

## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 KAJIAN PUSTAKA

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis melakukan kajian pustaka dari beberapa penelitian terdahulu. Berikut adalah karya ilmiah terdahulu yang berkaitan:

Penelitian [7] ini dibuat untuk melihat kinerja OQAM-FBMC dan CP-OFDM dan mengamati beberapa hasil simulasi *Bit Error Rate* (BER) terhadap nilai SNR. Hasil yang diperoleh, sistem OQAM-FBMC mencapai BER mendekati 0 saat nilai BER  $2 \times 10^{-5}$  pada SNR 16. Sedangkan di sistem CP-OFDM mencapai BER mendekati nilai 0 saat nilai BER  $3 \times 10^{-5}$  pada SNR 18. Hasil menunjukkan bahwa sistem OQAM-FBMC lebih baik daripada sistem CP-OFDM.

Penelitian [8] memiliki hasil simulasi yang menunjukkan peningkatan nilai BER yang lebih baik dengan menggunakan filter *pre-emphasis* bersama dengan filter PPN (*Per-Subcarrier Phase Rotation*) pada FBMC adalah hal yang positif. Dalam kasus contoh yang diberikan, dengan *Eb/No* sebesar 13 dB, terdapat penurunan nilai BER dari 0,0187 dB menjadi 0,0184 dB. Selain itu, dikatakan bahwa sekitar 250 bit berhasil diperbaiki.

Penelitian [9] ini memberikan kontribusi yang berharga dalam memahami karakteristik berbagai modulasi dalam sistem komunikasi OFDM, dan dapat menjadi acuan bagi perancangan dan implementasi sistem komunikasi yang lebih efisien dan andal dalam berbagai kondisi kanal dan lingkungan komunikasi. Hasil yang diperoleh yaitu sistem dengan modulasi M-QAM mendapat titik konstelasi yang lebih renggang dibandingkan dengan M-PSK. Sehingga, sistem dengan modulasi M-QAM mempunyai kinerja yang lebih baik daripada M-PSK. Pada penjabaran BER, sistem dengan modulasi 4-QAM dan 16-QAM paling baik karena memiliki nilai BER yang paling kecil.

Penelitian [10] adalah hasil dari implementasi sistem komunikasi kooperatif OFDM dan perbandingannya dengan sistem non-kooperatif

OFDM dapat memberikan wawasan yang berharga dalam mengoptimalkan jaringan komunikasi, terutama dalam menghadapi tantangan jarak, daya pancar, dan kondisi penghalang yang berbeda-beda. Informasi ini dapat menjadi acuan bagi industri telekomunikasi untuk memilih teknologi yang paling sesuai dengan kondisi lingkungan dan aplikasi tertentu. Pada saat tanpa penghalang sistem komunikasi kooperatif memperoleh nilai BER sama dengan 0 saat daya pancar sebesar -14dB sedangkan pada sistem non kooperatif OFDM pada saat daya pancar -9dB dan untuk kondisi dengan penghalang pada komunikasi kooperatif OFDM memperoleh nilai BER sama dengan 0 saat daya pancar sebesar -9 dB sedangkan non kooperatif OFDM tidak mencapai nilai BER sama dengan 0 pada daya pancar maksimum sebesar -5 dB.

Penelitian [11] ini berfokus pada unjuk kerja K-NN (*K-Nearest Neighbor*) clustering yang menggantikan fungsi *demapper* FBMC pada biasanya. *Demapper* K-NN menggunakan metode *Euclidean Distance* yang mengelompokkan bit-bit dari blok diagram pasca pengolahan OQAM menuju diagram 16 QAM. Parameter unjuk kerja sistem pada penelitian ini yaitu diukur dengan *Signal to Noise Ratio* (SNR) terhadap *Bit Error Rate* (BER) dan kapasitas saluran. Hasil penelitian menunjukkan FBMC OQAM ZF *demapper* K-NN memiliki nilai BER lebih baik dibandingkan yang tidak menggunakan ZF. Peningkatan nilai SNR yang digunakan dapat menghasilkan nilai kapasitas kanal yang semakin meningkat.

Penelitian [12] ini dilakukan dengan menggunakan modulasi BPSK pada beberapa jenis kanal yaitu *Rayleigh*, *Rician*, Nakagami-m, Weibull, dan Suzuki. Hasil simulasi MATLAB menunjukkan bahwa secara umum kanal yang mendapatkan perbaikan kinerja penerimaan, dimana nilai terendah sebesar 2 dB terjadi pada kanal Suzuki dan tertinggi sebesar 4 dB pada kanal Weibull.

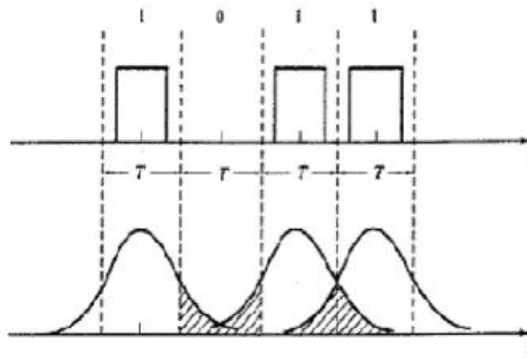
Dari beberapa sumber jurnal, artikel maupun penelitian terdahulu yang dijadikan oleh penulis sebagai referensi dalam melakukan penelitian ini terlihat bahwa FBMC-OQAM lebih baik dibandingkan CP-OFDM dan Kanal *Rician* lebih baik daripada kanal *Rayleigh Fading*.

## 2.2 DASAR TEORI

### 2.2.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

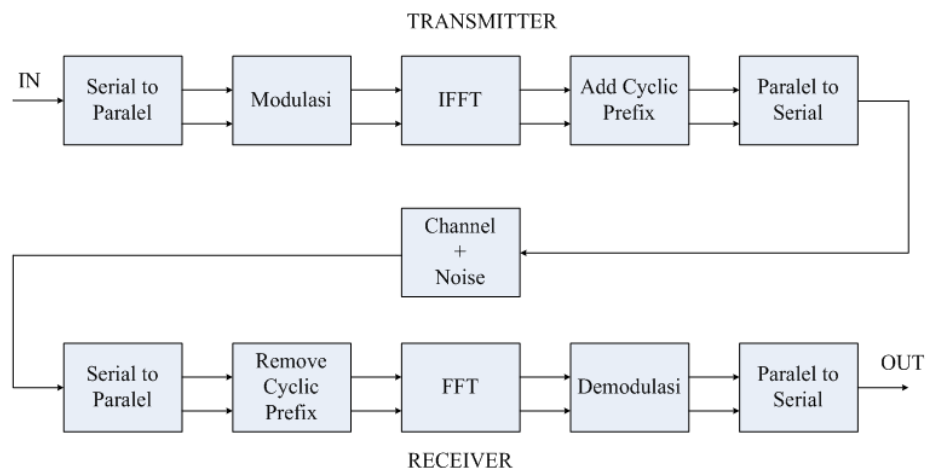
*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) merupakan suatu teknik modulasi dan *multiplexing* dalam bidang komunikasi nirkabel. Teknik ini membagi spektrum frekuensi menjadi banyak *subcarrier orthogonal* yang saling tegak lurus untuk mentransmisikan data secara paralel. Setiap *subcarrier* membawa bagian dari data yang dikodekan dalam bentuk simbol kompleks. OFDM telah menjadi salah satu teknologi yang sangat penting dalam komunikasi nirkabel modern, terutama dalam sistem seluler seperti LTE (*Long Term Evolution*) dan 5G. Keunggulan utama OFDM adalah efisiensi *spectral*, toleransi terhadap *Fading*, dan kemampuan untuk mengatasi interferensi frekuensi. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) ialah sebuah metode modulasi *multi-carrier*, yang berarti sinyal data ditransmisikan menggunakan banyak subpembawa frekuensi secara simultan. Setiap subpembawa bekerja pada frekuensi yang berbeda dan bekerja secara paralel untuk mengirimkan data. OFDM menggunakan banyak subpembawa, sinyal data yang ditransmisikan tetap bersifat tunggal, yang berarti semua bit data ditransmisikan bersamaan. Salah satu keuntungan utama dari OFDM ialah kemampuannya untuk mengalokasikan data ke dalam banyak subkanal frekuensi yang lebih sempit, daripada menggunakan satu saluran frekuensi lebar. Hal ini mengurangi gangguan dan distorsi jalur karena subkanal frekuensi yang lebih sempit lebih tahan terhadap efek *multipath* dan gangguan kanal. Prinsip *multicarrier* ini dikembangkan untuk membuat sistem yang bisa bekerja pada laju data yang tinggi serta terbebas dari efek *Intersymbol Interference* (ISI). Pada gambar 2.1 *Intersymbol interference* sendiri terbentuk karena ada *spreading* suatu *bit data* sehingga dayanya akan mengganggu *bit* lain, yang menjadikan suatu simbol yang diterima dapat mengalami salah eksposisi pada penerima [13].

Dalam sistem OFDM, data yang akan ditransmisikan dipecah menjadi beberapa *subcarrier*, yang masing-masing membawa bagian dari data tersebut. Data tersebut kemudian diubah menjadi simbol OFDM melalui proses IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*).



**Gambar 2.1 Intersymbol Interference [14].**

IFFT adalah kebalikan dari FFT (*Fast Fourier Transform*), yang digunakan pada sisi penerima untuk mengurai atau memproses kembali simbol OFDM yang telah dikirimkan. Pada sisi pengirim, simbol OFDM dihasilkan dari proses IFFT, yang mengonversi data dari domain frekuensi ke domain waktu. Simbol OFDM tersebut kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi. Pada sisi penerima, simbol OFDM yang telah dikirimkan diurai kembali ke bentuk domain frekuensi melalui proses FFT. Proses FFT memisahkan data yang terdapat pada berbagai *subcarrier*, sehingga data asli dapat dikembalikan dengan benar.



**Gambar 2.2 Sistem CP-OFDM [15].**

Berikut ini merupakan uraian pembahasan blok-blok Sistem OFDM dari Gambar 2.2.

1. *In (Input Data)*: *Input* data yang akan dikirim melalui sistem OFDM.
2. Konversi Serial ke Paralel: Blok ini mengkonversi aliran data dari bentuk serial (satu baris) kedalam beberapa baris dan beberapa kolom.

Hal ini dilakukan untuk membentuk subcarrier-subcarrier yang akan digunakan dalam sistem OFDM.

3. Modulasi: Blok ini bertujuan untuk menumpangkan sinyal informasi (data) ke sinyal *carrier* atau sinyal pembawa, sehingga data dapat dikirim dalam bentuk sinyal OFDM.
4. *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT): Sinyal yang termodulasi diaplikasikan ke dalam IFFT untuk membentuk simbol-simbol OFDM dalam domain waktu.
5. Penyisipan *Guard Interval* (GI): *Guard Interval* yang bernama *Cyclic Prefix* digunakan untuk mencegah *Inter Symbol Interference* (ISI). *Cyclic Prefix* menambahkan simbol dengan menyalin beberapa simbol dari akhir *frame* IFFT dan menempatkannya pada awal *frame*.
6. Konversi Pararel ke Serial: Simbol-simbol OFDM yang masih dalam bentuk stream paralel dikonversi kembali menjadi bentuk stream serial dalam sinyal *baseband* OFDM.
7. Kanal Transmisi: Kanal ini digunakan untuk mentransmisikan data dari pengirim ke penerima melalui media transmisi, seperti kabel atau gelombang radio.
8. Konversi Serial ke Pararel: Setelah melalui kanal transmisi, sinyal OFDM dikonversi kembali dari bentuk stream serial menjadi bentuk stream paralel.
9. *Fast Fourier Transform* (FFT): Pada blok ini, sinyal OFDM yang telah melewati kanal transmisi dipisahkan dari frekuensi *carriernya* dan dikembalikan ke domain frekuensi.
10. Konversi Pararel ke Serial: Pada blok ini, bit-bit informasi yang masih berupa matriks jumlah *subcarrier* x jumlah simbol dikonversi kembali ke bentuk semula dengan mengubahnya dari bentuk paralel ke bentuk serial.
11. Demodulasi, Pada blok ini: sinyal OFDM yang sudah berbentuk bit-bit informasi akan diubah kembali menjadi data awal melalui proses demodulasi. [15].

*Invers Fast Fourier Transform* (IFFT) mengambil spektrum yang diterima dan mengubah semuanya kembali ke sinyal domain waktu dengan cara mengalikannya dengan sejumlah gelombang sinus. Persamaan IFFT terlihat pada persamaan (2.1)

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin[2\pi kn/N] - j \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos[2\pi kn/N] \quad (2.1)$$

Keterangan:

X(n) = Waktu domain.

X(k) = Frekuensi domain.

N = Ukuran IFFT.

*Fast Fourier Transform* (FFT) adalah algoritma transformasi *fourier* yang dikembangkan dari algoritma *Discrete Fourier Transform* (DFT) untuk meningkatkan laju komputasi dari perhitungan transformasi *fourier* yaitu dengan mereduksi proses *looping* pada kalkulasi DFT tersebut sehingga hasilnya FFT tersebut mengurangi pemakaian memori dan mempercepat kerja sistem yang menggunakannya. FFT dapat mengambil sinyal acak, mengalikannya berturut-turut dengan eksponensial kompleks selama rentang frekuensi yang ada, menjumlahkan setiap hasil dan melakukan plot hasil tersebut sebagai koefisien frekuensi. Koefisien ini disebut spektrum dan mewakili "berapa banyak" frekuensi yang terdapat dalam sinyal *input*. Sinyal hasil FFT berbentuk domain frekuensi. Persamaan FFT terlihat pada persamaan (2.2) [16].

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin[2\pi kn/N] + j \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos[2\pi kn/N] \quad (2.2)$$

Keterangan:

X(n) = Waktu domain.

X(k) = Frekuensi domain.

N = Ukuran IFFT.

Persamaan FFT dan IFFT dibedakan oleh koefisien di antara keduanya dan tanda minus pada IFFT. Kedua rumusan tersebut melakukan hal yang sama, yaitu mengalikan sinyal masukan dengan sinyal sinusoidal, kemudian dipisahkan.

FFT dan IFFT adalah fungsi yang sama. Persamaan umum IFFT adalah sebagai berikut:

$$X[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot W_N^{-nk} \quad (2.3)$$

Keterangan :

X(n) = Waktu domain.

X(k) = Frekuensi domain.

N = Ukuran IFFT.

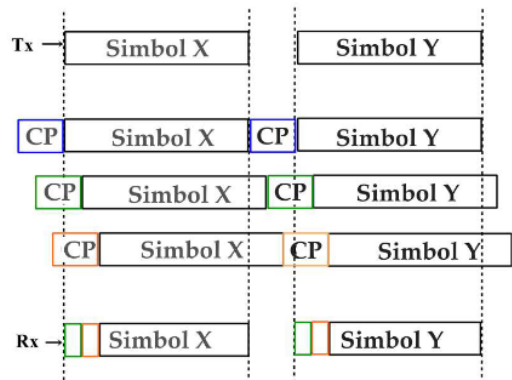
k = 0,1,2,3,.....,N-1.

Persamaan umum IFFT adalah sebagai berikut:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} X[n] \cdot W_N^{nk} \quad (2.4)$$

### 2.2.2 Cyclic Prefix

*Cyclic Prefix* (CP) merupakan duplikat bagian akhir dari simbol OFDM untuk menghilangkan *delay spread* yang terjadi antar data yang saling tumpang tindih. Pergerakan kecepatan *user* dan pengaruh efek *doppler* yang diakibatkan oleh pergerakan *user* sangat mempengaruhi panjang CP yang berdampak pada kinerja sistem OFDM. *Cyclic prefix* atau yang disingkat dengan CP berfungsi sebagai *guard interval* yang memastikan semua simbol OFDM terkirim secara lengkap dalam *interval* FFT dengan waktu tunda yang sama. Hal ini akan menjaga ke orthogonalitasan dari sinyal OFDM. Pada gambar 2.3 dapat dilihat penggunaan *Cyclic Prefix* [17] .



**Gambar 2.3 Penggunaan *Cyclic Prefix* [18].**

### 2.2.3 Konfigurasi OFDM

Keluaran pemetaan berupa bilangan yang kompleks kemudian diaplikasikan dalam *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) untuk mendapatkan hasil *orthogonal* OFDM. Penggunaan IFFT inilah yang memungkinkan pembagian sub-pembawa saling *orthogonal* pada OFDM. Masing-masing sub-pembawa ini membawa sejumlah data yang berbeda, dan mereka diatur sedemikian rupa sehingga tidak saling mengganggu satu sama lain dalam domain frekuensi. Ini menciptakan efisiensi spektral yang tinggi karena sejumlah besar sub-pembawa dapat digunakan secara bersamaan dalam bandwidth yang diberikan. *Output* IFFT yang masih bernilai bilangan kompleks kemudian dikonversi lagi dari bentuk paralel menjadi bentuk serial untuk kemudian diteruskan. Ini biasanya dilakukan dengan mengambil elemen-elemen dari setiap sub-pembawa dan menyusunnya secara berurutan menjadi sinyal serial yang akan dikirim melalui saluran komunikasi. Sinyal serial yang dihasilkan kemudian ditransmisikan melalui saluran komunikasi dan diterima oleh penerima. Di sisi penerima, sinyal serial akan dikonversi kembali menjadi bentuk paralel, dan kemudian dilakukan proses FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk mengembalikan data dari domain frekuensi ke domain waktu. Selanjutnya, data dikomplekskan kembali menjadi bentuk asli, dan proses demodulasi digunakan untuk mendapatkan data biner asli. Dengan demikian, IFFT adalah bagian kunci dalam proses OFDM yang memungkinkan pembagian sub-pembawa yang *orthogonal* dan efisiensi spektral yang tinggi dalam sistem komunikasi OFDM. Indeks waktu diskret dari tanggapan denyut kanal dan  $\tau_n$  adalah indeks lintasan terakhir, dengan merujuk pada persamaan 2.5

$$\tau_n = \frac{\tau_{max}}{T_s} \quad (2.5)$$

Keterangan :

$\tau_n$  = Jumlah Data

$\tau_{max}$  = Jumlah data maksimal.

$\tau_s$  = Periode Sampling



#### **2.2.4 Modulasi dan Demodulasi**

Modulasi adalah proses untuk mengubah sinyal informasi (data) menjadi bentuk yang cocok untuk ditransmisikan melalui media komunikasi. Tujuan utama dari modulasi adalah untuk memodifikasi sinyal informasi agar dapat ditransmisikan dengan efisien dan dapat diakses dengan mudah di tempat tujuan. Dalam komunikasi, informasi yang ingin dikirimkan biasanya berupa sinyal analog atau digital. Sinyal analog dapat berbentuk gelombang sinusoidal yang berfluktuasi dalam amplitudo dan frekuensi, sedangkan sinyal digital terdiri dari deretan bit 0 dan 1. Modulasi berfungsi untuk mengubah sinyal informasi ini menjadi sinyal yang sesuai dengan karakteristik media transmisi yang digunakan, seperti gelombang elektromagnetik pada transmisi radio, kabel, serat optik, dan lain-lain.

Maka dapat dikatakan bahwa modulasi sangat penting dalam komunikasi modern, karena memungkinkan pengiriman data dan informasi dengan efisien melalui media transmisi yang berbeda dan memungkinkan komunikasi jarak jauh. Teknologi modulasi menjadi dasar untuk berbagai aplikasi seperti televisi, radio, telepon seluler, internet nirkabel, dan komunikasi satelit. Demodulasi adalah proses kebalikan dari modulasi dalam sistem komunikasi. Saat modulasi, sinyal informasi (biasanya dalam bentuk data digital) dimodulasikan ke dalam bentuk sinyal *carrier*, yang dapat dengan mudah ditransmisikan melalui saluran komunikasi. Demodulasi adalah langkah yang diperlukan di penerima untuk mengembalikan sinyal informasi asli dari sinyal modulasi yang diterima.

Proses demodulasi bervariasi tergantung pada jenis modulasi yang digunakan dalam sistem komunikasi. Proses demodulasi adalah kunci dalam mendapatkan kembali data informasi yang asli dari sinyal yang diterima, dan efisiensi dan ketepatan dalam proses ini sangat penting untuk keberhasilan sistem komunikasi. Teknik demodulasi yang digunakan bergantung pada jenis modulasi yang digunakan dalam sistem komunikasi tersebut.

#### **2.2.5 Modulasi Quadrature Amplitude Modulation (QAM)**

*Quadrature Amplitude Modulation* atau QAM adalah salah satu bentuk modulasi yang menggabungkan amplitudo dan fase dari dua gelombang pembawa

sinusoidal yang ortogonal, yaitu gelombang *inphase* (I) dan gelombang *quadrature* (Q). Kombinasi amplitudo dan fase ini memungkinkan QAM untuk membawa lebih banyak bit dalam satu simbol dibandingkan dengan modulasi amplitudo atau fase tunggal. Jumlah titik dalam sinyal QAM ditentukan oleh level modulasi yang digunakan. Sebagai contoh, QAM 16 memiliki 16 titik dalam diagram konstelasi yang dapat menyatakan 4 bit informasi dalam satu simbol. Setiap simbol QAM 16 akan mengolah kombinasi dari 4 bit *biner*. Jumlah bit yang dapat ditransmisikan pada setiap simbol tergantung pada jumlah titik dalam diagram konstelasi. Kelebihan QAM adalah kemampuannya untuk mengalihkan data pada laju bit yang tinggi dalam lebar pita yang terbatas, seperti pada contoh Anda yang dapat mentransmisikan 9600 bit/detik pada kanal telepon dengan lebar pita 2700 Hz. Oleh karena itu, QAM banyak digunakan dalam komunikasi data seperti pada jaringan komputer, telepon seluler, dan komunikasi satelit, di mana efisiensi *bandwidth* menjadi sangat penting. [19]. QAM ini merupakan modulasi digital (kombinasi ASK dan PSK) dengan proses pentransmisian pada kanal lebar pita yang terbatas. QAM menggunakan perubahan amplitudo dan fase gelombang pembawa untuk membawa informasi digital.

Sinyal QAM dapat ditulis juga dengan persamaan berikut:

$$S(t) = I(t) \sin \omega_c t + Q(t) \cos \omega_c t \quad (2.6)$$

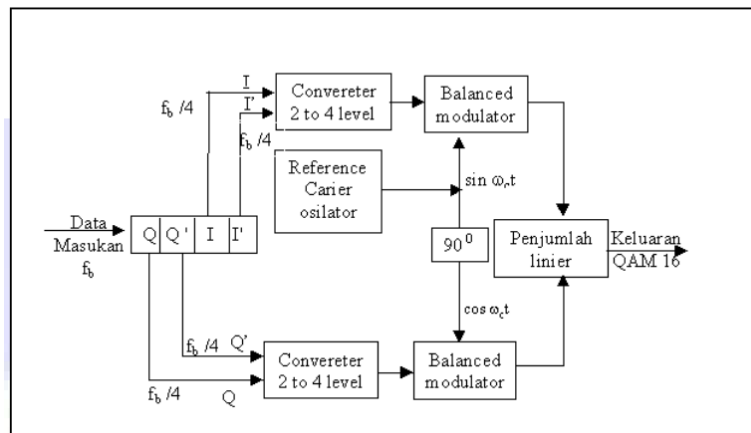
Keterangan:

$I(t) = A \sin \theta$  dan  $Q(t) = A \cos \theta$ .

Dari persamaan diatas, dapat dilihat bahwa sinyal QAM dapat dibentuk dengan menjumlahkan sebuah sinyal kosinus dengan amplitudo  $I(t)$  dan sebuah sinyal sinus dengan amplitudo  $Q(t)$ . Ini sama dengan menjumlahkan sebuah sinyal AM (amplitude modulation) yang menggunakan carrier kosinus dengan sebuah sinyal AM lain yang menggunakan carrier sinus. Kata *quadrature* pada QAM berasal dari kedua carrier yang berbeda fase  $90^\circ$ .

16-QAM menggunakan metode *encoding* M-er dengan  $M = 16$  yang berarti ada 16 *output* yang mungkin dengan kombinasi amplitudo dan fasa yang tidak sama. Data *input* dibagi kedalam 4 bit yang dikenal dengan sebutan

*QUADBIT*. Data ini kemudian diproses dalam 4 kanal, yaitu I, I', Q, dan Q', dengan laju bit pada masing-masing kanal sebesar 1/4 dari laju bit masukan ( $f_b/4$ ). Empat bit masukan diambil secara serial dan kemudian dipisahkan menjadi 4 kanal secara serentak dan paralel, yaitu kanal I, I', Q, dan Q'. Bit pada kanal I dan Q menyebutkan polaritas dari converter, sementara bit pada kanal I' dan Q' menyebutkan besaran keluaran *converter* menghasilkan 4 tingkatan sinyal PAM (*Pulse Amplitude Modulation*) dengan dua polaritas (+V dan -V) dan dua besar keluaran (0,821 V dan 0,22 V). Sinyal PAM kemudian dimodulasi dengan menghasilkan informasi '*In phase*' dan '*Quadrature*' di setiap modulator. Modulator kanal I memiliki 4 keluaran yang mungkin, sedangkan modulator kanal Q juga memiliki 4 keluaran yang mungkin. Penjumlahan linier menggabungkan keluaran modulator dari kanal I dan Q, dan akhirnya menghasilkan 16 kondisi keluaran QAM 16 keadaan dengan kombinasi amplitudo dan fasa yang berbeda. Pada gambar 2.4 merupakan diagram blok pemancar dari modulasi 16-QAM serta pada tabel 2.1 dan tabel 2.2 ialah tabel kebenaran converter 16-QAM Kanal I dan Kanal Q [20].



**Gambar 2.4 Diagram Blok Pemancar 16-QAM [20].**

**Tabel 2.1 Tabel Kebenaran Converter 16-QAM Kanal I [21]**

I	I'	Keluaran
0	0	-0,22
0	1	-0,821
1	0	+0,22
1	1	-0,821

**Tabel 2.2 Tabel Kebenaran Converter 16-QAM Kanal Q [22]**

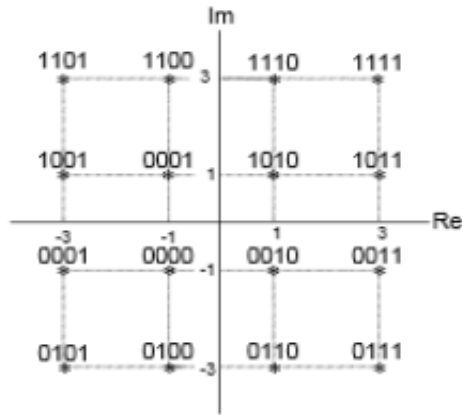
Q	Q'	Keluaran
0	0	-0,22
0	1	-0,821
1	0	+0,22
1	1	+0,821

**Tabel 2.3 Tabel Kebenaran Modulator 16-QAM [21]**

Simbol	I	Q	Q'	I'	Amplitudo	$\theta$
0	0	0	0	0	1,414	$-135,000^\circ$
1	0	0	0	1	3,162	$-161,565^\circ$
2	0	0	1	0	1,414	$-45,000^\circ$
3	0	0	1	1	3,162	$-18,435^\circ$
4	0	1	0	0	3,162	$-108,435^\circ$
5	0	1	0	1	4,242	$-135,000^\circ$
6	0	1	1	0	3,165	$-71,565^\circ$
7	0	1	1	1	4,242	$-45,000^\circ$
8	1	0	0	0	1,414	$135,000^\circ$
9	1	0	0	1	3,162	$161,565^\circ$
10	1	0	1	0	1,414	$45,000^\circ$
11	1	0	1	1	3,162	$18,435^\circ$
12	1	1	0	0	3,162	$108,435^\circ$
13	1	1	0	1	4,242	$135,000^\circ$
14	1	1	1	0	3,162	$71,565^\circ$
15	1	1	1	1	4,242	$45,000^\circ$

Teknik Konstelasi dalam 16-QAM dapat dihitung sebagai jumlah kuadrat amplitudo dari semua titik dalam konstelasi. Energi konstelasi ini memberikan gambaran tentang seberapa "berdaya" atau "kuat" modulasi tersebut, dan

mempengaruhi sejumlah faktor dalam sistem komunikasi, termasuk jarak antar titik dalam konstelasi.



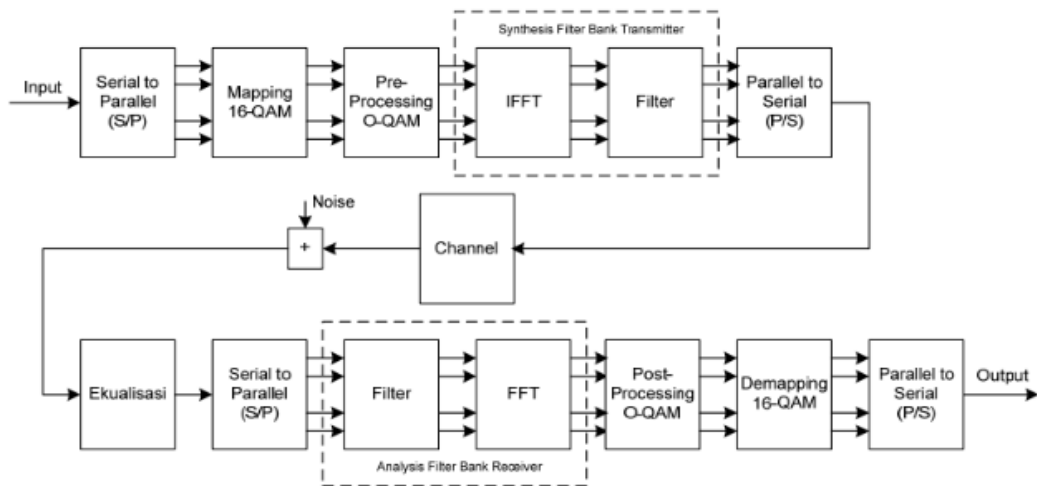
**Gambar 2.5 Diagram Konstelasi 16-QAM Rectagngular [21]**

Pada gambar 2.5 dapat dilihat bahwa dalam 16-QAM, terdapat 16 titik dalam konstelasi, yang biasanya disusun dalam susunan 4x4 seperti matriks. Setiap titik dalam konstelasi mewakili kombinasi amplitudo dari dua sinyal pemodulasi (misalnya, sinyal *in-phase* dan sinyal *Quadrature*). Jarak antara titik-titik dalam konstelasi adalah parameter penting dalam analisis sistem komunikasi, dan memengaruhi seberapa baik sistem dapat membedakan antara berbagai simbol modulasi. Semakin besar energi konstelasi, maka semakin besar jarak antar titik dalam konstelasi (d), dan ini dapat mempengaruhi daya pemisahan antara simbol-simbol dalam kondisi saluran yang berbeda. Sebagai hasilnya, sistem dapat menjadi lebih toleran terhadap gangguan dan noise atau memungkinkan transmisi pada jarak yang lebih jauh. Namun, konsekuensinya adalah bahwa semakin besar energi konstelasi, semakin sensitif sistem terhadap perubahan kondisi kanal yang ditunjukkan seperti pada Gambar 2.4 [21].

### 2.2.6 Pengertian *Filter Bank Multi Carrier (FBMC)*

*Filter Bank Multi Carrier (FBMC)* merupakan sebuah teknologi modulasi dalam bidang telekomunikasi yang mirip dengan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*, tetapi dengan beberapa perbedaan signifikan. FBMC adalah salah satu skema modulasi yang diusulkan untuk diterapkan dalam skema komunikasi seluler 5G dan dapat memberikan beberapa keunggulan dibandingkan dengan OFDM. Pada gambar 2.6 FBMC mempunyai 2 mekanisme, yaitu pra

pemrosesan dan pasca pemrosesan. Mekanisme pra pemrosesan FBMC disebut sintesis *bank filter*. Dan pasca pemrosesan dikenal dengan sebutan analisis *bank filter*. Sintesis *bank filter* diletakkan pada mekanisme pengiriman data setelah mekanisme pra pengolahan OQAM. Sedangkan di sisi penerima mekanisme analisis berada sebelum mekanisme pasca pengolahan OQAM. Pada rancangan OQAM, spektrum kanal yang beriringan mengalami *overlap* tanpa menyebabkan *crosstalk* antar *subcarrier* dikarenakan pengunduran setengah simbol waktu antara komponen *inphase* dan *quadrature* sinyal pada *subcarrier*. *Crosstalk* digeser ke sampel genap saat simbol kompleks ditransmisikan dari sampel ganjil. Sehingga terjadi pengurangan jarak kanal yang berdekatan pada *subcarrier* yang mengurangi efek *Inter Carrier Interference (ICI)* atau *Inter Symbol Interference (ISI)*.

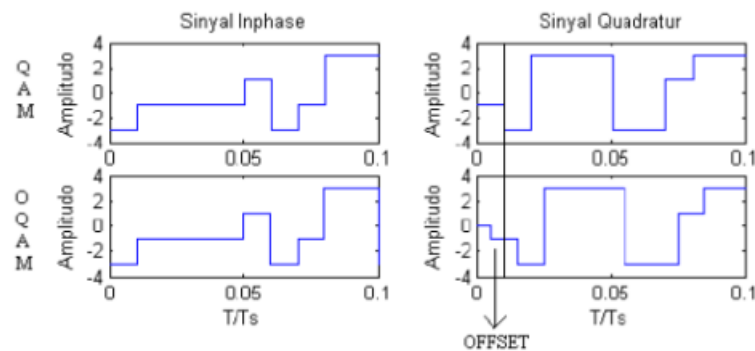


**Gambar 2.6 Sistem FBMC dengan Modulasi OQAM [23].**

### 2.2.7 Teknik Modulasi Offset-Quadrature Amplitude Modulation (O-QAM)

Dalam teknik modulasi OQAM, salah satu karakteristik utama dari OQAM adalah pemisahan fisik antara sinyal *inphase* (I) dan sinyal *quadrature* (Q). Sinyal *inphase* (I) dan sinyal *quadrature* (Q) dipisahkan secara fisik sehingga menjadi dua sinyal terpisah yang tidak saling tumpang tindih. Pemisahan ini memungkinkan sinyal-sinyal ini untuk diolah secara independen dalam sistem komunikasi. Pada gambar 2.7 modulasi QAM, konstelasi sinyal biasanya berbentuk silang atau

*cross-shaped constellations*. Sinyal *inphase* dan *quadrature* memiliki pola frekuensi yang saling bergantian. Konstelasi silang ini memungkinkan banyak titik dalam konstelasi, yang dapat membawa lebih banyak informasi dalam setiap simbol. Keuntungan utama dari OQAM adalah kemampuannya untuk mengurangi *Inter-symbol Interference* (ISI) yang disebabkan oleh penggunaan guard interval pada setiap subkanal dan kemampuannya untuk mengatasi distorsi jalur dengan lebih baik dibandingkan QAM. Ini berarti bahwa dalam kondisi saluran yang buruk atau berubah-ubah, OQAM dapat mempertahankan kualitas sinyal yang lebih baik. Dalam banyak kasus, OQAM digunakan dalam sistem komunikasi yang menghadapi tantangan seperti fading multipath atau distorsi jalur yang signifikan. Keunggulannya dalam mengatasi ISI dan distorsi jalur membuatnya menjadi pilihan yang baik dalam berbagai aplikasi, terutama ketika kualitas transmisi sinyal harus dipertahankan dalam kondisi yang tidak ideal. Namun, implementasi OQAM juga bisa lebih rumit daripada QAM karena pemisahan sinyal I dan Q, sehingga memerlukan lebih banyak sumber daya komputasi.



**Gambar 2.7 Perbedaan Modulasi QAM dengan OQAM [23].**

Terdapat dua tahap pada modulasi OQAM, ialah tahap pra pengolahan OQAM dan tahap pasca pengolahan OQAM.

### 2.2.8 Kanal Wireless

Kanal *wireless* merupakan faktor pokok yang mebatasi kinerja sistem komunikasi *wireless*. Kanal wireless merujuk pada medium nirkabel tempat sinyal elektromagnetik digunakan untuk mentransmisikan informasi antara pemancar dan penerima. Karena sifat *random* dan variabilitas kanal *wireless*, perancangan

sistem komunikasi nirkabel harus mempertimbangkan strategi mitigasi yang tepat untuk menghadapi tantangan tersebut. Karena berbagai rintangan alam atau buatan manusia di jalur sinyal, maka sinyal akan mengalami propagasi *multipath*, yang menyebabkan lebih banyak jumlah sinyal tiruan daripada sinyal yang ditransmisikan. Beberapa frekuensi bahkan bisa dilemahkan karena refleksi, difraksi dan efek lainnya seperti sering disebut frekuensi selektif *fading*.

Sinyal asli dan tiruan akan diterima di antena penerima secara tersebar. Dalam kondisi dimana pemancar dan penerima berada dalam frekuensi radio, maka sinyal dapat meningkat atau menurun tergantung pada gerakan relatif. *Rayleigh fading* berlaku ketika tidak ada propagasi yang dominan pada saat pemancar dan penerima dalam keadaan LOS. Teknik seperti *multiple access*, *error correction*, *adaptive modulation*, dan *diversity* digunakan untuk meningkatkan kinerja dan keandalan sistem komunikasi *wireless* di lingkungan yang bervariasi dan tidak dapat diprediksi. Multipath merupakan fenomena yang terjadi pada saluran sistem bergerak ketika sinyal yang dikirimkan sampai ke penerima melalui jalur yang berbeda karena adanya refleksi, difraksi dan hamburan yang mengakibatkan fading [24].

Berikut ini adalah persamaan matematis dari analisis sinyal multipath :

$$e_r(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(2\pi f_0 t + \phi_k) \quad (2.7)$$

Keterangan:

$f_0$  : Frekuensi carrier.

$N$  : Jumlah lintasan multipath.

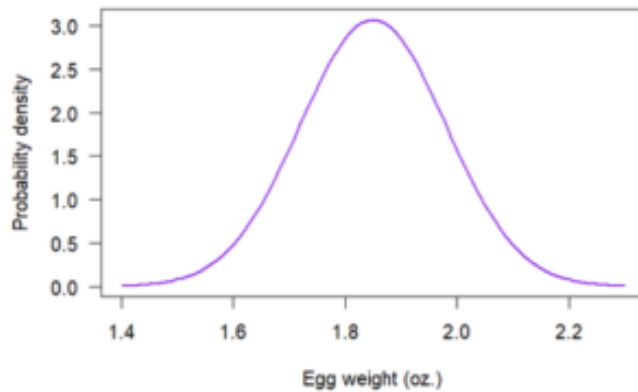
$a_k, \phi_k$  : Amplitudo dan fasa dari komponen multipath ke  $k$ .

### 2.2.8.1 Kanal Rician Fading

Model *Rician Fading* adalah model statistik lain yang menganggap bahwa sinyal memiliki dua komponen: komponen LOS dominan dan komponen acak. Komponen ini ialah sinyal yang mencapai penerima secara langsung dari



pemancar tanpa pantulan atau hamburan signifikan. Komponen LOS adalah jalur langsung dari pemancar ke penerima, yang memiliki amplitudo dan fasa konstan. Komponen acak mirip dengan model *Rayleigh Fading*, yang mewakili refleksi *multipath* dan hamburan sinyal.



**Gambar 2.8 Probability Density Function of Rician Distribution [25].**

Kekuatan sinyal dalam model *Rician Fading* dijelaskan oleh distribusi *Rician*, yang memiliki dua parameter penting: parameter  $K$  (*Rician K-factor*) dan parameter  $\sigma$ . Parameter  $K$  menggambarkan rasio antara kekuatan komponen LOS dengan komponen acak. Semakin besar nilai  $K$ , semakin dominan komponen LOS. Parameter  $\sigma$  mengukur kekuatan komponen acak. Model *Rician Fading* sesuai untuk lingkungan dimana terdapat komponen LOS yang jelas, seperti pedesaan atau area terbuka. Pemahaman tentang model *Rician Fading* penting dalam desain dan evaluasi sistem komunikasi nirkabel.

Adapun persamaan matematis dari Rician Fading ini yaitu:

$$f_{Ric}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + K^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Kr}{\sigma^2}\right), r \geq 0, K \geq 0 \quad (2.8)$$

Keterangan:

$\sigma$  : Nilai rms dari sinyal sebelum deteksi envelope.

$\sigma^2$  : Daya rata – rata waktu deteksi envelope.

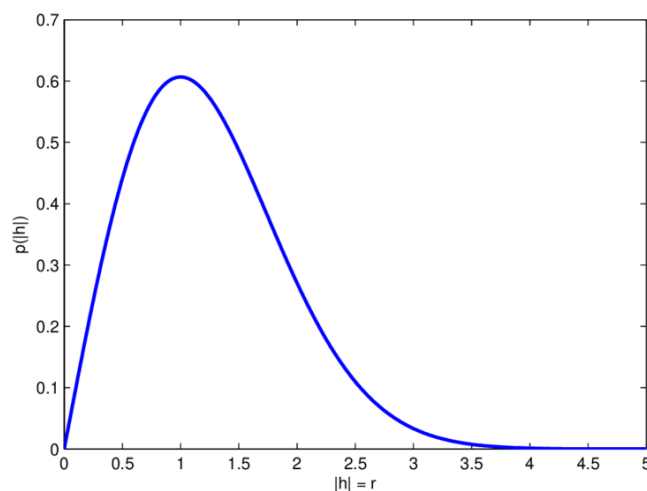
$I_0$  : Fungsi bessel termodifikasi bentuk pertama orde nol.

$K$  : Parameter  $K$  ( $K$  Factor)

Pada gambar 2.8 merupakan hasil grafik simulasi dari rumus *probability density function* pada kanal *Rician Fading*. Dengan memahami karakteristik dan parameter dari model *Rician Fading*, perancang sistem komunikasi dapat membuat keputusan yang lebih baik dalam merancang sistem yang dapat berkinerja dengan baik dalam kondisi saluran komunikasi yang sesuai dengan model ini [25].

### 2.2.8.2 Kanal Rayleigh Fading

Fenomena *Fading* menyebabkan fluktuasi daya sinyal yang diterima oleh penerima, yang bisa berupa penurunan daya (*Fading*) atau peningkatan daya (*enhancement*) dalam rentang waktu yang singkat. *Fading* menyebabkan fluktuasi daya sinyal yang diterima, dan dalam kondisi *fading* yang ekstrem, sinyal bisa menjadi terlalu lemah atau terlalu terdistorsi sehingga sulit untuk dilakukan proses demodulasi dan pemrosesan sinyal lebih lanjut. Oleh karena itu, dalam perancangan sistem komunikasi seluler, teknik mitigasi fading seperti penggunaan *diversity*, *equalization*, dan *coding* sering digunakan untuk mengatasi dampak negatif dari *fading* dan meningkatkan kualitas komunikasi [25].



**Gambar 2.9 Probability Density Function of The Rayleigh Distribution [25].**

Adapun persamaan matematis dari Rayleigh Fading ini yaitu:

$$fRay(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), r \geq 0 \quad (2.9)$$

Keterangan:

$\sigma$  : Nilai rms dari sinyal sebelum deteksi envelope.

$\sigma^2$  : Daya rata – rata waktu deteksi envelope.

Gambar 2.9 merupakan gambar grafik simulasi dari rumus *probability distribution function* kanal *Rayleigh Fading*. Pada sistem komunikasi wireless terdapat gangguan khusus berupa multipath dari sinyal yang di pancarkan *Multipath* merupakan jalur propagasi yang berbeda-beda, yang dilalui sinyal antara pengirim dan penerima, yang disebabkan karena pantulan oleh halangan-halangan dan benda-benda yang ada disepanjang jalur propagasi. Perbedaan waktu tiba pada penerima tersebut menyebabkan fenomena fluktuasi amplitudo dan fasa sinyal yang diterima, dan menimbulkan fenomena mendasar yang disebut fading. Fluktuasi amplitudo sinyal yang terjadi adalah acak dan tidak dapat ditentukan sebelumnya, besar dan kapan terjadinya. Namun, *fading* dapat diperkirakan secara statistik berupa nilai secara acak dengan distribusi tertentu. Salah satu distribusi tersebut adalah distribusi *Rayleigh*. Distribusi *Rayleigh* merupakan salah satu distribusi yang dapat menjadi model untuk mewakili *fading*, sehingga *fading* yang memiliki distribusi *Rayleigh* ini disebut *Rayleigh fading* [21].

## 2.2.9 Parameter Unjuk Kerja

### 2.2.9.1 Bit error rate (BER)

*Bit error rate* (BER) ialah rasio dengan jumlah bit gagal yang diterima dengan jumlah total bit yang dikirimkan selama suatu periode waktu tertentu. BER adalah parameter penting dalam sistem komunikasi digital karena mencerminkan seberapa baik performa sistem dalam mengirim dan menerima data tanpa kesalahan. Pengukuran BER biasanya dilakukan dengan membandingkan

bit yang dikirimkan dengan bit yang diterima pada penerima. Bit yang salah diidentifikasi sebagai hasil dari perbandingan ini, dan kemudian BER dihitung berdasarkan nilai bit yang salah dibandingkan dengan nilai total bit yang dikirimkan [26].

Dalam bentuk persamaan, BER dapat dihitung sebagai berikut :

$$BER = \frac{\text{Jumlah bit salah}}{\text{Jumlah bit kirim}} \quad (2.10)$$

Performa sistem komunikasi dapat dikatakan baik, apabila *bit* yang *error* saat pengiriman semakin sedikit dengan kata lain BER yang dihasilkan berjumlah kecil. Berdasarkan penjabaran tentang pesat gelat bit dengan simbol yang tersusun dari sejumlah bit, maka dapat dilakukan pendekatan mengenai hubungan antar keduanya seperti pada persamaan dibawah ini [27] :

$$\frac{1}{k} \leq \frac{PB}{PS} \leq \frac{2^{k-1}}{2^{k-1}} = \frac{M/2}{M/1} \quad (2.11)$$

Dimana PB ialah probabilitas pesat galat bit, PS merupakan probabilitas galat simbol,  $M=2K$  ialah level modulasi di sistem M-ary dan k adalah orde modulasi. Jadi, sistem 16-QAM yang dipakai pada simulasi ini mempunyai  $M=16$  dan  $k=4$  [27].

### 2.2.9.2 Power Spectral Density

*Power Spectral Density* (PSD) adalah ukuran konten daya sinyal versus frekuensi. PSD biasanya digunakan untuk mengkarakterisasi sinyal acak *broadband*. Amplitudo PSD dinormalisasi oleh resolusi spektral yang digunakan untuk mendigitalkan sinyal.

Untuk data getaran, PSD memiliki satuan amplitudo  $g^2/Hz$ . Meskipun unit ini mungkin tampak tidak intuitif pada awalnya, unit ini membantu memastikan bahwa data acak dapat dihiperkasikan dan dibandingkan secara independen dari

resolusi spektral yang digunakan untuk mengukur data. Artikel ini menjelaskan bagaimana hal ini dilakukan [28].

Daya dari suatu sinyal diukur sebagai energi yang dihasilkan oleh sinyal tersebut per satuan waktu. Jika sinyal memiliki daya yang terbatas, artinya rata-rata energi yang dihasilkan oleh sinyal tersebut dalam rentang waktu tertentu tidak melebihi batas tertentu. Contoh sinyal daya adalah sinyal yang hanya aktif dalam durasi tertentu dan memiliki periode mati di antara aktivitasnya. Sinyal daya sering digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti komunikasi nirkabel pada sistem burst atau dalam sistem *time-division multiple access* (TDMA), di mana setiap pengguna hanya aktif dalam slot waktu tertentu dan memiliki periode diam di antara slot waktu aktifnya. Sinyal daya ini memiliki kekuatan yang terbatas karena hanya aktif dalam beberapa interval waktu tertentu, tetapi rata-rata dayanya tetap terbatas karena daya rata-rata dihitung selama seluruh periode aktif dan non-aktifnya. Oleh karena itu, pengelolaan daya yang efisien pada sinyal daya sangat penting untuk memaksimalkan penggunaan daya secara efektif dalam sistem komunikasi atau pengolahan sinyal lainnya. Rata - rata waktu dari daya disebut rata - rata daya dan beberapa sinyal disebut sinyal daya. Rata - rata waktu daya dari sinyal diberikan :

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \quad (2.12)$$

Keterangan :

P = Daya kuadrat rata-rata sinyal periodik f(t).

T = Periode sinyal periodik f(t).

$[f(t)]^2$  = Kuadrat dari sinyal f(t).

Untuk persamaan 2.12 dalam konteks ini tampaknya merujuk pada persamaan yang menggambarkan daya kuadrat rata-rata dari sinyal periodik. Misalnya, jika f(t) adalah sinyal periodik. Hal tersebut dapat dilihat pada persamaan dibawah ini [22]:

$$P = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} S f(\omega) d\omega \quad (2.13)$$

Keterangan:

P : Daya kuadrat rata-rata sinyal periodik f(t).

Sf(ω) : kerapatan spektrum daya.