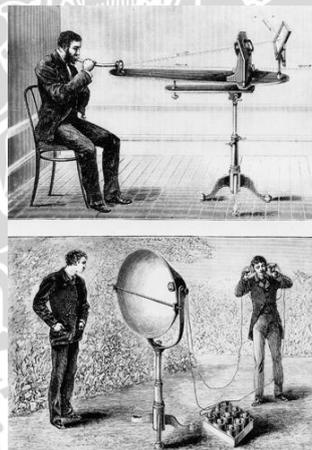


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komunikasi Cahaya

Penggunaan cahaya untuk komunikasi bukanlah suatu hal yang baru. Komunikasi gerakan tangan sejak dulu telah digunakan dimana mata sebagai detektor dan otak sebagai prosesor. Orang indian menggunakan asap sebagai alat komunikasi. Tahun 1880, Graham Bell menemukan sistem komunikasi cahaya disebut *photophone*. *Photophone* menggunakan cahaya matahari yang terpantul dari sebuah cermin tipis termodulasi *voice*. Di penerima cahaya matahari termodulasi itu jatuh pada *cell selenium photoconducting* yang langsung mengubahnya menjadi arus listrik. Di samping itu, kode morse digunakan pada lampu tersebut dengan mengedip-kedipkan lampu tersebut sesuai informasi yang dikirim.



Gambar 2.1 *Photophone*
(Sumber : en.wikipedia.org)

Komunikasi cahaya memiliki potensi besar dan akan menggantikan beberapa jaringan gelombang radio di masa depan. Sumber masalah terbesar dalam komunikasi cahaya adalah medium transmisi. Medium transmisi dapat menyebabkan fenomena optik seperti pemantulan cahaya, pembiasan cahaya dan dispersi. Fenomena optik tersebut berpengaruh terhadap daya pada komunikasi cahaya.

Relasi antara daya yang ditransmisikan dan daya yang diterima terhadap jarak diberikan oleh persamaan berikut (Soni & Banga, 2013) :

$$P_R = P_T \left(\frac{A_{Rx}}{(\theta L)^2} \right) \cdot e^{-\alpha L} \quad (2-1)$$

Keterangan :

P_R = daya pada *receiver* (dBm)

P_T = daya pada *transmitter* (dBm)

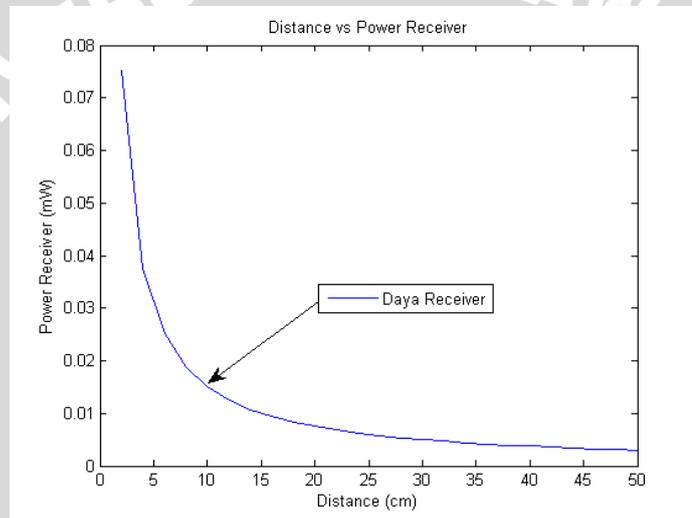
A_{Rx} = luas *aperture receiver* (cm²)

θ = sudut divergen (mrad)

α = rugi-rugi atmosfer (dB)

L = jarak antara *transmitter* dan *receiver* (m)

Hubungan matematis untuk persamaan (2-1) dapat digambarkan secara grafis seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Grafik Pengaruh Jarak terhadap Daya Receiver

Berdasarkan Gambar 2.2 Hubungan jarak antara *transmitter* dan *receiver* berbanding terbalik dengan daya pada *receiver*. Semakin jauh jarak *transmitter* dan *receiver* semakin kecil daya yang dihasilkan oleh *receiver*.

Selain itu, kinerja *Free Space Optic* (FSO) dapat dianalisis dengan menentukan *optical power loss* atau atenuasi. Metode standar dan umum untuk mengukur *optical power loss* melalui link FSO ditentukan dari hubungan antara daya penerima dengan daya pemancar. Untuk memudahkan dalam menentukan pelemahan sinyal atau amplifikasi yang diukur dalam desibel (dB). Unit dB didefinisikan oleh (Keiser, 2013):

$$\text{Optical Power Loss (dB)} = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (2-2)$$

Dimana P_1 adalah daya *transmitter* dan P_2 adalah daya *receiver*. Hubungan antara *power ratio* dan daya *receiver* berbanding lurus. Semakin besar daya *receiver* maka *power ratio* semakin besar dan sebaliknya.

Transmitter merupakan elemen komunikasi yang mengubah informasi yang dihasilkan oleh *source* (bisa berupa *speech*, *voice*, atau *data*) ke dalam bentuk yang sesuai dengan kanal informasi (*channel*). *Receiver* merupakan elemen komunikasi yang bekerja berlawanan dengan *transmitter*, yaitu mengubah informasi dari kanal ke bentuk yang sesuai dengan *destination* disertai dengan proses pengolahan sinyal untuk mengurangi derau yang dihasilkan saat ditransmisikan melalui kanal. Kanal informasi merupakan medium yang melewatkan informasi dari *transmitter* ke *receiver*. ada dua kategori kanal, yaitu:

1. *Guided Channel*

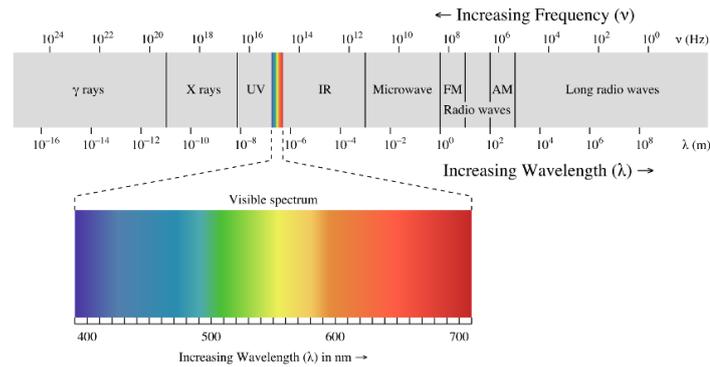
Merupakan komunikasi dengan menggunakan medium tertentu yang membuat arah informasi menjadi tertentu, contoh: saluran dua kawat, kabel koaksial, dan bumbung gelombang. penggunaan yang populer pada jaringan telepon PSTN. walaupun lebih mahal dalam infrastruktur namun mereka menawarkan keuntungan berupa *privacy* dan andal terhadap perubahan atmosfer.

2. *Unguided Channel*

Merupakan komunikasi dimana informasi dikirim tanpa sebuah medium pengarah, contoh yang populer adalah udara (atmosfer). kanal ini digunakan dalam komunikasi tanpa kabel seperti: komunikasi radio, komunikasi gelombang mikro dan komunikasi cahaya tampak (*Visible Light Communication*).

2.2 *Visible Light Communication (VLC)*

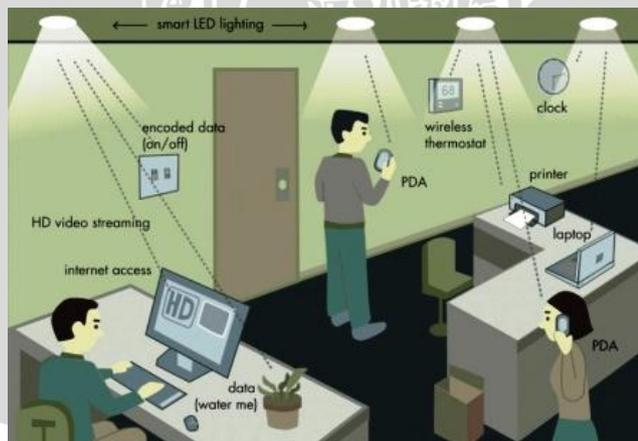
Cahaya tampak (*visible light*) adalah bentuk di mana radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang dalam kisaran tertentu diinterpretasikan oleh otak manusia. Spektrum yang terlihat mencakup panjang gelombang dari 380 nm sampai 750 nm. Jadi dapat disimpulkan bahwa sistem VLC (*Visible Light Communication*) adalah media komunikasi data menggunakan cahaya tampak antara 400 THz (780 nm) dan 800 THz (375 nm).



Gambar 2.3 Spektrum Cahaya Tampak

(Sumber : en.wikipedia.org)

Meninjau dari teknologi VLC tersebut maka sangatlah mungkin apabila selain untuk penerangan lampu ruangan (LED) juga dapat digunakan sebagai media transmisi. Penggunaan VLC sebagai media komunikasi memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan penggunaan gelombang elektromagnetik. Beberapa keuntungan tersebut adalah teknologi VLC aman untuk kesehatan manusia yang sudah ditinjau dari beberapa aspek. Selain itu, teknologi ini akan menghindarkan terjadinya interferensi dengan perangkat lain yang menggunakan gelombang elektromagnetik. Selain itu VLC bebas untuk digunakan karena hingga saat ini tidak adanya regulasi dari pemerintah.

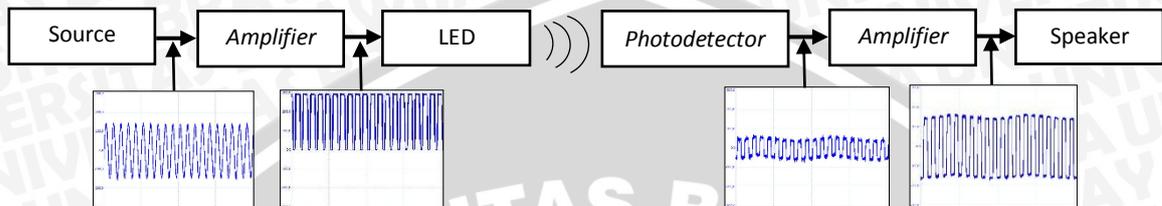


Gambar 2.4 Visible Light Communication

(Sumber : www.electronicbus.com)

VLC memiliki dua komponen utama, yaitu komponen *transmitter* dan *receiver*. Pada *transmitter* digunakan *Light Emitting Diode* (LED), sedangkan pada *receiver* digunakan *photodetector* atau detektor optik. Untuk mentransmisikan

informasi, VLC menggunakan LED sebagai *transmitter* yang akan mengirimkan informasi melalui media udara ke *receiver*. Pada *receiver*, cahaya dari LED yang merupakan pembawa informasi akan ditangkap oleh *photodetector*, kemudian *photodetector* akan mengubah cahaya dari LED menjadi listrik yang akan diolah di *receiver* sehingga informasi yang dikirimkan akan sampai di *receiver*.



Gambar 2.5 Blok Diagram Sistem *Visible Light Communication*

beserta Perubahan Sinyalnya

(Sumber : Perancangan, 2015)

Cara kerja sistem *Visible Light Communication* dimulai dari source yang membangkitkan sinyal input berupa sinyal audio dalam bentuk sinyal listrik, kemudian sinyal tersebut diteruskan melalui kabel *audio jack* ke rangkaian penguat (*amplifier*). Setelah itu sinyal audio yang berupa sinyal listrik akan diubah menjadi sinyal cahaya melalui LED. LED mentransmisikan informasi berupa sinyal cahaya yang akan ditangkap oleh *photodetector*. *Photodetector* atau detektor optik tersebut berfungsi untuk merubah sinyal cahaya menjadi sinyal listrik.

Sinyal listrik yang dihasilkan oleh detektor optik selanjutnya akan dikuatkan kembali oleh rangkaian penguat pada sisi *receiver*. Dan yang terakhir sinyal listrik yang sudah dikuatkan akan diubah menjadi sinyal suara oleh speaker sehingga data berupa sinyal suara yang sudah dikirimkan bisa di dengar di sisi *receiver*.

2.3 *Light Emitting Diode (LED)*

LED atau singkatan dari *Light Emitting Diode* adalah salah satu komponen elektronika yang terbuat dari bahan semikonduktor jenis dioda yang mampu mengeluarkan cahaya. Untuk mendapatkan emisi cahaya pada semikonduktor, bahan yang dipakai adalah *galium*, *arsenic* dan *phosporus*. Jenis bahan yang berbeda menghasilkan warna cahaya yang berbeda pula. Keuntungan dari *Light Emitting Diode (LED)* adalah memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan lampu lain, dimana *Light Emitting Diode (LED)* lebih hemat energi 80 % sampai

90% dibandingkan lampu lain. *Light Emitting Diode* (LED) memiliki tegangan operasi DC yang rendah.



Gambar 2.6 LED

(Sumber : id.wikipedia.org)

Seperti sebuah dioda normal, LED terdiri dari sebuah chip bahan semikonduktor yang diisi penuh, atau didop dengan ketidakmurnian untuk menciptakan sebuah struktur yang disebut p-n junction. Pembawa muatan elektron dan *hole* mengalir ke *junction* dari elektroda dengan voltase berbeda. Ketika elektron bertemu dengan *hole*, dia jatuh ke tingkat energi yang lebih rendah, dan melepaskan energi dalam bentuk *photon*.

Saat ini terdapat banyak warna cahaya LED yaitu warna merah, kuning dan hijau, LED berwarna biru sangat langka. Untuk menghasilkan warna putih yang sempurna, spectrum cahaya dari warna-warna tersebut digabungkan dengan cara yang paling umum yaitu penggabungan warna merah, hijau, dan biru, yang disebut RGB.

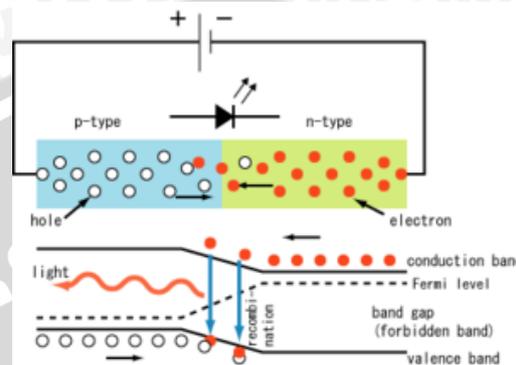
Bahan semikonduktor yang sering digunakan dalam pembuatan LED adalah:

1. Ga As (*Galium Arsenide*) meradiasikan sinar infra merah,
2. Ga As P (*Galium Arsenide Phospide*) meradiasikan warna merah dan kuning,
3. Ga P (*Galium Phospide*) meradiasikan warna merah dan kuning.

2.3.1 Prinsip Kerja LED

LED memiliki 2 kutub yaitu anoda dan katoda. LED akan menyala bila ada arus listrik mengalir dari anoda menuju katoda atau di bias maju seperti pada gambar 2.7. Pemasangan kutub LED tidak boleh terbalik karena apabila terbalik kutubnya maka LED tersebut tidak akan menyala. LED memiliki karakteristik berbeda-beda menurut warna yang dihasilkan. Semakin tinggi arus yang mengalir

pada LED maka semakin terang pula cahaya yang dihasilkan, namun perlu diperhatikan bahwa besarnya arus yang diperbolehkan 10 mA - 20 mA dan pada tegangan 1,6 V – 3,5 V menurut karakter warna yang dihasilkan. Apabila arus yang mengalir lebih dari 20 mA maka LED akan terbakar. Untuk menjaga agar LED tidak terbakar perlu kita gunakan resistor sebagai penghambat arus.



Gambar 2.7 Prinsip Kerja LED
(Sumber: elkatech.blogspot.com)

2.3.2 Karakteristik LED

Tak seperti lampu pijar dan neon, LED mempunyai kecenderungan polarisasi. Chip LED mempunyai kutub positif dan negatif (p-n) dan hanya akan menyala bila diberikan arus maju. Ini dikarenakan LED terbuat dari bahan semikonduktor yang hanya akan mengizinkan arus listrik mengalir ke satu arah dan tidak ke arah sebaliknya. Bila LED diberikan arus terbalik, hanya akan ada sedikit arus yang melewati chip LED. Ini menyebabkan chip LED tidak akan mengeluarkan emisi cahaya.

Salah satu karakteristik terpenting dari LED adalah efisiensi. Umumnya, efisiensi ini berhubungan dengan daya listrik (daya masukan) terhadap daya optik keluaran. Efisiensi kuantum η_Q berhubungan dengan arus masukan terhadap cahaya yang dibangkitkan secara internal, bukan terhadap cahaya yang dikeluarkan oleh LED. Dalam kebutuhan praktis η_Q ini bernilai antara 0,5 sampai 0,8 (50% sampai 80%). Artinya bahwa hanya 50% dari elektron yang disuntikkan menghasilkan *photon*. Untuk penyederhanaan η_Q ini berikut didefinisikan (Zeghbroeck, 1996)

$$\eta_Q = P_{\text{int}} / P_{\text{el}} \quad (2-3)$$

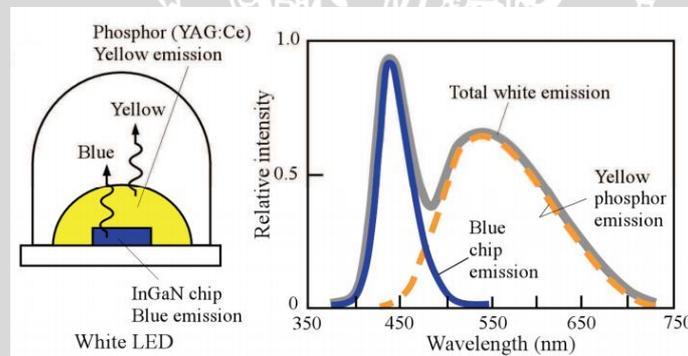
P_{int} adalah berkas sinar yang dibangkitkan secara internal dan P_{el} daya listrik terdisipasi.

LED lebih efisien dibandingkan dengan sumber optik lainnya yaitu *Laser Diode* (LD). Jika dibandingkan dengan LD, LED lebih cocok digunakan untuk komunikasi jarak dekat dan sebagai media penerangan. Hal ini ditunjukkan pada Tabel 1 dibawah ini:

Tabel 2.1. Perbandingan LED dan LASER

NO	Karakteristik	LED	LASER
1.	Spektrum keluaran	Tidak koheren	Koheren
2.	Daya optik keluaran	(0,4-4,0 mW)	(1,5-8,0mW)
3.	Kestabilan operasi terhadap temperature	Stabil	Kurang stabil
4.	Penguatan cahaya	Tidak ada	Ada
5.	Arah pancaran cahaya	Kurang terarah	Sangat terarah
6.	Arus pacu	Kecil	Besar
7.	Rongga Resonansi optik	Tidak ada	Ada
8.	Disipasi panas	Kecil	Besar
9.	Harga	Lebih murah	Mahal
10.	Kecepatan (<i>rise time</i>)	Lebih lambat (2-10 ns)	Lebih cepat (0,3-0,7 ns)
11.	Kompatibilitas dengan <i>single mode</i>	Tidak	Ya

edia.com)



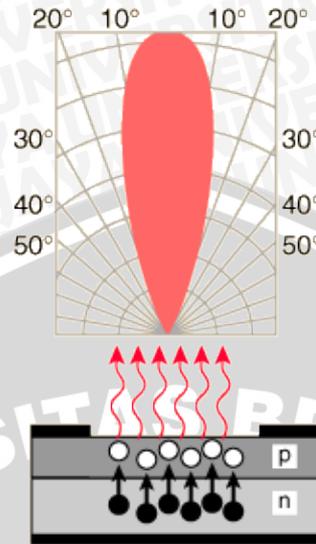
Gambar 2.8 Struktur Skematik LED Putih dan Distribusi Spektralnya

(Sumber : Kasap, 2013)

Pada Gambar 2.8 menunjukkan spektrum distribusi dari LED warna putih. Dimana warna putih LED berasal dari pancaran warna biru Chip GaInN dan pancaran warna kuning *phosphor* yang digabungkan.

Sebuah LED memancarkan cahaya satu arah dengan daya pancaran maksimum tegak lurus dengan permukaan pemancar. Pada Gambar 2.9 pola radiasi menunjukkan bahwa energi optimal dipancarkan sampai sudut 20° dari pancaran

cahaya maksimum. Beberapa tipe LED mempunyai lensa plastik yang berguna menyebarkan cahaya untuk sudut visibilitas yang lebih baik.



Gambar 2.9 Radiation Pattern of LED

(Sumber: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>)

2.4 Photodiode

Photodiode adalah suatu jenis dioda yang resistansinya berubah-ubah apabila cahaya yang jatuh pada dioda intensitasnya berubah-ubah. Dalam gelap nilai tahanannya sangat besar hingga praktis tidak ada arus yang mengalir. Semakin kuat cahaya yang jatuh pada dioda maka semakin kecil nilai tahanannya, sehingga arus yang mengalir semakin besar. Jika *photodiode* persambungan p-n bertegangan balik disinari, maka arus akan berubah secara linier dengan kenaikan fluks cahaya yang dikenakan pada persambungan tersebut.

Photodiode terbuat dari bahan semikonduktor. Biasanya yang dipakai adalah *silicon* (Si) atau *gallium arsenide* (GaAs), dan lain-lain termasuk *indium antimonide* (InSb), *indium arsenide* (InAs), *lead selenide* (PbSe), dan *timah sulfide* (PBS). Bahan-bahan ini menyerap cahaya melalui karakteristik jangkauan panjang gelombang, misalnya: 250 nm ke 1100 nm untuk silicon, dan 800 nm ke 2000 nm untuk GaAs.



Gambar 2.10 Photodiode

(Sumber : digikey.com)

Photodiode digunakan sebagai komponen pendeteksi ada tidaknya cahaya maupun dapat digunakan untuk membentuk sebuah alat ukur akurat yang dapat mendeteksi intensitas cahaya dibawah 1 pW/cm^2 sampai intensitas diatas 10 mW/cm^2 . *Photodiode* mempunyai resistansi yang rendah pada kondisi *forward bias*. *Photodiode* dapat dimanfaatkan pada kondisi *reverse bias* karena resistansi dari *photodiode* akan turun seiring dengan intensitas cahaya yang masuk. Komponen ini mempunyai sensitivitas yang lebih baik jika dibandingkan dengan *photodiode*. Hal ini disebabkan karena elektron yang ditimbulkan oleh foton cahaya pada junction ini diinjeksikan di bagian *base* dan diperkuat di bagian kolektornya. Namun demikian, waktu respon dari *phototransistor* secara umum akan lebih lambat dari pada *photodiode*.

Jika *photodiode* tidak terkena cahaya, maka tidak ada arus yang mengalir ke rangkaian pembanding, jika *photodiode* terkena cahaya maka *photodiode* akan bersifat sebagai tegangan, sehingga V_{cc} dan *photodiode* tersusun seri, akibatnya terdapat arus yang mengalir ke rangkaian pembanding.

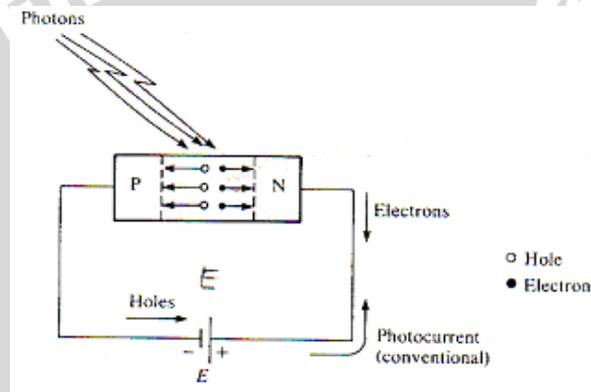
2.4.1 Prinsip Kerja Photodiode

Photodiode dibuat dari semikonduktor dengan bahan yang populer yaitu *silicon* (Si) atau *galium arsenida* (GaAs), dan yang lain meliputi InSb, InAs, PbSe. Material ini menyerap cahaya dengan karakteristik panjang gelombang mencakup: $2500 \text{ \AA} - 11000 \text{ \AA}$ untuk *silicon*, $8000 \text{ \AA} - 20,000 \text{ \AA}$ untuk GaAs. Ketika sebuah *photon* (satu satuan energi dalam cahaya) dari sumber cahaya diserap, proses ini akan membangkitkan suatu elektron dan menghasilkan sepasang pembawa muatan tunggal, sebuah elektron dan sebuah *hole*. Di mana suatu *hole* adalah bagian dari kisi-kisi semikonduktor yang kehilangan elektron.

Arah arus yang melalui sebuah semikonduktor adalah kebalikan dengan gerak muatan pembawa. Di dalam *photodiode* cara tersebut digunakan untuk mengumpulkan *photon* yang menyebabkan pembawa muatan (seperti arus atau tegangan) mengalir atau terbentuk di bagian-bagian elektroda.

Prinsip kerja *photodiode* :

- Cahaya diserap oleh *photodiode*
- Terjadinya pergeseran foton
- Menghasilkan pasangan *electron-hole* di kedua sisi
- Elektron menuju [+] sumber & *hole* menuju [-] sumber
- Sehingga arus akan mengalir di dalam rangkaian

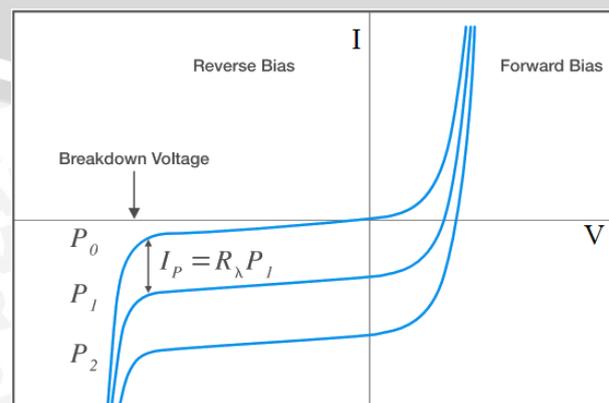


Gambar 2.11 Prinsip Kerja *Photodiode*

(Sumber : Irham, 2014)

2.4.2 Karakteristik *Photodiode*

Photodiode berbeda dengan dioda biasa. Jika *photodiode* persambungan p-n bertegangan balik disinari, maka arus akan berubah secara linier dengan kenaikan fluks cahaya yang dikenakan pada persambungan tersebut.



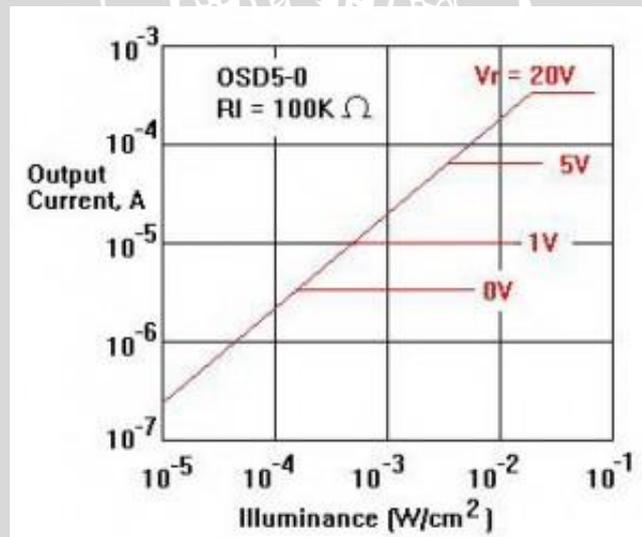
Gambar 2.12 Kurva Karakteristik I-V pada *Photodiode*

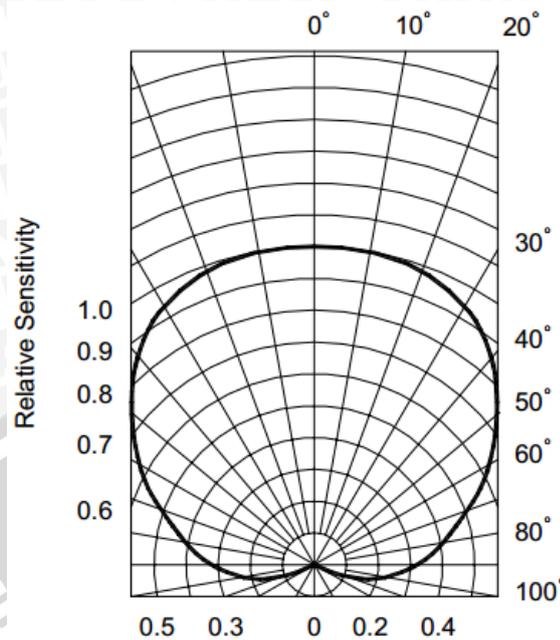
(Sumber : OSIOptoelectronics, 2013)

P_0, P_1 , dan P_2 adalah level intensitas cahaya yang berbeda. Pada Gambar 2.12 menunjukkan bahwa sebuah *photodiode* akan bekerja optimal jika diberi bias mundur.

Beberapa karakteristik *photodiode* yaitu mempunyai respon 100 kali lebih cepat daripada *phototransistor*. Dikemas dengan plastik transparan yang juga berfungsi sebagai lensa, lensa tersebut lebih dikenal sebagai *lensa fresnel* dan *optical filter*.

Hubungan antara keluaran sensor *photodiode* dengan intensitas cahaya yang diterima adalah membentuk suatu fungsi yang linier. Jika level intensitas cahaya yang diterima besar maka akan menghasilkan arus dan tegangan yang besar dan juga sebaliknya. Hubungan antara keluaran sensor *photodiode* dengan intensitas cahaya ditunjukkan pada gambar berikut :

Gambar 2.13 Hubungan Keluaran *Photodiode* Dengan Intensitas Cahaya(Sumber : <http://elektronika-dasar.web.id>)



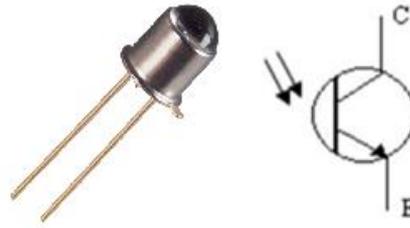
Gambar 2.14 Diagram Sensitivitas *Photodiode*

(Sumber: LTR-516AD *Datasheet*)

Dilihat dari Gambar 2.14, sebuah *photodiode* tipe LTR-516AD memiliki sensitivitas paling maksimum pada sudut 0°. Jika sudut pandang diperbesar maka daya yang diterima oleh *photodiode* semakin kecil. Jika sudut pandang lebih dari 120° maka tidak ada daya yang diterima oleh *photodiode*.

2.5 *Phototransistor*

Phototransistor merupakan salah satu komponen yang berfungsi sebagai detektor cahaya yang dapat mengubah efek cahaya menjadi sinyal listrik. Karena itu *phototransistor* termasuk dalam detektor optik. *Phototransistor* dapat diterapkan sebagai sensor yang baik, karena memiliki kelebihan dibandingkan dengan komponen lain yaitu mampu untuk mendeteksi sekaligus menguatkannya dengan satu komponen tunggal. *Phototransistor* memiliki sambungan kolektor-basis yang besar dan cahaya dapat membangkitkan pasangan lubang elektron. Dengan diberi bias maju, cahaya yang masuk akan menimbulkan arus pada kolektor.



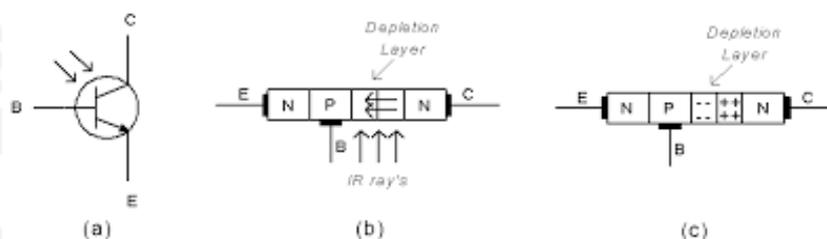
Gambar 2.15 Bentuk dan Simbol *Phototransistor*
(Sumber : www.suconel.com)

Bahan utama dari *phototransistor* adalah silikon atau germanium sama seperti pada transistor jenis lainnya. *Phototransistor* juga memiliki dua tipe seperti transistor yaitu tipe NPN dan tipe PNP. *Phototransistor* sebenarnya tidak berbeda dengan transistor biasa, hanya saja *phototransistor* ditempatkan dalam suatu material yang transparan sehingga memungkinkan cahaya (cahaya inframerah) mengenainya daerah basis, sedangkan transistor biasa ditempatkan pada bahan logam dan tertutup. Simbol dari *phototransistor* seperti pada terlihat pada gambar simbol *phototransistor*.

2.5.1 Prinsip Kerja *Phototransistor*

Prinsip kerja *phototransistor* sama persis dengan kerja transistor sebagai saklar. Perbedaannya terletak pada denyut yang masuk ke dalam basis. Jika pada transistor biasa denyut yang diberikan berupa arus DC, maka pada *phototransistor* denyut yang dikenakan pada basis adalah intensitas cahaya yang sesuai dengan karakteristik *phototransistor* tersebut.

Dalam kondisi normal, kolektor mendapat *reverse* bias, dan emitor mendapat *forward* bias. Pada kaki kolektor akan ada sedikit arus bocor (I_{co}), yaitu arus bocor antara kolektor dan basis. I_{co} selain dipengaruhi oleh suhu juga dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang datang pada daerah pengosongan antara kolektor dan basis. Sehingga *phototransistor* dapat menghantar atau transistor *on*.



Gambar 2.16 Prinsip Kerja *Phototransistor*.

- (a) Simbol *phototransistor*, (b) *Phototransistor* terkena cahaya, (c) *Phototransistor* tidak terkena cahaya
(Sumber : <http://softonezero.blogspot.com/>)

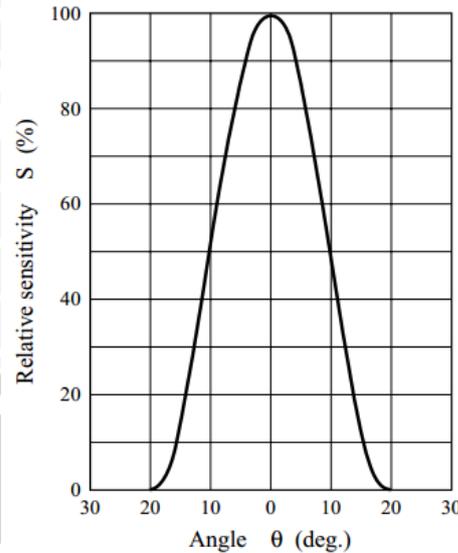
Saat *phototransistor* tidak terkena cahaya, Basis – Emitor tidak mendapatkan bias, *electron* tidak dapat bergerak bebas, sehingga *depletion layer* melebar, dengan demikian arus tidak dapat mengalir, transistor dalam keadaan *cut off*. Sebaliknya, saat *phototransistor* terkena cahaya dengan intensitas cahaya yang sesuai dengan karakteristik *phototransistor* tersebut, maka terjadi perpindahan elektron di sekitar lapisan pengosongan yang akhirnya membentuk sebuah ikatan ion di sekitar lapisan pengosongan, sehingga lapisan pengosongan menyempit dan transistor akan bersifat menghantar atau transistor *on*.

2.5.2 Karakteristik *Phototransistor*

Phototransistor memiliki beberapa karakteristik yang sering digunakan dalam perancangan, yaitu:

- Dalam rangkaian, jika menerima cahaya akan berfungsi sebagai resistan.
- Dapat menerima penerimaan cahaya yang redup (kecil).
- Semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima, maka semakin besar pula resistan yang dihasilkan.
- Memerlukan sumber tegangan yang kecil.
- Menghantarkan arus saat ada cahaya yang mengenainya.
- Penerimaan cahaya dilakukan pada bagian basis.
- Apabila tidak menerima cahaya maka tidak akan menghantarkan arus.

Berdasarkan tanggapan spektral, sifat – sifat dan cara kerja dari *phototransistor* tersebut, maka perubahan cahaya yang kecil dapat dideteksi. Oleh karena itu *phototransistor* digunakan sebagai detektor cahaya yang peka, terutama terhadap cahaya inframerah.



Gambar 2.17 Diagram Sensitivitas *Phototransistor*
(Sumber: PNA1401L *Data Sheet*)

Pada Gambar 2.17 Ditunjukkan bahwa sebuah *phototransistor* mempunyai sensitivitas maksimum pada sudut pandang 0° . Jika sudut pandang lebih dari 20° maka *phototransistor* tidak dapat menangkap cahaya sama sekali.

2.6 Noise Photodetector

Pada *photodetector*, ada dua sumber *noise* yang dapat diidentifikasi yaitu *Shot Noise* dan *Johnson Noise*.

Shot Noise berkaitan dengan fluktuasi statis pada kedua *photocurrent* dan *dark current*. Besarnya *Shot Noise* dinyatakan sebagai kuadrat akar (rms) *noise* arus (Kartopoulos, 2011):

$$I_{sn} = \sqrt{2q(I_P + I_D)B} \quad (2-4)$$

Dimana $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C, adalah muatan elektron, I_P adalah *photogenerated current*, I_D adalah *photodetector dark current* dan B adalah *bandwidth* dari *receiver*. *Shot noise* adalah sumber *noise* dominan ketika beroperasi pada mode fotokonduktif (bias).

Johnson Noise pada *photodetector* berhubungan dengan hambatan *shunt* (R_{SH}) Hal ini disebabkan panas yang dihasilkan sinyal *carrier*. Besarnya arus *noise* tersebut (Kartopoulos, 2011):

$$I_{Jn} = \sqrt{\frac{4k_B T B}{R_{SH}}} \quad (2-5)$$

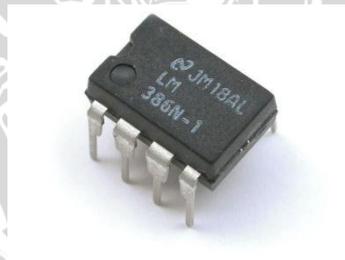
Dimana $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$ adalah konstanta Boltzmann, T adalah suhu mutlak dalam derajat Kelvin ($273 \text{ K} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$), B adalah *bandwidth* dari *receiver* dan R_{SH} adalah resistansi *shunt* dari *photodetector*.

Total *noise* arus yang dihasilkan pada sensor cahaya ditentukan oleh (Kartopoulos, 2011):

$$I_{tn} = \sqrt{I_{sn}^2 + I_{jn}^2} \quad (2-6)$$

2.7 Amplifier

IC LM386 adalah IC yang biasa digunakan dalam power *amplifier* mini atau speaker aktif. IC ini dirancang untuk digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan tegangan rendah. Tanpa komponen pendukung yang lain IC tersebut sudah dapat menguatkan input sebesar 20 kali.



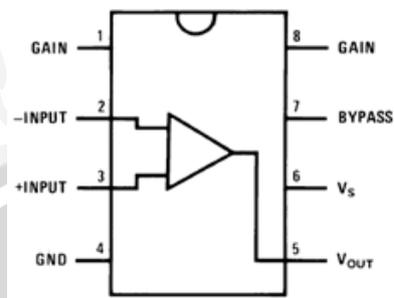
Gambar 2.18 Amplifier LM386

(Sumber: <http://www.electroniccircuits.com>)

Keuntungan lain dari IC ini adalah konsumsi daya yang rendah dan hasil penguatan yang cukup baik. Untuk mendapatkan penguatan yang lebih besar dapat dilakukan dengan menambahkan resistor dan kapasitor antara pin 1 dan 8. Dengan demikian akan didapat penguatan sebesar 200 kali. Untuk tegangan Output akan secara otomatis bisa sampai setengah tegangan *supply*. Daya yang bisa diserap saat kondisi *standby* hanya 24 mW. IC ini dapat beroperasi pada tegangan 4 - 12 volt, membuat IC LM386 bisa dioperasikan menggunakan baterai.

IC LM386 di desain lebih fleksibel untuk mengatur penguatan (*gain*), kuncinya terletak pada dua pin (1 dan 8). Dengan pin 1 dan 8 membuka (tanpa hubungan) maka set gain adalah 20 kali (26 dB). Jika sebuah kapasitor diletakkan dari pin 1 dan 8, gain akan naik sampai 200 kali (46 dB). Jika kapasitor diseri dengan resistor, *gain* dapat diatur ke nilai berapapun antara 20-200 kali. Sinyal suara untuk

diperkuat ditempatkan di Terminal 2, dan 3. Sinyal suara diperkuat kemudian keluar melalui terminal 5. Setelah beberapa kapasitor dan sebuah resistor untuk menyaring suara yang tidak diinginkan pada sinyal suara sebelum diperkuat.

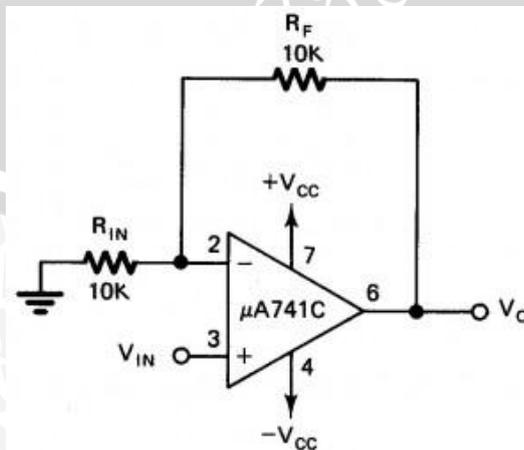


Gambar 2.19 PIN out diagram LM386

(Sumber: *Datasheet LM386*)

2.7.1. *Non-Inverting Amplifier*

Non-Inverting Amplifier merupakan penguat sinyal dengan karakteristik dasar sinyal output yang dikuatkan memiliki fasa yang sama dengan sinyal input. Penguat tak-membalik (*non-inverting amplifier*) dapat dibangun menggunakan penguat operasional, karena penguat operasional memang didesain untuk penguat sinyal baik membalik ataupun tak membalik. Rangkaian penguat tak membalik ini dapat digunakan untuk memperkuat AC maupun DC dengan keluaran yang tetap sefase dengan sinyal inputnya. Impedansi masukan dari rangkaian penguat tak-membalik (*non-inverting amplifier*) sangat tinggi dengan nilai impedansi sekitar 100 M Ω . Contoh rangkaian dasar penguat tak-membalik menggunakan operasional *amplifier* (*Op-Amp*) dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.20 Rangkaian *Non-Inverting Amplifier*

(Sumber : <http://elektronika-dasar.web.id>)

Dengan sinyal input yang diberikan pada terminal input *non-inverting*, maka besarnya penguatan tegangan rangkaian penguat *non-inverting* diatas tergantung pada harga R_{in} dan R_f yang dipasang. Besarnya penguatan tegangan output dari rangkaian penguat *non-inverting* diatas dapat dituliskan dalam persamaan matematis sebagai berikut (Hasan, 1990).

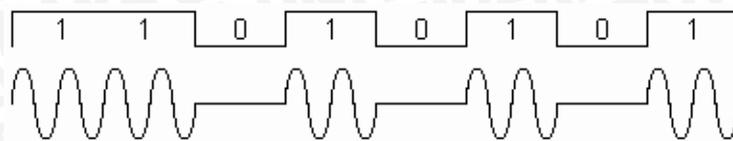
$$A_V = \left(\frac{R_f}{R_{in}} \right) + 1 \quad (2-7)$$

Berdasarkan persamaan (2-7), apabila besarnya nilai resistor R_f dan R_{in} rangkaian penguat *non-inverting* diatas sama ($R_f = R_{in}$) maka besarnya penguatan tegangan dari rangkaian penguat diatas sebesar 2x.

2.8 Modulasi Intensitas Cahaya

Modulasi adalah suatu proses penumpangan sinyal-sinyal informasi ke dalam sinyal pembawa (*carrier*), sehingga dapat ditransmisikan ke tujuan. Modulasi optik atau modulasi cahaya adalah teknik modulasi yang menggunakan berkas cahaya berupa pulsa pulsa cahaya sebagai sinyal pembawa informasi. Berkas cahaya yang digunakan disini adalah berkas cahaya yang dihasilkan oleh suatu sumber cahaya (laser atau LED).

Dibandingkan dengan modulasi konvensional, modulasi cahaya memiliki keunggulan dalam hal ketahanan terhadap derau yang sangat tinggi, karena sinyal tidak dipengaruhi medan elektromagnet. Di samping itu, sistem ini memungkinkan adanya bitrate hingga mencapai ratusan gigabit per detik. Dalam modulasi optik, sinyal dapat dimodulasi amplitudonya yang dikenal dengan modulasi intensitas (*Intensity Modulation*) berupa *Amplitudo Shift Keying (ASK) / On-Off Keying (OOK)*. Selain itu, berkas cahaya dapat juga dimodulasi frekuensinya atau lebih tepat modulasi panjang gelombang (*Wavelength Modulation*). Dan yang ketiga adalah dimodulasi fasanya (*Phasa Modulation*).



Gambar 2.21 On – Off Keying (OOK)

(Sumber : www.wikipedia.com)

Dalam modulasi optik koheren, sinyal cahaya yang dimodulasikan dapat direpresentasikan dalam bentuk rumus besaran elektrik. Adapun rumus dasar besaran tersebut dapat didefinisikan (Freznel, 2008):

$$E_s = A_s \cos[\omega_s t + \phi_s(t)] \quad (2-8)$$

Keterangan :

E_s = nilai sesaat besaran sinyal optik

A_s = amplitudo sinyal optik

ω_s = frekuensi sinyal *carrier*

ϕ_s = fase sinyal optik

2.9 Parameter Performansi Jaringan

Quality of Service (QoS) merupakan sekumpulan teknik dan mekanisme yang menjamin performansi suatu sistem komunikasi cahaya. *Quality of Service* (QoS) tersebut adalah *Optical Power Loss*, *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan *delay spread*.

2.9.1 *Optical Power Loss*

Di dalam perancangan jaringan optik, *optical power loss* harus diperhitungkan. Hal ini untuk menunjukkan perbedaan daya yang dihasilkan oleh *transmitter* dibandingkan dengan jumlah cahaya yang dapat diterima oleh *receiver*. Dalam menghitung *optical power loss*, pertama mempertimbangkan daya keluaran dari *transmitter*. Seperti pada persamaan (2-2) yang sudah dijelaskan diatas (Keiser, 2013).

$$\text{Optical Power Loss (dB)} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

Dimana P_1 adalah daya *transmitter* dan P_2 adalah daya *receiver*.

Sebagai contoh, kebanyakan tranceiver multimode memiliki nilai transmisi minimum 10 dB, sensitivitas penerima maksimum ditetapkan sebesar -17 dB. Hasilnya adalah bahwa dalam aplikasi multimode, dengan tranceiver standar pada 850 nm, anggaran dB adalah -7 dB. Ini berarti bahwa sampai 7 dB daya dapat hilang tetapi penerima masih akan mendeteksi sinyal optik.

Tabel berikut menunjukkan persentase daya yang hilang dan nilai dB yang sesuai. Pada -7 dB hanya 20% dari daya yang diterima dan belum sinyal optik yang

diterima berhasil. Sebuah perangkat optik secara teoritis sempurna akan ada kerugian internal dan akan mengirimkan 100% dari daya, sehingga memiliki 0 dB.

Tabel 2.2 Konversi Desibel ke Daya

dB	P_{in}	P_{out}
.001	99.98%	.02%
.01	99.8%	.22%
.05	99%	1%
.1	98%	2%
.5	89%	11%
.9	81%	10%
1	79%	21%
5	32%	68%
10	10%	90%
20	1%	99%
30	0.1%	99.9%
40	0.01%	99.99%
50	0.001%	99.999%

(Sumber: www.timbercon.com)

2.9.2 Signal to Noise Ratio (SNR)

Salah satu perhitungan *Noise* yang sangat penting adalah *signal to noise ratio* (SNR atau S/N). *Signal to Noise Ratio* ini merupakan perbandingan antara daya sinyal dengan daya *noise*. Makin besar nilai SNR, makin tinggi kualitas jalur tersebut. Dengan SNR dapat dilakukan evaluasi dan antisipasi pengaruh *noise* dari luar. SNR biasanya diukur pada ujung penerimaan dari sistem telekomunikasi sebelum proses deteksi sinyal. Secara matematis, SNR dinyatakan dalam satuan desibel (dB) dengan menggunakan rumusan (Kartopoulos, 2011):

$$SNR (dB) = 10 \log \left[\frac{\text{Signal Power}}{\text{Total noise Power}} \right]$$

$$SNR (dB) = 10 \log \left[\frac{I_P^2}{(I_{SN}^2 + I_{TN}^2)} \right] \quad (2-9)$$

I_{TN} adalah arus *thermal noise* dan I_{SN} adalah arus *shot noise*. Pada persamaan (2-9) berasumsi bahwa sinyal yang datang bebas dari *noise*. Dalam kenyataannya, sinyal *photonic* yang datang telah mengandung *optical noise*. Akibatnya, *optical noise* harus dimasukkan ke dalam *total noise power* untuk menghitung SNR yang nyata.

2.9.3 Delay Spread

Delay Spread merupakan suatu interval ukuran *delay* masing masing lintasan yang dilewati sinyal dengan nilai penguatan atau peredaman tertentu. *Delay spread* ini dapat menimbulkan interferensi antar simbol, karena setiap simbol saling bertumbukan dengan simbol sebelum dan sesudahnya. Level interferensi antar simbol ini ditentukan oleh kecepatan transmisi bit. *Delay spread* berawal dari sinyal *multipath* yang sampai di penerima dengan waktu tiba yang berbeda beda tergantung jarak lintasan yang ditempuh. Sebuah *impuls* yang dikirimkan oleh pemancar akan diterima oleh penerima bukan lagi sebuah impuls melainkan sebuah pulsa dengan lebar penyebaran yang disebut *Delay spread*. *Delay spread* dapat diamati pada *oscilloscope* dengan menghitung selisih periode sinyal di *receiver* dan periode sinyal di *transmitter* seperti pada persamaan berikut (Yulian, 2014):

$$D = T_{Rx} - T_{Tx} \quad (2-10)$$

Keterangan :

D = *Delay Spread*

T_{Rx} = Periode Sinyal pada *Receiver*

T_{Tx} = Periode Sinyal pada *Transmitter*

Pada persamaan (2-10) menunjukkan hubungan antara *delay spread* dengan periode sinyal pada *receiver*. Semakin besar periode sinyal *receiver* maka *delay spread* sistem juga semakin besar.

