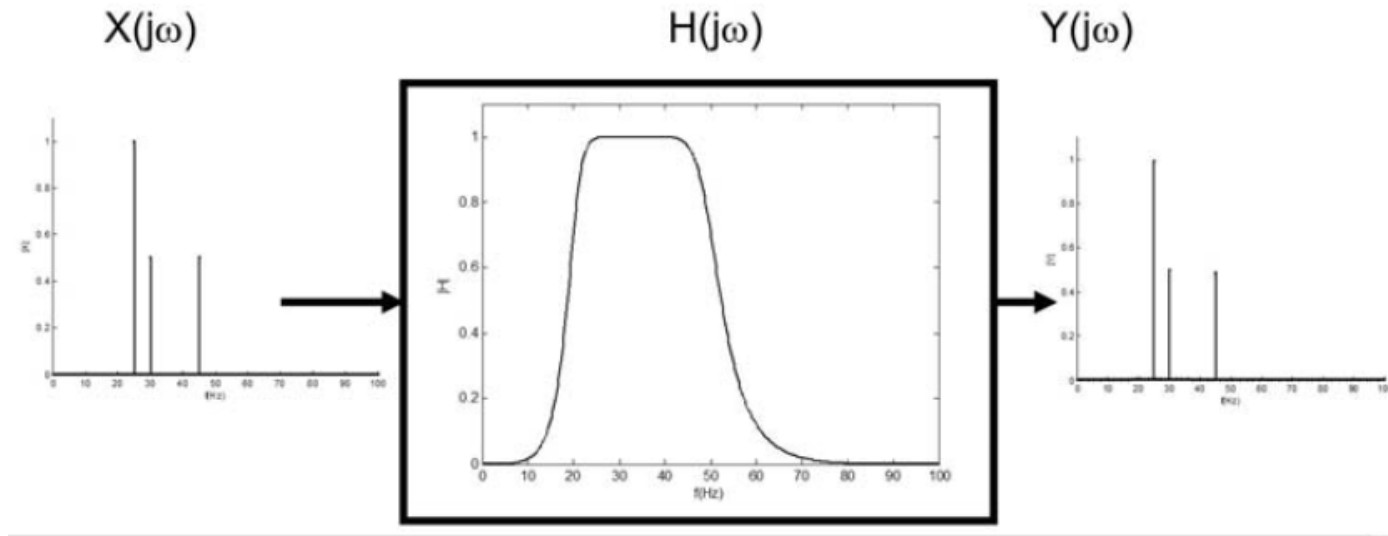
Filter Elliptic juga dikenal dengan nama filter Cauer merupakan filter yang dengan transition band yang curam tetapi memiliki ripple pada passband dan stopband. Besarnya ripple ini ditentukan pada saat filter ini dirancang. Jika ripple pada passband dibuat kecil maka ripple pada stopband akan besar, demikian sebaliknya. Gambar 10.17 menunjukkan respon frekuensi dari suatu filter LPF Elliptic.



**Gambar 10.17**  
**Filter LPF Elliptic orde-4**



# Pergeseran Fase pada Filter



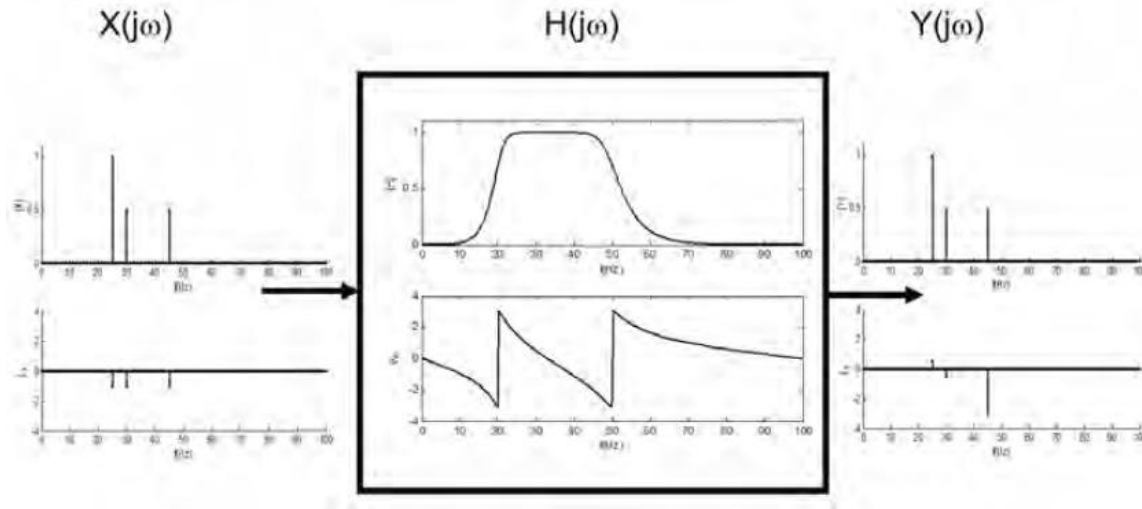
**Gambar 10.18**

**Proses filter pada sinyal input dengan dua komponen sinusoidal**

Gambar 10.18 menunjukkan suatu filter BPF dengan passband dari 20 sampai 50 Hz. Karena sinyal input hanya mempunyai tiga komponen sinusoidal dengan frekuensi yang terletak dalam daerah passband, maka filter ini meneruskan semua komponen sinusoidal dari sinyal input, dengan katalain  $|Y| = |X|$ .

Kita tentunya berharap bahwa sinyal output,  $y(t)$ , akan sama dengan sinyal input,  $x(t)$ , tetapi ternyata kita bisa mendapati  $y(t) \neq x(t)$ . Penyebabnya adalah karena fase sinyal output tidak sama dengan fase sinyal input,  $\varphi_y \neq \varphi_x$ . Dengan kata lain, telah terjadi pergeseran fase pada output.

# Pergeseran Fase pada Filter



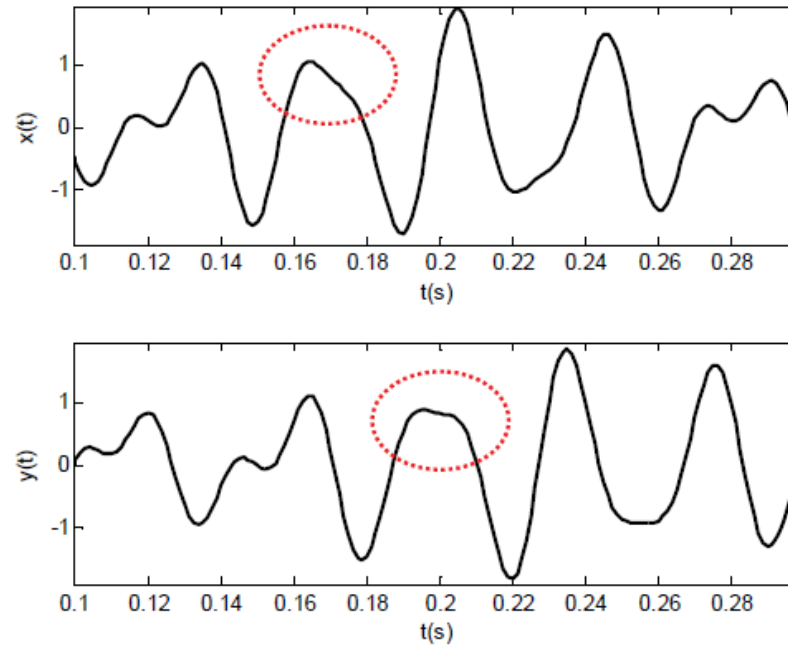
**Gambar 10.19**  
**Pergeseran fase pada proses filter**

Gambar 10.19 menunjukkan bahwa ketiga komponen sinusoidal pada sinyal input,  $x(t)$ , sama-sama memiliki fase sebesar  $-1$  rad. Setelah dilewatkan pada filter, amplitudo kedua komponen ini tetap sama tetapi fasenya telah berubah menjadi  $0.5$  rad untuk komponen pertama,  $-0.5$  rad untuk komponen kedua, dan  $-3$  rad untuk komponen ketiga. Pergeseran ini terjadi karena fase output merupakan penjumlahan fase input dan fase dari filter.

$$\varphi_y = \varphi_x + \varphi_h$$

Pergeseran ini akan menyebabkan  $y(t) \neq x(t)$ . seperti ditunjukkan pada Gambar 10.20, khususnya pada daerah yang dilingkari.

# Pergeseran Fase pada Filter



**Gambar 10.20**  
**Perbedaan bentuk input dan output karena pergeseran fase**

Jika suatu filter digunakan pada aplikasi yang mementingkan bentuk sinyal maka pergeseran fasa ini dapat merusak bentuk sinyal sekalipun pada daerah passband. Kita harus berhati-hati dalam menggunakan sebuah filter untuk menghilangkan noise pada sinyal jantung (ECG). Jika pergeseran fase ini tidak kita atur dengan baik maka filter tersebut bukan hanya menghilangkan noise tetapi juga merusak bentuk sinyal ECG.



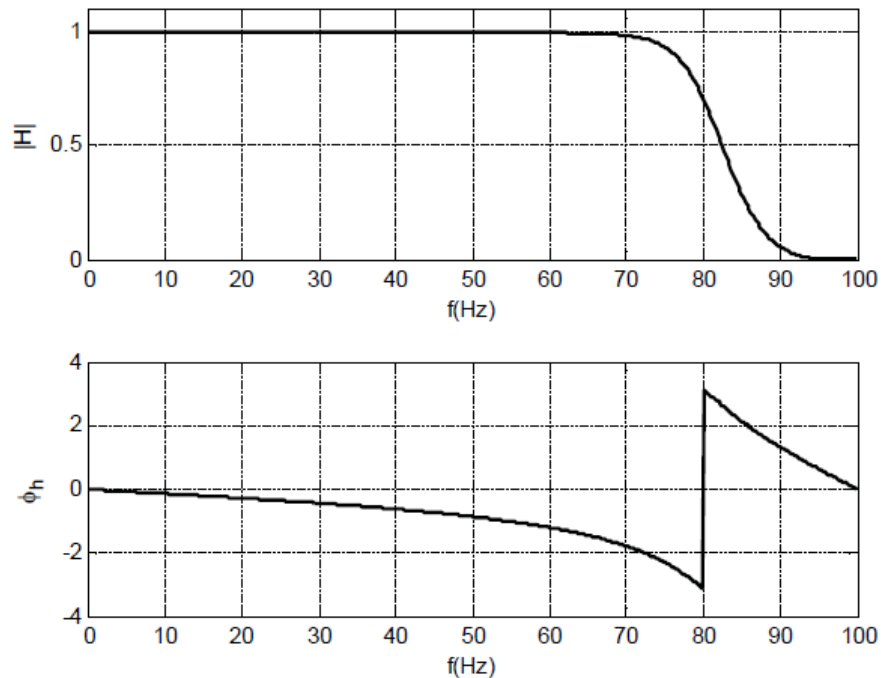
Masalah pergeseran fase di atas dapat diatasi jika kita menggunakan filter yang sama sekali tidak mengubah fase dari komponen sinusoidal sinyal input, atau dengan kata lain, respon fase dari filter,  $\phi_h$ , selalu nol di daerah passband. Harapan ini tidak mungkin diimplementasikan karena semua filter melakukan perubahan fase pada sinyal input.

Karena pergeseran fase dari suatu komponen sinusoidal menentukan delay yang terjadi pada komponen sinusoidal itu, maka pergeseran fase yang terjadi pada suatu filter tidak akan merusak bentuk sinyal input jika semua komponen sinusoidal di daerah passband di-delay dengan waktu yang sama. Kerusakan bentuk sinyal terjadi jika komponen-komponen sinusoidal di-delay dengan waktu yang berbeda-beda. Semua komponen sinusoidal akan di-delay dengan waktu yang sama jika respon fase dari suatu filter berbentuk garis lurus (linier).

# Group Delay



Gambar 10.21 menampilkan respon dari suatu filter dengan respon fase yang tidak linier (tidak berbentuk garis lurus). Tabel 10.1 menampilkan pergeseran fase dan delay dari beberapa komponen sinusoidal pada filter tersebut. Tabel tersebut menunjukkan bahwa komponen sinusoidal di-delay dengan waktu yang berbeda-beda.



**Gambar 10.21**

**Filter dengan pergeseran fase tidak linier**

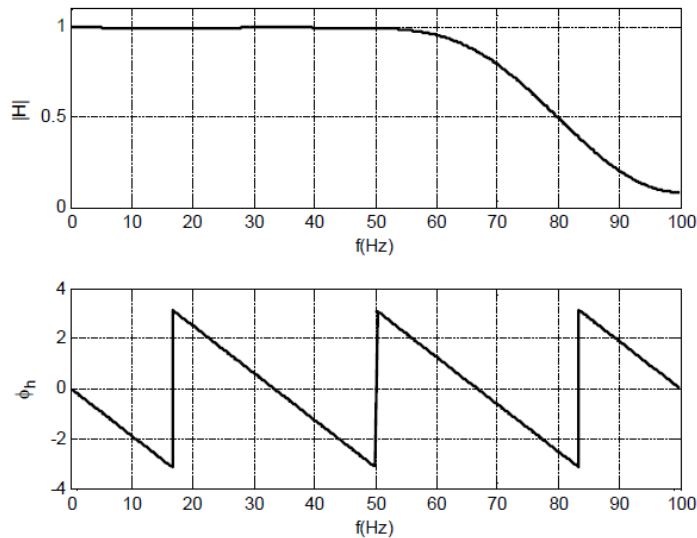
**Tabel 10.1**  
**Pergeseran fase dan delay dari filter Gambar 10.20**

Komponen sinusoidal (Hz)	Pergeseran fase (radian)	Delay (ms)
20	-0.276	2.2
30	-0.434	2.3
40	-0.622	2.5
50	-0.862	2.7
60	-1.206	3.2
70	-1.792	4.1

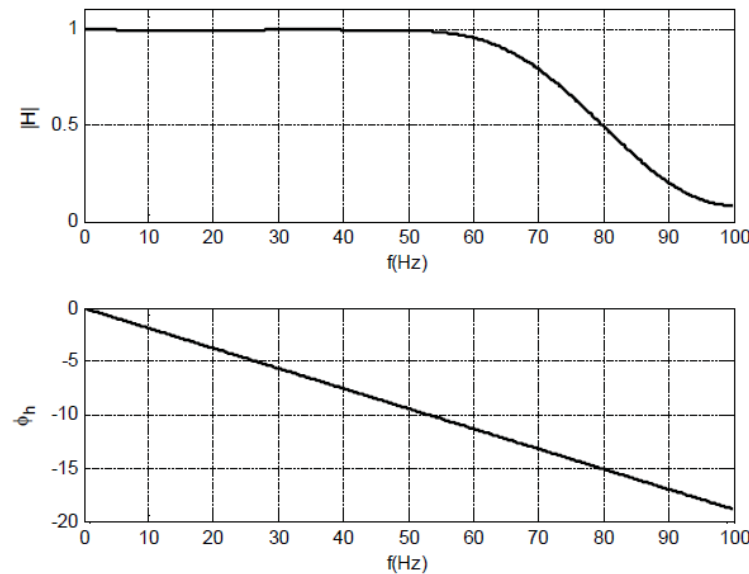
# Group Delay



Gambar 10.22 menampilkan respon dari suatu filter dengan respon fase yang linier (berbentuk garis lurus). Respon fase dari filter tersebut terlihat seperti gelombang gergaji karena hanya digambarkan dari  $-\pi$  sampai  $\pi$ . Sesungguhnya kurva respon fase tersebut berbentuk garis lurus seperti pada Gambar 10.23. Tabel 10.2 menampilkan pergeseran fase dan delay dari beberapa komponen sinusoidal pada filter tersebut. Tabel tersebut menunjukkan bahwa semua komponen sinusoidal di-delay dengan waktu yang sama.



**Gambar 10.22**  
Filter dengan pergeseran fase linier



**Gambar 10.23**  
Filter dengan pergeseran fase linier yang digambar dalam bentuk garis lurus

**Tabel 10.2**  
Pergeseran fase dan delay dari filter Gambar 10.22

Komponen sinusoidal (Hz)	Pergeseran fase (radian)	Delay (ms)
20	-3.770	30
30	-5.655	30
40	-7.540	30
50	-9.4248	30
60	-11.3104	30
70	-13.1944	30

Jika respon fase dari suatu filter bersifat linier maka semua komponen sinusoidal dalam sinyal input akan di-delay dengan waktu yang sama sehingga tidak akan merusak bentuk sinyal. Besarnya waktu delay yang terjadi karena perseseran fase ini disebut group delay. Filter pada tabel 10.2 memiliki group delay sebesar 30 ms.