

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

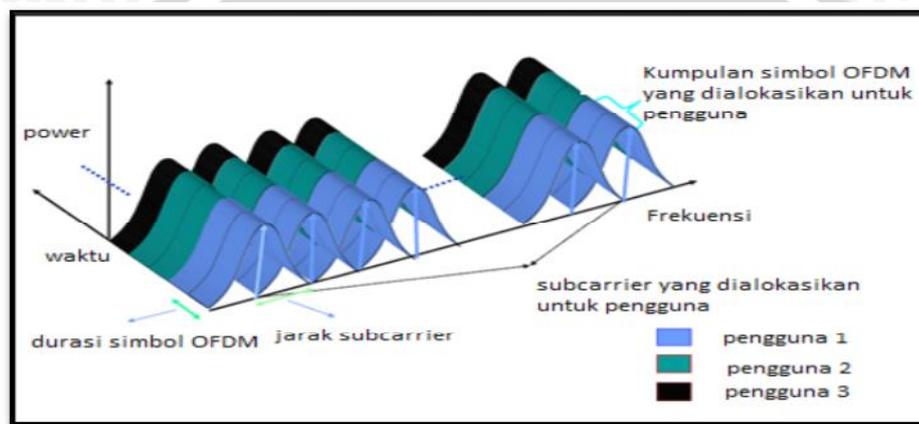
2.1 *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM)

Teknik multipleksing banyak digunakan untuk mengefisienkan prosepentransmisi sinyal atau data. Multipleksing dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis berdasarkan parameter yang dimultipleks, salah satunya adalah *Frequency Division Multiplexing* (FDM). Jika frekuensi-frekuensi yang digunakan saling tegak lurus maka disebut *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM).

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) adalah sebuah teknik transmisi yang menggunakan beberapa buah frekuensi (*multicarrier*) yang saling tegak lurus. Masing-masing *subcarrier* tersebut dimodulasikan dengan teknik modulasi konvensional pada rasio simbol yang rendah. Teknik ini telah dipakai sebagai metode yang efisien untuk melawan efek *multipath* yang memiliki data *rate* yang tinggi. OFDM membagi data serial berkecepatan tinggi dengan membagi *carrier* menjadi beberapa *subcarrier* yang bersifat tegak lurus sehingga diperoleh sinyal paralel dengan data *rate* yang rendah. Pembagian data *rate* mengubah kondisi kanal dari *frequency selective fading* menjadi *flat fading*. Selain itu *orthogonalitas subcarrier* dapat mengurangi *Inter Carrier Interference* (ICI) dan *Inter Symbol Interference* (ISI). OFDM dapat dipandang sebagai suatu teknik modulasi maupun teknik *multiplexing*. Alasan pemikiran OFDM sebagai suatu teknik transmisi sinyal adalah untuk meningkatkan ketahanan sinyal terhadap *frequency selective fading* dan *interferensi narrowband*.

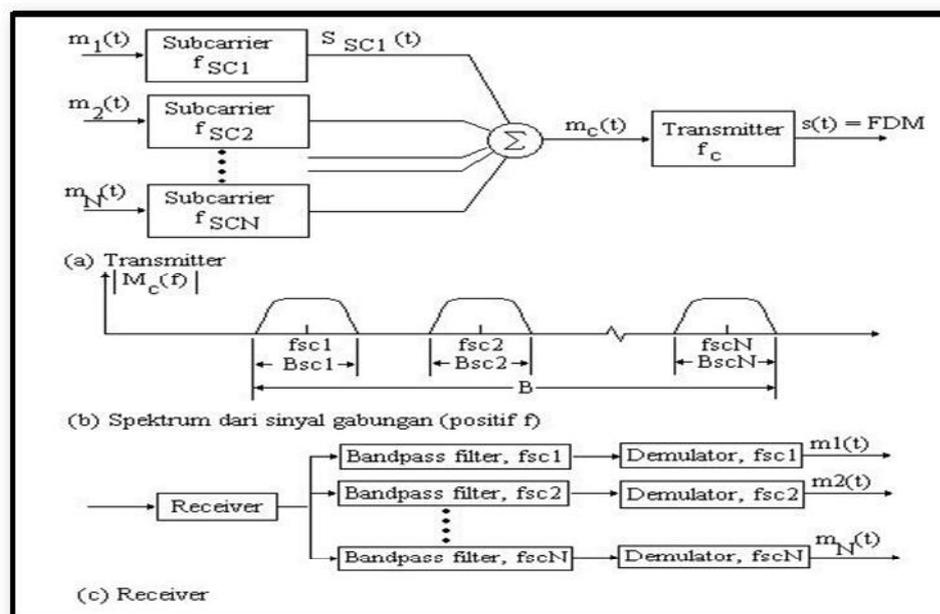
Teknologi OFDM sebenarnya sudah dikembangkan sejak 1966. OFDM merupakan bentuk khusus dari sebuah *multicarrier modulation* (MCM). Berbeda dengan *singlecarrier modulation* (SCM), dalam mengirimkan data OFDM membagi suatu aliran data yang akan dikirimkan menjadi beberapa *subcarrier* dengan kecepatan transmisi data yang rendah, sehingga daya transmisi yang dibutuhkan kecil. OFDM menggunakan prinsip yang sama seperti *Frequency*

Division Multiplexing (FDM) yaitu mengirimkan banyak pesan pada suatu kanal pentransmisi. Pada FDM yang memiliki kelemahan dengan harus menghindari terjadinya tumpang tindih frekuensi yang berbeda dari masing-masing *subcarrier* atau sering disebut dengan *Inter-Carrier Interference* (ICI) dan kelemahan lain adalah *Intersymbol Interference* (ISI). Berbeda dengan FDM, OFDM dapat mengirimkan pesan tanpa terjadinya *inter-carrier interference* (ICI) dan *intersymbol interference* (ISI) dengan cara menambahkan *cyclic prefix*.



Gambar 2.1 Sinyal OFDM dilihat dari domain frekuensi dan waktu

(Sumber :<http://engr.sjsu.edu>)



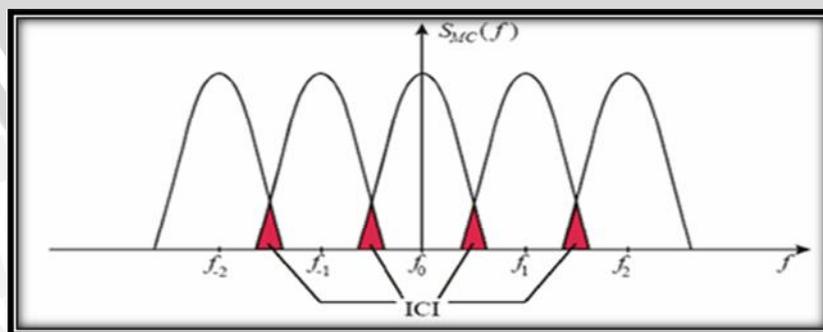
Gambar 2.2 Frequency Division Multiplexing

(Sumber :www.engineer.tamuk.edu)

Frequency Division Multiplexing (FDM) digunakan ketika *bandwidth* dari medium melebihi *bandwidth* sinyal yang diperlukan untuk transmisi. Tiap sinyal dimodulasikan ke dalam frekuensi *carrier* yang berbeda dan frekuensi *carrier* tersebut terpisah dimana *bandwidth* dari sinyal-sinyal tersebut tidak *overlap*.

Gambar 2.2 memperlihatkan sistem FDM secara umum. Sejumlah sinyal digital atau analog [$m_i(t)$, $i = 1, N$] di-*multiply* ke medium transmisi yang sama. Tiap sinyal $m_i(t)$ dimodulasi dalam *carrier* f_{sci} ; karena digunakan multiple *carrier* maka masing-masing dinyatakan sebagai *subcarrier*. Sinyal termodulasi dijumlah untuk menghasilkan sinyal gabungan $m_c(t)$. Sinyal gabungan tersebut mempunyai total *bandwidth* B , dimana *bandwidth* medium lebih besar dari *bandwidth* sinyal. Sinyal analog ini ditransmisikan melalui medium yang sesuai. Pada akhir penerimaan, sinyal gabungan tersebut lewat melalui N *bandpass filter*, dimana tiap *filter* berpusat pada f_{sci} dan mempunyai *bandwidth* B_{sci} , untuk $1 < i < N$. Sinyal diuraikan menjadi bagian-bagian komponennya. Tiap komponen kemudian dimodulasi untuk membentuk sinyal asalnya. Kelemahan sistem ini adalah adanya kebutuhan untuk memfilter *bandpass* yang relatif mahal dan rumit untuk dibangun (penggunaan *filter* tersebut biasanya digunakan dalam *transmitter* dan *receiver*)

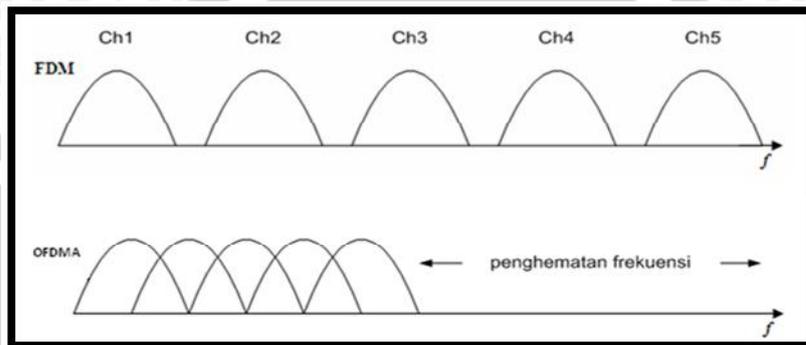
OFDM memiliki prinsip kerja yaitu mengirimkan banyak pesan pada satu kanal pentransmisi. OFDM juga dapat mengirimkan pesan tanpa terjadi *inter-carrier interference* (ICI) dan *inter-symbol interference* (ISI). Hal ini dikarenakan adanya proses penambahan *cyclic prefix* (CP) pada simbol OFDM. Terjadinya ICI misalnya pada teknik *Frequency Division Multiplexing* (FDM) ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Srikanth, 2007)



Gambar 2.3 *Inter Carrier Interference* (ICI).

(Sumber : <http://engr.sjsu.edu>)

OFDM menggunakan sinyal *orthogonal*, dimana *null sideband* dari salah satu *sub-carrier* bertumpukan dengan *main lobe frequency* dari *sub-carrier* yang selanjutnya sehingga *overlapping* dari frekuensi *carrier* tidak mempengaruhi sinyal. Dengan demikian akan menghilangkan adanya *band guard*, sehingga penggunaan *bandwidth* lebih efisien. Gambar 2.4 menunjukkan bahwa teknologi OFDM mampu menekan penggunaan *bandwidth*.



Gambar 2.4 Efisiensi penggunaan *bandwidth* pada OFDM

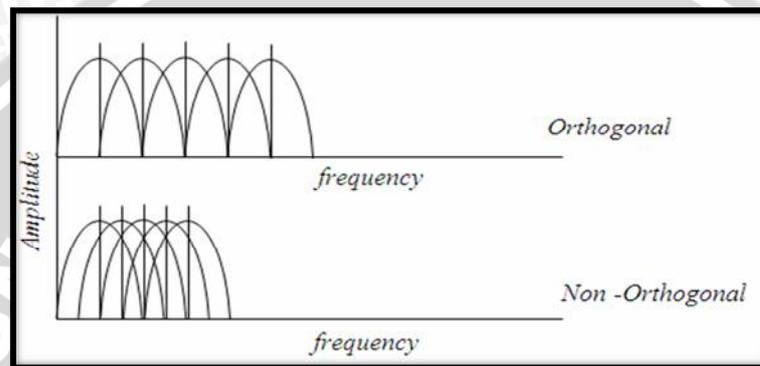
(Sumber :Ramjee Prasaad, 2004)

Prinsip dasar *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) adalah membagi laju data kecepatan tinggi menjadi beberapa laju data kecepatan rendah yang ditransmisikan secara simultan dengan menggunakan beberapa *subcarrier* yang saling tegak lurus. Laju data yang rendah pada masing-masing *subcarrier* menyebabkan periode simbol lebih panjang dan *bandwidth subcarrier* akan lebih sempit. Dengan *subcarrier* yang saling *orthogonal* memungkinkan penggunaan spektrum antar *subcarrier* yang saling *overlap* tanpa menimbulkan efek Intercarrier Interference (ICI). OFDM merupakan kasus khusus dari FDM yang spektrumnya saling tumpang tindih, namun penerima tidak saling mengganggu karena frekuensinya saling *orthogonal* sehingga menghemat frekuensi. (Ramjee Prasaad, 2004)

2.1.1 Definisi *Orthogonal*

Teknologi OFDM menggunakan sinyal *orthogonal*, dimana awal spektrum frekuensi berada tepat di spectrum sebelumnya, sehingga *overlapping* dari frekuensi *carrier* tidak akan mempengaruhi sinyal. Dengan demikian akan

menghilang adanya *guard band*, sehingga penggunaan *bandwidth* lebih efisien. Sinyal dikatakan *orthogonal* jika sinyal-sinyal tersebut saling bebas satu sama lain (*mutually independent*). Orthogonalitas merupakan suatu sifat yang memungkinkan pentransmisiian sinyal informasi *multiple* dengan sempurna melalui kanal tanpa terjadinya interferensi. Kehilangan orthogonalitas menyebabkan pengkaburan (*blurring*) diantara sinyal-sinyal informasi dan penurunan performansi sistem komunikasi.



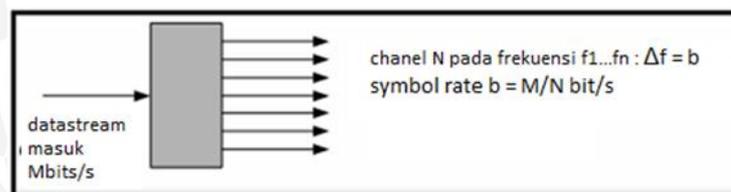
Gambar 2.5 Representasi orthogonalitas antar *subcarrier*.

(Sumber : <http://www.ee.ccu.edu.tw>)

Setiap *subcarrier* dalam suatu sinyal OFDM dijaga sedekat mungkin secara teoritis agar diperoleh orthogonalitas pada setiap *subcarrier*. OFDM mencapai orthogonalitas di dalam domain frekuensi dengan mengalokasikan setiap sinyal informasi yang terpisah ke dalam *subcarrier* yang berbeda.

2.1.2 Pembagian Aliran Data pada OFDM

Prinsip dasar dari sistem OFDM ini adalah membagi sebuah M laju data yang tinggi (*single high-rate bit stream*) menjadi N laju data rendah. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2.6 Pembagian aliran data

(Sumber : <http://www.cogitamus.it>)

Pada sistem OFDM, laju transmisi total yang tersedia dibagi kedalam beberapa *subcarrier* agar dapat mentransmiskikan data dengan laju data rendah. Laju transmisi untuk masing-masing *subcarrier* dari laju transmisi total yang tersedia dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Tufvesson, 1998) :

$$R_{sub} = \frac{R_{tot}}{N} \quad (2-1)$$

dengan :

R_{sub} = laju transmisi masing-masing *subcarrier* (bps)

R_{tot} = laju tranmsi total (bps)

N = jumlah *subcarrier*

Dan durasi simbol untuk suatu modulasi pada masing-masing *subcarrier* dinyatakan dengan persamaan berikut (Tufvesson, 1998) :

$$T_{sub} = \frac{\log_2 \cdot M}{R_{sub}} = \frac{N \cdot \log_2 \cdot M}{R_{tot}} \quad (2-2)$$

dengan :

T_{sub} = durasi simbol masing-masing *subcarrier* (s)

R_{sub} = laju transmisi masing-masing *subcarrier* (bps)

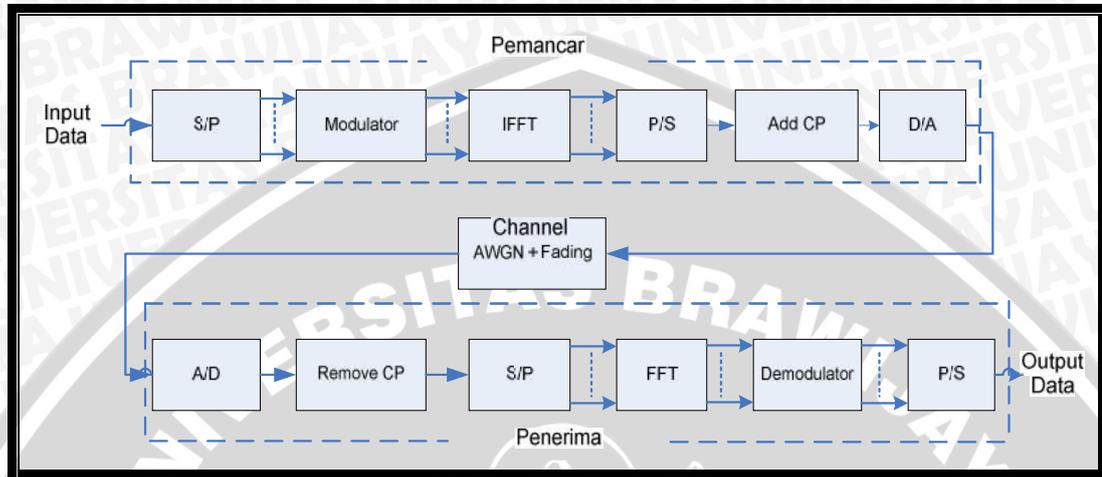
R_{tot} = laju tranmsi total (bps)

N = jumlah *subcarrier*

M = jumlah kemungkinan sinyal , untuk modulasi 64-QAM nilai $M = 2^6 = 64$

2.1.3 Blok Diagram OFDM

Gambar 2.7 merupakan blok diagram dasar dari suatu pemancar dan penerima OFDM.



Gambar 2.7 Blok diagram pemancar dan penerima sistem OFDMA

(Sumber : Kwang-Cheng Chen, 2007)

2.1.4 Konversi Serial ke Paralel (S/P)

Data yang akan dipancarkan umumnya dalam bentuk aliran data serial. Pada OFDM, proses konversi serial ke paralel dibutuhkan untuk mengubah masukan aliran bit data serial ke dalam data-data yang akan dipancarkan dalam setiap simbol OFDM. Data yang dialokasikan untuk setiap simbol tergantung pada teknik modulasi yang digunakan dan jumlah *subcarrier*. Hasil dari proses konversi serial ke paralel merupakan proses pengisian *payload* data untuk setiap *subcarrier*. Pada penerima terjadi proses yang berkebalikan, dimana data dari *subcarrier* (data paralel) diubah kembali ke dalam aliran data serial aslinya. Proses yang terjadi pada penerima ini disebut juga dengan proses konversi paralel ke serial.

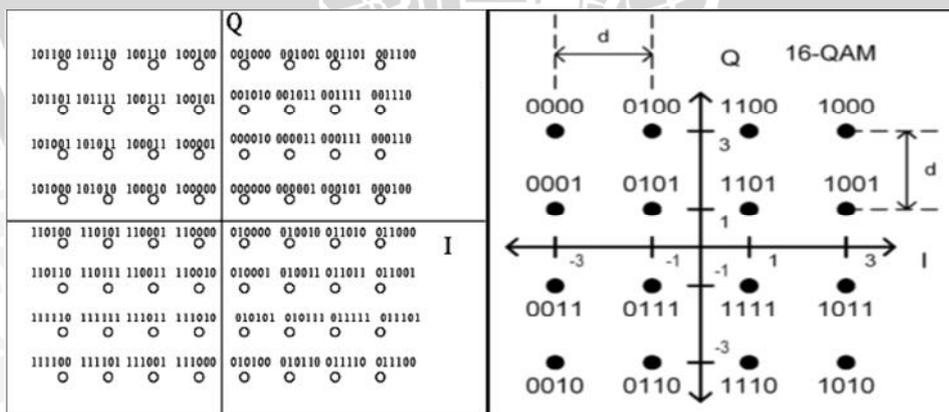
2.1.5 Modulator dan Demodulator *Baseband*

Modulator bertugas mengkodekan informasi sebuah pesan menjadi simbol yang cocok untuk pengiriman. Karena sumber informasinya berupa data digital,

maka digunakan modulator *baseband* digital yang memodulasikan M -bit menjadi satu simbol yang disebut juga dengan modulasi M -ary. Contoh dari modulasi ini adalah *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) dan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

a) **Quadrature Amplitude Modulation (QAM)**

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) merupakan teknik yang mengkombinasikan antara teknik *Amplitude Shift Keying* (ASK) dan teknik *Phase Shift Keying* (PSK). Berarti pada QAM, amplitudo dan *phase* sinyal *carrier* berubah terhadap perubahan amplitudo sinyal informasi. Sehingga, sinyal direpresentasikan dalam besaran amplitudo dan pergeseran *phase*. Dikatakan *quadrature* karena jumlah minimum bit pada tiap simbolnya adalah 2 bit. Sehingga pada QAM dikenal teknik 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, dan 256-QAM tergantung banyaknya jumlah bit dalam satu simbol. Untuk 16-QAM terdapat 4 bit setiap simbolnya, sehingga disebut juga dengan *quadbit*. Sedangkan untuk 64-QAM terdapat 6 bit pada tiap simbolnya, sehingga disebut juga dengan *hexabit*. Teknik 64-QAM merupakan teknik yang paling cepat mentransmisikan data pada teknologi LTE, karena jumlah bit per simbolnya adalah yang tertinggi dibandingkan dengan teknik modulasi digital yang lain, yaitu 6 bit.



(a)

(b)

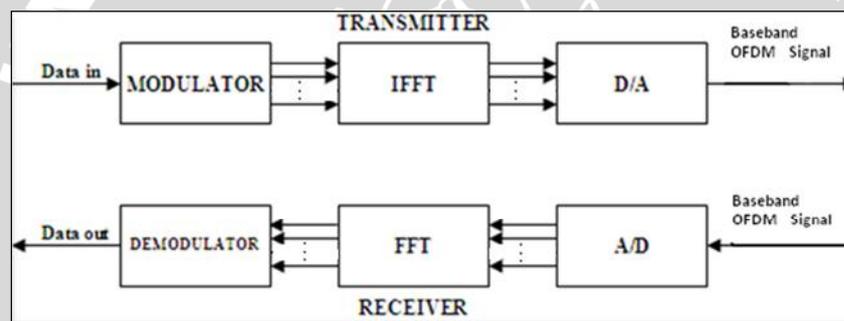
Gambar 2.8(a) 64 QAM constellation (b) 16 QAM constellation

(Sumber : Behrouz A. Forouzan, 2000)

Gambar 2.9 menjelaskan hubungan antara amplitudo dan *phase* dengan bit pada 16-QAM. Gambar 2.8 juga disebut dengan *constellation* yang menunjukkan hubungan yang sama dengan mengilustrasikan amplitudo dan *phase*-nya. (Behrouz A. Forouzan, 2000)

2.1.6 Transformasi *Fast Fourier* pada Sistem OFDM

Fast Fourier Transform (FFT) mentransformasikan peredaran sinyal dalam *domain* waktu ke dalam *domain* frekuensi. Sedangkan *Invers Fast Fourier Transform* (IFFT) melakukan proses berkebalikan dengan proses FFT, yaitu mentransformasikan sinyal dalam *domain* frekuensi menjadi sinyal dalam *domain* waktu. Gambar 2.9 menunjukkan suatu konfigurasi dari implementasi FFT dan IFFT pada sistem OFDM.



Gambar 2.9 Dasar implementasi FFT dan IFFT pada *transceiver* OFDM.

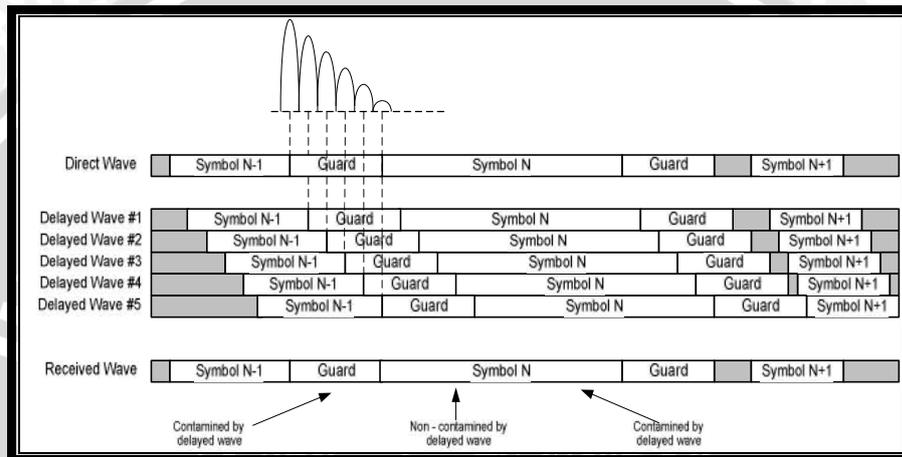
(Sumber :Eric Lawrey, 1997)

Pada pemancar, konverter *digital-to-analog* (D/A) mengkonversikan sinyal digital OFDM ke dalam format analog. Sedangkan pada sisi penerima, konverter *analog-to-digital* (A/D) mengkonversikan sinyal analog OFDM ke dalam format digital.

2.1.7 *Cyclic Prefix*

Cyclic Prefix merupakan cara untuk mengatasi masalah pada *delay spread* dengan melakukan penyisipan *guard interval* dari kopi simbol OFDM pada bagian akhir secara siklis. Salah satu masalah yang terpenting dalam komunikasi nirkabel adalah *delay spread*. Pada OFDM, *delay spread* dapat diatasi dengan menambah panjang simbol OFDM sehingga melebihi panjang *delay spread*. Dengan bertambahnya panjang simbol OFDM maka karakteristik kanal dapat

berubah sehingga mengakibatkan orthogonalitas antar *sub-carrier* dapat hilang dan ICI meningkat. Disisi lain, ISI juga menjadi masalah dengan meningkatnya *bandwidth carrier* dan laju simbol *sub-carrier*. Untuk mencegah terjadinya ISI maka pada tiap simbol OFDM disisipkan *guard interval* secara periodik. Bila panjang *guard interval* melebihi *multipath delay*, maka ISI dapat dihilangkan. Efek dari penyisipan *guard interval* dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.10



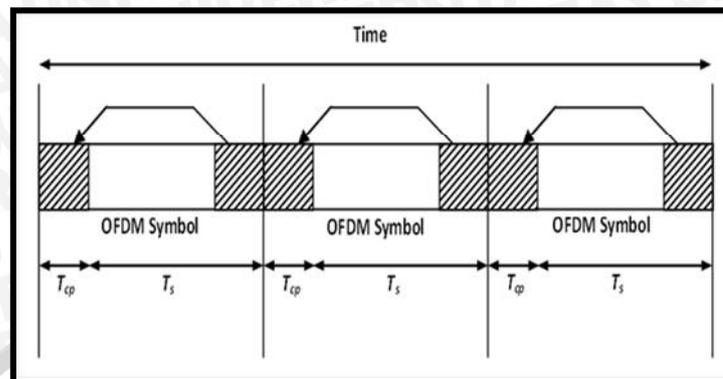
Gambar 2.10 Simbol OFDM dengan *Guard Interval*

(Sumber: Amitabh Kumar, 2008)

Akan tetapi penggunaan *guard interval* tidak dapat mencegah terjadinya *Interchannel Interference (ICI)* sehingga orthogonalitas antar *sub-carrier* tidak mampu dijaga. Untuk mengatasi masalah ini, maka harus dilakukan penambahan ekstensi siklis dengan cara mencuplik beberapa *frame* OFDM pada bagian akhir dan meletakkannya dalam *guard interval* atau disebut dengan *cyclic prefix*. Dengan penambahan *cyclic prefix* maka masalah interferensi (ISI dan ICI) yang terjadi pada komunikasi nirkabel dapat diatasi.

Proses penambahan *cyclic prefix* (T_{cp}) dilakukan pada pemancar terhadap simbol OFDM. Pada penerima, *cyclic prefix* (T_{cp}) akan dipisahkan dari simbol OFDM. Akibat penambahan *cyclic prefix* ini maka total dari durasi simbol OFDM untuk masing-masing *subcarrier* adalah durasi simbol OFDM tanpa *cyclic prefix* ditambah durasi *cyclic prefix*, sehingga total durasi simbol OFDM adalah $T_s = T_{sub}$

- T_{cp} . Representasi waktu dari total satu simbol OFDM dapat digambarkan pada Gambar 2.11 berikut.



Gambar 2.11 Representasi waktu dari OFDM.

(Sumber :Zhang Di, 2004)

Bandwidth antar *subcarrier* setelah penambahan *cyclic prefix* sama dengan *invers* dari durasi simbol tanpa *cyclic prefix*. Secara matematis *bandwidth subcarrier* dapat dituliskan dengan (Hara, 2003) :

$$\Delta f = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_{sub} - T_{cp}} \quad (2-3)$$

dan *bandwidth* sistem dari sejumlah *subcarrier* yang digunakan adalah :

$$\begin{aligned} B_{sistem} &= \frac{2}{T_{sub}} + \frac{N-1}{(1-\alpha_{cp}) \cdot T_{sub}} \\ B_{sistem} &= \frac{2(1-\alpha_{cp}) + N-1}{(1-\alpha_{cp}) \cdot T_{sub}} \\ B_{sistem} &= \frac{2(1-\alpha_{cp}) + N-1}{(1-\alpha_{cp}) \cdot \frac{N \cdot \log_2 M}{R_{tot}}} \\ B_{sistem} &= \frac{R_{tot} [2(1-\alpha_{cp}) + N-1]}{(1-\alpha_{cp}) \cdot N \cdot \log_2 M} \end{aligned} \quad (2-4)$$

dengan :

B_{sistem} = bandwidth sistem (Hz)

T_s = durasi simbol OFDM (s)

T_{sub} = durasi simbol masing-masing *subcarrier* (s)

T_{cp} = durasi *cyclic prefix* (s)

R_{tot} = laju bit total yang tersedia (bps)

M = jumlah kemungkinan sinyal

N = jumlah *subcarrier*

α_{cp} = faktor *cyclic prefix*

2.2 Selektifitas Frekuensi

Selektifitas merupakan kemampuan penerima untuk membedakan antara sinyal yang diinginkan dan osilasi elektromagnetik yang tersebar dari berbagai macam faktor yang mengganggu penerimaan sinyal dan menolak sinyal-sinyal yang tidak diinginkan. Sinyal yang diinginkan dipilih berdasarkan beberapa karakteristik yang dimiliki, seperti selektifitas frekuensi, selektifitas amplitude, selektifitas fasa, dan selektifitas perbedaan waktu.

Selektifitas frekuensi adalah kemampuan penerima untuk membedakan sumber-sumber sinyal yang beroperasi pada frekuensi yang berbeda dan dalam rentang panjang gelombang tertentu. Sistem OFDM memiliki sensitifitas pada *error* frekuensi yang diakibatkan oleh perbedaan frekuensi yang diterima dengan *oscillator* lokal pada penerima. Perbedaan ini diakibatkan oleh adanya interferensi dimana sinyal pengganggu yang tidak diinginkan berada pada frekuensi yang berdekatan atau sama dengan akibat efek pergerakan dan pengaruh ICI antar *subcarrier*. (Huseyin Arslan dan Tefvik Yucek, 2010)

2.2.1 Interferensi

Interferensi terjadi karena tumpang tindih frekuensi dimana sinyal pengganggu yang tidak diinginkan berada pada frekuensi yang sama atau berdekatan. Interferensi dapat terjadi dalam keadaan jika *mobile station* berada dalam sel yang sama, melakukan proses panggilan di sel sebelahnya dan adanya *Base Station* dengan frekuensi yang sama. Interferensi pada skripsi ini terjadi

karena gangguan yang ditimbulkan oleh sel tetangga atau sel lainnya yang berada di dekat *user*.

Jenis Interferensi :

1. *Co-Channel Interference*.

Adalah : *Interferensi antar cell yang menggunakan kanal/frekuensi sama.*

2. *Adjacent-Channel Interference*.

Adalah : *Interferensi antar kanal yang berdekatan.*

3. *Intersystem Interference*.

Adalah : *Interferensi yang terjadi akibat sistem komunikasi radio lain yang menggunakan frekuensi sama dalam satu area yang sama.*

2.2.2 *Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)*

Signal to Interference plus Noise Ratio merupakan parameter daya yang mengalami interferensi dari sel lainnya dengan interferensi *co-channel*. *Signal Interference to Noise Ratio* dapat dijelaskan dengan persamaan sebagai berikut (ITT Telkom, 2008)

$$|SINR1|_{\text{watt}} = \frac{Prx1}{[Prx2+PN1]} \quad (2-5)$$

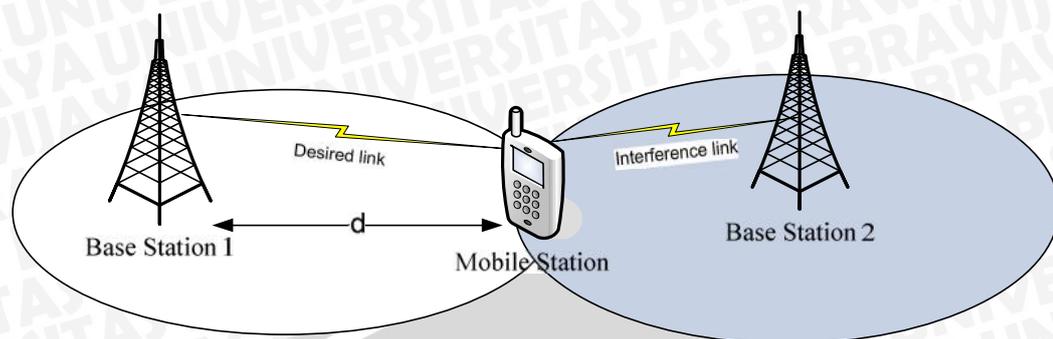
$$|SINR2|_{\text{watt}} = \frac{Prx2}{[Prx1+PN1]} \quad (2-6)$$

$$SINR_1\text{dB} = 10 \text{ Log }_{10} [SINR_1] \quad \text{dan} \quad (2-7)$$

$$SINR_2\text{dB} = 10 \text{ Log }_{10} [SINR_2] \quad (2-8)$$

Dengan,

- PRx1 adalah daya sinyal yang diterima oleh MS dari BS1,
- PRx2 adalah daya sinyal yang diterima oleh MS dari BS2,
- PN1 adalah daya *noise* yang diterima oleh MS ketika terhubung ke BS1
- PN2 adalah daya *noise* yang diterima oleh MS ketika terhubung ke BS2



Gambar 2.12 Ilustrasi *intercell*-interferensi pada user
(Sumber : Farooq Khan, 2009)

Pada gambar 2.12 menjelaskan aplikasi *mobile station* yang dipengaruhi adanya interferensi. *Mobile station* merupakan pengguna tepi sel dari Base Station 1. Base Station 1 mengirimkan sinyal yang diinginkan (*desired link*) kepada *Mobile Station*. Tetapi karena *Mobile Station* berada pada tepi sel dari Base Station 1 maka *Mobile Station* mudah mendapatkan gangguan dari Base Station 2. Base Station 2 mengirimkan sinyal pengganggu (*interference link*) kepada *Mobile Station*. Sinyal pengganggu ini dipengaruhi oleh penginterferensi f dimana f adalah perbandingan sel lainnya dengan sel itu sendiri yaitu Base Station 2 terhadap Base Station 1. SINR dalam sistem OFDM berpengaruh terhadap peningkatan nilai f . SINR adalah parameter daya yang terinterferensi dari sel lainnya. Secara umum, f lebih besar untuk pengguna di tepi sel yang mengalami gangguan tinggi dari sel lainnya dan pengguna sel pusat mengalami sedikit interferensi dari sel lainnya. Oleh karena itu, pengguna lebih dekat ke sel dengan nilai f rendah diharapkan dapat memberikan manfaat lebih dari pengguna di tepi sel pada OFDM. Kinerja pengguna di tepi sel umumnya didominasi oleh gangguan dari sel lainnya daripada gangguan *multi-path*. Oleh karena itu, OFDM diharapkan memberikan keuntungan untuk pengguna di tepi sel. (Farooq Khan, 2009)

2.3 Kanal Propagasi

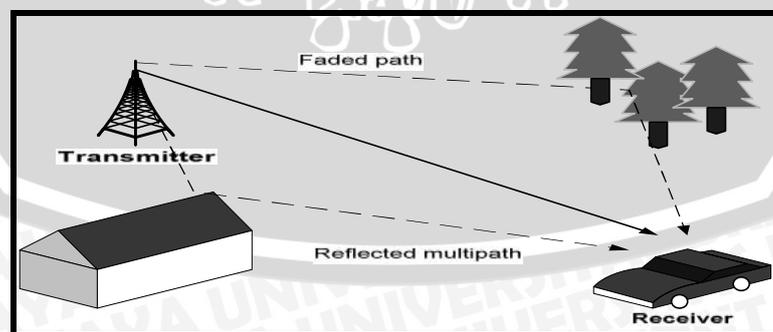
Kanal merupakan suatu media transmisi yang digunakan untuk mentransmisikan informasi dari pemancar ke penerima. Dalam sistem nirkabel, yang tentunya menggunakan medium *wireless*, terdapat dua macam gangguan yang dinilai memiliki efek signifikan terhadap sistem. Gangguan tersebut adalah (Gunawan Wibisono, 2008) :

1) *Noise* atau derau

Noise merupakan gelombang elektromagnetik yang terdapat di alam, dapat bersumber dari matahari, bumi, atmosfer, galaksi, busi kendaraan bermotor, dan lain-lain. Dalam sistem *wireless*, sinyal asli dapat bercampur dengan sinyal *noise*. Sehingga *magnitude* sinyal total per satuan waktu merupakan penjumlahan kedua sinyal ini.

2) *Fading*

Fading merupakan fluktuasi amplitudo sinyal secara cepat dalam periode waktu tertentu yang disebabkan oleh diterimanya dua atau lebih sinyal oleh *receiver* akibat banyaknya lintasan sinyal. Pada proses transmisi, sinyal yang sampai di penerima tidak hanya melewati satu jalur tetapi datang dari berbagai jalur (*multipath*). Sinyal-sinyal *multipath* tersebut akan mengalami pergeseran fasa dan *delay* yang selalu berubah. Pengaruh dari perbedaan panjang lintasan sinyal akan mengakibatkan pergeseran realtif fasa antara komponen fasa utama yang bersuperposisi dengan komponen fasa lintasan lain. Hal ini akan mengakibatkan penguatan atau pelemahan sinyal yang diterima. Akibat dari perlakuan demikian maka level sinyal terima di penerima akan mengalami fluktuasi. *Fading* yang terjadi akibat adanya *multipath* dinamakan *multipath fading*. Proses terjadinya *multipath fading* dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Proses terjadinya *multipath fading*.

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

2.3.1 Kanal AWGN pada Sistem OFDM

Kanal AWGN adalah kanal ideal yang hanya memiliki *noise* AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Kanal ideal berarti kanal ini tidak menyebabkan distorsi (perubahan bentuk sinyal) pada sinyal yang dikirim. Artinya kanal ideal memiliki *bandwidth* tidak terbatas dan respon frekuensinya tetap untuk segala frekuensi. Kanal AWGN dapat dijelaskan dalam Gambar 2.14.

Noise AWGN merupakan *noise* yang pasti terjadi dalam jaringan *wireless* manapun, memiliki sifat-sifat *additive*, *white*, dan *gaussian*. Sifat *additive* artinya *noise* ini dijumlahkan dengan sinyal, sifat *white* artinya *noise* tidak bergantung pada frekuensi operasi sistem dan memiliki rapat daya yang konstan, dan sifat *gaussian* artinya besarnya tegangan *noise* memiliki rapat peluang terdistribusi *gaussian*. (John G. Proakis, 2000)

Besarnya daya AWGN dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$N_o = k \cdot T \cdot B \quad (2-9)$$

dengan :

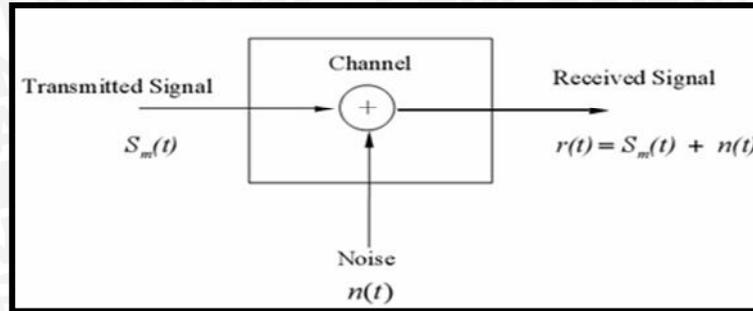
N_o = daya *noise* saluran transmisi (dBm)

k = konstanta Boltzman (1.38×10^{-23} J/K)

T = temperature operasi sistem ($^{\circ}$ K)

B = bandwidth (Hz)

Dari persamaan dapat dipahami bahwa keberadaan *noise* AWGN dalam jaringan telekomunikasi manapun akan selalu ada, selama terdapat *bandwidth* dan temperature perangkat telekomunikasi yang bekerja pada suhu di atas -273° K.

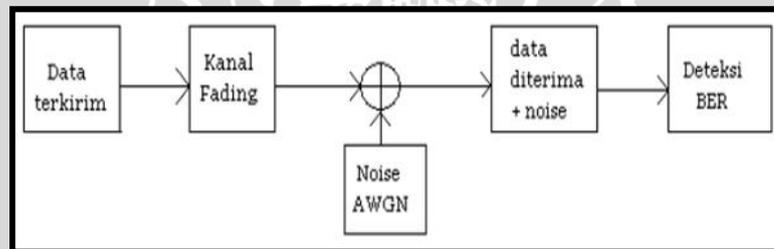


Gambar 2.14 Additive White Gaussian Noise (AWGN).

(Sumber :John G. Proakis, 2000)

2.3.2 Kanal Fading

Pengertian dari kanal *fading* yaitu kanal tidak ideal yang terdapat pada sistem komunikasi *wireless*, yang memiliki keterbatasan *bandwidth* dan menyebabkan distorsi pada sinyal yang dikirim. Kanal ini dibuat untuk memperkirakan akibat yang ditimbulkan oleh *multipathfading*. Distribusi yang sering digunakan untuk menjelaskan bentuk selubung sinyal pada kanal *multipath* yaitu distribusi *Reyleigh*. Kanal *fading* ditunjukkan dalam Gambar 2.15.



Gambar 2.15Kanal *fading*.

(Sumber : Muh. Arif Nugroho, 2008)

2.4 Model Propagasi

2.4.1 Propagasi *Outdoor* dan *Indoor*

Pada saat pentransmisian, gelombang radio merambat melalui media udara dan mengalami berbagai proses pemantulan, difraksi, refraksi dan *scattering*. Hal ini disebabkan karena gelombang radio melewati daerah yang memiliki kontur permukaan tidak rata. Kontur daerah yang akan dilewati gelombang radio akan sangat mempengaruhi perhitungan rugi-rugi propagasi. Area untuk propagasi

gelombang radio dibagi menjadi dua jenis, yaitu propagasi *outdoor* dan propagasi *indoor*.

2.4.1.1 Propagasi *Outdoor*

Cakupan area untuk propagasi *outdoor* sangat luas dan memiliki tingkat interferensi yang sangat tinggi. Hal ini disebabkan karena propagasi gelombang pada ruang terbuka akan melewati penghalang yang lebih banyak, seperti gedung, rumah, pepohonan, gunung, bukit dan sebagainya, serta terpengaruh oleh cuaca. Klasifikasi lingkungan suatu lintasan gelombang radio berdasarkan halangan dan tingkat kepadatan halangan dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

a. Daerah urban

Ciri-ciri daerah urban diantaranya yaitu:

- Memiliki gedung-gedung tinggi, sehingga kemungkinan terjadinya difraksi pada propagasi sinyal sangat kecil.
- Gedung-gedung yang terdapat di daerah tersebut berkerangka logam dan memiliki beton yang tebal, sehingga membatasi propagasi radio melalui gedung.
- Sinyal radio dalam perambatannya mengalami pantulan dengan redaman tertentu.
- Memiliki sangat sedikit pepohonan, sehingga redaman akibat pepohonan (foliage loss) dapat diabaikan.
- Banyak terdapat kendaraan yang bergerak, sehingga menyebabkan perubahan karakteristik kanal secara kontinyu.

b. Daerah sub – urban

Ciri-ciri daerah sub – urban antara lain yaitu:

- Memiliki tingkat halangan yang lebih rendah dibandingkan dengan daerah urban, sehingga propagasi sinyal radio relatif lebih baik dan rata-rata kuat sinyal tinggi.
- Kecepatan pergerakan kendaraan lebih tinggi dibanding daerah urban.

- Memiliki gedung-gedung yang relatif rendah, sehingga sinyal radio mengalami difraksi oleh puncak gedung.

c. Daerah rural

Ciri-ciri daerah rural antara lain yaitu:

- Jarang terdapat halangan, sehingga kuat sinyal yang diterima akan lebih besar dibanding daerah urban atau sub – urban.
- Memiliki ruas jalan yang lebar.
- Kecepatan pergerakan kendaraan sangat tinggi.

2.4.1.2 Propagasi *Indoor*

Propagasi dalam ruangan (*indoor*) memiliki mekanisme yang sama seperti pada propagasi *outdoor*, yaitu pantulan, difraksi, dan hamburan, tetapi kondisinya bervariasi. Yang membedakan model propagasi *indoor* dengan model propagasi komunikasi bergerak biasa yaitu cakupan daerahnya dan variasi lingkungan yang lebih besar seiring dengan makin kecilnya jarak antara *transmitter* dan *receiver*. Propagasi *indoor* sangat dipengaruhi oleh hal-hal spesifik pada bangunan, seperti konstruksi material, dan tipe bangunan. Model propagasi yang digunakan untuk menghitung rugi-rugi propagasi *indoor* antara lain yaitu:

a. Rugi-rugi propagasi dalam satu lantai

Faktor yang mempengaruhi rugi-rugi propagasi dalam satu lantai adalah partisi dari lantai tersebut, yang dibedakan atas *hard partition* (sekat permanen) dan *soft partition* (sekat yang dapat dipindah-pindah).

b. Rugi-rugi antar-lantai

Faktor yang mempengaruhi rugi-rugi propagasi antarlantai adalah dimensi, jenis material lantai dan keadaan sekeliling dari suatu gedung.

2.5 Performansi sistem

Untuk mengetahui performansi dari sistem, mulai dari saat di pengirimsampai dengan di penerima, dibutuhkan beberapa parameter yang akan digunakan dalam analisis. Beberapa parameter performansi yang akan dibahas dalam skripsi ini antara lain yaitu:

2.5.1 Kapasitas kanal

Pada OFDM, tidak ada interferensi *multi-path* karena adanya penggunaan *cyclic prefix*. Oleh karena itu, penyebab interferensi SINR dalam sistem OFDM adalah adanya interferensi dari sel yang lain dan adanya pengaruh *noise*. SINR dalam sistem OFDM ditunjukkan sebagai berikut:

$$\rho_{OFDM} = \frac{P}{f \cdot P + N_0} \quad (2-10)$$

$$C_{OFDM} = \log_2 \left(1 + \frac{P}{f \cdot P + N_0} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{\rho \cdot f + 1} \right) \quad (2-11)$$

Dalam hal ini perlu mempertimbangkan *overhead cyclic prefix* pada sistem OFDM. Oleh karena itu, kapasitas sistem OFDM untuk menghitung nilai *overhead CP* sebagai berikut:

$$C_{OFDM} = \left(1 - \frac{1}{T_s} \right) \cdot \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{\rho \cdot f + 1} \right) \quad (2-12)$$

T_s adalah durasi simbol OFDM dan Δ durasi *cyclic prefix*. Hal ini bahwa SINR dalam sistem OFDM berpengaruh terhadap peningkatan nilai f . Secara umum, f lebih besar untuk pengguna di tepi sel yang mengalami gangguan dari sel lainnya. Oleh karena itu, pengguna lebih dekat ke sel dengan nilai f rendah diharapkan dapat memberikan manfaat lebih dari pengguna di tepi sel pada OFDM. Kinerja pengguna di tepi sel umumnya didominasi oleh gangguan dari sel lainnya daripada gangguan *multi-path*. Oleh karena itu, OFDM diharapkan memberikan keuntungan untuk pengguna di tepi sel.

Kapasitas kanal adalah suatu kapasitas atau ukuran kemampuan kanal untuk dapat menerima apa yang akan dikirim. Batas kapasitas pada sistem OFDM dalam kanal *frequency selective* dapat dituliskan sebagai berikut (Farooq Khan, 2009) :

$$C_{OFDM} = \left(1 - \frac{1}{T_s} \right) \cdot \frac{1}{N_{sc}} \sum_{i=1}^{N_{sc}} \log_2 \left(1 + \frac{|H_c(i)|^2 P_{sc}}{f \times |H_{int}(i)|^2 \times P_{sc} + N_0} \right) \text{ (b/s/Hz)} \quad (2-13)$$

Sedangkan untuk daya noise dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$N_0 = 10 \cdot \log_2(k \cdot T) + 10 \cdot \log_{10}(B_{sistem}) + NF \quad (2-14)$$

Dengan,

N_o = daya *noise* saluran transmisi (dBm)

k = konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$)

T = suhu *absolute* (300° K)

NF = *noise figure* (dB)

B_{sistem} = *bandwidth* sistem (Hz)

Untuk mendapatkan rata-rata SNR per *subcarriernya* dengan $\rho_{sc} = P_{sc}/N_o$, dapat dituliskan dalam persamaan berikut

$$C_{OFDM} = \left(1 - \frac{1}{T_s}\right) \cdot \frac{1}{N_{sc}} \sum_{i=1}^{N_{sc}} \log_2 \left(1 + \frac{|H_c(i)|^2 \rho_{sc}}{f_x |H_{int}(i)|^2 x \rho_{sc} + 1}\right) \text{ (b/s/Hz)} \quad (2-15)$$

Dengan menghilangkan interferensi yang lain, yaitu mengasumsikan $f = 0$, maka didapatkan persamaan berikut ini

$$C_{OFDM} = \left(1 - \frac{1}{T_s}\right) \cdot E[\log_2(1 + |H_c(i)|^2 \rho_{sc}^2)] \text{ (b/s/Hz)} \quad (2-16)$$

Pada SNR rendah jika $|H_c(i)|^2 \rho_{sc}^2 \ll 1$ maka persamaan yang digunakan adalah

$$C_{OFDM} = \left(1 - \frac{1}{T_s}\right) \cdot E[|H_c(i)|^2 \rho_{sc}^2 \log_2 e] \text{ (b/s/Hz)} \quad (2-17)$$

Dalam persamaan $\log_2(1 + x) \approx x \log_2 e$ untuk x yang bernilai kecil

Sebagai $E[|H_c(i)|^2] = 1$, dapat dituliskan

$$C_{OFDM} = \left(1 - \frac{1}{T_s}\right) \cdot \rho_{sc} \log_2 e \text{ (b/s/Hz)} \quad (2-18)$$

Kapasitas pada SNR rendah merupakan fungsi linier dari SNR tersebut. Hal ini berbeda dengan SNR tinggi dimana kapasitas merupakan fungsi cekung dari SNR.

$$C_{OFDM} = \left(1 - \frac{1}{T_s}\right) \cdot E[\log_2(|H_c(i)|^2 \rho_{sc})] \text{ (b/s/Hz)} \quad (2-19)$$

$$C_{OFDM} = \left(1 - \frac{1}{T_s}\right) \cdot (\log_2(\rho_{sc}) + E[\log_2(|H_c(i)|^2)])(b/s/Hz) \quad (2-20)$$

Dimana $E[\log_2|H_c(i)|^2]$ menunjukkan hak dari *frequency selective* pada SNR tinggi. Untuk kanal *Rayleigh Fading*,

$$E[\log_2(|H_c(i)|^2)] = -0.83(b/s/Hz) \quad (2-21)$$

Sehingga *frequency selective interference* (FSI) adalah

$$C_{OFDM}^{FSI} = \left(1 - \frac{1}{T_s}\right) \cdot \frac{1}{N_{sc}} \sum_{i=1}^{N_{sc}} \log_2 \left(1 + \frac{|H_c(i)|^2 \rho_{sc}}{f x |H_{int}(i)|^2 x \rho_{sc} + 1}\right) (b/s/Hz) \quad (2-22)$$

Untuk kanal AWGN,

$$C_{OFDM}^{AWGN} = \left(1 - \frac{1}{T_s}\right) \log_2 \left(1 + \frac{1}{f x \frac{1}{\rho_{sc}}}\right) (b/s/Hz) \quad (2-23)$$

Keterangan :

ρ_{sc} : *Signal to Noise Ratio* yang terinterferensi (dB)

P_{sc} : Daya per *subcarrier* (dBm)

P : Daya total di seluruh *bandwidth* (dBm)

N_{sc} : jumlah *subcarrier*

N_0 : Daya *noise* saluran transmisi (dBm)

C : kapasitas kanal (b/s/Hz)

Δ : durasi *cyclic prefix* (s)

T_s : durasi simbol (s)

$|H_c|^2$: Gain yang menguntungkan

$|H_{int}|^2$: Gain yang mengganggu

f : penginterferensi

2.5.2 Signal to Noise Ratio (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) adalah suatu parameter yang menyatakan kekuatan sinyal diterima dinyatakan dengan perbandingan sinyal yang diterima dengan deru (noise) dari penerima.

Untuk mendapatkan SNR maka

$$SNR = 2^{C_{OFDM}} - 1 \quad (2-24)$$

Keterangan :

SNR : *Signal to Noise Ratio* (dB)

C_{ofdm} : kapasitas kanal OFDM (b/s/Hz)

2.6 Keunggulan dan Kelemahan OFDM

OFDM memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan sistem yang lain, diantaranya (Srikanth, 2007) :

1. Pemakaian frekuensi yang lebih kecil

OFDM merupakan jenis modulasi multicarrier yang memiliki efisiensi frekuensi yang lebih kecil dibandingkan dengan modulasi multicarrier yang lainnya (seperti FDM). Hal ini dimungkinkan karena sifat orthogonalitas memungkinkan adanya overlap antar frekuensi. Berbeda dengan multicarrier konvensional seperti halnya FDM, untuk menghindari terjadinya interferensi antar sinyal carrier maka perlu disisipkannya frekuensi penghalang (*guard band*), dengan adanya *guard band* inilah pemakaian frekuensi tidak efisien. Selain itu *guard band* menyebabkan penurunan kecepatan transmisi dibandingkan dengan sistem *single carrier* dengan lebar spektrum yang sama.

2. Kuat terhadap *frequency selective fading*

frequency selective fading merupakan sebuah keadaan yang mana terjadi pelemahan daya secara tidak seragam pada frekuensi tertentu

yang diakibatkan *bandwidth* dari kanal lebih sempit daripada *bandwidth* transmisi. Pada sistem OFDM ini dapat dihindarkan dengan cara menggunakan *subcarrier* yang relatif banyak pada sistem OFDM yang berpengaruh pada kecepatan transmisi sehingga menjadi sangat rendah dan hanya menimbulkan *flat fading*.

3. Tidak sensitif terhadap *delay spread*

Dengan dibaginya kecepatan transmisi ke dalam banyak *subcarrier*, maka kecepatan pada *subcarrier* akan menjadi kecil, sehingga periode simbol menjadi lebih panjang yang akhirnya mampu mengurangi terjadinya *delay*

OFDM bukanlah sistem tanpa kelemahan, adapun kelemahan sistem ini antara lain:

1. *Carrier frequency offset (CFO)*

Sistem OFDM memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap CFO yang disebabkan oleh *jitter* pada gelombang pembawa dan juga terhadap efek Doppler yang disebabkan oleh pergerakan stasiun pengirim atau penerima.

2. *Distorsi nonlinear*

Teknologi OFDM menggunakan sistem *multi*-frekuensi dan *multi*-amplitudo, sehingga sistem ini mudah terkontaminasi oleh *distorsi nonlinear* yang terjadi pada penguat dari daya transmisi.

3. Sinkronisasi sinyal

Pada stasiun penerima, menentukan *start point* untuk memulai operasi *Fast Fourier Transform (FFT)* ketika sinyal OFDM tiba di stasiun penerima adalah relatif sulit. Dengan kata lain, sinkronisasi sinyal OFDM adalah sulit

2.7 Rekomendasi Untuk Investor

1. Investor dapat menerapkan pemakaian frekuensi yang lebih kecil karena OFDM merupakan jenis modulasi multicarrier yang memiliki efisiensi frekuensi yang lebih kecil. Hal ini dimungkinkan karena sifat orthogonalitas memungkinkan adanya overlap antar frekuensi untuk menghindari terjadinya interferensi antar sinyal *carrier* maka perlu disisipkannya frekuensi penghalang (*guard band*), dengan adanya *guard band* inilah pemakaian frekuensi tidak efisien. Selain itu *guard band* menyebabkan penurunan kecepatan transmisi dibandingkan dengan sistem *single carrier* dengan lebar spektrum yang sama.
2. Investor dapat menggunakan *subcarrier* yang relatif banyak pada sistem OFDM yang berpengaruh pada kecepatan transmisi sehingga menjadi sangat rendah dan hanya menimbulkan *flat fading* yang tidak menimbulkan terjadinya *frequency selective fading*. Dengan dibaginya kecepatan transmisi ke dalam banyak *subcarrier*, maka kecepatan pada *subcarrier* akan menjadi kecil, sehingga periode simbol menjadi lebih panjang yang akhirnya mampu mengurangi terjadinya *delay*.

