

# Telekomunikasi untuk Pemula

Arsyad Ramadhan Darlis  
Poernomo Trisapto  
Lita Lidyawati  
Lucia Jambola

 **penerbit itenas**

Jl. PKH. Mustapha No.23, Bandung 40124  
Telp. +62 22 7272215, Fax.: +62 22 7202892  
e-mail: [penerbit@itenas.ac.id](mailto:penerbit@itenas.ac.id)

ISBN 978-623-7525-34-9



 **penerbit itenas**

# **Telekomunikasi untuk Pemula**

**Oleh:**

**Arsyad Ramadhan Darlis**

**Poernomo Trisapto**

**Lita Lidyawati**

**Lucia Jambola**

Edisi 1, November 2020

Hak Cipta dilindungi undang-undang  
©2020, Penerbit Itenas

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit

---

Hak Cipta pada Penerbit Itenas, 2020

ISBN: 978-623-7525-34-9

Penerbit Itenas,  
Jl. PKH. Mustopha No.23 Bandung  
Telp.: +62 22 7272215, Fax: +62 22 7202892  
Email: [penerbit@itenas.ac.id](mailto:penerbit@itenas.ac.id)

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga Buku Telekomunikasi untuk Pemula telah dapat diselesaikan. Buku ini memberikan pemahaman mendasar secara teoritis dan aplikatif mengenai hal – hal yang perlu diketahui oleh pembaca sebagai mahasiswa/dosen/praktisi agar mendapatkan gambaran dengan secara jelas dalam penyelesaian masalah mengenai dunia telekomunikasi.

Kami sampaikan terimakasih kepada Rektor Institut Teknologi Nasional Bandung Prof. Meilinda Nurbanasari, Dekan Fakultas Teknologi Industri Jono Suhartono, Ph.D., dan Ketua Program Studi Teknik Elektro Ratna Susana, M.T. yang telah mendukung dalam penyusunan buku ini. Terimakasih juga kami sampaikan kepada Bapak Poernomo Trisapto, Ibu Lita Lidyawati, dan Ibu Lucia Jambola atas segala kontribusi didalam penyempurnaan buku ini.

Terimakasih kepada Bapak Agus Wardana yang telah ikut serta berkontribusi dalam proses editing dan layouting serta seluruh jajaran dosen Program Studi Teknik Elektro dan semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, yang sudah ikut membantu dalam proses penyelesaian buku ini.

Kami menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam buku ini untuk itu kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan buku ini sangat diharapkan. Dan semoga buku ini dapat memberikan maanfaat bagi pembaca khususnya dan bagi semua pihak dari segala lapisan yang membutuhkan.

Bandung, November 2020  
Penyusun,

Arsyad Ramadhan Darlis

## DAFTAR ISI

<b>Kata Pengantar .....</b>	<b>i</b>
<b>Daftar Isi .....</b>	<b>ii</b>
 <b>Bab 1 Sinyal dan Informasi .....</b>	 <b>1</b>
1.1. Pengertian Sinyal dan Informasi .....	1
1.2. Sinyal Listrik .....	2
1.3. Spektrum Sinyal .....	4
1.4. Analisis Sinyal .....	5
1.5. Sistem .....	9
 <b>Bab 2 Sistem Transmisi .....</b>	 <b>11</b>
2.1. Metoda Transmisi .....	11
2.2. Media Transmisi .....	13
2.3. Media Fisik .....	13
2.4. Media Non Fisik .....	17
2.5. Dasar Sistem Penyambungan ( <i>Switching</i> ) .....	23
 <b>Bab 3 Pemrosesan Sinyal .....</b>	 <b>25</b>
3.1. Modulasi dan Demodulasi .....	25
3.2. Modulasi Analog .....	27
3.3. Modulasi Pulsa .....	32
3.4. Modulasi Digital .....	33
 <b>Bab 4 Multiplexing .....</b>	 <b>35</b>
4.1. Pengertian Multiplexing .....	35
4.2. <i>Frequency Division Multiplexing</i> (FDM) .....	36
4.3. <i>Time Division Multiplexing</i> (TDM) .....	39
 <b>Bab 5 Noise dan Level Daya .....</b>	 <b>41</b>
5.1. <i>Noise</i> (Derau) .....	41
5.2. <i>Noise Eksternal</i> .....	41
5.3. <i>Noise Internal</i> .....	43
5.4. Istilah dalam Noise .....	45
5.5. Level Daya Sinyal .....	46
 <b>Daftar Pustaka .....</b>	 <b>49</b>

# 1 SINYAL DAN INFORMASI

## 1.1. Pengertian sinyal dan informasi

Sinyal (*signal*), biasanya diartikan suatu pola atau corak, yang terdengar atau terlihat, yang mengandung berita/pesan atau bagian dari berita/pesan tersebut.

Wujud sinyal dapat:

- a. Langsung terindra:
  1. Terlihat oleh mata: tulisan, coretan, dan gambar
  2. Terdengar oleh telinga: suara (*voice*) atau percakapan (*speech*)
- b. Tidak langsung terindra: sinyal listrik, sinyal atau gelombang elektromagnetik

Berita/pesan yang dikandung (menumpang pada) sinyal itulah yang disebut informasi (*information, message*). Informasi adalah sesuatu yang dapat dimengerti dan diartikan, yang dikandung oleh sinyal yang tampil. Informasi dapat dipertukarkan atau ditransfer, yang dalam penukarannya (pengiriman, penyaluran dan penerimaan) ditumpangkan kepada jenis sinyal yang sesuai.

Informasi timbul dari dua macam sumber:

- a. Ide dari pikiran (*mind*) seseorang, dan
- b. Keadaan lingkungan (alam), misalnya aliran udara dan cairan, temperatur, tekanan gas atau cairan dan sebagainya.

Dikenal pula dua macam penerima/tujuan, kemana informasi “diserap”, yakni:

- a. Pikiran seseorang
- b. Peralatan yang berespons / tanggap terhadap sinyal tertentu atau perubahan (konversi) dari padanya, misalkan meter, indikator dan aktuator penggerak alat tertentu.

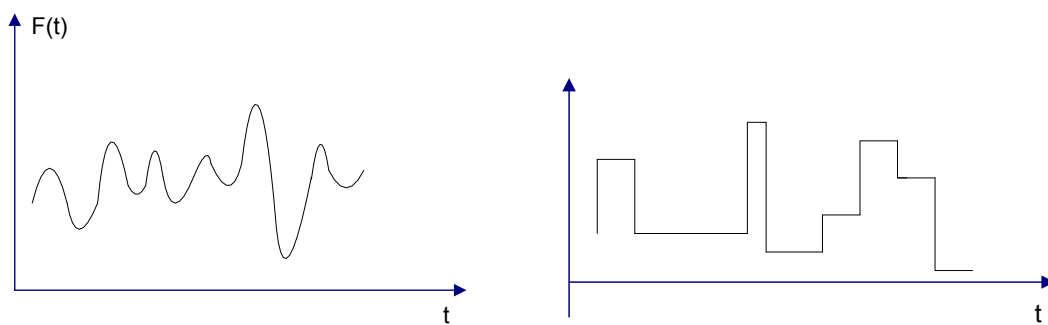
Pada komunikasi listrik, sinyal yang dipertukarkan berwujud sinyal listrik. Di sisi pengirim, terjadi perubahan dari bentuk informasi semula ke sinyal listrik (seterusnya disebut sinyal informasi). Sedang di sisi penerima terjadi perubahan kembali sinyal informasi yang diterima ke bentuk informasi semula atau besaran listrik yang sesuai untuk ditampilkan.

## 1.2. Sinyal Listrik

Sinyal listrik dapat digambarkan menjadi dua bentuk yaitu pada bidang waktu (t) dan pada bidang frekuensi (f). Pada dasarnya dikenal dua macam sinyal listrik:

1. Analog: bentuk gelombang kontinu menurut waktu
2. Diskrit: bentuk gelombang tidak kontinu

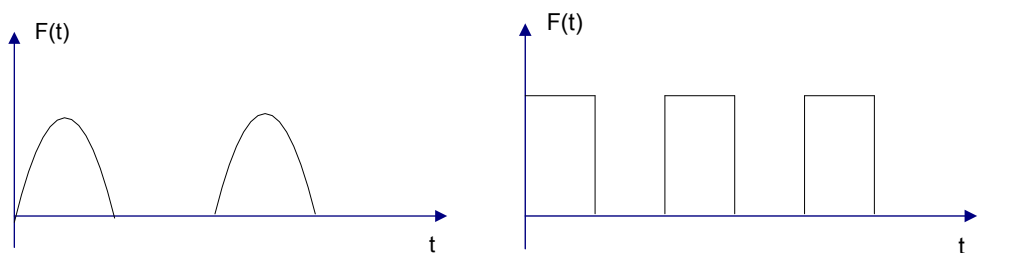
Menurut keteraturannya terhadap waktu, gelombang dibagi menjadi gelombang sembarang dan periodik, yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



a. Analog – Sembarang

b. Diskrit – Sembarang

Gambar 1. Gelombang sembarang



a. Analog – Periodik

b. Diskrit – Periodik

Gambar 2. Gelombang periodic

Fungsi dari gelombang periodik ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$F(t) = F(t + n \cdot T) \quad [\text{Volt}] \quad (1)$$

dimana :

$T$  = perioda waktu [sekon]

$n$  = bilangan bulat 1, 2, , , bilangan bulat

Gelombang sinyal harmonis: atau sering disebut gelombang sinusoida, merupakan bentuk paling teratur sebagai bentuk dasar gelombang, yang dipakai untuk menganalisa bentuk gelombang lain. Contoh gelombang tegangan listrik, dinyatakan pada Persamaan (2).

$$F(t) = V(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad [\text{Volt}] \quad (2)$$

dimana :

$A$  = amplituda [volt]

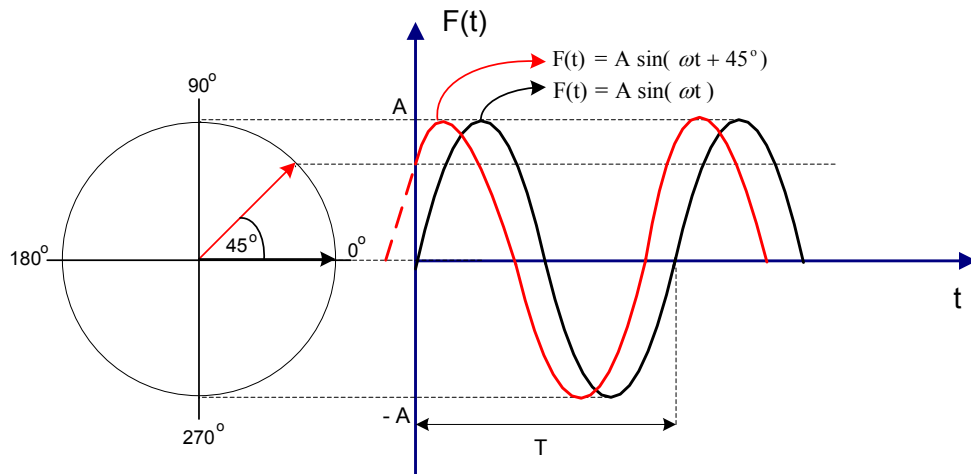
$\omega$  = kecepatan sudut =  $2\pi f$  [radian per detik]

$f$  = frekuensi =  $\frac{1}{T}$  [Hz, cycle per detik]

$\phi$  = sudut fasa (radian atau  $^\circ$ ) =  $\sin^{-1} \frac{A(t-\phi)}{A}$

= simpangan pada waktu  $t = 0$

Gelombang  $F(t)$  menyatakan nilai besaran untuk setiap  $t$  (sebagai variabel). Dikatakan gambaran gelombang  $F(t)$  ini disebut “Time Domain”.



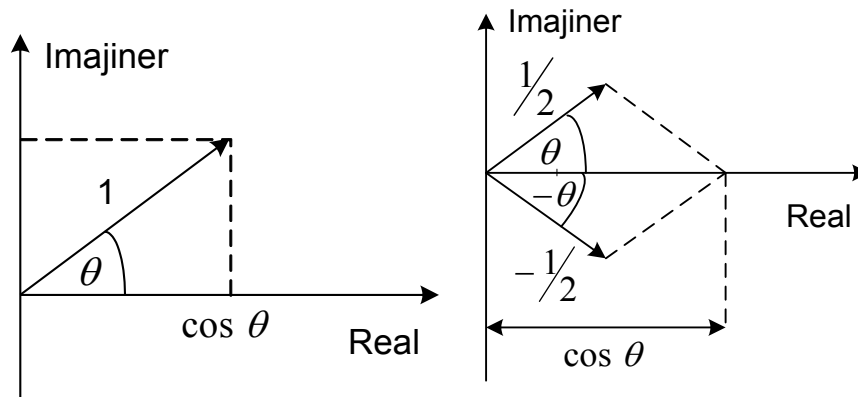
**Gambar 3. Sinyal Sinusoida dan Pergeserannya**

Dari Gambar 3 terlihat bahwa gelombang sinusoida merupakan perwujudan sebuah vektor berputar fasor yang diambil nilai proyeksinya terhadap sumbu tegak. Bila ditinjau lebih rinci, sebuah fasor dinyatakan pada Persamaan (3).

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta \quad (3)$$



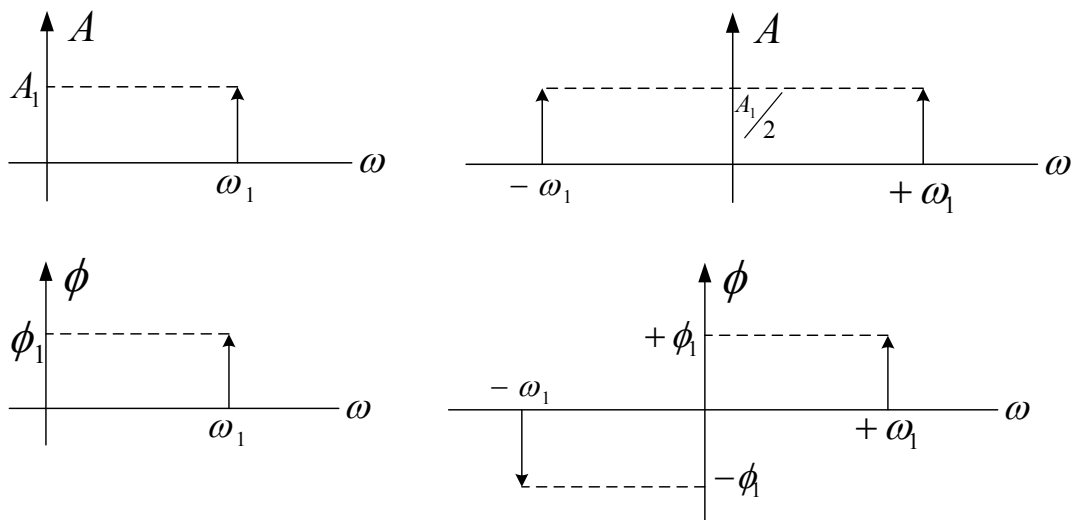
Dan apabila digambarkan pada sumbu kompleks, akan terlihat seperti Gambar 4.



**Gambar 4. Sumbu Kompleks dari Sebuah Fasor**

### 1.3. Spektrum Sinyal

Spektrum sinyal merupakan (perubahan) nilai sinyal pada bidang frekuensi, gambar ini didapat setelah diadakan analisa dari gelombang sinyal yang sama.



**Gambar 5. Spektrum Sinyal**

#### 1.4. Analisis Sinyal

Gelombang sinyal non harmonis, periodik atau tidak; tidak dapat langsung terbaca atau terukur nilai amplituda, frekuensi, maupun fasanya. Untuk pemrosesan sinyal, karakteristik tanggapan rangkaian atau fungsi transfernya akan dihadapkan dengan karakteristik sinyal yang masuk. Untuk mengetahui amplitude, frekuensi, dan fasa sinyal, perlu diadakan analisis terhadapnya.

##### a. Analisis Secara Matematis

Analisis ini terbatas untuk bentuk gelombang tertentu.

##### 1. Penjumlahan dua sinyal harmonis

Dua sinyal:

$$V_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1)$$

$$V_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2)$$

dimana :  $\omega_2 > \omega_1$

Penjumlahan  $V_1(t) + V_2(t) = V_A(t)$

$$V_A(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) \quad (4)$$

##### 2. Perkalian dua sinyal harmonis

$$\begin{aligned} V_B(t) &= V_1(t) \cdot V_2(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \cdot A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) \\ &= \frac{A_1 A_2}{2} [\{\cos(\omega_1 + \omega_2)t + (\phi_1 + \phi_2)\} + \{\cos(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)\}] \end{aligned} \quad (5)$$

$V_1(t)$ ,  $V_2(t)$ ,  $V_A(t)$ ,  $V_B(t)$  terlihat seperti pada Gambar 6.

##### b. Analisis Secara Grafis

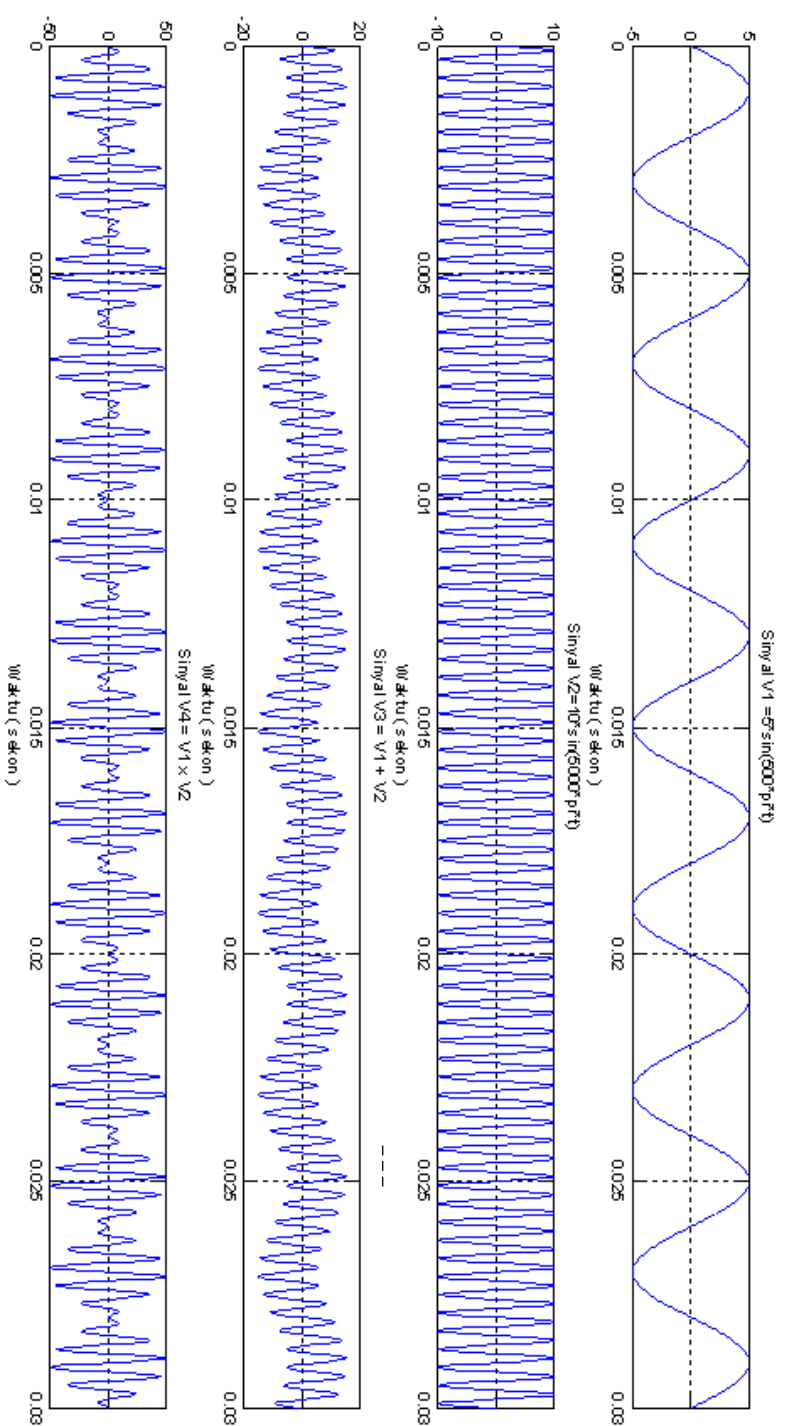
Sinyal periodik dinyatakan dengan deret Fourier, dimana sinyal periodik merupakan gabungan sinyal – sinyal harmonis dengan frekuensi dasar  $f_1$  dan frekuensi kelipatan dari frekuensi dasar, yang disebut harmonisa; dengan masing-masing amplitudanya.

$$V(t) = V(t + n T_1) \quad (6)$$

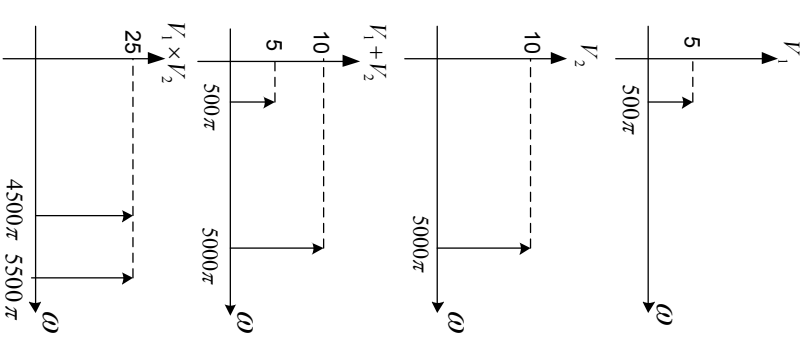
dimana :

$$T_1 = \text{Perioda} = \frac{1}{f_1} \quad [\text{sekon, s}]$$

$$f_1 = \text{frekuensi dasar [Hertz, Hz]}$$



Gambar 6. Bentuk Sinyal Hasil Analisis Secara Grafis



Dinyatakan

$$V(t) = a_0 + \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_2 t] \quad (7)$$

Dimana:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T_1/2}^{T_1/2} v(t) dt$$

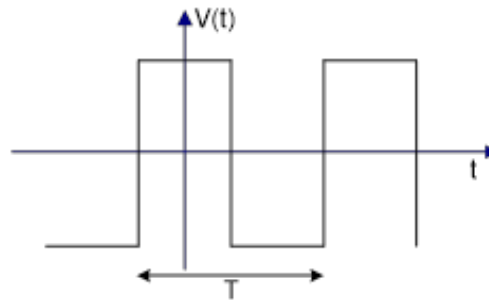
$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T_1/2}^{T_1/2} v(t) \cos n\omega t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T_1/2}^{T_1/2} v(t) \sin n\omega t dt$$

Contoh:

1. Sinyal Persegi:

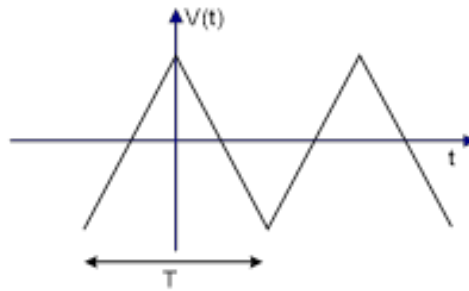
$$V(t) = \frac{4A}{\pi} \left[ \cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \dots \right]$$



**Gambar 7. Bentuk Sinyal Persegi**

2. Sinyal Segitiga

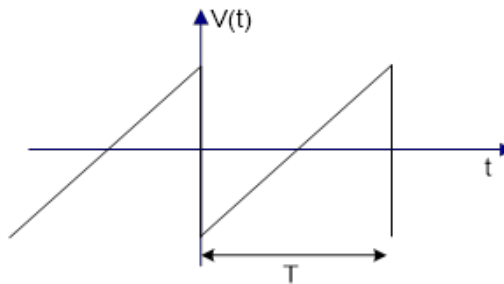
$$V(t) = \frac{8A}{\pi^2} \left[ \cos \omega t + \frac{1}{9} \cos 3\omega t + \frac{1}{25} \cos 5\omega t + \dots \right]$$



**Gambar 8. Bentuk sinyal segitiga**

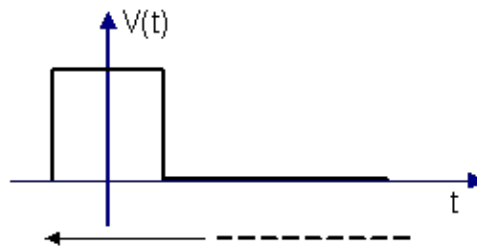
3. Sinyal Gigigergaji

$$V(t) = -\frac{2A}{\pi} \left[ \sin \omega t + \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots \right]$$



**Gambar 9. Bentuk sinyal gigi gergaji**

Pada sinyal non periodik bentuk sinyal dapat dilihat di Gambar 10 Sinyal non periodik dapat dianggap periodik, dengan perioda  $T = \text{tak hingga}$ .

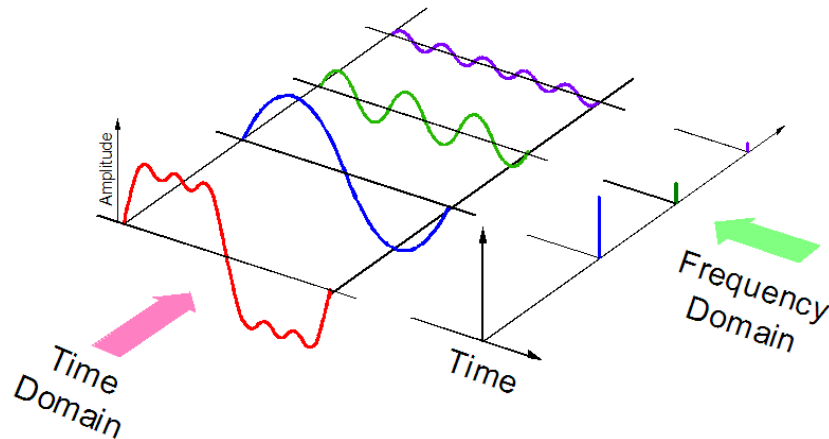


**Gambar 10. Bentuk sinyal nonperiodic**

Dengan diadakan analisa, dihasilkan komponen sinyal masing masing dengan *amplitude* ( $A_i$ ), Frekuensi ( $f_i$ ) dan fasa ( $\phi_i$ ). Dari komponen sinyal ini dapat digambarkan spektrum (frekuensi) sinyal yang merupakan gambaran lain dari sinyal tersebut.

c. Analisis dengan Alat Ukur

Nilai amplitudo komponen sinyal dalam bidang frekuensi dapat diamati dan diukur dengan *Spectrum Analyzer*, sebagaimana gelombang sinyal dalam bidang waktu, diamati dengan *Oscilloscope*. Spectrum Analyzer dapat menunjukkan nilai amplitudo semua bentuk sinyal tanpa memperlihatkan fasa relatif setiap komponen amplitudo. Hubungan antara *time domain* dan *frequency domain* dari sinyal persegi sebagai contoh ditunjukkan pada Gambar 11.

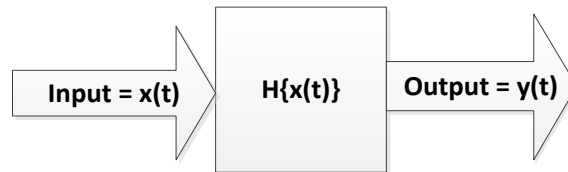


**Gambar 11. Bentuk Sinyal dalam Domain Waktu dan Frekuensi**

### 1.5. Sistem

Sistem adalah suatu algoritma atau alat yang beroperasi pada sinyal untuk menghasilkan sinyal dengan bentuk lain, atau dapat disebut sebagai pemroses sinyal. Sistem digambarkan sebagai kotak yang memiliki dua buah panah yang merepresentasikan sinyal. Panah yang masuk adalah sinyal masukan (*input*) yang akan diproses, sedangkan panah yang keluar merepresentasikan sinyal hasil pemrosesan (*output*).

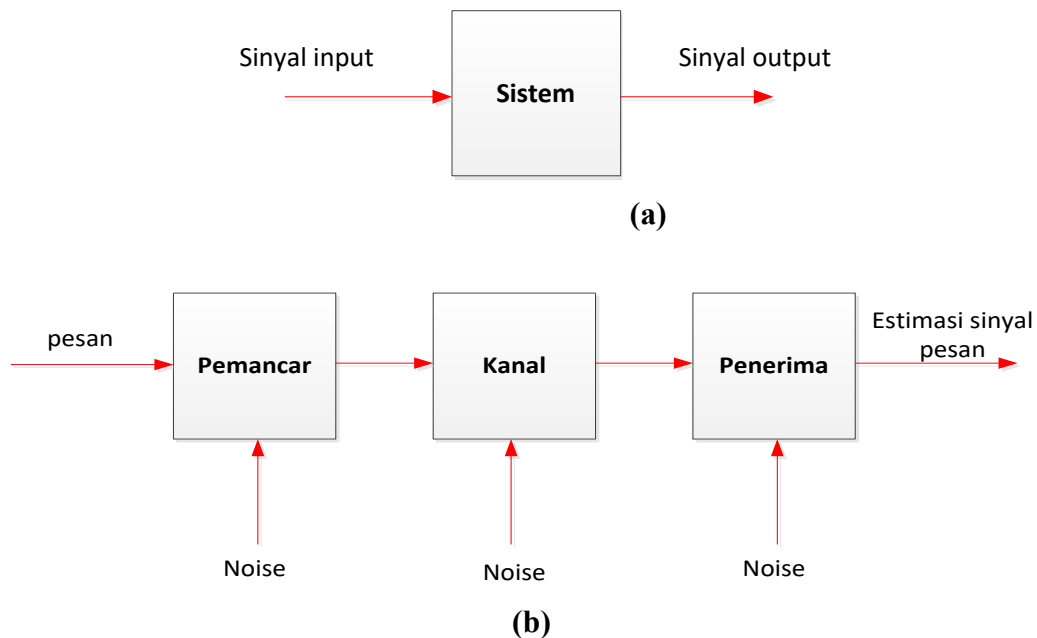
Sistem dapat dikategorikan dalam 2 (dua) macam, yaitu: sebagai alat fisik yang melakukan suatu operasi pada sinyal (contohnya: filter) dan sebagai alat non fisik (contoh nya: *software* yang melakukan sejumlah operasi-operasi matematik dan algoritma). Dua perbedaan pemodelan dalam bidang teknik: Sistem fisik dimodelkan dengan persamaan matematika, dan sinyal fisik dimodelkan dengan fungsi matematis.



**Gambar 12. Representasi Sistem Secara Umum**

Sistem dapat mentransformasi, mengolah, memproses, dan memetakan sinyal *input*,  $x(t)$ , sehingga menghasilkan sinyal *output*,  $y(t)$ . Berikut ini adalah beberapa contoh sistem:

1. Sistem pengenalan suara: sinyal *input* berupa sinyal suara (*voice signal*), sistemnya adalah komputer, dan sinyal *output* berupa identitas pembicara.
2. Sistem komunikasi: sinyal *input* dapat berupa sinyal pembicaraan atau data komputer, sistemnya terdiri dari pemancar, kanal, dan penerima. Sinyal outputnya berupa estimasi dari sinyal informasi yang terkandung pada pesan asli.



**Gambar 13. (a) Diagram Blok Representasi Sistem dan (b) Sistem Komunikasi**

# 2 SISTEM TRANSMISI

Sistem transmisi adalah sistem penyaluran sinyal informasi dari pengirim ke penerima meliputi metoda dan media transmisi yang digunakan.

## 2.1. Metoda Transmisi

Metoda transmisi adalah cara-cara yang digunakan untuk menyalurkan sinyal informasi.

Ada 2 metoda yang digunakan untuk menyalurkan informasi yaitu metoda langsung dan metoda tidak langsung.

### a. Metoda langsung

Metoda ini sederhana, setelah dihasilkan pengubahan menjadi sinyal informasi (sinyal listrik) langsung disalurkan lewat media penghantar, dengan cara penyambungan fisik misalkan disolder atau dengan sekrup.

Disini dibahas tentang pengubahan informasi asli: suara/percakapan, data coretan, tulisan atau gambar kepada sinyal listrik. Komponen pengubah ini disebut *transducer*, contoh komponen pengubah diantaranya:

#### 1. Mikrofon (*microphone*)

Mikrofon adalah sebuah *transducer* yang mengubah energi akustik atau sinyal suara menjadi sinyal listrik.



**Gambar 14. Mikrofon**

Mikrofon berguna untuk merubah suara menjadi getaran listrik sinyal analog untuk selanjutnya diperkuat dan diolah sesuai dengan kebutuhan.



Pengolahan berikutnya dengan bantuan *amplifier* mengubah dari suara yang berintensitas rendah menjadi lebih tinggi yang akan diumpan ke *speaker*.

Mikrofon memiliki bermacam tipe, salah satunya yang paling banyak digunakan adalah mikropon karbon. Mikrofon karbon adalah mikrofon yang terbuat dari sebuah diagram logam yang terletak pada salah satu ujung kotak logam yang berbentuk silinder. Cara kerja mikrofon ini berdasarkan resistansi variabel dimana terdapat sebuah penghubung yang menghubungkan diafragma dengan butir-butir karbon di dalam mikropon. Perubahan getaran suara yang ada akan menyebabkan nilai resistansi juga berubah sehingga mengakibatkan perubahan pada sinyal *output* mikrofon.

## 2. Speaker

Speaker adalah *transducer* yang mengubah sinyal elektrik ke frekuensi *audio* (suara) dengan cara menggetarkan komponennya yang berbentuk membran untuk menggetarkan udara sehingga terjadilah gelombang suara sampai di kantung telinga kita dan dapat kita dengar sebagai suara.



**Gambar 15. Speaker**

Sistem pada penguat suara adalah suatu komponen yang mengubah kode sinyal elektronik terakhir menjadi gerakan mekanik. Dalam penyimpanan suara pada kepingan CD, pita magnetik *tape*, dan kepingan DVD, dapat di reproduksi oleh penguat suara *loudspeaker* yang dapat kita dengar. Pada dasarnya, speaker merupakan mesin penterjemah akhir, kebalikan dari mikrofon. Speaker dari sinyal elektrik dan dirubahnya kembali menjadi getaran untuk menggetarkan udara untuk membuat gelombang suara.

### 3. *Transducer* lain

*Transducer* lain diantaranya adalah jarum *magnetic head*, mata optik dan komponen pengubah lain yang umumnya disebut sensor.

Sebuah metode transmisi memerlukan proses (pengolahan) terhadap sinyal listrik sebelum disalurkan, demikian pula proses kembali sampai dihasilkan sinyal informasi kembali pada penerima. Proses ini akan dibahas selanjutnya.

## 2.2. Media Transmisi

Media transmisi adalah media yang digunakan sebagai jalan perantara dalam penyaluran sinyal informasi. Media transmisi dibagi menjadi media fisik dan media non fisik.

### a. Media Fisik

Media fisik adalah media yang berupa benda fisik atau material, media fisik dibagi menjadi 2 jenis yaitu:

1. Penghantar: kawat penghantar terbuka, kawat dalam kabel, koaksial.
2. Non penghantar: kabel serat optik dan bumbung gelombang (*waveguide*).

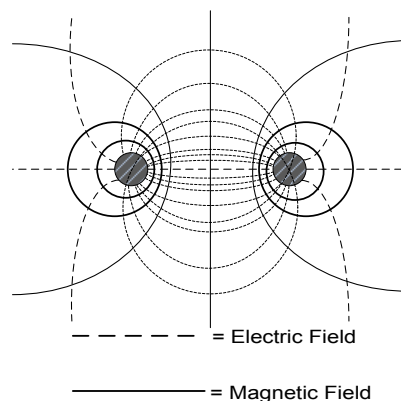
### b. Media non fisik

Media non fisik adalah media yang tidak memiliki bentuk fisik, contoh dari media non fisik adalah gelombang elektromagnetik yang merambat dalam ruang (udara/gas, cairan dan padat) dapat disebut radio atau *wireless*.

## 2.3. Media fisik

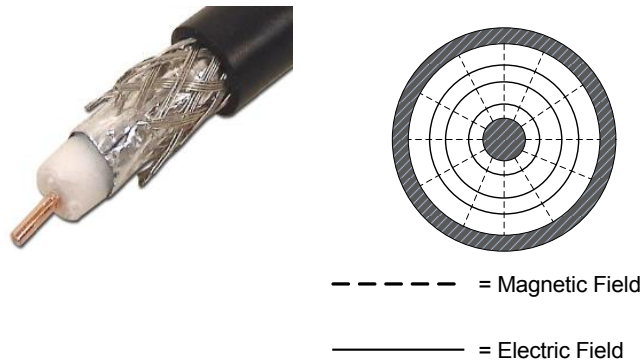
### a. Media fisik penghantar

1. Kawat sejajar terbuka atau dalam kabel



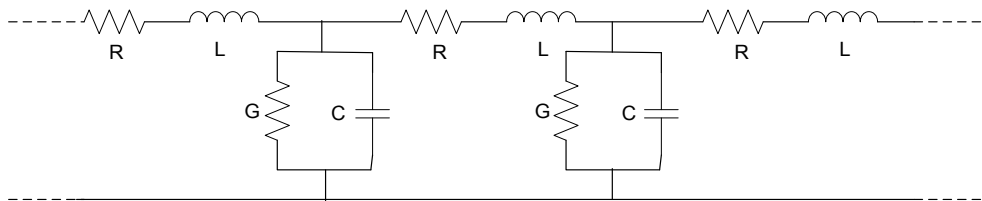
**Gambar 16. Gambar Konstruksi Kawat Sejajar Terbuka**

2. Kabel koaksial (*coaxial*): terdiri dari dua penghantar konsentris, dengan penghantar satu (disebut penghantar luar) melingkupi penghantar lain (penghantar dalam).



**Gambar 17. Gambar Konstruksi Koaksial**

Transmisi fisik saluran penghantar tidak berbeda dari rangkaian elektrik, hanya komponen rangkaian tersebar merata sepanjang saluran, disebut rangkaian terdistribusi (*distributed network*), dengan rangkaian pengganti seperti pada Gambar 18.



**Gambar 18. Rangkaian Terdistribusi**

dimana:

R = Resistansi, dalam Ohm persatuan panjang

L = Induktansi, dalam Henry persatuan panjang

C = Kapasitansi, dalam Farad persatuan panjang

G = Konduktansi, dalam Mho persatuan panjang

$\Delta x$  = elemen satuan panjang : meter, kilometer

Rangkaian terdistribusi memiliki karakteristik saluran :

- 1) Impedansi karakteristik

$$Z_o = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} = R_o + jX_o \quad [\text{Ohm}] \quad (9)$$

## 2) Konstanta propagasi

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad [\text{per satuan panjang}] = \alpha + j\beta \quad (10)$$

dimana:

$\alpha$  : konstanta redaman, dalam Neper (Np) per satuan panjang

$\beta$  : konstanta pergeseran fasa, dalam radian per satuan Panjang

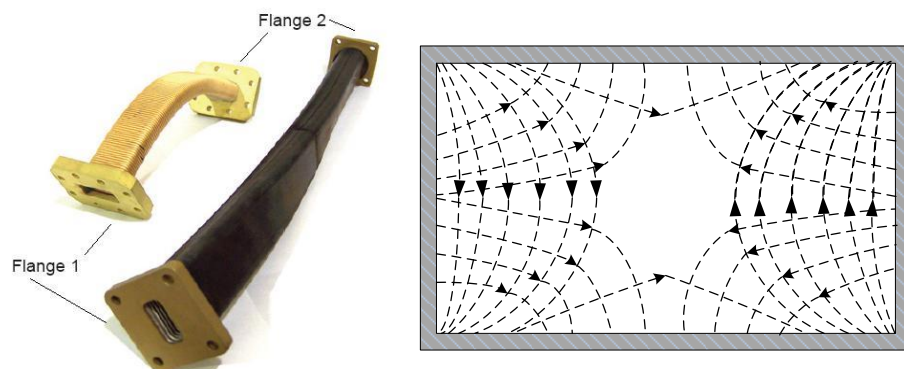
## 3) Kecepatan rambat sinyal pada saluran

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} \quad [\text{satuan panjang per detik}] \quad (11)$$

### b. Media fisik non penghantar

#### 1. Bumbung gelombang (*waveguide*)

*Waveguide* adalah satu struktur berbentuk pipa (bumbung) yang berongga berisi udara atau gas tertentu yang dapat menghantarkan dan membimbing gelombang elektromagnetik. Gambar 19 menunjukkan *waveguide* persegi. Pipanya dari bahan metal untuk per timbangan kekuatan mekanik, tetapi bukan bertindak sebagai penghantar. Penyaluran sinyal dengan perambatan gelombang elektromagnetik hasil pancaran dari semacam jarum yang ditusukkan di ujung kirim yang bertindak sebagai pemancar (radiator), dan merambat dibimbing oleh pipa tersebut.



**Gambar 19. *Waveguide* Persegi**

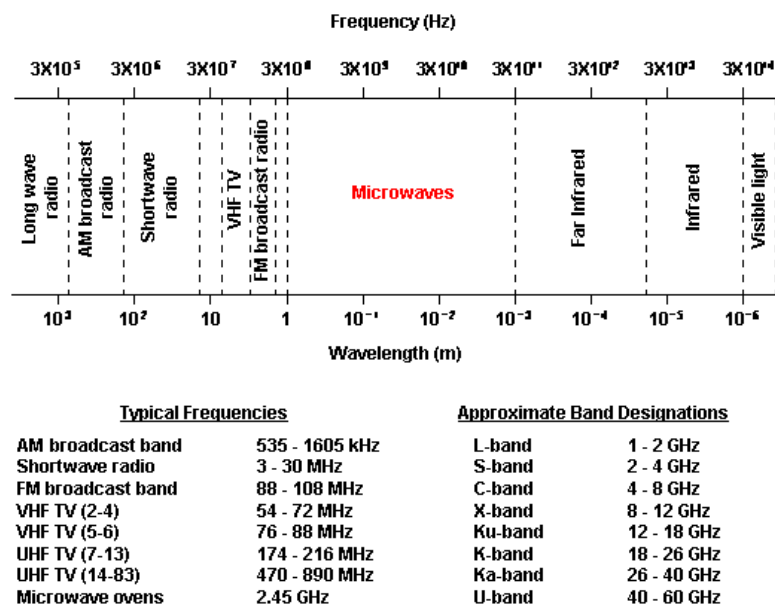
Beberapa pengertian pada penyaluran dengan *waveguide*:

$f_{\text{cutoff}}$ : frekuensi terendah sebagai batas menyalurkan, dibawah frekuensi ini sinyal tidak tersalur.

*Waveguide* digunakan untuk frekuensi sinyal sangat tinggi dan jarak penyaluran relatif pendek, misalnya dari pemancar ke antenna dan dari antenna ke penerima.

## 2. Saluran serat optik

Frekuensi sinyal radio yang sudah sangat tinggi akan mendekati spektrum cahaya (optik), orde  $10^{12}$  Hz (Terahertz) dan lebih tinggi .



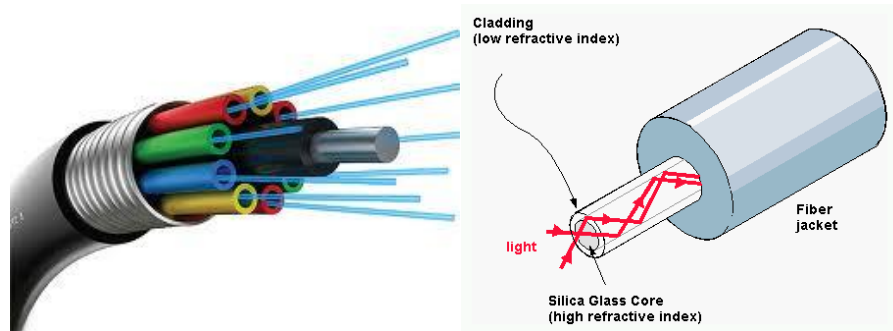
**Gambar 20. Spektrum Frekuensi Radio**

Cahaya optik ini dapat dimodulasikan (ditumpangi) oleh sinyal informasi, bertindak sebagai pembawa informasi. Karena frekuensi cahaya ini jauh lebih tinggi dari frekuensi radio umumnya, hingga lebar ban frekuensi penyalurannya lebih juga lebih lebar, sehingga dengan kapasitas penyalurannya lebih besar.

Serat optik terdiri dari:

- Inti (*core*) sebagai penyalur sinyal optik utama dibuat dari bahan gelas, plastik atau gabungan gelas dan plastik.
- Mantel (*cladding*) menyelubungi inti, dari bahan yang sama hanya dengan indeks bias ( $n$ ) yang sedikit lebih rendah.

Gambar serat optik *single mode*, *multimode step* dan *graded index*, terlihat seperti berikut:



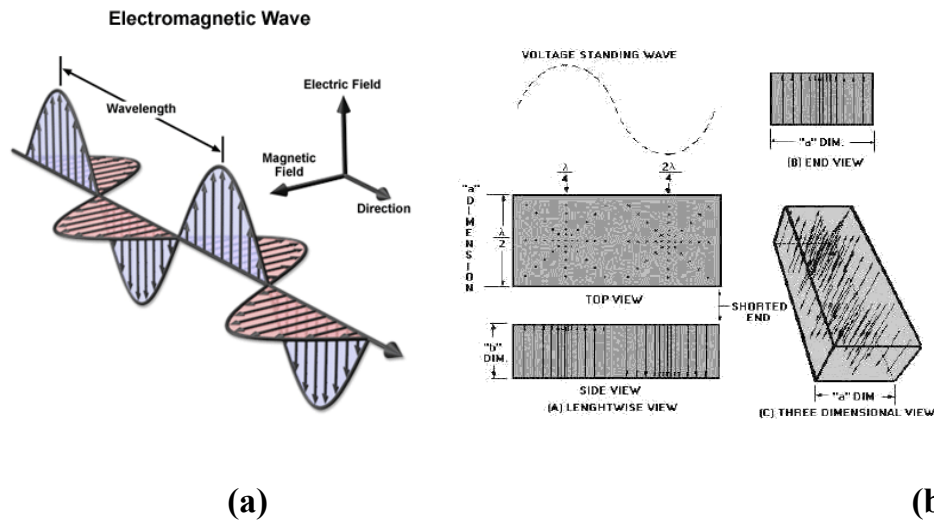
**Gambar 21. Penampang Serat Optik**

Cahaya optik merambat dengan cara pemantulan berturut turut pada perbatasan inti dengan *cladding*, kecuali pada single mode karena diameter inti sangatlah kecil. Cahaya yang datang pada ujung saluran optik pada arah dalam sudut/ kerucut tangkap dapat disalurkan.

#### **2.4. Media Non fisik**

Gelombang elektromagnetik adalah salah satu media nonfisik yang memiliki bentuk energi memancar dari suatu radiator dan merambat di ruangan. Bila ruangan hampa dan homogen, rambatan akan merata ke segala arah dengan kecepatan rambat seperti cahaya:  $c = 299.792.500$  meter per detik, yang sering dianggap  $3 \times 10^8$  meter per detik.

Sifat rambatan gelombang ini mirip dengan rambatan cahaya; dapat dibiaskan (refraksi), dipantulkan (refleksi) dan dibaurkan (difraksi), selain diredam dan diserap oleh medium. Ruang bebas (*free space*) tidak akan mempengaruhi atau ber interferensi dengan rambatan gelombang. Pada kenyataannya tidak ada ruang bebas di dekat sekitar bumi ini. Konsep ruang bebas digunakan untuk memudahkan, menyederhanakan analisa dan perhitungan rambatan. Gelombang elektromagnetik terdiri atas medan listrik **E** dan medan magnet **H** yang saling tegak lurus. Setiap pasang medan **E** dan **H** terletak pada bidang tegak lurus arah rambatan, merupakan ujung gelombang transversal. Kedua medan secara serempak berubah intensitas maupun arahnya menurut perubahan sinyal listrik yang dipancarkan. Gambar 22 merupakan cara penggambaran medan elektromagnetik, dengan memisalkan sinyal yang dipancarkan merupakan sinyal sinusoida.



**Gambar 22. (a) Gambaran Gelombang Menurut Perubahan Intensitas Medan  
(b) Gambaran Gelombang Menurut Arah dan Kerapatan Medan**

#### a. Perambatan Gelombang dan Dasar Perhitungan.

Dalam ruang bebas, gelombang merambat ke segala arah dan merata. Pada gambar: bila titik pancar T memancarkan daya  $P_T$  watt, di satu titik R berjarak  $r_1$  dari T, dihasilkan

1. Intensitas daya penerimaan

$$P_{r1} = \frac{P_T}{4\pi r_1^2} \text{ [W per m}^2\text{]} \quad (11)$$

Bila jarak  $r_2 = 2 r_1$

$$P_{r2} = \frac{P_T}{4\pi r_2^2} = \frac{P_T}{4\pi 4r_1^2} = \frac{1}{4} P_{r1} \text{ [W per m}^2\text{]} \quad (12)$$

Semakin jauh jaraknya intensitas penerimaan makin kecil, berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya, ini menunjukkan redaman perambatan.

2. Kecepatan rambat  $v_p$ , tergantung dari permitivitas  $\epsilon$  dan permeabilitas  $\mu$  ruangan dinyatakan oleh:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \text{ [meter per detik]} \quad (13)$$

Pada kondisi ruang hampa, dimana  $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Henry/m dan  $\epsilon_o = \frac{10^{-9}}{36\pi}$  Farad/m, sehingga :

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \varepsilon_o}} = 3.10^8 \quad [\text{meter per detik}] \quad (14)$$

3. Impedansi ruangan atau disebut impedansi intrinsik,  $Z_o$  merupakan perbandingan  $E$  per  $H$  dan juga tergantung nilai  $\mu$  dan  $\varepsilon$ , dimana:

$$Z_o = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad [\text{Ohm}] \quad (15)$$

Pada kondisi ruangan hampa, dimana  $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Henry/m dan  $\varepsilon_o = \frac{10^{-9}}{36\pi}$  Farad/m, sehingga :

$$Z_o = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}} = 120 \pi \quad [\text{Ohm}] \quad (16)$$

4. Intensitas medan

$$E = \frac{1}{r} \sqrt{30 P_T} \quad [\text{volt per meter}] \quad (17)$$

#### **b. Lintasan Rambatan**

Untuk sampai di penerima rambatan gelombang mempunyai lintasan rambatan utama. Tergantung pada frekuensi sinyal radio yang dipancarkan. Ada tiga lintasan utama :

1. Rambatan gelombang bumi (*ground/surface wave*): rambatan mengikuti permukaan bumi. Sesuai untuk frekuensi rendah (LF) dan menengah (MF).
2. Rambatan gelombang langit (*skywave*) : lintasan menuju ke langit untuk kemudian dibelokkan kembali oleh lapisan langit menuju ke bumi. Sesuai untuk frekuensi tinggi (HF).
3. Rambatan gelombang ruangan (*spacewave*): Lintasan dalam ruangan antara titik pancar dan titik terima. Sesuai untuk frekuensi lebih tinggi lagi (mulai dari VHF, UHF dan yang lebih tinggi lagi).

#### **c. Antena**

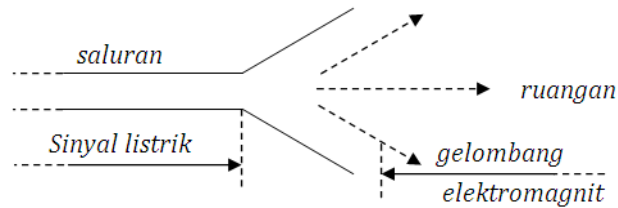
Antena adalah bagian atau elemen dari sistem komunikasi radio (nirkabel), dimana:

1. Pada pengirim; berfungsi merubah dan memancarkan gelombang elektromagnetik dari daya listrik yang disalurkan kepadanya.



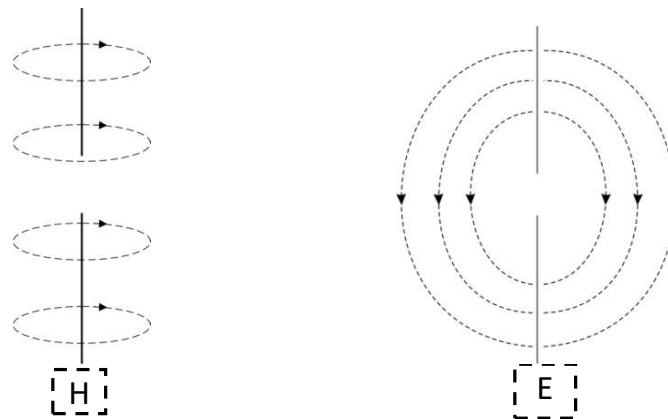
2. Pada penerima; berfungsi menangkap dan merubah kembali gelombang elektromagnetik kepada sinyal listrik untuk diproses lebih lanjut.

Antena merupakan tempat pengubahan (transformasi) dari sinyal listrik ke bentuk gelombang elektromagnetik atau sebaliknya.

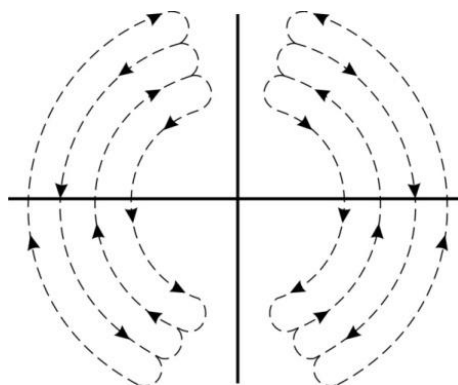


**Gambar 23. Fungsi Antena sebagai Transformator**

Arah medan  $E$  dan  $H$  pada gelombang elektromagnetik didekat elemen pancar (radiator) seperti terlihat pada Gambar 24. Dan intensitas maupun arahnya berubah dengan waktu, merambat meninggalkan radiator terlihat seperti Gambar 25.



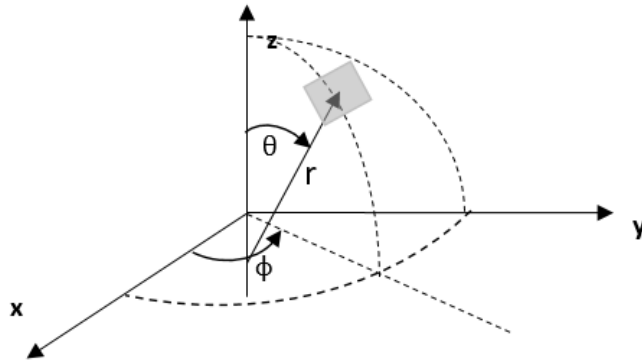
**Gambar 24. Arah Medan E dan H**



**Gambar 25. Perambatan Antena**

Terdapat beberapa antena dasar yang dikenal, yaitu:

1. Antena (sumber) isotropis, merupakan titik pancar dimana daya yang dipancarkan merata (uniform) ke setiap arah. Muka gelombang pada waktu rambat  $t_1$  tertentu membentuk satu bola dengan jari-jari  $r_1 = c.t_1$  dimana  $c$  = kecepatan rambat gelombang.

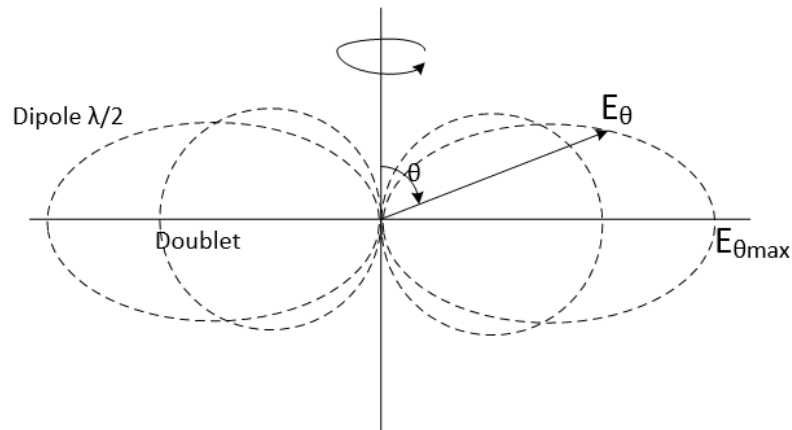


**Gambar 26. Sistem Koordinat Bola**

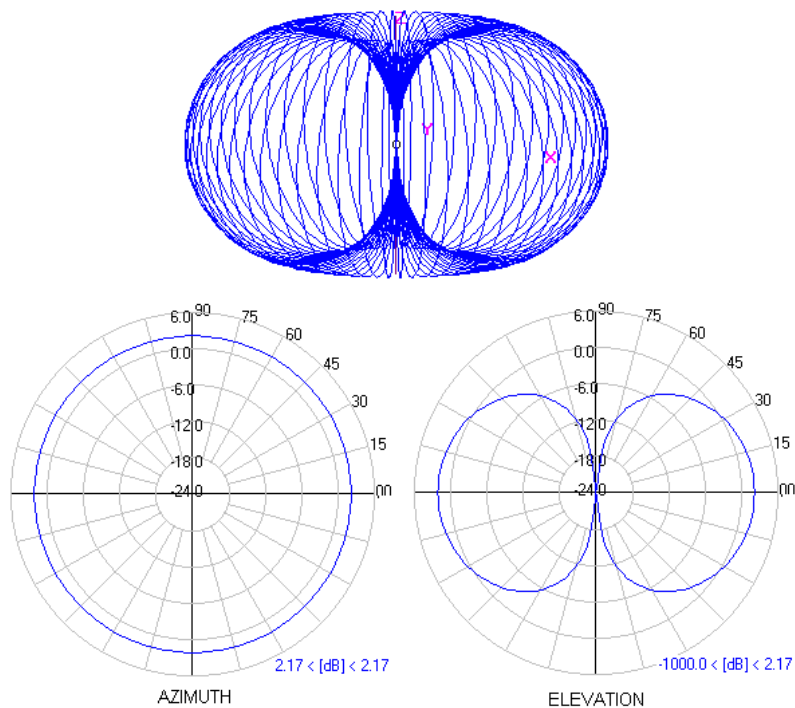
Intensitas medan penerima, daya  $P_T$  per satuan luas, untuk bola :  $P_r = \frac{P_T}{4\pi r_1^2}$  seperti dibahas sebelumnya.

2. Antena Doublet (dipole pendek), antena semacam dipole yang panjang radiator pendek sekali sehingga distribusi arus sepanjang radiator merata/sama. Kawat radiator tipis sekali. Pada antena ini : medan  $H$  hanya searah  $\phi$  ( $H_\phi$ ), sedangkan medan  $E$  ada  $E_r$  ( $E$  arah radial) dan  $E_\theta$  ( $E$  arah  $\theta$ ).
3. Antena Dipole  $\lambda/2$ , antena ini dianggap sejumlah doublet yang masing masing elemen panjang  $dl$ . Hanya dikenal nilai  $E_\theta$  dan  $H_\phi$  merupakan integrasi  $dl$  sepanjang  $\lambda/2$ . Antena dipole  $\lambda/2$  sering disebut antenna resonansi, karena pada panjang radiator =  $\lambda/2$  ini dicapai keadaan resonansi yang mengakibatkan pancaran maksimum.

Dari nilai  $E_\theta$  dari doublet dan dipole  $\lambda/2$ , dapat digambarkan dalam ruangan, intensitas  $E_\theta$  kearah  $\theta$  : dari  $0^\circ$  sampai  $180^\circ$ . Gambar 27 menunjukkan intensitas pancaran dari radiator kesegala arah dalam ruangan.



**Gambar 27. Intensitas Pancaran Radiator**



**Gambar 28. Pola Pancaran**

Tampak dari gambar, pancaran antenna doublet dan dipole  $\lambda/2$  mempunyai pengarah (Directivity, D): terdapat arah dimana intensitas maksimum sedang arah lain intensitas tidak sama.

$$\text{Tingkat pengarah } D = \frac{\text{intensitas pancaran maksimum}}{\text{intensitas pancaran rata rata}} \quad (18)$$

Antena mempunyai sifat *reciprocity* (timbang – balik), mempunyai perilaku/sifat yang sama baik sebagai elemen pancar maupun terima, misalkan pola pancaran sama dengan pola penerimaan, tingkat pengarah, impedansi dan sebagainya.

Efisiensi antena  $k$  merupakan perbandingan daya yang dipancarkan dengan daya masuk yang diberikan kepada antena. Dengan nilai  $k$  ini, dikenal nilai Gain (G) antena.

$$G = k \cdot D \quad [\text{kali (x)}] \quad (19)$$

## 2.5. Dasar Sistem Penyambungan (*Switching*)

Dalam wilayah jaringan: telepon, telegraf, faximile dan komunikasi data saluran dari setiap pelanggan diberkaskan dan dipusatkan di pusat jaringan dimana dilakukan proses penyambungan, dimana setiap pelanggan yang akan melakukan hubungan disambungkan ke tujuan hubungan yang dimaksudkan. Tempat ini disebut sentral penyambungan, *switching center* atau *exchange*. Proses penyambungan yang pernah ada, dilakukan dengan cara:

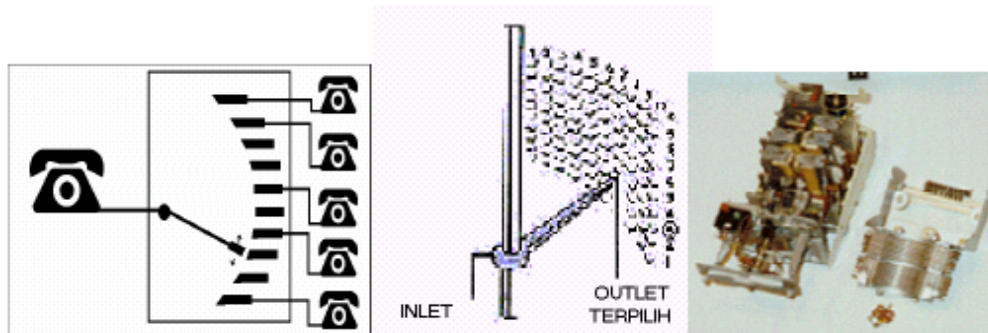
1. Manual, proses penyambungan dan pembubaran dilakukan oleh operator, memerlukan waktu lama, tidak efisien dan mutu penyambungan ditentukan oleh operator sebagai manusia, pendidikan, keterampilan, pembawaan dan sebagainya. Cara ini sudah tidak digunakan.
2. Otomatis, penyambungan dan pengontrolannya dilakukan sendiri oleh pelanggan. Otomatisasi penyambungan dilakukan pada penyambungan pada hubungan lokal, interlokal maupun internasional untuk hubungan telepon, telegraf/faximile dan data yang secara bertahap diintegrasikan.

Proses penyambungan otomatis dilakukan oleh peralatan penyambungan di sentral, dikerjakan dan dikendalikan oleh pesawat pelanggan. Peralatan penyambungan terdiri atas:

1. Alat elektromekanik: rele, kontak, selector dan generator sinyal.
2. Alat elektronik mekanik: penyambungan secara elektromekanik sedang pengendaliannya dengan rangkaian elektronik.
3. Alat penyambungan menuju ke teknologi maju: rangkaian penyambungan dan pengendalian berupa rangkaian dan peralatan elektronik.

Selektor (*selector*), adalah peralatan utama yang digunakan dalam penyambungan. Fungsi selektor adalah memilih salah satu jalan keluar (outlet) dari sejumlah jalan keluar, dari satu jalan masuk (inlet) yang berasal dari

pelanggan yang meminta hubungan. Ini dilakukan secara bertahap (berturut turut) sampai akhir jalan keluar terakhir adalah saluran yang menuju pelanggan yang dituju. Secara elektro mekanik selektor digambarkan sebagai berikut:



**Gambar 29. Selektor Analog**

Ada beberapa macam selektor:

1. Selektor awal: *Preselector* selector pertama, yang masing dimiliki oleh saluran pelanggan.
2. Pencari saluran: *Linefinder*, berfungsi mencari pelanggan yang minta sambungan.
3. Selektor kelompok: *Group selector*, mencari jalan sambungan secara bertahap.
4. Selektor akhir: *Final selector*, mencari jalan keluar akhir, ke saluran pelanggan yang dituju.

Sinyal penyambungan dari pelanggan berupa digit digit nomor yang tercantum pada nomor pelanggan (*call number*). Nomor nomor ini diberikan kepada sentral dari pelanggan berupa:

1. Pulsa (*impulse*) diberikan deretan pulsa pendek ( $\sim 100 \text{ milidetik}$ ) sejumlah sesuai dengan digit nomor yang diputar.
2. Nada, disebut *dual tone multi frequency* (DTMF) gabungan dua nada dari sejumlah frekuensi nada.

Sinyal ini yang dikirimkan ke sentral untuk mengerjakan selektor untuk mencari jalan keluar dari hubungan yang dimaksud. Pada masa kini telah memakai sistem digital, yang terdiri dari komponen *multiplexer*, *demultiplexer*, *memory register* dan komponen elektronika digital lainnya, dan bahkan selektor berbasis *Internet Protocol* (IP) baik versi 4 maupun versi 6 yang dihubungkan dengan jaringan internet.

# 3 PEMROSESAN SINYAL INFORMASI

## 3.1. Modulasi dan Demodulasi

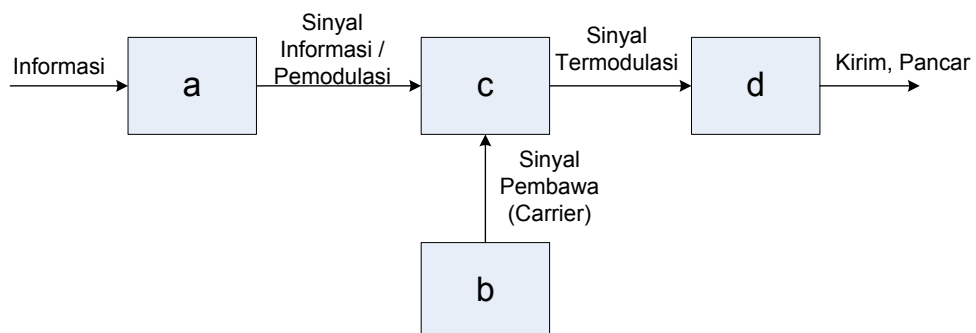
Dalam metoda transmisi telah disebutkan bahwa diperlukan proses lebih lanjut terhadap sinyal informasi sebelum pentransmisiannya lewat media transmisi. Salah satu proses yang terkenal yakni pemodulasian sinyal informasi terhadap sinyal pembawa (*carrier signal*), kemudian sinyal pembawa termodulasi ini yang ditransmisikan. Di penerima terjadi proses sebaliknya yaitu demodulasi yang berfungsi untuk memisahkan kembali sinyal informasi dari pembawanya. Proses transmisi ini dinamakan juga transmisi dengan gelombang pembawa.

Modulasi diartikan dengan penumpangan sinyal informasi kepada sinyal pembawa, atau juga sebagai pengendalian sinyal pembawa oleh sinyal informasi.

### a. Pada Pengirim

Proses yang terjadi di titik pengirim adalah:

1. Pengubahan informasi kepada sinyal informasi listrik oleh transducer
2. Pengadaan atau pembentukan sinyal pembawa, dengan osilator sinyal pembawa
3. Penumpangan sinyal informasi kepada sinyal pembawa, disebut proses modulasi
4. Pengiriman sinyal pembawa termodulasi, misalkan dengan proses pemancaran

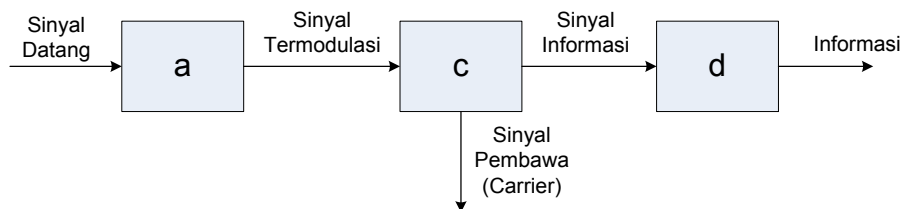


Gambar 30. Blok Diagram di *Transmitter* (Pengirim)

## b. Pada penerima

Proses yang terjadi di titik penerima adalah:

1. Penerima dan penguatan sinyal yang datang
2. Pengambilan kembali sinyal informasi dari pembawanya
3. Pengubahan sinyal informasi ke bentuk informasi semula oleh *transducer (decoder)*



**Gambar 31. Receiver (Penerima)**

Adapun cara cara modulasi yang ada digambarkan pada Skema (Ikhtisar) modulasi seperti berikut:

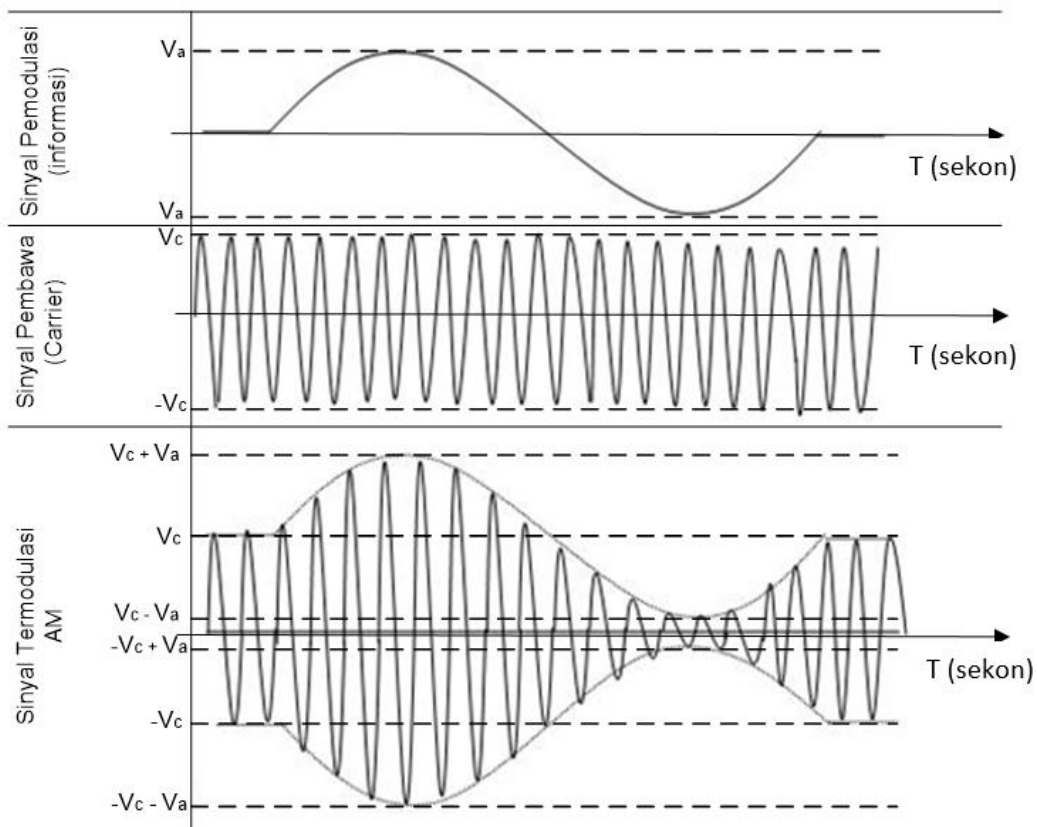
- a. Modulasi Analog; sinyal informasi (analog) memodulasi sinyal pembawa analog (sinusoida), terdiri atas:
  1. Modulasi Amplituda (*Amplitude Modulation*, AM), pengendalian pada amplitude sinyal pembawa dan modifikasinya: Modulasi dengan penekanan sinyal pembawa (*carrier suppressad modulation*).
  2. Modulasi Frekuensi (*Frequency Modulation*, FM), pengendalian pada frekuensi sinyal pembawa
  3. Modulasi Fasa (*Phase Modulation*, PM), pengendalian pada fasa sinyal pembawa
- b. Modulasi Pulsa: sinyal informasi (analog) memodulasi sinyal pembawa berupa deretan pulsa, terdiri atas:
  1. *Pulse Amplitude Modulation* (PAM), pengendalian terhadap amplituda pulsa, dan modifikasinya: *Pulse Code Modulation* (PCM) dan Modulasi Delta.
  2. *Pulse Width* atau *Duration Modulation* (PWM Atau PDM), pengendalian terhadap kelebaran atau durasi pulsa.
  3. *Pulse Frequency Modulation* (PFM), pengendalian terhadap frekuensi atau *rate* pulsa.

4. *Pulse Phase* atau *Position Modulation* (PPM), pengendalian terhadap posisi pulsa.
- c. Modulasi Digital: sinyal informasi digital memodulasi sinyal pembawa analog, terdiri atas:
1. *Amplude Shift Keying* (ASK), pengendalian pada amplituda sinyal pembawa
  2. *Frequency Shift Keying* (FSK), pengendalian terhadap frekuensi sinyal pembawa
  3. *Phase Shift Keying* (PSK), pengendalian terhadap fasa sinyal pembawa, dan modifikasinya: M(arry) PSK dan M(arry) *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM)

### 3.2. Modulasi Analog

#### a. Modulasi Amplituda (*Modulation Amplitude*, AM)

Pada modulasi ini amplituda sinyal pembawa berubah-ubah sesuai dengan sinyal informasi, digambarkan seperti berikut:



**Gambar 32. Modulasi Amplituda**



Persamaan sinyal AM:

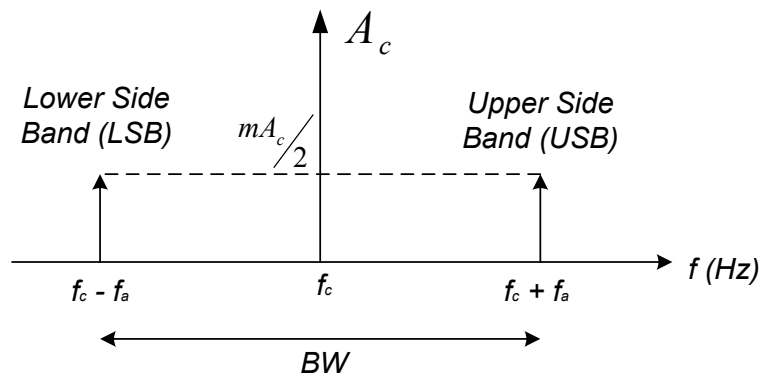
$$\begin{aligned} AM(t) &= A_c (1 + m \cos \omega_a t) \cdot \cos \omega_c t \\ AM(t) &= A_c \cos \omega_c t + m A_c \cos \omega_c t \cos \omega_a t \\ AM(t) &= A_c \cos \omega_c t + \frac{m}{2} A_c \cos(\omega_c + \omega_a)t + \frac{m}{2} A_c \cos(\omega_c - \omega_a)t \end{aligned} \quad (20)$$

Dimana  $m$  adalah derajat modulasi yang menggambarkan kedalaman modulasi (derajat modulasi). Apabila  $m$  semakin besar, maka semakin besar pula perubahan amplituda sinyal, dan sebaliknya semakin kecil  $m$ , maka semakin kecil pula perubahan amplituda sinyalnya, dimana:

$$m = \text{Derajat modulasi} = \frac{A_a}{A_c} = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} \quad (21)$$

Nilai  $m < 1$  atau apabila presentase modulasi  $m (\%) < 100 \%$ .

Bila  $A_a$  lebih besar daripada  $A_c$ , maka didapat nilai  $m > 1$ . Pada keadaan ini sinyal AM yang dihasilkan akan cacat (*over modulation*). Akibat cacat ini, timbul harmonisa frekuensi pemodulasi (informasi) sehingga menimbulkan sejumlah *sideband* baru :  $f_c + n f_a$ , yang akan memperlebar pita (*band*) AM. Sinyal AM dapat direpresentasikan menjadi sebuah spektrum tegangan yang ditunjukkan pada Gambar 33.



**Gambar 33. Spektrum Tegangan Sinyal AM**

Lebar pita frekuensi (*bandwidth*): adalah daerah frekuensi yang dicakup sebuah sinyal, dalam hal ini sinyal AM. Dari Gambar 33, dapat dilihat bahwa *bandwidth*:

$$BW = 2 \times f_a \quad (21)$$

Untuk mencari nilai daya sinyal AM ( $P_{AM}$ ) sebelumnya menentukan nilai tegangan dan arus nilai AM pada beban resistif ( $R$ ).

$$P = \frac{A^2}{2R} \text{ [Watt]} \quad (22)$$

Daya sinyal sebelum dimodulasi = daya komponen sinyal pembawa:

$$P_c = \frac{A_c^2}{2R} \text{ [Watt]} \quad (23)$$

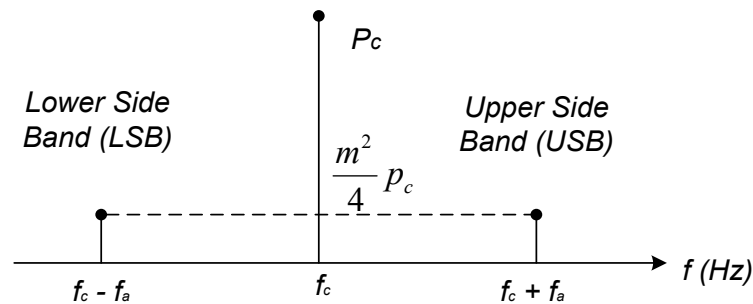
Daya komponen sinyal USB + LSB (amplitude  $\frac{m}{2} A_c$ ) :

$$P_{USB} + P_{LSB} = \frac{m^2 A_c^2}{2R \cdot 4} + \frac{m^2 A_c^2}{2R \cdot 4} = \frac{m^2 A_c^2}{2R \cdot 2} = \frac{m^2}{2} P_c \quad (24)$$

Jadi, daya sinyal AM adalah:

$$P_{AM} = P_c + P_{USB} + P_{LSB} = P_c \left( 1 + \frac{m^2}{2} \right) \text{ [Watt]} \quad (25)$$

Adapun spektrum daya dari sinyal AM digambarkan pada Gambar 34 berikut:



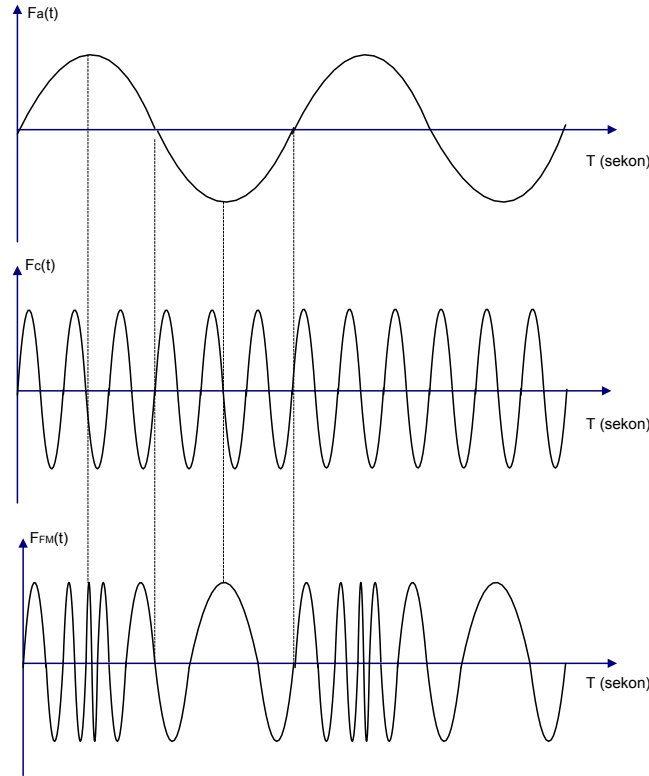
**Gambar 34. Spektrum Tegangan Sinyal AM**

Pada modulasi AM terdapat penurunan modulasi yang disebut AM DSB SC (*Amplitude Modulation Double Side band Suppressed Carrier*) yang didapat dengan menekan komponen sinyal pembawa pada hasil modulasi. Keuntungan modulasi ini dibandingkan dengan AM:

1. Efektifitas daya lebih baik karena komponen carrier yang membutuhkan bagian daya terbanyak; dengan komponen *carrier* ditiadakan, daya akan dipakai dikedua *sideband* yang justru mengandung informasi. Sinyal yang demikian disebut *double sideband*.
2. Efisiensi penggunaan spektrum lebih baik, dengan hanya menggunakan setengah spektrum untuk satu informasi disebut *single sideband* atau

penggunaan spektrum sepenuhnya tetapi untuk dua informasi yang berbeda yang dinamakan *independent sideband*.

Sinyal AM sendiri dapat disebut *double sideband full carrier*.



**Gambar 35. Modulasi Frekuensi**

#### **b. Modulasi Frekuensi (*Frequency Modulation, FM*)**

Pada hasil pemodulasian ini frekuensi sinyal pembawa berubah-ubah sesuai dengan sinyal informasi, digambarkan seperti Gambar 35.

Sinyal informasi sebagai sinyal pemodulasi yang dinyatakan dengan  $F_a(t) = A_a \sin \omega_a t$  memodulasi sinyal pembawa  $F_c(t) = A_c \sin \omega_c t$ , sehingga akan dihasilkan sinyal dengan persamaan FM:

$$F_{FM}(t) = A_c \sin ( \omega_c t + m_f \sin \omega_a t ) \quad (26)$$

Dengan penguraian lebih lanjut

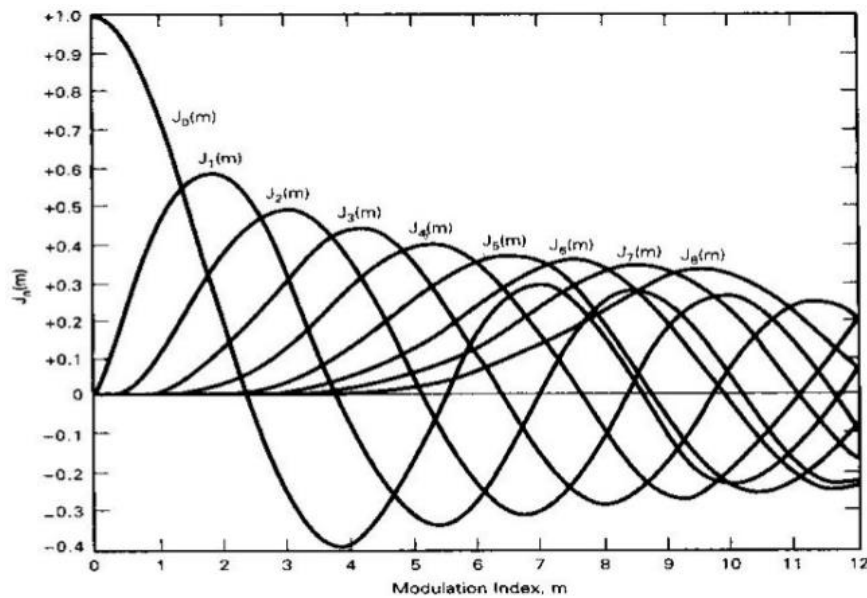
$$F_{FM}(t) = A_c ( \sin \omega_c t \cos(m_f \sin \omega_a t) + \cos \omega_c t \sin(m_f \sin \omega_a t) ) \quad (27)$$

Dengan analisis Bessel didapatkan:

$$\begin{aligned}
 F_{FM}(t) = A_c [ & J_0(m_f) \sin \omega_c t \\
 & + J_1(m_f) (\sin(\omega_c + \omega_a)t - \sin(\omega_c - \omega_a)t) \\
 & + J_2(m_f) (\sin(\omega_c + 2\omega_a)t + \sin(\omega_c - 2\omega_a)t) \\
 & + J_3(m_f) (\sin(\omega_c + 3\omega_a)t - \sin(\omega_c - 3\omega_a)t) + \dots
 \end{aligned}
 \quad (28)$$

Dengan nilai  $J_0(m_f)$  tergantung dari nilai indeks modulasi FM  $m_f$ , dimana indeks modulasi didefinisikan sebagai perbandingan deviasi frekuensi maksimum sinyal pembawa karena modulasi dibagi dengan frekuensi pemodulasi.

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_a} \quad (29)$$



**Gambar 36. Grafik Bessel**

Sehingga dapat diartikan  $J_n(m_f)$  merupakan fungsi Bessel jenis pertama dengan argumen  $m_f$  pada orde ke  $n$ . Nilai tersebut dapat dilihat pada Grafik Bessel Gambar 36 atau Tabel Bessel pada Gambar 37.

Modulation index	Carrier $J_0$	Sidebands									
		$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_7$	$J_8$	$J_9$	$J_{10}$
0.0	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.25	0.98	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.5	0.94	0.24	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02	—	—	—	—	—	—	—
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01	—	—	—	—	—	—
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03	—	—	—	—	—	—
2.5	-0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02	—	—	—	—	—
3.0	-0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01	—	—	—	—
4.0	-0.40	-0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02	—	—	—
5.0	-0.18	-0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.06	0.02	—	—
6.0	0.15	-0.28	-0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02	—
7.0	0.30	0.00	-0.30	-0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02
8.0	0.17	0.23	-0.11	-0.29	0.10	0.19	0.34	0.32	0.22	0.13	0.06

**Gambar 37. Tabel Bessel**

Bandwidth (Lebar Pita) FM dapat dihitung dengan dua cara, yaitu:

1. Dengan pendekatan orde, yang mana:

$$BW_{FM} = 2 n f_a \quad (30)$$

dimana  $n$  adalah jumlah orde dan  $f_a$  adalah frekuensi pemodulasi

2. Dengan rumus pendekatan Carson, yang dinyatakan oleh:

$$BW_{FM} = 2 f_a (m_f + 1) \quad (31)$$

### c. Modulasi Fasa

Pada hasil pemodulasian ini fasa sinyal pembawa berubah ubah sesuai dengan sinyal informasi. Gambaran sinyal modulasi fasa sama dengan modulasi frekuensi, dimana perubahan frekuensi akan mengakibatkan perubahan fasa sesaat dan sebaliknya.

### 3.3. Modulasi Pulsa

- a. *Pulse amplitude modulation* (PAM); Deretan pulsa, setelah pemodulasian amplituda pulsa berubah rubah sesuai sinyal informasi.
- b. *Pulse width modulation* (PWM); Deretan pulsa setelah pemodulasian lebar pulsa berubah rubah sesuai dengan sinyal informasi.
- c. *Pulse frequency modulation* (PFM); Deretan pulsa, setelah pemodulasian pulse ratenya berubah rubah sesuai informasi.

- d. *Pulse position modulation* (PPM); Deretan pulsa, setelah pemodulasian posisi hadirnya pulse atau fasa pulsa tersebut berubah rubah sesuai informasi.

### **3.4. Modulasi Digital**

Modulasi digital adalah modulasi terhadap sinyal pembawa sinusoida oleh sinyal informasi digital misalkan sinyal PCM atau bit bit data computer. Modulasi digital terdiri dari:

- a. *Amplitude Shift Keying* (ASK); pada cara ini amplitude sinyal sinusoida berubah rubah tinggi atau rendah menurut bit informasi (0 atau 1). Atau ada sinyal pembawa atau tidak (on-off keying).
- b. *Frequency Shift Keying* (FSK); pada cara ini frekuensi sinyal sinusoida berubah-ubah (terjadi *frequency shift*) menurut digit digit sinyal informasi.
- c. *Phase Shift Keying* (PSK); pada cara ini fasa sinyal sinusoida dari sinyal pembawa dari berubah rubah menurut digit digit sinyal informasi.



# 4 MULTIPLEXING

## 4.1. Pengertian Multiplexing

Kepadatan lalu lintas komunikasi makin meningkat pesat. Untuk itu, diupayakan cara pentransmisian informasi multikanal untuk menambah kapasitas penyaluran per sistem sehingga efisiensi penggunaan saluran dapat dipertinggi. Satu sistem transmisi sekaligus membawakan beberapa informasi tanpa saling mengganggu. Yang dimaksudkan sebuah sistem transmisi adalah:

1. Transmisi Kawat: satu pasang kawat terbuka, dalam kabel atau satu kabel koaksial
2. Transmisi Radio: satu pasang pemancar dan penerima dengan satu frekuensi pembawa untuk satu arah hubungan.

*Multiplexing*, disini diartikan cara penggabungan dan penyusun beberapa kanal informasi kepada sebuah kanal gabungan, disebut *baseband* (ban dasar) untuk bersama – sama disalurkan.

Pada penerimaan terjadi proses sebaliknya, yakni penguraian kembali dari *baseband* yang datang kepada kanal masing-masing. Sering proses ini disebut *demultiplexing*.

Dikenal tiga macam *multiplexing*, menurut bidang/domain dimana kanal – kanal informasi digabung dan disusun.

1. *Frequency Division Multiplexing (FDM)*

FDM adalah penyusunan dan penggabungan kanal informasi di bidang frekuensi. Bidang frekuensi dengan kelebaran tertentu dibagi-bagi untuk penempatan setiap kanal informasi.

2. *Time Division Multiplexing (TDM)*

TDM adalah penyusunan dan penggabungan kanal informasi di bidang waktu. Bidang waktu dibagi-bagi untuk penyaluran kanal-kanal yang diwakili oleh pulsa sampling atau kode yang mewakilinya.

3. *Wavelength Division Multiplexing (WDM)*

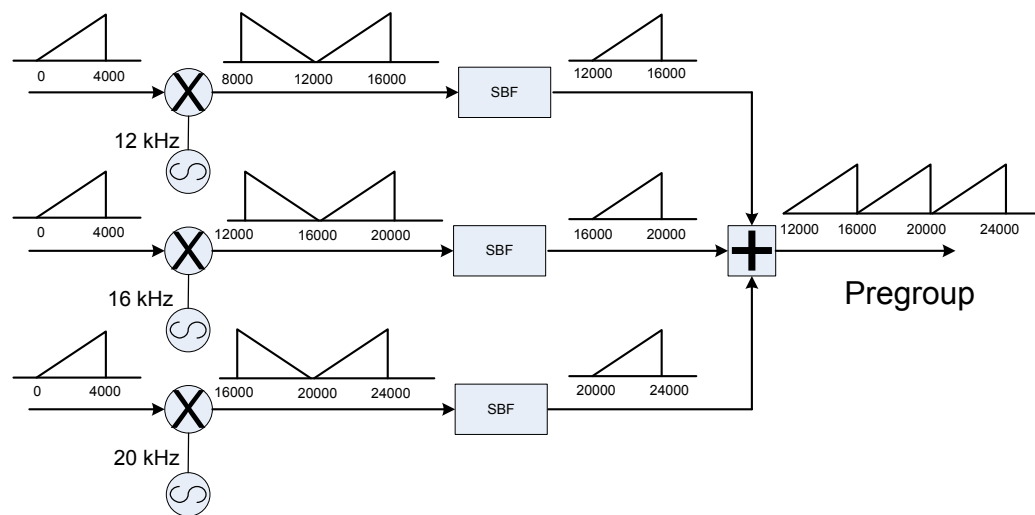
WDM adalah penyusunan dan penggabungan kanal informasi dalam komunikasi serat optik dengan menggunakan panjang gelombang (warna) cahaya laser yang berbeda.



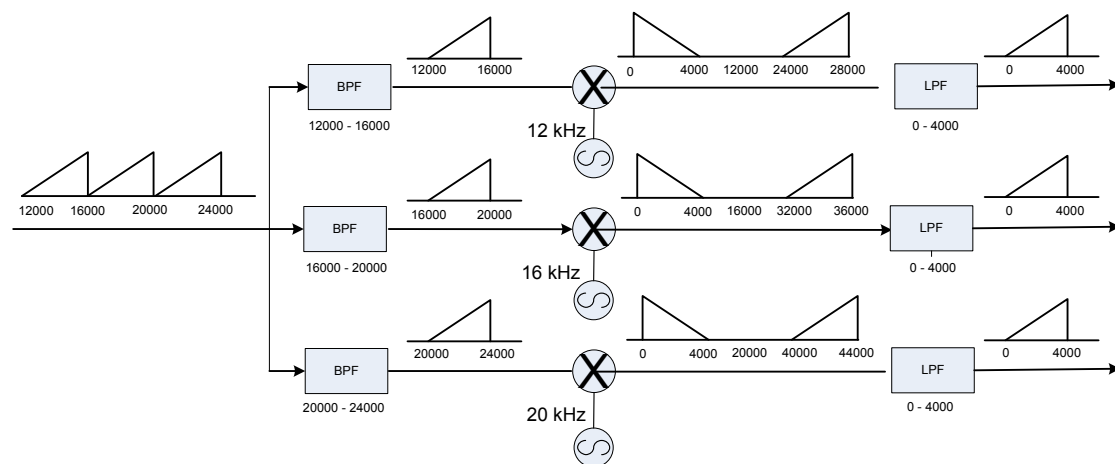
## 4.2. Frequency Division Multiplexing (FDM)

### a. Prinsip Kerja

FDM merupakan skema *multiplexing* analog: sinyal yang ditransmisikan adalah sinyal analog, pentransmisiannya pun tetap berupa sinyal analog. Pada pembahasan *multiplexing*, yang biasa disebut kanal informasi adalah informasi pembicaraan (telefoni) dengan lebar ban dari 300 – 2400 Hz. Untuk setiap kanal tersebut disediakan tempat selebar 4 kHz. Pada pembahasan setiap kanal informasi sering dianggap 0 – 4 kHz. Penggabungan dan penyusunan digambarkan seperti ditunjukkan pada Gambar 38(a).



(a)



(b)

Gambar 38. (a) Multiplexing (b) Demultiplexing

Untuk translasi (pemindahan) setiap kanal (0 - 4 kHz) ke daerah frekuensi barunya dibutuhkan sinyal osilator dengan frekuensi  $f_o$ , yang dimodulasikan pada *product* modulator. Keluaran modulator ini lalu disaring oleh sideband

filter SBF seperti halnya pembentukan sinyal SSB-SC. Hasil dari setiap pembentukan SSB-SC dengan daerah frekuensi berbeda kemudian digabungkan. Gambar 37 (a) menunjukkan proses *multiplexing* dan Gambar 37(b) proses *demultiplexing*.

#### **b. Baseband**

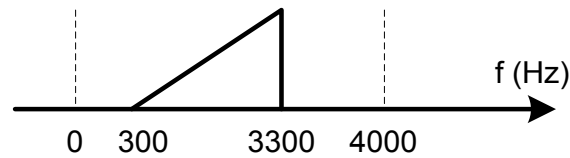
*Baseband* adalah ban dasar yang berisikan sejumlah kanal informasi hasil *multiplexing* dari setiap kanal, yang siap untuk proses transmisi selanjutnya. Ada beberapa hirarki ban dasar, diatur CCITT sebagai berikut:

1. *Basicgroup band*: berisi 12 kanal informasi, 60 – 108 kHz. Ban dasar ini dapat dibentuk:
  - a. Secara langsung dari 12 kanal informasi ditranslasikan dengan masing-masing pembawanya, lalu digabungkan.
  - b. Secara tidak langsung, dengan menggabungkan 4 buah pregroup yang dibentuk seperti Gambar 38(a) dan 38(b), setelah di translasikan dari daerah frekuensinya.
2. *Basic supergroup band*: berisi 60 kanal informasi, menempati ban 312 – 552 kHz; hasil penggabungan 5 buah *basicgroup*.
3. *Basic mastergroup band*: berisi 300 kanal informasi, menempati 812 – 2044 kHz; hasil penggabungan 5 buah *basic supergroup*.
4. *Basic super mastergroup band*: berisi 900 kanal informasi menempati 8516-12388 kHz; hasil penggabungan 3 buah *basic mastergroup*.
5. Ada beberapa ban dasar lebih tinggi, yang merupakan penggabungan *basic super mastergroup*: *jumbogroup* dan *supergrup*, sehingga didapat ban dasar dengan lebih dari 10.000 kanal informasi.

#### **c. Pembawaan informasi dalam FDM**

Selain kanal informasi berupa pembicaraan telefoni, pada transmisi multikanal, dibawakan pula beberapa informasi lain secara simultan.

1. *Signalling*: yang digunakan membantu penyelenggaraan hubungan telepon; dalam ban dasar, ditempatkan pada alokasi kanal masing – masing. Dengan memilih cara *out of band signaling*, ditentukan frekuensi 3825 Hz pada setiap kanal 0 – 4000 Hz, membawakan informasi *signaling* ini.



Signalling : 3825

**Gambar 39. Sinyal Baseband**

2. Program siaran radio

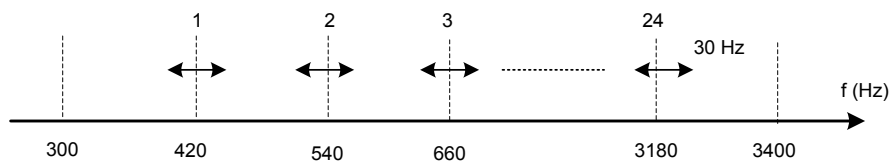
Program siaran radio berisi pembicaraan dan musik, memerlukan ban lebih lebar (hampir 10 kali untuk fidelitas baik). Untuk membawakan program siaran ini, ban 10 kHz dialokasikan di *basicgroup band* yaitu 86 - 96 kHz.

3. Program siaran Televisi (TV)

Siaran TV, terdiri atas sinyal video dan audio, membutuhkan ban frekuensi sangat lebar: 6000 kHz. Bila siaran TV ini disertakan dalam transmisi multikanal, akan memakan tempat ekivalen dengan 1500 telefoni. Dengan kebutuhan alokasi yang begitu lebar, sudah tentu baru dapat dibawakan pada hirarki ban dasar yang tinggi, misalkan *jumbogroup band* (2700 kanal).

4. Informasi telegrafi

Pulsa/digit telegrafi: mark dan space diubah dulu kepada sinyal FSK dengan suatu modem. Untuk frekuensi tengah dari FSK, dapat dipilih frekuensi-frekuensi nada dalam ban frekuensi. Dengan kecepatan telegrafi tertentu, dapat dipilih sejumlah frekuensi audio yang dapat digunakan membawa sinyal telegrafi. Contoh: telegrafi 50 baud, didapat 24 frekuensi dalam kanal telefoni, yang setiap frekuensi bergeser sejauh  $f = 30$  Hz, seperti berikut :



**Gambar 40. Pembagian Frekuensi pada Telegrafi**

### 4.3. Time Division Multiplexing (TDM)

#### a. Prinsip Kerja

Setiap informasi yang berbentuk analog, disample pada waktu yang berurutan dengan *multiplexing switch* (elektronik), menghasilkan pulsa-pulsa diskrit, lalu ditransmisikan. Pada penerimaan, *demultiplexing switch* yang diserempakkan dengan *multiplexing switch* bertugas membagi-bagikan pulsa sampling kepada masing-masing alamat tujuan untuk direkonstruksi kembali. Berikut adalah contoh transmisi PCM 30 kanal:

Satu kanal pembicaraan: 300-3400 Hz. Untuk itu digunakan sampling rate  $f_s = 8000$  pulsa per detik. Maka perioda sampling  $T_s = 1/8000 = 125 \mu\text{detik}$ .

Pada setiap  $T_s$  ini timbul pulsa sampling dari kanal yang sama. Selama waktu 125  $\mu\text{detik}$  ini ditransmisikan 30 kanal, ditambah 1 kanal untuk sinkronisasi dan 1 kanal untuk *signaling*.

Jadi dalam satu *frame* selama  $T_s$  ini, dibagi menjadi 30 *word time slots*, sehingga:

$$1 \text{ word slot} = \frac{125 \mu s}{32} = 3,9 \mu s$$

1 *word slot* merupakan panjang kode dari pulsa sampling, yang terdiri atas 8 bit, sehingga setiap bit dibutuhkan waktu :

$$\text{Panjang satu bit} = \frac{3,9 \mu s}{8} = 488 \text{ ns}$$

Dengan panjang satu bit = 488 ns ini, maka :

$$\text{line pulse repetition rate} = \frac{1}{488 \text{ ns}} = 2048 \text{ kbit/s}$$



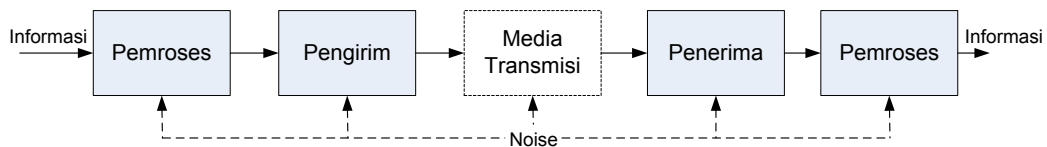
# 5 NOISE DAN LEVEL DAYA

## 5.1. *Noise* (Derau)

*Noise* (derau) adalah sinyal liar yang tidak dikehendaki yang ikut hadir dalam sistem komunikasi, menyertai dalam pemrosesan sinyal dan penyalurannya. Ikut sertanya *noise* akan mengganggu, dan mengurangi kualitas informasi di penerima, bahkan merusaknya. Dapat dikatakan bahwa *noise* menjadi pembatas terakhir bagi kualitas sistem.

*Noise* dan perhitungan *noise* lebih ditekankan pada sisi penerima dimana level daya sinyal sudah sangat lemah, sehingga level ini berjarak dengan level *noise* sudah relatif dekat.

Bagaimana kehadiran dan keikutsertaan *noise* dalam sistem komunikasi ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 41. Blok Diagram Keikutsertaan *Noise* pada Sistem Komunikasi**

Ada beberapa penggolongan *noise*, biasanya didasarkan pada sumber dimana *noise* dibangkitkan.

- Noise* Eksternal: berasal dari luar rangkaian penerima, yang menyertai dalam proses penerimaan sinyal.
- Noise* Internal: berasal dan dibangkitkan dari dalam rangkaian penerima: pada penghantar, komponen pasif dan aktif, serta rangkaian rangkain lain pada penerima.

## 5.2. *Noise Eksternal*

Ada beberapa jenis *noise* eksternal yaitu :

- 1) *Noise* Atmosferik

*Noise* atmosferik dinamakan juga *noise* statik, berasal dari energi yang ditimbulkan loncatan listrik, petir dan gangguan elektrik di atmosfer. Bentuk *noise* berupa *impulse* acak yang pendek dimana spektrum dayanya tersebar pada ban frekuensi sangat lebar. Sinyal ini

merambat sebagaimana rambatan sinyal radio yang akan tertangkap oleh penerima.

Kuat medan sinyal *noise* berbanding terbalik dengan frekuensi, pada orde harmonisa makin tinggi, dayanya akan semakin kecil. *Noise* statik dari sumber yang jauh, berubah ubah intensitasnya karena kondisi propagasi yang berubah. *Noise* atmosferik menurun pada frekuensi diatas 30 MHz, disebabkan karena fenomena pembangkitan *noise* pada daerah frekuensi ini sudah sangat rendah, dimana pada daerah frekuensi ini perambatan gelombang langit sudah kurang efektif.

## 2) *Noise* Ekstraterrestrial

*Noise* ekstraterrestrial adalah *noise* yang berasal dari sumber yang berada di angkasa luar, diatas lapisan atmosfir bumi.

### a) *Noise* berasal dari matahari (solar)

Matahari sebagai benda sangat besar dengan temperature sangat tinggi (di permukaan 6000° C) yang sangat tidak stabil dan selalu meradiasikan gelombang elektromagnetik yang dirasakan di bumi sebagai *noise*. Spektrum frekuensi *noise* sangat lebar, meliputi hampir semua frekuensi yang digunakan komunikasi.

### b) *Noise* kosmik

Sebagaimana matahari demikian juga bintang bintang sebagai sebagai tetangga dari sistem tata surya, baik dalam galaksi yang sama maupun dari galaksi yang lain. Oleh karenanya noise ini disebut juga *noise* galaktik. *Noise* angkasa luar teramati dari frekuensi 8 MHz sampai 1,5 GHz, dengan daerah paling kuat di daerah 20 – 120 MHz.

### c) *Manmade Noise*

*Noise* ini datang dari sumber sumber berupa sistem atau peralatan rancangan dan buatan manusia, diantaranya adalah:

1. Loncatan api listrik pada mesin mesin
2. Loncatan api listrik pada motor motor listrik, busi, kontak, switch dan rele elktromekanik
3. Saluran jaringan tenaga listrik, terutama yang bertegangan tinggi.

*Noise* ini akan terasa kuat di kota kota besar dan daerah industri.

*Noise* ini sangat bervariasi sehingga sulit dianalisa, selain

analisa dengan statistik. Intensitas daya *noise* yang diterima akan bertambah bila lebar ban frekuensi penerima bertambah.

### 5.3. *Noise Internal*

*Noise* internal terdiri dari beberapa macam:

1) *Noise* Termal,

*Noise* termal disebut juga *Noise Johnson*, *noise* ini bersumber dari gerakan acak elektron dalam suatu penghantar dan komponen pasif dalam rangkaian. Setiap benda yang bertemperatur diatas 0° K (*absolute*) membangkitkan *noise* ini. Rapat daya merata sepanjang spektrum yang sangat lebar, oleh karenanya *noise* ini sering di sebut “*white noise*”. Daya *noise* berbanding langsung dengan *temperature* dan lebar ban frekuensi rangkaian, dinyatakan:

$$P_n = k \cdot T \cdot B \text{ [Watt]} \quad (32)$$

dimana :

k = konstanta Boltzman =  $1,38 \times 10^{-23}$  [Joule per °K]

T = temperature absolute [°K]

B = lebar ban frekuensi rangkaian [Hz]

2) *Shot Noise*

*Shot noise* menyerupai *noise termal*, terjadi pada komponen aktif dalam rangkaian, yang disebabkan tidak meratanya waktu tansit *electron* atau *hole* antar elektroda pada rangkaian semikonduktor atau tabung elektronik.

Dalam dioda, *noise* diformulasikan dengan nilai arus *noise*  $i_n$ , yang dinyatakan

$$i_n = \sqrt{2 e i_p B} \text{ [Ampere rms]} \quad (33)$$

dimana :

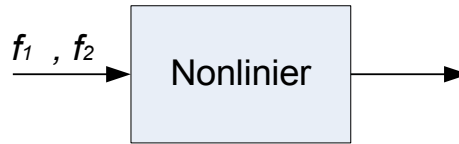
e = muatan elektron =  $1,6 \times 10^{-19}$  [Coulomb]

$i_n$  = arus diode [Ampere]



3) *Noise Intermodulasi*

*Noise* intermodulasi adalah *noise* yang dihasilkan dari intermodulasi yang terjadi pada rangkaian non linier. Bila dua frekuensi sinyal  $f_1$  dan  $f_2$  dimasukkan kedalam rangkaian nonlinier.



**Gambar 42. Dua Buah Sinyal Masuk Kedalam Rangkaian Nonlinier**

Maka keluaran rangkaian berupa gabungan sinyal :

1. Sinyal Utama :  $f_1$  dan  $f_2$
2. Harmonisasi Sinyal :  $n f_1$  dan  $m f_2$ , dimana  $n$  dan  $m$  adalah bilangan bulat 2,3,4,....
3. Intermodulasi antara kedua sinyal :  $|n f_1 \pm m f_2|$

Sinyal hasil intermodulasi mempunyai frekuensi ‘spurious’, diantaranya:

1. Hasil orde ke 2 :  $|f_1 \pm f_2|$
2. Hasil orde ke 3 :  $|f_1 \pm 2 f_2|$  dan  $|2 f_1 \pm f_2|$
3. Hasil orde ke 4 :  $|2 f_1 \pm 2 f_2|$  ,  $|3 f_1 \pm f_2|$  dan  $|f_1 \pm 3 f_2|$

4) *Noise Cakapsilang (Crosstalk)*

*Noise* cakap silang adalah *noise* yang terjadi karena kopling yang tidak diinginkan antar lintasan sinyal yang berbeda, sebagai contoh:

- a. Antar media transmisi,
- b. Antar dua penghubung dalam rangkaian,
- c. Antardua filter yang respons frekuensi tidak baik dan saling berdekatan, dan
- d. Akibat kinerja nonlinier antar kanal, pada transmisi FDM.

Ada dua tipe noise cakap silang, yaitu:

- a. Cakap silang yang dapat dimengerti, dan
- b. Cakap silang yang tidak dapat dimengerti: suara gangguan yang dinamakan “*babble*”.

### 5) *Noise Impulse*

*Noise impulse* adalah *noise* yang berupa deretan impulse tidak teratur, berujud loncatan tegangan yang pendek dengan amplitude tinggi. Untuk telefoni, gangguan ini tidak terlalu menurunkan kualitas informasi, tidak demikian halnya pada komunikasi data, akan menambah jumlah kesalahan (*bit error rate*).

## 5.4. Istilah Dalam *Noise*

### a. *Signal to Noise Ratio (SNR)*

*SNR* adalah perbandingan level daya sinyal terhadap level daya *noise* suatu rangkaian, ini menunjukkan kualitas sinyal yang dikehendaki terhadap sinyal *noise* yang tidak dikehendaki. Makin besar nilai *SNR* ini kualitas informasi yang dihasilkan makin baik.

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{P_S}{P_N} = \left[ \frac{V_S}{V_N} \right]^2 \quad (34)$$

### b. *Noise Figure*

*Noise Figure* adalah perbandingan  $\frac{S}{N}$  di dua titik rangkaian berbeda, biasanya pada *input* (masukan) dan pada *output* (keluaran) suatu penguat. Nilai *NF* ini menunjukkan berapa besar kandungan *noise* suatu penguat tersebut.

$$NF = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{in}}{\left(\frac{S}{N}\right)_{out}} \text{ nilainya } \geq 1 \quad (35)$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out} = \frac{S_{in}}{N_{out}} = \frac{S_{in} \cdot A_p}{N_{in} \cdot A_p + N_{int}} < \left(\frac{S}{N}\right)_{in} \quad (36)$$

dimana:

$A_p$  = Penguatan daya

$N_{int}$  = Daya *noise* internal penguat

Semakin besar nilai *NF*, menunjukkan rangkaian itu banyak *noise* yang dikandungnya.

### 5.5. Level Daya Sinyal

Level daya sinyal menunjukkan berapa tinggi atau rendahnya daya sinyal terhadap daya acuan, misalkan 1 Watt (W) atau 1 miliWatt (mW). Untuk itu digunakan besaran:

$$\text{dBW} = 10 \log \frac{\text{daya sinyal (W)}}{1(W)} \quad ; \text{ bila level daya acuan } 1 \text{ W} \quad (37)$$

$$\text{dBm} = 10 \log \frac{\text{daya sinyal (mW)}}{1 \text{ mW}} \quad ; \text{ bila level daya acuan } 1 \text{ mW} \quad (38)$$

Terdapat dua pengertian untuk perbandingan level daya, yaitu:

- a. Perbandingan level daya yang sama pada dua tempat yang berbeda dalam rangkaian.

Contoh:

Jika  $P_1$  adalah daya sinyal masukan dan  $P_2$  adalah sinyal keluaran suatu rangkaian, maka

$$\frac{P_2}{P_1} \text{ (dalam decibel : dB)} = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \text{ dB} ; \text{ disebut penguatan} \\ \text{(bila } P_2 > P_1) \quad (39)$$

$$\frac{P_1}{P_2} \text{ (dalam decibel ; dB)} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \text{ dB} ; \text{ disebut redaman} \\ \text{(bila } P_1 > P_2) \quad (40)$$

Karena  $1 \text{ watt} = 1.10^3 \text{ mW}$  ; maka  $x \text{ dBW} = x + 30 \text{ dBm}$

- b. Perbandingan dua sinyal yang berbeda pada satu titik rangkaian yang sama.

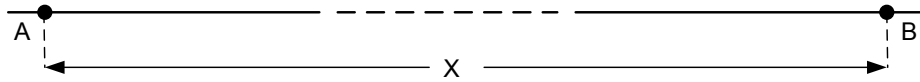
Contoh:

$$\frac{S}{N} \text{ (dalam dB)} = 10 \log \frac{\text{daya sinyal (S)}}{\text{daya Noise (N)}} \text{ Db} \quad (41)$$

Dari Gambar 42 dibawah ini jika  $V_A$  adalah tegangan di titik A dan  $V_B$  adalah tegangan di titik B, maka nilai tegangan di titik B dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini.

$$\text{Tegangan efektif } V_B = V_A e^{-\alpha x} \quad (42)$$

$\alpha$  adalah konstanta redaman saluran (Np per km), neper merupakan satuan yang dipakai untuk menyatakan perbandingan level daya di saluran transmisi penghantar



**Gambar 43. Perbandingan Level Daya**

Dari persamaan diatas, maka didapatkan:

$$\text{Redaman } a = \alpha x = \ln \frac{V_A}{V_B} \quad (\text{Np}) \quad (43)$$

$$\text{Redaman daya : } a = \ln \frac{\sqrt{P_A \cdot R}}{\sqrt{P_B \cdot R}} = 0,5 \ln \frac{P_A}{P_B} \quad (\text{Neper}) \quad (44)$$

dimana:

$\ln$  = logaritma berbasis  $e = 2,718..$

Konversi:  $0 \text{ dB} = 0,115 \text{ Np}$  ;  $0 \text{ Np} = 8,68 \text{ dB}$



# Daftar Pustaka

ANTTALAINEN, Tarmo. *Introduction to telecommunications network engineering*. Artech House, 2003.

DODD, Annabel Z. *The essential guide to telecommunications*. Prentice Hall Professional, 2002.

FREEMAN, Roger L.; FREEMAN, Roger L. *Fundamentals of telecommunications*. New York: Wiley, 2005.

FREEMAN, Roger L. *Telecommunication transmission handbook*. Wiley, 1991.

FREEMAN, Roger L. *Telecommunication system engineering*. John Wiley & Sons, 2004.

FREEMAN, Roger L. *Radio system design for telecommunications*. John Wiley & Sons, 2006.

GOUZALI, Saydam. Prinsip Dasar Teknologi Jaringan telekomunikasi. *Bandung: Angkasa*, 2017.

HAYKIN, S. *Digital Communication Systems*, Hoboken. 2013.

HUURDEMAN, Anton A. *The worldwide history of telecommunications*. John Wiley & Sons, 2003.

KENNEDY, George; DAVIS, Brendan. *Electronic communication systems*. Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi, 1985.

MAZDA, Fraidoon (ed.). *Telecommunications engineer's reference book*. Butterworth-Heinemann, 2014.

RODDY, Dennis. *Electronic communications*. Pearson Education India, 1977.

TAUB, Herbert; SCHILLING, Donald L. *Principles of communication systems*. McGraw-Hill Higher Education, 1986.

VAN BOSSE, John G.; DEVETAK, Fabrizio U. *Signaling in telecommunication networks*. John Wiley & Sons, 2006.

WILLNER, Alan. *Optical fiber telecommunications*. Academic Press, 2019.

