

**TEKNIK *EQUALIZER* UNTUK SISTEM *ORTHOGONAL*  
*FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING* (OFDM) PADA KANAL  
*MOBILE***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada  
Jurusan Teknik Elektro



Oleh:

**RIFALDI HUSNI SAIH**  
**10855001604**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU  
PEKANBARU  
2013**

# **AN EQUALIZATION TECHNIQUE FOR ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (OFDM) SYSTEMS IN CHANNEL MOBILE**

**RIFALDI HUSNI SAIH**  
**NIM : 10855001604**

*Date of Final Exam :*

*Department of Electrical Engineering  
Faculty of Sciences and Technology  
State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau  
Soebrantas St No. 155 Pekanbaru-Indonesia*

## **ABSTRACT**

*Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is a multicarrier technique which has orthogonal frequency with each other by using a narrow bandwidth. One of the weaknesses in the OFDM system is fading and loss of orthogonality on subchannel caused by the Doppler shift. The problems that arise due to the Doppler shift is the intercarrier interference (ICI) in the channel so that the required mitigation ICI to improve the performance of the system. In this study, ICI mitigation is done using a zero forcing equalizer, MMSE equalizer and LMS equalizer. LMS equalizer has better performance than the zero-forcing equalizer and MMSE equalizer is the channel mobile-to-fix rayleigh fading able to survive on BER  $10^{-3}$  when the normalized Doppler frequency of **0.30** with  $E_b/N_0$  33dB and channel mobile-to-mobile rayleigh fading able to survive on BER  $10^{-3}$  when the normalized Doppler frequency of **0.30** with  $E_b/N_0$  30dB.*

**Key Word:** Channel Mobile, Doppler, Equalizer, ICI Mitigation, OFDM

**TEKNIK *EQUALIZER* UNTUK SISTEM *ORTHOGONAL*  
*FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING* (OFDM) PADA KANAL  
*MOBILE***

**RIFALDI HUSNI SAIH  
NIM : 10855001604**

Tanggal Sidang :  
Tanggal Wisuda :

Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Sains dan Teknologi  
Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau  
Jl. Soebrantas No. 155 Pekanbaru

**ABSTRAK**

*Orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) adalah teknik *multicarrier* yang memiliki frekuensi *orthogonal* satu sama lain dengan menggunakan *bandwidth* yang sempit. Salah satu kelemahan pada sistem OFDM adalah terjadinya *fading* dan hilangnya orthogonalitas pada *subchannel* yang diakibatkan oleh pergeseran *Doppler*. Permasalahan yang timbul akibat pergeseran *Doppler* adalah terjadinya *intercarrier interference* (ICI) pada kanal sehingga diperlukan mitigasi ICI untuk meningkatkan kinerja pada sistem. Pada penelitian ini, mitigasi ICI dilakukan menggunakan *zero forcing equalizer*, *MMSE equalizer* dan *LMS equalizer*. *LMS equalizer* memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan *zero forcing equalizer* dan *MMSE equalizer* yaitu pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* mampu bertahan pada BER  $10^{-3}$  ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.30 dengan Eb/No 33dB dan pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* mampu bertahan pada BER  $10^{-2}$  ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.30 dengan Eb/No 30dB.

**Kata Kunci :** *Doppler, Equalizer, Kanal Mobile, Mitigasi ICI, OFDM*

## KATA PENGANTAR

*Assalamu'alaikum Wr.Wb*

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, yang telah mencurahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis. Shalawat beriring salam untuk junjungan kita Nabi Muhammad SAW, sebagai seorang sosok pemimpin dan tauladan bagi seluruh umat di dunia yang patut teladani bagi kita semua. Atas ridho Allah SWT penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “**Teknik Equalizer untuk Sistem Orthogonal Frequency Divison Multiplexing (OFDM) Pada Kanal Mobile**”.

Melalui proses bimbingan dan pengarahan yang disumbangkan oleh orang-orang yang berpengetahuan, dorongan, motivasi, dan juga do'a orang-orang yang ada disekeliling penulis sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan penuh kesederhanaan. Sudah menjadi ketentuan bagi setiap Mahasiswa yang ingin menyelesaikan studinya pada perguruan tinggi UIN SUSKA RIAU harus membuat karya ilmiah berupa Tugas Akhir guna mencapai gelar sarjana.

Oleh sebab itu sudah sewajarnya penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Ayahanda dan Ibunda tercinta, yang telah memberikan semangat, dukungan moril maupun materil dan doa kepada penulis serta keluarga besar penulis yang selalu mendoakan penulis.
2. Dra. Hj. Yenita Morena, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau beserta seluruh Pembantu Dekan, Staf dan jajarannya.
3. Kunaifi, ST., PgDipEnSt., M.Sc. selaku ketua jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau yang telah membuat proses administrasi menjadi lebih efektif sehingga penulis lebih mudah dalam melengkapi berkas-berkas untuk Tugas Akhir dan pengalaman-pengalaman luar biasa beliau yang penulis rasakan
4. Mulyono, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam memberikan penjelasan dan masukan yang sangat berguna sehingga penulis menjadi lebih mengerti dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

5. Dr. Teddy Purnamirza, ST., MEng, Drs. Martius, M.Hum, Fitri Amilia, ST., MT dan Sutoyo, ST., MT selaku dosen penguji yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi kritikan dan saran yang sangat membangun terhadap penulis.
6. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan dan curahan ilmu kepada penulis sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Anggi Gustini, yang telah memberikan bantuan dan memberi dorongan, menemani penulis baik dalam susah maupun senang dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. M. Nursyarifudin, Jefriadi, Indri Novita serta teman-teman penulis lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dan memberi dorongan, motivasi dan sumbangan pemikiran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Kakanda dan Adinda Teknik Elektro yang telah memberikan dorongan kepada penulis.

Semoga bantuan yang telah diberikan baik moril maupun materil mendapat balasan pahala dari Allah SWT, dan sebuah harapan dari penulis semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembaca semua pada umumnya.

Semua kekurangan hanya datang dari penulis dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT, hal ini yang membuat penulis menyadari bahwa dalam pembuatan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan karena keterbatasan kemampuan, pengalaman, dan pengetahuan penulis. Untuk itu penulis mengharap kritik dan saran dari semua pihak yang bersifat positif dan membangun demi kesempurnaan skripsi ini.

## DAFTAR ISI

|                                      | Halaman |
|--------------------------------------|---------|
| HALAMAN <i>COVER</i> .....           | i       |
| LEMBAR PERSETUJUAN.....              | ii      |
| LEMBAR PENGESAHAN.....               | iii     |
| LEMBAR HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL..... | iv      |
| LEMBAR PERNYATAAN.....               | v       |
| LEMBAR PERSEMBAHAN.....              | vi      |
| <i>ABSTRACT</i> .....                | vii     |
| ABSTRAK.....                         | viii    |
| KATA PENGANTAR.....                  | ix      |
| DAFTAR ISI.....                      | xi      |
| DAFTAR GAMBAR.....                   | xv      |
| DAFTAR TABEL.....                    | xvii    |
| DAFTAR RUMUS.....                    | xviii   |
| DAFTAR SINGKATAN.....                | xix     |
| DAFTAR LAMPIRAN.....                 | xx      |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b>             |         |
| 1.1 Latar Belakang.....              | I-1     |
| 1.2 Rumusan Masalah.....             | I-2     |
| 1.3 Tujuan Penelitian.....           | I-2     |
| 1.4 Batasan Masalah.....             | I-2     |
| 1.5 Manfaat Penelitian.....          | I-3     |
| 1.6 Metodologi Penelitian.....       | I-3     |

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

|        |  |       |
|--------|--|-------|
| 2.1    | Konsep Kerja OFDM .....  | II-1  |
| 2.2    | Modulasi QPSK.....   | II-2  |
| 2.3    | <i>Fast Fourier Transfrom (FFT)</i> .....                      | II-2  |
| 2.4    | <i>Cyclic Prefix</i> .....                                     | II-3  |
| 2.5    | Kanal Transmisi.....   | II-4  |
| 2.5.1  | Kanal <i>Additive White Gaussian Noise (AWGN)</i> .....        | II-4  |
| 2.5.2  | Kanal <i>Mobile-to-Mobile Rayleigh Fading</i> .....            | II-5  |
| 2.5.3  | Kanal <i>Mobile-to-Fix Rayleigh Fading</i> .....               | II-6  |
| 2.6    | Faktor Terjadinya <i>Intercarrier Interference (ICI)</i> ..... | II-7  |
| 2.7    | Efek <i>Doppler</i> .....                                      | II-7  |
| 2.8    | Estimasi kanal.....  | II-8  |
| 2.9    | Interpolasi .....  | II-8  |
| 2.10   | <i>Equalizer</i> .....   | II-9  |
| 2.10.1 | <i>Zero Forcing Equalizer</i> .....                            | II-9  |
| 2.10.2 | <i>Minimum Mean Square Error (MMSE) Equalizer</i> .....        | II-10 |
| 2.10.3 | <i>Least Mean Squared (LMS) Equalizer</i> .....                | II-10 |
| 2.11   | <i>Variance Inflation Factors (VIF)</i> .....                  | II-12 |

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

|     |                                 |       |
|-----|---------------------------------|-------|
| 3.1 | Langkah-Langkah Penelitian..... | III-1 |
| 3.2 | Parameter Sistem .....          | III-3 |
| 3.3 | Bit Informasi.....              | III-3 |
| 3.4 | Proses Modulasi.....            | III-4 |
| 3.5 | Proses Serial ke Paralel.....   | III-5 |
| 3.6 | Penyisipan Pilot.....           | III-6 |

|      |   |        |
|------|---|--------|
| 3.7  | Proses <i>Inverse Fast Fourier Transform</i> (IFFT).....              | III-6  |
| 3.8  | <i>Cyclic Prefix</i> .....  | III-7  |
| 3.9  | Proses Paralel ke Serial.....   | III-8  |
| 3.10 | Pemodelan Kanal Transmisi.....  | III-8  |
| 3.11 | Estimasi Kanal .....  | III-12 |
| 3.12 | Teknik <i>Equalizer</i> .....   | III-12 |
|      | 3.12.1 <i>Zero Forcing Equalizer</i> .....                            | III-12 |
|      | 3.12.2 <i>Minimum Mean Square Error</i> (MMSE) <i>Equalizer</i> ..... | III-12 |
|      | 3.12.3 <i>Least Mean Squared</i> (LMS) <i>Equalizer</i> .....         | III-13 |
| 3.13 | Menghapus <i>Cyclic Prefix</i> .....                                  | III-13 |
| 3.14 | Proses <i>Fast Fourier Transform</i> (FFT).....                       | III-14 |
| 3.15 | Perhitungan BER vs Eb/No dengan $F_d$ yang Bervariasi .....           | III-14 |

#### **BAB IV HASIL PENGUKURAN DAN ANALISA**

|     |  |       |
|-----|--|-------|
| 4.1 | Teknik <i>Equalizer</i> Pada Kanal <i>Mobile-to-Mobile Rayleigh Fading</i> dan <i>Mobile-To-Fix Rayleigh Fading</i> .....              | IV-1  |
| 4.2 | Unjuk Kerja Estimasi pada <i>Kanal Mobile-to-Fix Rayleigh Fading</i> ...   | IV-3  |
| 4.3 | Unjuk Kerja Estimasi pada <i>Kanal Mobile-to-Mobile Rayleigh Fading</i> .....  | IV-4  |
| 4.4 | Perbandingan Teknik <i>Equalizer</i> Pada Kanal <i>Mobile-To-Mobile Rayleigh Fading</i> dan <i>Mobile-To-Fix Rayleigh Fading</i> ..... | IV-5  |
| 4.5 | Unjuk Kerja Mitigasi ICI pada <i>Kanal Mobile-to-Fix Rayleigh Fading</i> .....   | IV-7  |
| 4.6 | Unjuk Kerja Mitigasi ICI pada <i>Kanal Mobile-to-Mobile Rayleigh Fading</i> .....  | IV-11 |
| 4.7 | Unjuk Kerja Mitigasi ICI pada <i>Kanal Mobile-to-Mobile Rayleigh Fading</i> Menggunakan Variabel $a$ .....                             | IV-14 |
| 4.8 | Analisa .....  | IV-17 |

**BAB V PENUTUP**

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 5.1 Kesimpulan..... | V-1 |
| 5.2 Saran .....     | V-1 |

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada sistem telekomunikasi *wireless*, sinyal informasi umumnya ditransmisikan menggunakan satu sinyal *carrier* yang memanfaatkan keseluruhan *bandwidth*. Dalam sistem komunikasi *wireless* kecepatan tinggi, jika metode *single carrier* ini digunakan pada suatu kanal yang memiliki respon frekuensi yang tidak ideal (*frequency selective*) maka transmisi ini akan menemui kendala yang berhubungan dengan kesalahan deteksi simbol pada penerima. Kesalahan deteksi simbol ini diakibatkan oleh simbol-simbol yang berdekatan mengalami *intersymbol interference* (ISI). Salah satu sistem komunikasi yang digunakan untuk mengatasi hal tersebut adalah *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) (Naim M, 2011).

Sistem OFDM adalah salah satu teknik *multicarrier* yang memiliki frekuensi *orthogonal* satu sama lain dengan menggunakan *bandwidth* yang sempit (Setiawan, 2006). Fungsi sistem OFDM adalah memecah data yang memiliki *bandwidth* tinggi menjadi deretan data *rate* paralel yang memiliki *bandwidth* yang lebih rendah. Deretan sinyal paralel dari data *rate* tersebut selanjutnya akan dimodulasi dengan *subcarrier* yang saling *orthogonal* dengan cara menambahkan *cyclic prefix* sebagai *guard interval* untuk mencegah terjadinya ISI.

Kelemahan pada sistem OFDM pada kanal *mobile* adalah terjadinya pergeseran *Doppler* yang dikarenakan variasi waktu pada kanal sehingga orthogonalitas pada *subchannel* akan hilang dan menimbulkan *intercarrier interference* (ICI) (Jeon, 1999). Menurunnya kinerja sistem yang diakibatkan ICI merupakan masalah yang serius, sehingga diperlukan teknik mitigasi yang berfungsi untuk mengurangi ICI pada *receiver*. Dalam sistem OFDM, Salah satu mitigasi ICI yaitu dengan menggunakan teknik *equalizer*.

Mengacu pada penelitian sebelumnya (Hrycak, 2006), mengenai mitigasi ICI menggunakan LSQR *equalizer* dan *minimum mean square error* (MMSE) *equalizer* pada domain-waktu sebelum sinyal penerima tersebut melakukan proses *fast fourier transform*

(FFT) dan penelitian tentang melakukan mitigasi ICI dengan menggunakan MMSE *equalizer* dan *decision feedback equalizer* (DFE) pada kanal *Underwater Acoustic* (Tu, 2010), maka muncul ide penulis untuk melakukan mitigasi ICI menggunakan teknik *equalizer* pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*. Kanal akan diestimasi menggunakan susunan pilot tipe *comp* dan teknik *equalizer* yang digunakan adalah *zero forcing equalizer*, MMSE *equalizer* dan *least mean square* (LMS) *equalizer*. Dengan diterapkannya teknik *equalizer* ini diharapkan mampu meningkatkan kinerja dari mitigasi ICI pada kanal *mobile*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat diambil rumusan masalah yaitu : Bagaimana menganalisa hasil mitigasi ICI menggunakan *zero forcing equalizer*, LMS *equalizer* dan MMSE *equalizer* pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian tugas akhir ini bertujuan yaitu menganalisa mitigasi ICI menggunakan *zero forcing equalizer*, LMS *equalizer* dan MMSE *equalizer* pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*.

## 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Kinerja estimasi berdasarkan VIF.
2. Kinerja mitigasi ICI berdasarkan BER.
3. Menggunakan modulasi QPSK.
4. Menggunakan kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*.
5. Teknik *equalizer* yang digunakan adalah *zero forcing equalizer*, LMS *equalizer* dan MMSE *equalizer*.

## 1.5 Manfaat penelitian

Manfaat dalam penelitian ini dapat dilihat dari sisi keilmuan tentang teknik *equalizer* untuk sistem OFDM pada kanal *mobile* dan digunakan sebagai referensi guna penelitian berikutnya.

## 1.6 Metode Penelitian

Dalam penelitian Tugas Akhir ini digunakan beberapa metode yakni :

a. Studi literatur

Metode ini merupakan langkah awal dari penelitian yaitu dengan mengumpulkan referensi-referensi yang dibutuhkan dalam penelitian dan penulisan laporan. Adapun referensi yang dibutuhkan adalah buku, jurnal dan paper.

b. Pemodelan dan simulasi sistem

Pemodelan yang akan dirancang sesuai dengan perancangan yang mengacu pada penelitian yang akan dibuat.

c. Identifikasi *software* dan simulasi

Melakukan pemilihan *software* yang akan digunakan dalam simulasi pada penelitian ini dan mensimulasikan pemodelan sistem tersebut.

d. Analisis hasil simulasi

Melakukan analisa-analisa sesuai hasil simulasi yang telah dilakukan.

e. Penulisan laporan

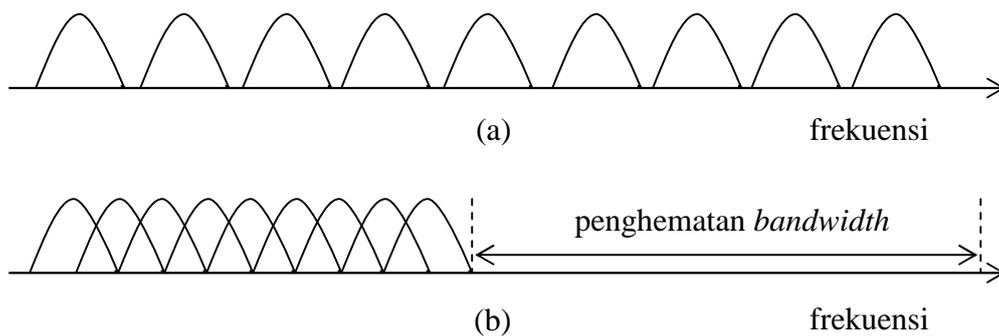
Tahap akhir dari metode penelitian ini adalah menulis laporan Tugas Akhir berdasarkan analisis dan kesimpulan yang diperoleh.

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Konsep Kerja OFDM

Teknik OFDM merupakan teknik transmisi data yang menguraikan aliran data yang ditransmisikan menggunakan *single-carrier* menjadi data *rate* yang lebih rendah yang ditransmisikan secara bersamaan menggunakan deretan frekuensi *subcarrier*. Namun berbeda dengan teknik modulasi *subcarrier* dimana setiap frekuensi *subcarrier* dibagi menjadi deretan paralel yang tidak saling *overlap* karena akan terjadi ISI. Sistem OFDM dapat membuat frekuensi setiap *subcarrier* saling *orthogonal* satu sama lain dimana setiap frekuensi saling *overlap* tanpa rentan terhadap ISI dengan cara menambahkan *guard interval* pada setiap frekuensi *subcarrier*.



Gambar 2.1. Model spektrum *subcarrier* (a) tidak *overlap* (b) *overlap orthogonal* (Juliandy, 2009)

Prinsip *orthogonal* menunjukkan adanya hubungan matematis antar frekuensi *subcarrier* pada sistem. OFDM menggunakan spektrum yang saling *overlap* antara *subcarrier* yang satu dengan *subcarrier* lain tanpa terjadinya interferensi pada sinyal yang diterima. Sehingga sistem OFDM dapat diterapkan untuk meningkatkan efisiensi *bandwidth* yang diperlihatkan pada gambar 2.1 (Juliandy, 2009).

Sinyal *carrier* pada OFDM adalah hasil dari penjumlahan dari *subcarriers* yang *orthogonal* dengan data *baseband* pada masing-masing *subcarriers* yang dimodulasikan secara bebas dengan menggunakan teknik modulasi. Operasi yang dilakukan pada *receiver*

berkebalikan dengan apa yang dilakukan pada *transmitter*. Dimulai pada konversi dari serial ke paralel, lalu konversi sinyal paralel dengan FFT, setelah itu demodulasi, konversi paralel ke serial dan akhirnya kembali menjadi bentuk data informasi (Ilyasa, 2007).

Pada sistem OFDM frekuensi-frekuensi *multicarrier* saling tegak lurus, yang berarti bahwa *crosstalk* di antara *subchannels* dihilangkan dan *intercarrier guard bands* tidak diperlukan. Dalam sistem OFDM istilah *orthogonal* mengandung makna diantara frekuensi-frekuensi yang digunakan memiliki hubungan yang matematis sehingga frekuensi yang saling *orthogonal* memungkinkan *overlap* antar frekuensi tanpa menimbulkan interferensi satu sama lain (Ilyasa, 2007).

## 2.2 Modulasi QPSK

Modulasi yang digunakan dalam sistem ini adalah modulasi *quarternary phase shift keying* (QPSK). Modulasi QPSK merupakan teknik *M-ary encoding* dimana *M* adalah 4 sehingga pada modulasi QPSK terdapat empat *output phase* untuk sebuah *single carrier* dan mempunyai empat kondisi *input* berbeda. Agar mempunyai empat kondisi *input* yang berbeda, maka setiap deretan bit *input* diambil setiap 2 group bit (Budiarti, 2011). Dengan menggunakan modulasi QPSK maka dapat menghemat *bandwidth*.

Teknik modulasi QPSK menggunakan cara mengirimkan 1 dari 4 sinyal yang mungkin selama *interval* waktu tertentu dan setiap sinyal pada modulasi QPSK merupakan pasangan bit yaitu 00, 01, 11, 10. Pada modulasi QPSK sinyal yang ditumpangkan pada sinyal pembawa, mempunyai empat kemungkinan dari setiap pasangan bitnya. *Bit error rate* (BER) pada modulasi QPSK sama dengan dua kali BER pada modulasi *binary phase shift keying* (BPSK), tetapi modulasi QPSK dapat mengirim data dua kali lebih banyak dengan menggunakan *bandwidth* yang sama (Juliandy, 2009).

## 2.3 Fast Fourier Transform (FFT)

FFT dan *inverse fast fourier transform* (IFFT) menggunakan algoritma untuk melakukan kinerja pada sinyal dalam domain waktu diskrit dan domain frekuensi. Algoritma yang digunakan untuk melakukan transformasi *discrete fourier transform* (DFT) dengan menggunakan metode transformasi matematis pada sinyal waktu diskrit ke domain frekuensi.

DFT merupakan metode transformasi matematis sinyal waktu diskrit. Dimana setiap simbol yang telah dibentuk menjadi paralel dilewatkan pada IFFT untuk menghasilkan simbol-simbol OFDM yang saling *orthogonal* satu sama lain. Persamaan IFFT adalah sebagai berikut (Hermanto, 2012) :

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [X(k)] W_N^{kn}$$

$$x(n) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} [X(k) + X\left(\frac{N}{2} + k\right)] W_N^{kn} \quad (2.1)$$

Proses yang terjadi pada penerima adalah kebalikan dari proses yang dilakukan pada pemancar. FFT merupakan komponen yang paling utama pada bagian perencanaan demodulasi. Ketika lebih dari satu pembawa dimasukkan, FFT merupakan suatu metode praktis untuk memperbaiki data dari pembawa (*carrier*). FFT digunakan untuk merubah kembali ke ranah frekuensi. Sedangkan persamaan FFT adalah sebagai berikut (Hermanto, 2012) :

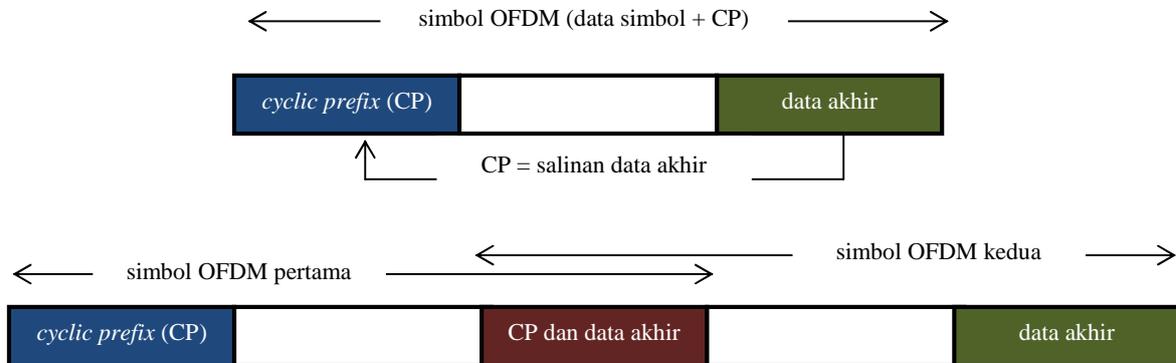
$$X(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} [x(n) + x\left(\frac{N}{2} + n\right)] W_N^{-kn} \quad (2.2)$$

## 2.4 Cyclic Prefix

Sinyal *orthogonal* OFDM dapat berubah. *Cyclic prefix* dapat membantu menjaga sifat *orthogonal* dari sinyal OFDM tersebut. Pada mulanya sebelum ada *cyclic prefix* jarak antara *subcarrier* di isi dengan *guard interval*. Namun, antara *subcarrier* tersebut yang berisikan *guard interval* menimbulkan ICI. Adanya *crosstalk* antara *subcarrier* yang akan menimbulkan hilangnya ortonogonalitas dari sinyal OFDM. *Cyclic prefix* merupakan salinan dari bagian akhir simbol OFDM yang ditaruh di depan pada saat pengiriman sinyal OFDM. Gambar 2.2 memperlihatkan definisi *cyclic prefix* yang digunakan sebagai *guard interval* pada sistem OFDM (Astuti, 2012).

*Cyclic prefix* berfungsi sebagai *guard interval* yang memastikan semua simbol OFDM terkirim secara lengkap dalam *interval* FFT dengan waktu tunda yang sama. Hal ini akan menjaga ortonormalitas dari sinyal OFDM. Pada modulasi OFDM, IFFT diambil sebagai periode simbol sehingga secara teknisnya akan dihasilkan waktu yang sama. Pada

*transformasi fourier* akan dihasilkan komponen dari semua sinyal yang saling *orthogonal* (Astuti, 2012).



Gambar 2.2. Definisi *cyclic prefix* sebagai *guard interval* pada OFDM

Pada bagian penerima *cyclic prefix* tersebut dibuang sebelum proses demodulasi dengan FFT. Selama *interval* dari *cyclic prefix* tersebut tidak melebihi *delay spread* maksimum  $\tau_{max}$ , semua pantulan dari simbol sebelumnya dibuang dan sifat *orthogonal* sinyal dipulihkan. Jika *interval cyclic prefix* melebihi dari *delay spread* maksimum  $\tau_{max}$  maka orthogonalitas dari sinyal tersebut akan hilang (Astuti, 2012).

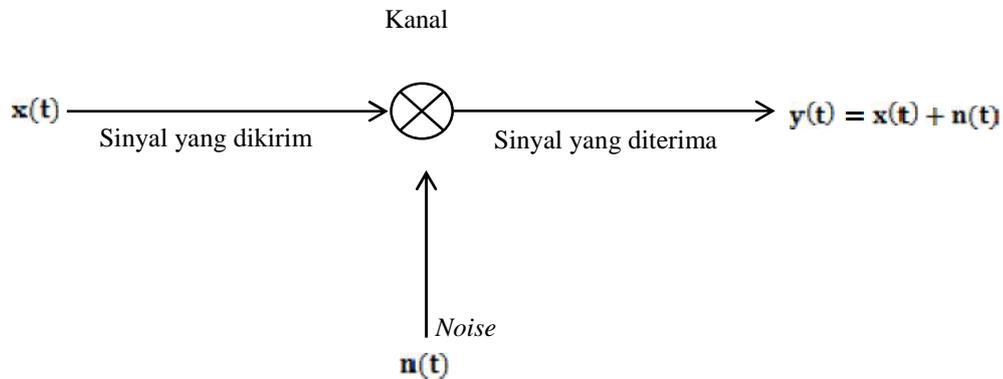
## 2.5 Kanal Transmisi

Dalam sistem OFDM digunakan kanal *wireless*. Adapun kanal *wireless* yang dapat digunakan yaitu kanal *additive white gaussian noise* (AWGN) dan kanal *mobile*.

### 2.5.1 Kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN)

Pada kanal transmisi selalu terdapat penambahan *noise* yang timbul sebagai akibat dari *thermal noise* pada perangkat *transmitter* dan *reciever*. *Noise* yang menyertai sinyal pada sisi penerima dapat didekati dengan model matematis statistik AWGN. AWGN merupakan gangguan yang bersifat *additive* terhadap sinyal transmisi, dimodelkan dalam pola distribusi acak *gaussian* dengan rata-rata (*mean*) nol, standar deviasi 1, berhingga. AWGN merupakan model kanal sederhana dan umum digunakan dalam suatu sistem komunikasi. Model kanal ini dapat dilihat pada gambar 2.3.

Jika sinyal yang dikirim  $\mathbf{x}(t)$ , pada kanal akan dipengaruhi oleh *noise*  $\mathbf{n}(t)$  sehingga sinyal yang diterima menjadi  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t)$  (Juliandy, 2009).



Gambar 2.3 Model kanal AWGN (Juliandy, 2009)

### 2.5.2 Kanal *Mobile-to-Mobile Rayleigh Fading*

Kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dalam komunikasi *wireless* memiliki peranan penting dalam sistem komunikasi seluler yang banyak digunakan pada saat ini. Pada sistem komunikasi kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*, *transmitter* dan *reciever* terhalang oleh bangunan, pepohonan dan lainnya sehingga mengakibatkan kondisi propagasi NLOS (Patel, 2006).

Sinyal ditransmisikan mengalami pemantulan, penghamburan saat berhadapan dengan hambatan. Akibatnya, sinyal yang diterima adalah perpaduan sinyal asli dan sinyal yang telah tersebar dan dipantulkan. Sehingga sinyal memiliki amplitudo sendiri, *phase* acak, dan pergeseran *Doppler* yang disebabkan oleh gerakan *transmitter* dan *reciever* pada transmisi *narrowband*. Pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dimana terjadi pergerakan pada *transmitter* dan *reciever* mengakibatkan *Doppler* yang menjadi permasalahan yang lebih serius dibandingkan dengan kanal *mobile* lainnya (Patel, 2006).

Persamaan kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dapat digunakan dengan menggunakan persamaan (2.3).  $\omega_1$  dan  $\omega_2$  adalah frekuensi *Doppler* maksimum yang dihasilkan dari gerakan *transmitter* dan *reciever*.  $t$  merupakan waktu (Zaji'c, 2006) :

$$g(t) = \sqrt{\frac{2}{NM}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \exp\{j[\omega_1 t \cos(\alpha_n) + \omega_2 t \cos(\beta_m) + \phi_{nm}]\} \quad (2.3)$$

$\alpha_n$  dan  $\beta_m$  dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (2.4) dan persamaan (2.5). Sudut pengirim di setiap jalur *scattering*  $\theta_n$  dan sudut penerima  $\psi_m$  dan  $\phi_{nm}$  di  $g(t)$  adalah semua variabel independen acak seragam selama  $[-\pi, \pi)$  (Wang, 2009) :

$$\alpha_n = \frac{2n\pi - \pi + \theta_n}{4N} \quad (2.4)$$

$$\beta_m = \frac{2(2m\pi - \pi + \psi_m)}{4M} \quad (2.5)$$

### 2.5.3 Kanal *Mobile-to-Fix Rayleigh Fading*

Dalam sistem telekomunikasi salah satu kanal *mobile* adalah kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*. Pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* pergerakan hanya terjadi pada *transmitter* saja, sedangkan *receiver* dalam keadaan tetap. Perbedaan kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* adalah pergerakan dan efek *Doppler* hanya berada pada *transmitter*.

Adapun persamaan pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* yaitu (Zheng, 2002) :

$$g(t) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=1}^N \exp[j(\omega_d t \cos \alpha_n + \phi_n)] \quad (2.6)$$

dengan

$$\alpha_n = \frac{2\pi n - \pi + \theta}{4M}, \text{ dengan } n = 1, 2, \dots, M \quad (2.7)$$

dimana

$\alpha_n$  = sudut gelombang datang

$\phi_n$  = *phase* awal yang terkait dengan jalur propagasi ( $n^{\text{th}}$ )

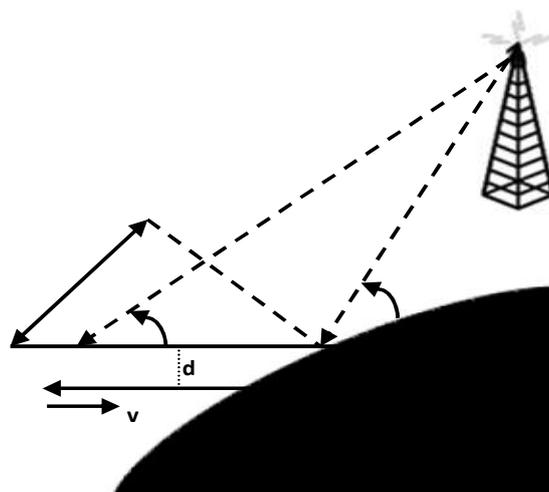
$\omega_d$  = sudut maksimum frekuensi *Doppler*

## 2.6 Faktor Terjadinya *Intercarrier Interference (ICI)*

ICI adalah masalah serius pada sistem OFDM. ICI terjadi pada *sub-channel* digunakan kembali oleh *sub-channel* yang berada pada blok data yang sama dari pengguna yang sama. Bahkan jika hanya terdapat satu pengguna dalam komunikasi OFDM, ICI mungkin terjadi. Faktor yang menyebabkan ICI adalah frekuensi *offset* dan *time variant*. beberapa jenis *time variant* pada kanal dapat dimodelkan sebagai *white Gaussian random noise*, sedangkan *time variant* lain dapat dimodelkan sebagai frekuensi *offset* seperti pergeseran *Doppler* (Xiao, 2003).

## 2.7 Efek *Doppler*

*Doppler shift* disebabkan oleh pergerakan reaktif antara pemancar, penerima dan pergerakan objek-objek pemantul pada kanal. Hal ini mengakibatkan adanya pelebaran spektral sinyal yang diterima oleh penerima (Juliandy, 2009).



Gambar 2.4. Ilustrasi dari efek *Doppler* pada *reciever* (Juliandy, 2009)

*Coherence bandwidth* dapat mendefinisikan sifat *fading* sebagai *frequency selective* atau sebagai *flat fading*. Jika ditransmisikan sinyal dengan *bandwidth* lebih besar dari *coherence bandwidth*, maka sinyal tersebut akan terkena *frequency selective fading*. Tetapi jika ditransmisikan sinyal dengan *bandwidth* lebih kecil dari *coherence bandwidth*, maka sinyal tersebut akan terkena *flat fading*. *Doppler spread*  $B_D$  merupakan ukuran pelebaran *spectral* yang disebabkan oleh pergerakan kanal dan didefinisikan sebagai *interval* frekuensi pada spektrum *Doppler* yang nilainya tidak nol. *Coherence Time*  $T_c$  merupakan ilustrasi efek *Doppler* pada domain waktu dan digunakan untuk mengkarakterisasi variasi waktu dari tingkat dispersi frekuensi dari kanal dalam domain waktu (Juliandy, 2009).

*Coherence time* dapat digunakan untuk mengkarakterisasi sifat kanal berdasarkan variasi waktu, yaitu *slow fading* atau *fast fading*. Jika ditransmisikan sinyal dengan durasi simbol lebih kecil dari  $T_c$ , maka sinyal tersebut akan mengalami *slow fading*, sebaliknya jika ditransmisikan sinyal dengan durasi simbol lebih besar dari  $T_c$ , maka sinyal tersebut akan terkena *fast fading* (Juliandy, 2009).

## 2.8 Estimasi kanal

Terdapat dua masalah utama dalam mendisain estimator kanal pada sistem OFDM. Masalah pertama adalah pengaturan dari pilot informasi, dimana pilot berarti sinyal referensi yang digunakan baik itu di sisi *transmitter* dan *reciever*. Masalah kedua yaitu desain dari estimator agar tidak terlalu rumit dan kemampuan pelacakan kanal yang baik. Secara umum kanal *fading* dari OFDM dapat dilihat dari 2D (waktu dan frekuensi). Namun, estimator 2D terlalu kompleks untuk implementasi praktis.

Kombinasi kecepatan data yang tinggi dan tingkat kesalahan rendah bit dalam sistem OFDM memerlukan penggunaan estimator yang memiliki keduanya kompleksitas rendah dan akurasi tinggi. Estimasi saluran satu dimensi (1D) biasanya diadopsi dalam sistem OFDM untuk mencapai *trade-off* antara kompleksitas dan akurasi (Astuti, 2012).

## 2.9 Interpolasi

Setelah kanal ditransmisikan dalam bentuk pilot, data pada kanal dapat di interpolasi. Pada penelitian ini interpolasi yang digunakan untuk estimasi kanal pada sistem OFDM adalah interpolasi *low pass*.

Interpolasi *low pass* dilakukan dengan cara memasukkan nol ke urutan asli dan kemudian menerapkan filter *low pass* FIR yang memungkinkan untuk mengubah data asli dan interpolasi dibuat sedemikian rupa sehingga kesalahan *mean-square* antara interpolasi poin dan nilai-nilai yang ideal diminimalkan (Arshad, 2002).

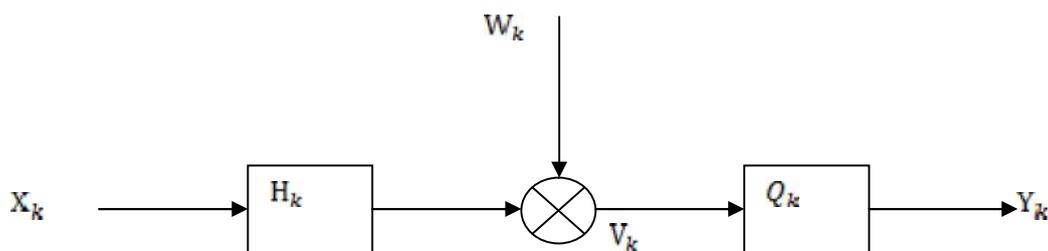
## 2.10 Equalizer

Meskipun *guard time* yang memiliki durasi lebih lama dari *delay spread* pada kanal *multipath* dapat menghilangkan ISI karena penambahan simbol, tetapi masih memiliki beberapa ISI karena kanal *frequency selective*. Agar mengkompensasi distorsi ini, *single-tap equalizer* diperlukan (Arshad, 2002).

Fungsi dari teknik *equalizer* adalah sebagai penyeimbang karakteristik kanal. Pada *output* FFT di sisi penerima, akan dilakukan teknik *equalizer* pada sampel masing-masing *subcarrier* sehingga dapat mengurangi ICI dan *noise* yang disebabkan oleh frekuensi *Doppler* yang terjadi pada kanal yang berubah dengan cepat.

### 2.10.1 Zero Forcing Equalizer

Dalam sistem OFDM cara menghilangkan ICI menggunakan *equalizer* linier, dimana cara paling sederhana untuk menghilangkan ISI adalah *zero forcing equalizer*.



Gambar 2.5. Diagram *zero forcing equalizer* (Wang, 2011)

dimana

$X_k$  = sinyal input

$H_k$  = respon impuls kanal

$W_k$  = kanal AWGN

$Q_k$  = *equalizer*

Berdasarkan persamaan gambar 2.5, maka dapat diketahui

$$Y_k = (X_k H_k + W_k) Q_k = X_k H_k Q_k + W_k Q_k \quad (2.8)$$

$$Y_k - X_k = X_k H_k Q_k + W_k Q_k - X_k \quad (2.9)$$

*Zero forcing equalizer* merupakan *equalizer* paling sederhana untuk meminimalkan distorsi. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 2.5. Kinerja *zero forcing equalizer* dalam menghilangkan ISI pada sistem OFDM mendapatkan hasil yang memuaskan. Dalam bagian dari estimasi kanal, *zero forcing equalizer* dicapai dengan sinyal yang diterima dibagi dengan respons impuls kanal. Hal tersebut dapat dilihat pada Persamaan (Wang, 2011) :

$$Q_k = \frac{1}{H_k} \quad (2.10)$$

### 2.10.2 Minimum Mean Square Error (MMSE) Equalizer

MMSE *equalizer* merupakan salah satu teknik *equalizer* linear yang dapat diterapkan pada sistem OFDM. Metode yang digunakan MMSE *equalizer* adalah mencari nilai respon impuls kanal dengan cara melakukan estimasi kanal dan mengurangi *noise* yang terdapat pada sinyal secara maksimal sehingga kinerja mitigasi ICI meningkat. MMSE *equalizer* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (Chang, 2005) :

$$W = \frac{H_l^*}{|H_l|^2 + \sigma_n^2} \quad (2.11)$$

Dimana  $H_1$  adalah respon impuls kanal,  $\sigma_n^2$  adalah *variant noise*.  $(\cdot)^*$  adalah *conjugate*. Untuk mendapatkan sinyal yang diterima  $\hat{\mathbf{x}}$  dapat dilihat pada persamaan :

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W}\mathbf{y} \quad (2.12)$$

dimana

$\mathbf{y}$  = sinyal yang telah terkena respons impuls kanal dan kanal AWGN

### 2.10.3 *Least Mean Squared (LMS) Equalizer*

LMS *equalizer* adalah pendekatan yang lebih umum untuk perpaduan otomatis. Mitigasi ICI menggunakan LMS *equalizer* koefisien dilakukan secara bertahap disesuaikan untuk berkumpul ke filter yang meminimalkan kesalahan antara *equalizer* dan sinyal yang diterima. Konvergensi filter didasarkan pada perkiraan untuk perhitungan gradien dari persamaan kuadrat yang mewakili *mean square error* (Smalley, 1994).

Keunggulan *equalizer* ini adalah parameter yang akan disesuaikan merupakan langkah adaptasi ukuran. Melalui proses yang berulang-ulang, semua langkah filter disesuaikan dengan setiap periode sampel dalam urutan percobaan. Akhirnya, filter akan mencapai konfigurasi yang meminimalkan *mean square error* antara *equalizer* dan sinyal yang diterima (Smalley, 1994).

LMS *equalizer* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (Reuter, 1999) :

$$\hat{\mathbf{w}}(n+1) = \hat{\mathbf{w}}(n) + \mu \mathbf{u}(n) \mathbf{e}^*(n) \quad (2.13)$$

$\hat{\mathbf{w}}$  merupakan koefisien filter dan  $\mathbf{u}(n)$  dapat diketahui dari data yang terkena interferensi dan *noise*.  $\mathbf{e}(n)$  adalah urutan *error* yang merupakan selisih antara sinyal yang diinginkan dan sinyal keluaran dari LMS *equalizer*.  $\mathbf{e}(n)$  dapat diketahui pada persamaan sebagai berikut (Reuter, 1999) :

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.14)$$

$d(n)$  merupakan sinyal yang diinginkan dan  $y(n)$  merupakan keluaran dari LMS equalizer.  $y(n)$  dapat diketahui pada persamaan sebagai berikut (Reuter, 1999) :

$$y(n) = \hat{\mathbf{w}}(n)^H \mathbf{u}(n) \quad (2.15)$$

dimana

$(\cdot)^H = \text{Hermitian transpose}$

Nilai yang diambil merupakan antara  $e^*(n)$  dan  $\mathbf{u}(n)$  sehingga nilai yang dihasilkan kemungkinan besar akan tidak akurat. Tetapi karena melakukan penyesuaian kecil untuk koefisien filter pada setiap langkah waktu yang ditentukan oleh  $\mu$ , maka kesalahan pendekatan sesaat didapat koefisien rata-rata keluaran menjadi optimal.

Nilai  $\mu$  dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (Ip, 2008) :

$$0 < \mu < 1/\lambda_{max} \quad (2.16)$$

$$\lambda_{max} = E[\mathbf{y}_k^* \mathbf{y}_k^H] \quad (2.17)$$

dimana

$\mathbf{y}_k$  = sinyal yang terkena respon impuls kanal dan kanal AWGN

## 2.11 Variance Inflation Factors (VIF)

Untuk melihat hasil kinerja dari estimasi kanal maka digunakan *variance inflation factors* (VIF). Sebelum dilakukan estimasi menggunakan VIF terlebih dahulu harus ditentukan hasil dari *sum squared error* (SSE) dan *sum squared total error* (SST). Adapun persamaan SSE dan SST sebagai berikut (Symington, 2009) :

$$SSE_j = \sum_{i=1}^{N_j} (\bar{J} - J_i)^2 \quad (2.18)$$

$$SST_j = \sum_{i=1}^{N_j} (\bar{x} - J_i)^2 \quad (2.19)$$

$$R_j^2 = 1 - \frac{SSE_j}{SST_j} \quad (2.20)$$

dimana

$\bar{J}$  = hasil estimasi kanal

$J_i$  = respon impuls kanal

$\bar{x}$  = data yang dikirim

Setelah nilai koefisien determinasi ganda ( $R_j^2$ ) diketahui, maka nilai VIF dapat ditentukan. Jika nilai VIF semakin besar maka terdapat korelasi yang besar antara nilai estimasi kanal dan respons impuls kanal. Nilai VIF dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Putri, 2011) :

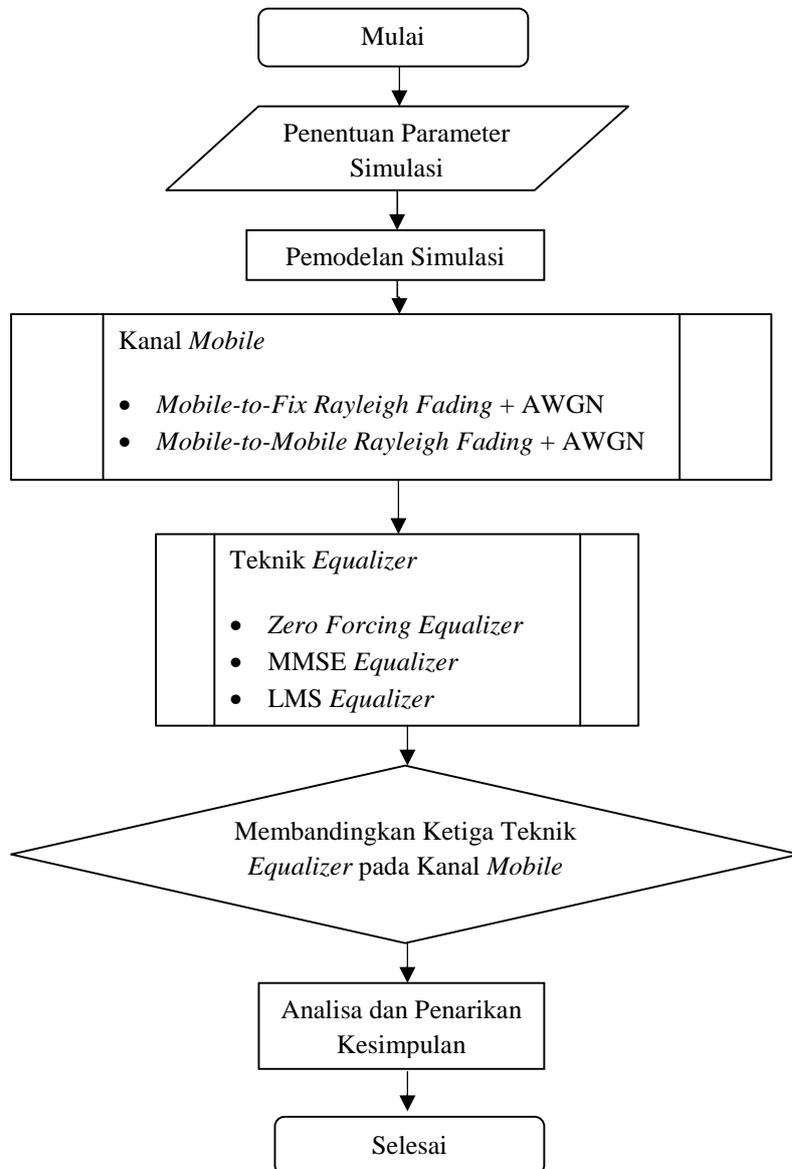
$$VIF = \frac{1}{1-R_j^2} \quad (2.21)$$

# BAB III

## METODE PENELITIAN

### 3.1 Langkah-Langkah Penelitian

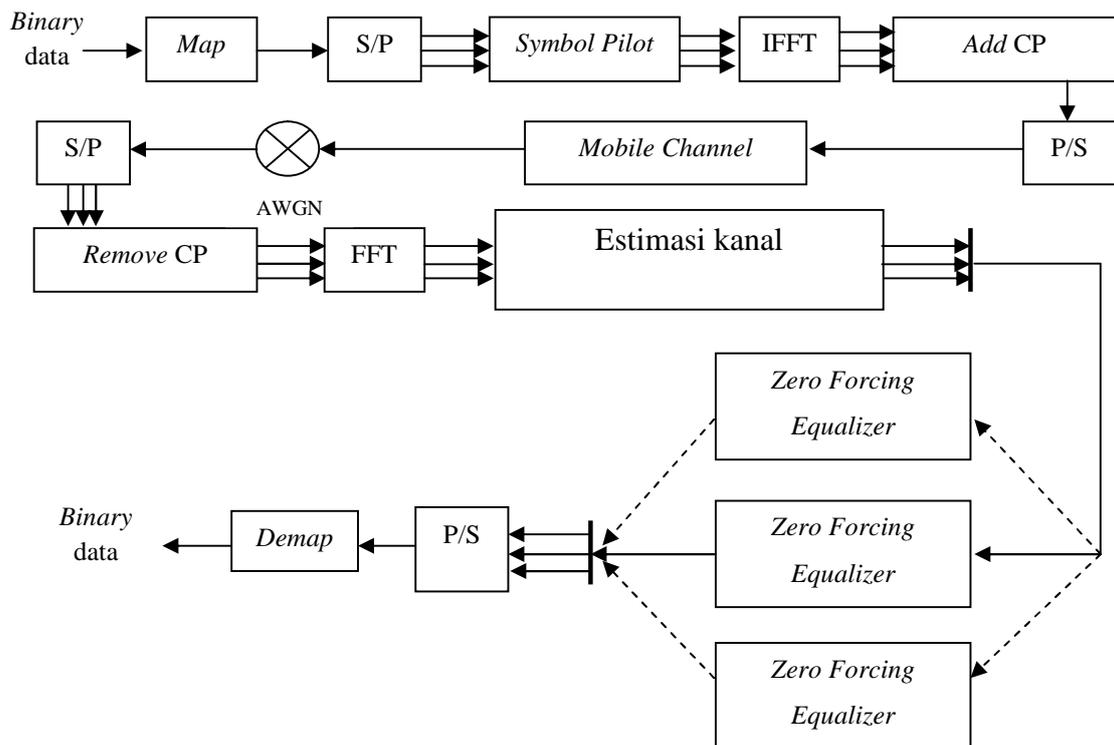
Langkah-langkah yang akan dilakukan pada penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1. langkah pertama yang akan dilakukan adalah menentukan parameter simulasi yaitu dengan cara melakukan studi literatur dan yang kedua adalah membuat pemodelan sistem OFDM yang dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.1. Langkah-langkah Penelitian

Pada penelitian ini teknik *equalizer* akan diterapkan untuk sistem OFDM pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* dan *mobile-to-mobile rayleigh fading* dengan pengaruh AWGN. Adapun sistem transmisi data menggunakan sistem OFDM dapat dilakukan dengan cara melakukan proses *mapping* pada *transmitter*, proses *mapping* adalah proses data yang berbentuk *binary* yang dimodulasikan menggunakan modulasi QPSK agar dapat diterima kanal *wireless*.

Setelah proses *mapping*, data *binary* yang telah dimodulasikan menjadi sinyal frekuensi tersebut yang berbentuk sinyal tunggal akan dibagi menjadi beberapa sinyal serial dan diubah menjadi deretan sinyal paralel. Setelah menjadi deretan data simbol maka akan dilakukan penyisipan simbol pilot agar dapat dilakukan estimasi kanal.



Gambar 3.2. Diagram blok sistem OFDM dengan menggunakan teknik *equalizer*

Seluruh simbol tersebut akan dimasukkan ke IFFT yang berfungsi untuk merepresentasikan sinyal dalam domain waktu diskrit dan domain frekuensi. Setelah proses IFFT maka *cyclic Prefix* akan menyalin bagian akhir simbol OFDM yang ditaruh di depan pada saat pengiriman sinyal OFDM. Setelah *cyclic Prefix* menambahkan simbol ke

data, maka data akan diubah kembali dari data paralel menjadi serial sebelum ditransmisikan melalui kanal *mobile* juga dipengaruhi AWGN.

Pada *receiver* data yang diterima dari kanal kembali diubah dari data serial menjadi data paralel. Lalu *cyclic Prefix* yang terdapat pada awal simbol data akan dihapus kembali sebelum masuk FFT dan akan dilakukan estimasi pada kanal. Setelah dilakukan estimasi pada kanal maka akan dilakukan proses mitigasi ICI sehingga akan didapatkan nilai yang diinginkan pada *receiver*.

Mitigasi ICI akan dilakukan menggunakan *zero forcing equalizer*, *MMSE equalizer* dan *LMS equalizer* sehingga dapat mengurangi ICI dan meminimalisasi *error* pada kanal.

### 3.2 Parameter Sistem

Dalam penelitian ini akan diterapkan teknik *equalizer* pada sistem OFDM. Adapun parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi dan menganalisis pemodelan ini adalah sebagai berikut :

1. Data masukan berupa bit informasi yang dibangkitkan secara acak sebanyak 30720 bit data.
2. Menggunakan modulasi QPSK.
3. Menggunakan susunan pilot tipe *comb*.
4. Menggunakan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* dan *mobile-to-mobile rayleigh fading*.
5. Kanal yang digunakan dipengaruhi AWGN.
6. Melakukan mitigasi ICI dengan menggunakan *zero forcing equalizer*, *MMSE equalizer* dan *LMS equalizer*.
7. Jumlah FFT yang digunakan adalah 128, *cyclic Prefix* adalah 16, *subcarrier* adalah 128 dan pilot adalah 8.

### 3.3 Bit Informasi

Bit informasi yang dibangkitkan secara acak dengan nilai 1 atau 0. Pembangkitkan bit informasi tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi *rand* dan level *threshold* pada titik 0.5 pada Matlab sehingga jika nilai acak yang dihasilkan lebih kecil

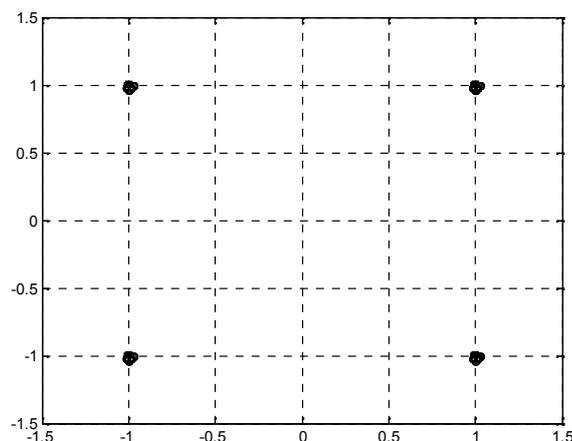
dari 0.5 akan bernilai 0 dan jika nilai acak yang dihasilkan lebih besar dari 0.5 akan bernilai 1.

Pada simulasi yang akan dilakukan menggunakan program Matlab sinyal informasi dapat dibangkitkan setelah jumlah bit informasi telah diketahui. Jumlah bit informasi yang akan digunakan dapat ditentukan dengan diketahuinya jenis modulasi yang akan digunakan serta jumlah *subcarrier* dan jumlah simbol pada setiap *subcarrier*.

Pada simulasi ini modulasi yang akan digunakan adalah modulasi QPSK dimana pada setiap 2 bit informasi dapat menjadi 1 simbol data. Jumlah *subcarrier* yang akan digunakan adalah 128 *subcarrier* dengan jumlah simbol sebanyak 120 pada setiap *subcarrier* sehingga diketahui bit informasi yang digunakan berjumlah 30720 bit informasi.

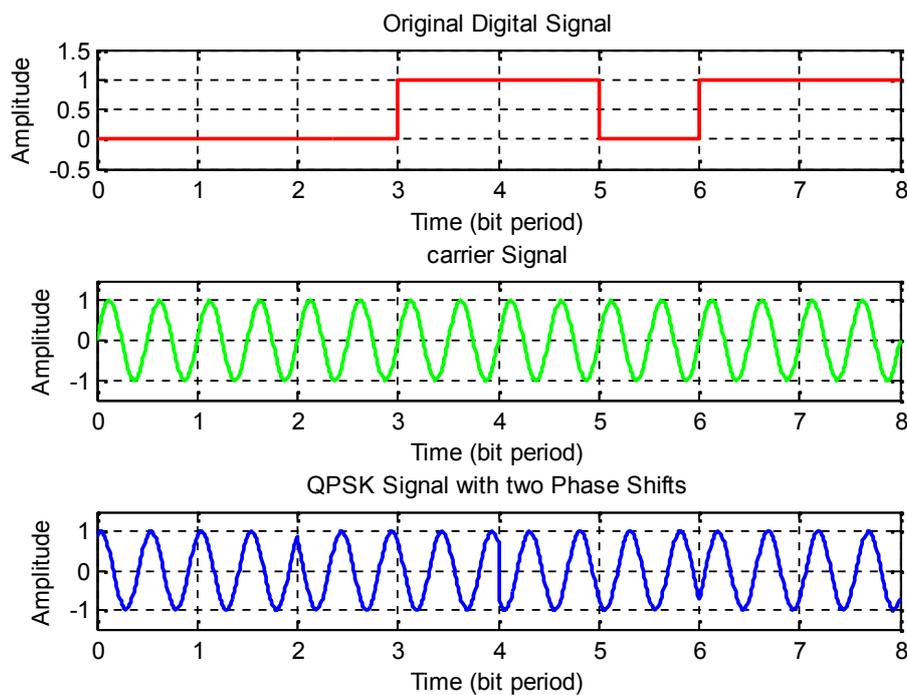
### 3.4 Proses Modulasi

Sebelum bit informasi akan dikirim, bit informasi akan dimodulasi terlebih dahulu. Modulasi yang akan digunakan pada bit informasi adalah modulasi QPSK. Modulasi QPSK terdiri dari empat *phase* keluaran yang berbeda, jadi harus ada empat kondisi masukan yang berbeda. Masukan digital ke modulator QPSK merupakan sinyal biner sehingga untuk menghasilkan empat kondisi masukan yang berbeda untuk dipakai bit masukan lebih dari 1 bit.



Gambar 3.3. Konstelasi QPSK

Sinyal yang telah dimodulasi menggunakan modulasi QPSK merupakan bilangan kompleks yang terdiri dari bilangan *real* dan *imaginer*. Sehingga keluaran dari sinyal yang telah dimodulasi dengan menggunakan modulasi QPSK ada empat kondisi yang mungkin yaitu:  $-1 -i$ ,  $-1 i$ ,  $1 -i$  dan  $1 i$ .



Gambar 3.4. Perubahan sinyal dengan menggunakan modulasi QPSK

Pada Modulasi QPSK adalah modulasi yang dapat memetakan 2 bit informasi menjadi 1 simbol data sehingga bit informasi yang berjumlah 30720 bit akan berjumlah 15360 simbol data setelah dimodulasi menggunakan modulasi QPSK.

### 3.5 Proses Serial ke Paralel

Sistem OFDM yang melakukan transmisi data menggunakan sistem transmisi data menggunakan beberapa *subcarrier*. Data yang semula terdiri dari sinyal tunggal dibagi menjadi beberapa sinyal serial sehingga dapat dikonversikan menjadi deretan sinyal paralel.

Proses serial ke paralel dapat dilakukan setelah bit informasi dimodulasi menjadi simbol data. Simbol data yang berjumlah 15360 tersebut akan diubah menjadi paralel

berdasarkan jumlah *subcarrier* yang akan digunakan. Jumlah *subcarrier* yang akan digunakan berjumlah 128 *subcarrier* sehingga jumlah simbol data pada setiap *subcarrier* adalah 120 simbol data.

Berdasarkan simbol data dan jumlah *subcarrier* yang akan digunakan maka dapat dilakukan proses serial ke paralel pada sinyal. Pada simulasi ini proses perubahan serial ke paralel dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi *reshape* pada Matlab.

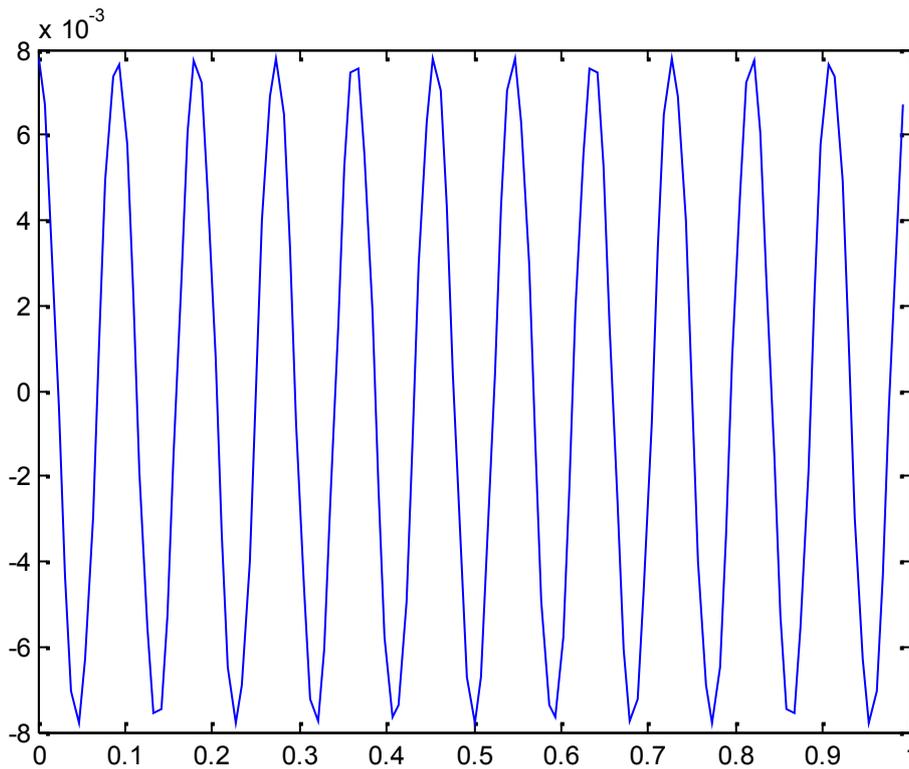
### **3.6 Penyisipan Pilot**

Sebelum *transmitter* mengirim data pada informasi tersebut dimasukkan simbol pilot agar *reciever* bisa mendapatkan informasi tentang kanal menggunakan simbol yang diterima. Pada penelitian ini akan digunakan penyisipan pilot menggunakan tipe pilot *comb* yang melakukan proses pada domain frekuensi. Simbol pilot yang akan digunakan dapat dibangkitkan dengan menggunakan fungsi *ones* pada Matlab sehingga nilai dari simbol pilot adalah 1.

Setelah simbol pilot dibangkitkan maka simbol pilot akan dimasukkan ke *subcarrier* tertentu pada simbol OFDM. Adapun cara menentukan letak simbol pilot dapat diketahui berdasarkan jumlah simbol pilot dan jumlah *subcarrier*. Simbol pilot yang akan disisipkan pada setiap *subcarrier* berjumlah 8 simbol pilot. Sehingga jika simbol data pada setiap *subcarrier* yang berjumlah 120 maka *interval* frekuensi untuk tiap penyisipan adalah 15.

### **3.7 Proses Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)**

Proses IFFT menggunakan suatu algoritma yang digunakan untuk merepresentasikan sinyal dalam domain waktu diskrit dan domain frekuensi. Pada sistem OFDM proses IFFT sangat penting karena berfungsi untuk menjaga orthogonalitas pada setiap *subcarrier* agar tidak terjadi interferensi pada *subchannel* yang saling *overlapping*. Pada simulasi proses IFFT dapat dilakukan menggunakan fungsi *ifft* pada Matlab.



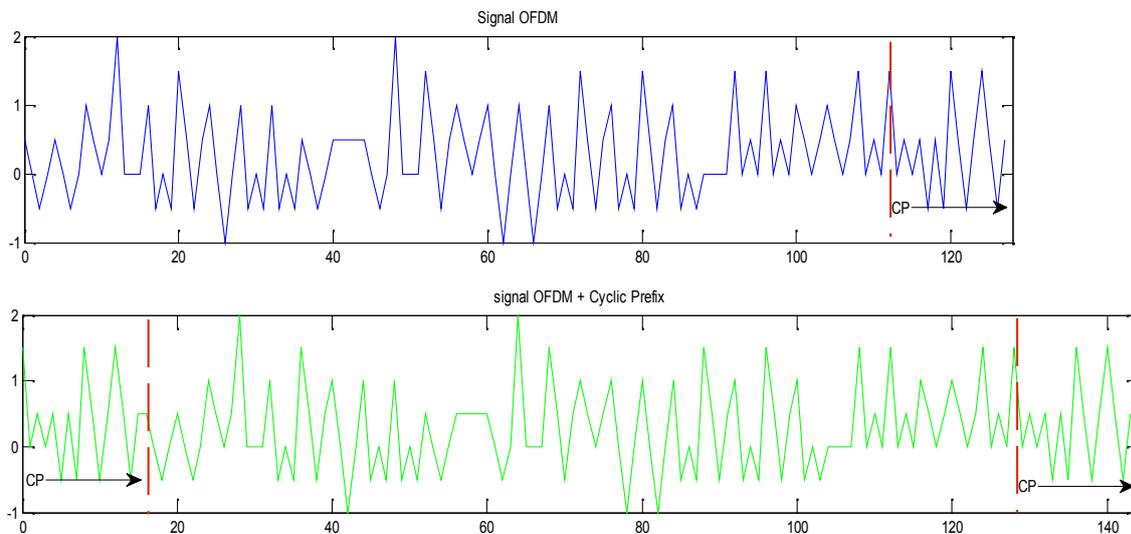
Ga

mbar 3.5. Sinyal keluaran IFFT

### 3.8 Cyclic Prefix

Sinyal yang saling *orthogonal* pada sistem OFDM akan menyebabkan terjadinya ICI sehingga diperlukan penambahan *cyclic prefix* pada setiap sinyal *subcarrier*. *Cyclic Prefix* adalah salinan bagian akhir dari simbol OFDM dan ditambahkan pada awal simbol OFDM. Jumlah *cyclic prefix* yang akan digunakan adalah  $\frac{1}{8}$  dari jumlah simbol OFDM pada setiap *subcarrier*. Jumlah simbol OFDM pada setiap *subcarrier* berjumlah 128 sehingga jumlah *cyclic prefix* adalah 16.

Setelah diketahui jumlah *cyclic prefix* yang akan digunakan maka akan dilakukan penyalinan pada simbol OFDM pada setiap *subcarrier*. Simbol OFDM yang akan disalin adalah 16 simbol OFDM terakhir dan akan diletakkan pada awal simbol OFDM sehingga simbol OFDM yang berjumlah 128 akan berjumlah 144 setelah ditambahkan *cyclic Prefix*. Proses *cyclic prefix* dapat dilihat pada gambar 3.6.



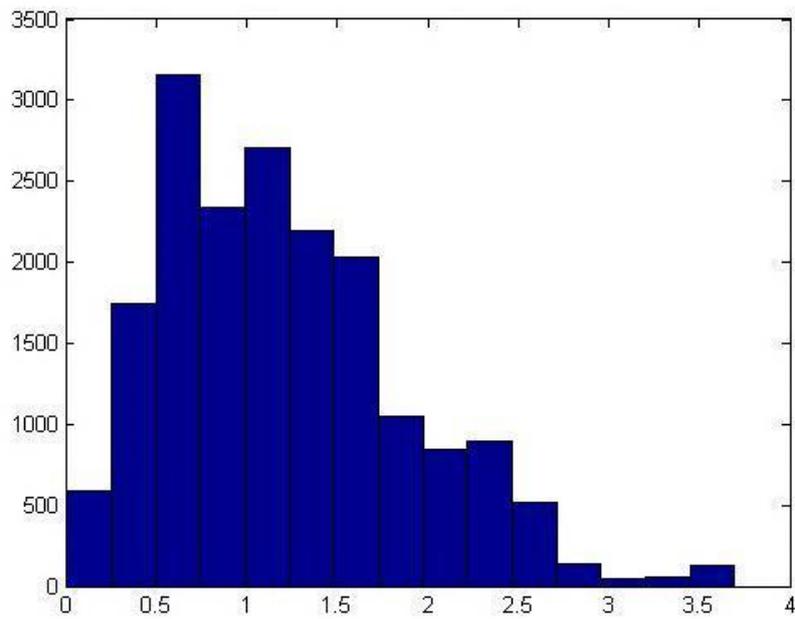
Gambar 3.6. Penambahan simbol *cyclic prefix* pada simbol OFDM

### 3.9 Proses Paralel ke Serial

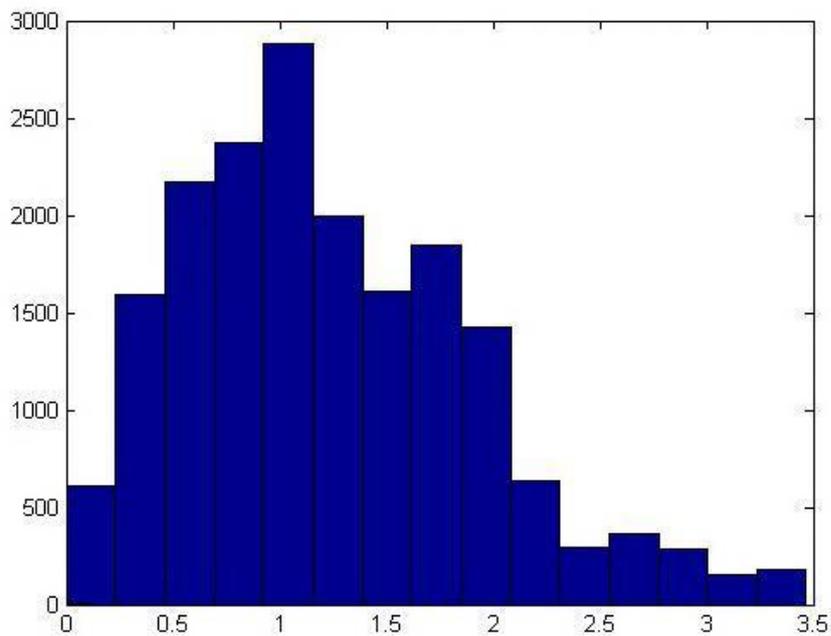
Setelah melakukan penyisipan simbol pilot dan penambahan *cyclic prefix* pada sinyal paralel maka sinyal tersebut akan dikirimkan oleh *transmitter*. Namun sinyal yang akan dikirim tersebut harus berbentuk sinyal tunggal sehingga pada sistem OFDM yang terdiri dari deretan sinyal paralel akan dilakukan konversi paralel ke serial. Pada simulasi ini proses perubahan paralel ke serial dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi *reshape* pada Matlab.

### 3.10 Pemodelan Kanal Transmisi

Dalam sistem transmisi data dari *transmitter* ke *reciever* digunakan media berupa kanal transmisi. Kanal yang digunakan adalah kanal *wireless* yang rentan terhadap perubahan sinyal yang diakibatkan dari penghamburan, pantulan dan sebagainya sehingga pada sistem transmisi kanal *wireless* terdapat berbagai model kanal. Adapun model kanal yang digunakan pada penelitian ini adalah kanal *mobile* yaitu kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*.



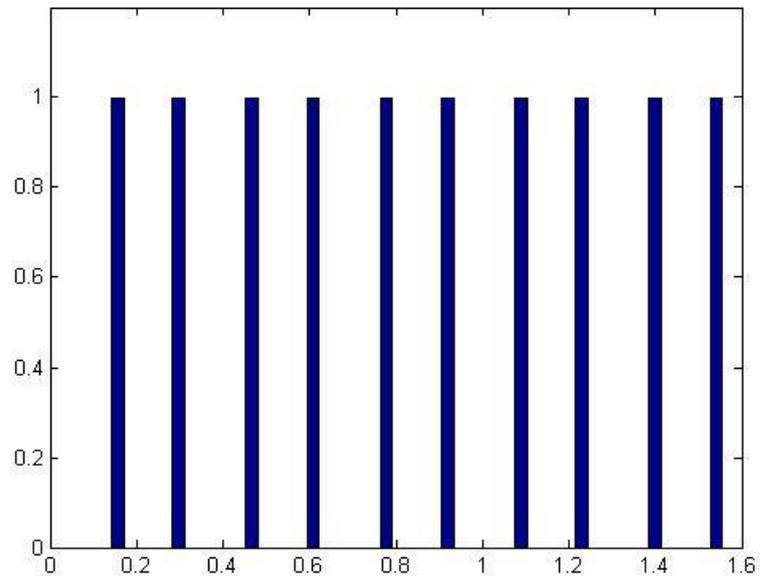
Gambar 3.7. Histogram kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*



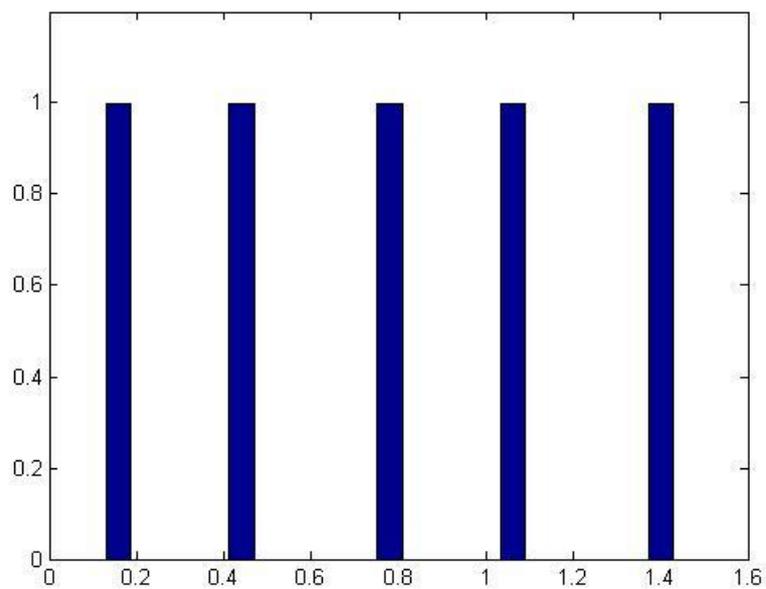
Gambar 3.8. Histogram kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*

Pada sinyal yang ditransmisikan menggunakan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* yang mana pada kanal tersebut efek *Doppler* hanya pada *transmitter*. Sedangkan sinyal

ditransmisikan menggunakan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* yang mana pada kanal tersebut efek *Doppler* hanya pada *transmitter* dan *reciever*.

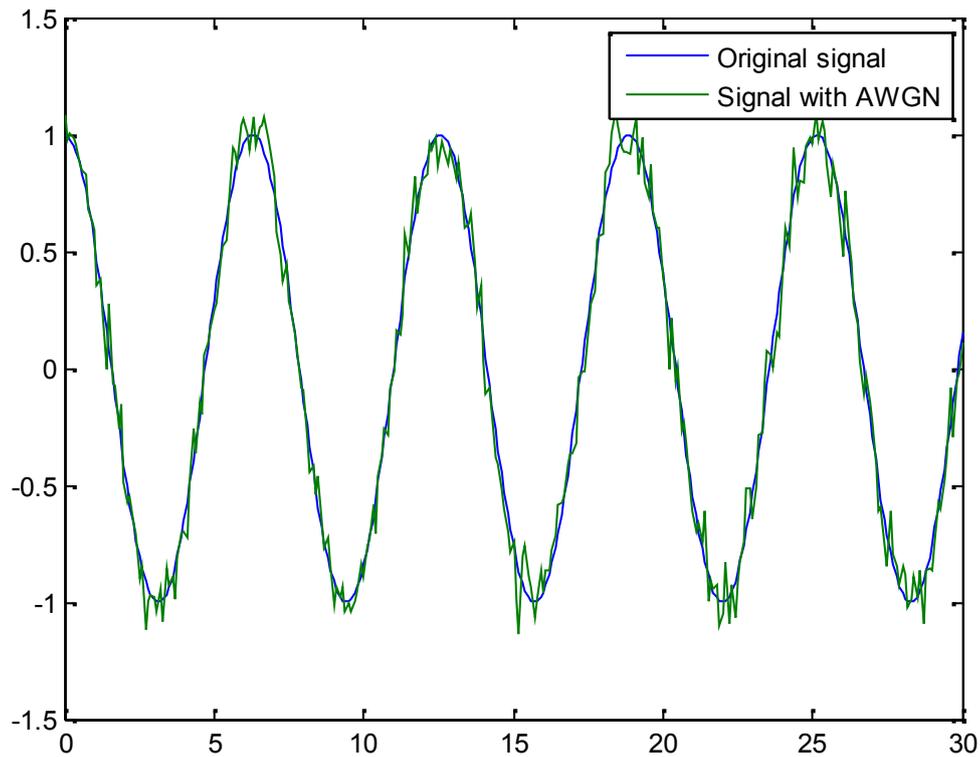


Gambar 3.9. Histogram  $\alpha_n$  dari kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*



Gambar 3.10. Histogram  $\beta_n$  dari kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*

$\alpha_n$  merupakan sudut gelombang yang terdapat pada kanal pengirim yang terdapat pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*. sedangkan  $\beta_n$  adalah sudut gelombang pada kanal penerima yang terdapat pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*.



Gambar 3.11. Model kanal AWGN

Selain kanal *mobile*, sinyal yang dikirim juga akan dipengaruhi *noise* yang timbul sebagai akibat dari *thermal noise* dari *transmitter* ke *reciever*. *Noise* yang menyertai sinyal pada sisi penerima dapat didekati dengan model matematis statistik AWGN yang merupakan gangguan yang bersifat *additive* terhadap sinyal transmisi.

Kanal AWGN merupakan model kanal sederhana dan umum digunakan dalam suatu sistem komunikasi. Gambar 3.11 memperlihatkan pengaruh dari AWGN pada ketika sinyal informasi ketika dikirimkan melalui kanal transmisi.

### 3.11 Estimasi Kanal

Data yang ditransmisikan pada kanal berbentuk pilot sehingga dapat dilakukan teknik interpolasi untuk estimasi kanal. Pada penelitian ini interpolasi yang dapat dilakukan menggunakan fungsi *interp1* pada Matlab. Adapun interpolasi yang akan digunakan adalah interpolasi *spline*.

Nilai estimasi kanal menggunakan interpolasi tersebut akan diterapkan pada *zero forcing equalizer* dan *MMSE equalizer* ketika melakukan mitigasi ICI.

### 3.12 Teknik Equalizer

Fungsi dari teknik *equalizer* adalah sebagai penyeimbang karakteristik kanal. Pada *receiver* akan dilakukan teknik *equalizer* pada sampel masing-masing *subcarrier* sehingga dapat mengurangi ICI dan *noise* yang disebabkan oleh frekuensi *Doppler* yang terjadi pada kanal yang berubah dengan cepat. Teknik *equalizer* yang akan digunakan adalah *zero forcing equalizer*, *MMSE equalizer* dan *LMS equalizer*.

#### 3.12.1 Zero Forcing Equalizer

Dalam sistem OFDM cara menghilangkan ICI menggunakan *equalizer* linier, dimana cara paling sederhana untuk menghilangkan ISI adalah *zero forcing equalizer*. Pada penelitian ini *zero forcing equalizer* dapat dilakukan setelah nilai estimasi kanal telah diketahui. Hasil mitigasi ICI menggunakan *zero forcing equalizer* dapat dilakukan dengan cara membagi nilai sinyal yang diterima dengan estimasi kanal.

#### 3.12.2 Minimum Mean Square Error (MMSE) Equalizer

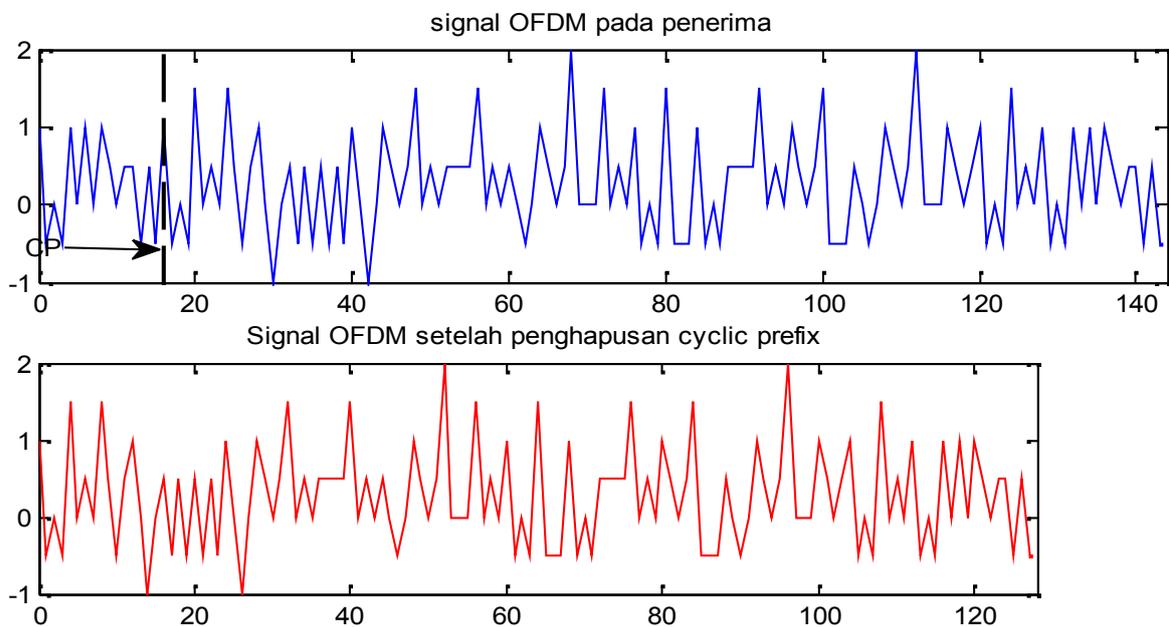
Kinerja Mitigasi ICI menggunakan *MMSE equalizer* adalah melakukan estimasi pada kanal dan mengurangi *noise* yang terdapat pada *receiver* secara maksimal sehingga mitigasi ICI dapat ditingkatkan. Hasil mitigasi ICI menggunakan *MMSE equalizer* dapat dilakukan dengan cara mengalikan nilai sinyal yang diterima dengan nilai *MMSE equalizer*.

### 3.12.3 Least Mean Squared (LMS) Equalizer

LMS *equalizer* adalah pendekatan yang lebih umum untuk perpaduan otomatis. Pada mitigasi ICI menggunakan LMS *equalizer* koefisien dilakukan secara bertahap disesuaikan untuk berkumpul ke filter yang meminimalkan kesalahan antara *equalizer* dan sinyal yang diterima. Pada simulasi yang akan digunakan koefisien filter adalah 3 dan sinyal yang diinginkan diasumsikan telah diketahui sedangkan pada implementasi yang sebenarnya adalah nilai tersebut diketahui dari penerapan mitigasi ICI sebelumnya secara berulang-ulang sehingga didapat nilai yang diinginkan.

### 3.13 Menghapus *Cyclic Prefix*

Setelah data telah diterima oleh *receiver* maka sinyal *cyclic prefix* yang berfungsi sebagai *guard interval* akan dipisahkan dan dihapus dari sinyal sebenarnya sehingga data informasi yang sebenarnya dapat diperoleh. Sebelum dilakukan penghapusan *cyclic prefix* terlebih dahulu sinyal yang berbentuk serial harus dikonversikan terlebih dahulu menjadi deretan sinyal paralel.



Gambar 3.12. Pelepasan *cyclic prefix*

Setelah sinyal OFDM menjadi sinyal deretan paralel maka *cyclic prefix* sinyal yang terdapat pada awal simbol OFDM pada setiap *subcarrier* dapat dihapus. Sehingga jumlah

simbol pada setiap *subcarrier* yang berjumlah 144 sewaktu ditambahkan *cyclic prefix* akan berjumlah 128 setelah penghapusan *cyclic prefix*.

### 3.14 Proses *Fast Fourier Transform* (FFT)

Setelah dilakukan penghapusan *cyclic prefix* maka akan dilakukan proses FFT yang berfungsi untuk memisahkan kembali data informasi dengan sinyal *carrier*. Proses tersebut bisa juga disebut dengan proses demodulasi *multicarrier* dan merupakan berkebalikan dari proses IFFT. Dalam simulasi proses FFT dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi *fft* pada Matlab.

### 3.15 Perhitungan BER vs Eb/No dengan $F_d$ yang Bervariasi

Perhitungan BER dapat dilakukan dengan cara membandingkan deretan bit pada bagian pengirim dengan deretan bit pada penerima yang mana pada metode ini disebut metode *monte carlo*. Sedangkan Eb/No merupakan perbandingan antar level daya pada *reciever* dengan tingkat daya *noise*.

Pada penelitian ini  $F_d$  yang digunakan merupakan frekuensi *Doppler* ( $F_d$ ) yang ternormalisasi yang digunakan pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*. Pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*  $F_d$  terjadi pada *transmitter* dan *reciever*. Adapun perhitungan  $F_d$  total diperoleh dengan cara

$$F_{d1} = \frac{F_d}{1+\alpha} \quad (3.1)$$

$$F_{d2} = F_d - F_{d1} \quad (3.2)$$

dimana

$F_{d1} = F_d$  yang terdapat pada Tx

$F_{d2} = F_d$  yang terdapat pada Rx

$F_d = F_d$  total pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*

ketika  $\alpha = 0,5$  maka  $F_{d1} > F_{d2}$ , ketika  $\alpha = 1$  maka  $F_{d1} = F_{d2}$  dan  $\alpha = 1,5$  maka  $F_{d1} < F_{d2}$ .

## BAB IV

### HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

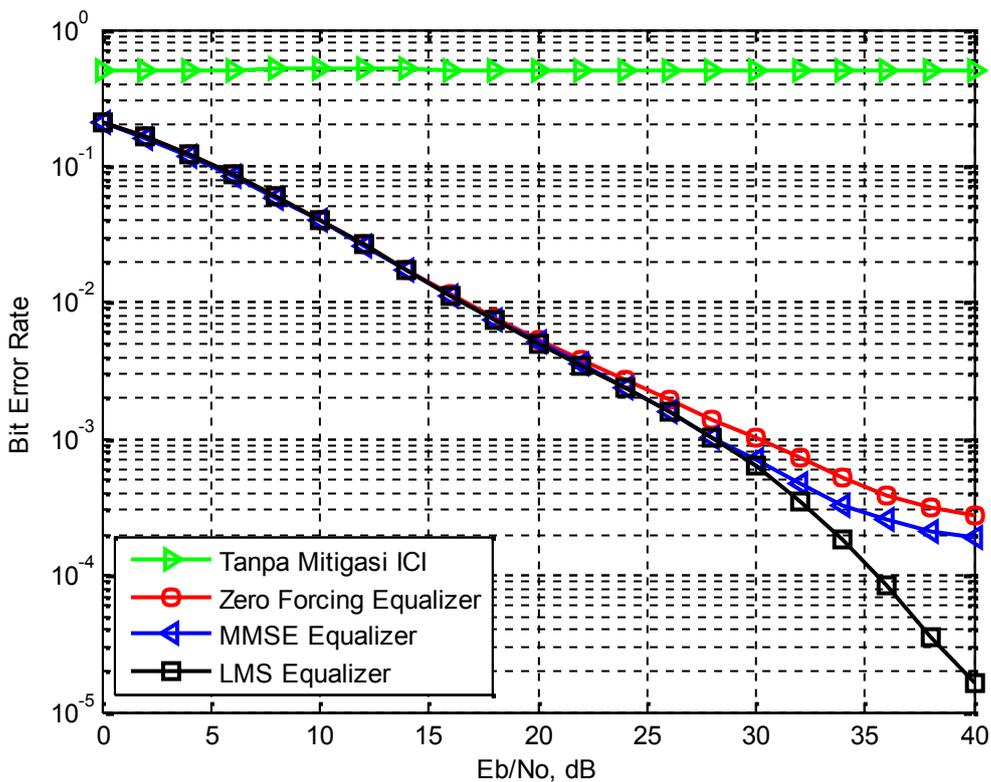
Pada penelitian ini simulasi dilakukan dengan menggunakan bahasa pemrograman Matlab dengan iterasi sebanyak 30 kali. Simulasi dilakukan agar unjuk kerja dari estimasi kanal dan mitigasi ICI dapat terlihat. Estimasi kanal dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi interpolasi pada Matlab. Mitigasi ICI yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan menggunakan *zero forcing equalizer*, *MMSE equalizer* dan *LMS equalizer*.

Simulasi yang akan dilakukan menggunakan kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*. *Scatter* yang digunakan pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* berjumlah  $N = M = 10$  dengan model kanal *double ring scatter* dan diasumsikan NLOS. Simulasi ini juga menggunakan frekuensi *Doppler* ternormalisasi yang bervariasi agar pengaruh *Doppler spread* dan ICI dapat terlihat pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*. Pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* frekuensi *Doppler* merupakan penjumlahan dari frekuensi *Doppler* pada *transmitter* yang disebut  $F_{d1}$  dan frekuensi *Doppler* pada *receiver* disebut  $F_{d2}$ . Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh perubahan yang disebabkan pada  $F_{d1}$  dan  $F_{d2}$  maka akan dilakukan simulasi ketika  $F_{d1} \neq F_{d2}$ .

Untuk melihat unjuk kerja estimasi kanal akan dilakukan dengan melihat pengaruh perubahan nilai VIF dengan frekuensi *Doppler* yang bervariasi. Sementara untuk melihat kinerja dari mitigasi ICI akan dilakukan dengan membandingkan BER dengan Eb/No.

#### **4.1 Teknik Equalizer Pada Kanal Mobile-to-Mobile Rayleigh Fading dan Mobile-To-Fix Rayleigh Fading**

Pada sinyal penerima yang melewati kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan *mobile-to-fix rayleigh fading* akan terkena ICI dan *noise* sehingga dibutuhkan mitigasi ICI yang dapat meminimalkan ICI pada sinyal. Mitigasi ICI yang akan digunakan adalah *zero forcing equalizer*, *MMSE equalizer* dan *LMS equalizer*.



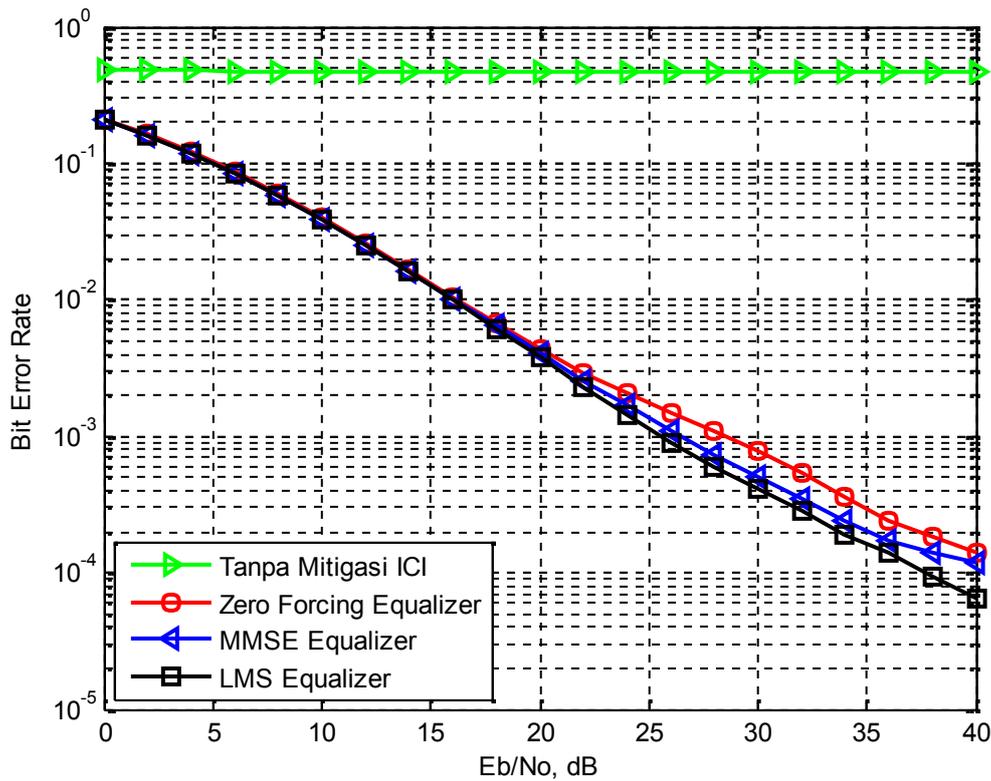
Ga

mbar 4.1. Grafik teknik *equalizer* pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*

Gambar 4.1 memperlihatkan mitigasi ICI yang dilakukan pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* dengan frekuensi *Doppler* ternormalisasi sebesar **0.05** menggunakan *zero forcing equalizer*, *MMSE equalizer* dan *LMS equalizer*. Pada gambar 4.1 dapat dilihat *LMS equalizer* memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan *MMSE equalizer* dan *zero forcing equalizer*.

Pada *LMS equalizer* nilai BER  $10^{-4}$  dapat dicapai dengan Eb/No 36dB. *MMSE equalizer* juga terlihat lebih baik dibandingkan dengan *zero forcing equalizer*. Hal tersebut dapat dilihat pada BER  $10^{-3}$  *MMSE equalizer* hanya membutuhkan Eb/No sebesar 28dB sedangkan *zero forcing equalizer* membutuhkan Eb/No sekitar 30dB.

Gambar 4.2 memperlihatkan mitigasi ICI yang dilakukan pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dengan frekuensi *Doppler* ternormalisasi sebesar **0.05** menggunakan teknik *equalizer*. Pada gambar 4.2 dapat dilihat *LMS equalizer* memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan *MMSE equalizer* dan *zero forcing equalizer*.



Gambar 4.2. Grafik teknik *equalizer* pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*

Pada LMS *equalizer* nilai BER  $10^{-4}$  dapat dicapai dengan Eb/No 38dB. Kinerja MMSE *equalizer* juga terlihat lebih baik dibandingkan dengan *zero forcing equalizer*. Hal tersebut dapat dilihat pada BER  $10^{-3}$  MMSE *equalizer* hanya membutuhkan Eb/No sebesar 26dB sedangkan *zero forcing equalizer* membutuhkan Eb/No sekitar 28dB.

Pada gambar 4.1 dan gambar 4.2 dapat dilihat dengan menggunakan *zero forcing equalizer*, MMSE *equalizer* dan LMS *equalizer* mitigasi ICI dapat dilakukan sehingga *error* dan ICI yang terjadi dapat dikurangi.

#### 4.2 Unjuk Kerja Estimasi pada Kanal *Mobile-to-Fix Rayleigh Fading*

Untuk melihat seberapa besar selisih yang terjadi antara hasil estimasi kanal dan nilai sebenarnya pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* maka akan digunakan VIF. Perbandingan antara frekuensi *Doppler* yang bervariasi dengan VIF pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan nilai VIF pada frekuensi *Doppler* yang bervariasi pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*

| $F_d$ | VIF <i>Spline</i> |
|-------|-------------------|
| 0.05  | 1707.1            |
| 0.10  | 669.12            |
| 0.15  | 252.58            |
| 0.20  | 137.51            |
| 0.25  | 76.760            |
| 0.30  | 50.166            |

Pada simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada tabel 4.1 dapat disimpulkan besarnya nilai VIF pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* berpengaruh pada besarnya frekuensi *Doppler* yang terdapat pada kanal dan teknik interpolasi yang digunakan.

#### 4.3 Unjuk Kerja Estimasi pada Kanal *Mobile-to-Mobile Rayleigh Fading*

Untuk melihat seberapa besar selisih yang terjadi antara hasil estimasi kanal dan nilai sebenarnya pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* maka akan digunakan VIF. Perbandingan antara frekuensi *Doppler* yang bervariasi dengan VIF pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan nilai VIF pada frekuensi *Doppler* yang bervariasi pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*

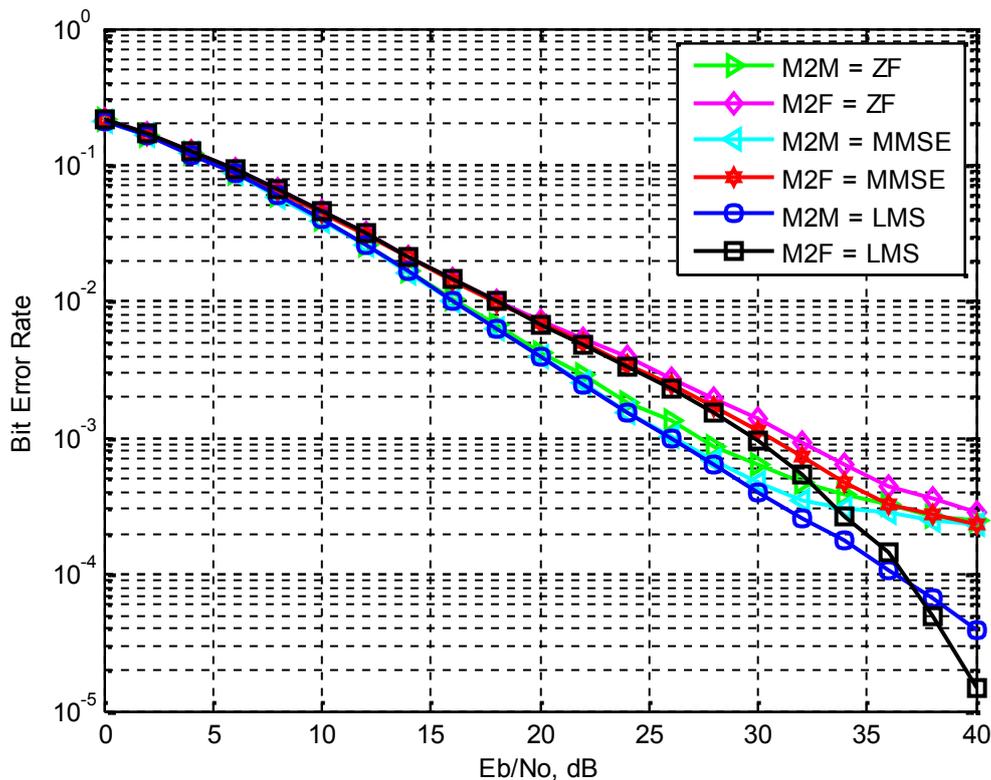
| $F_d$ | VIF <i>Spline</i> |
|-------|-------------------|
| 0.05  | 2696.1            |
| 0.10  | 685.73            |
| 0.15  | 234.68            |
| 0.20  | 131.06            |
| 0.25  | 90.916            |
| 0.30  | 67.209            |

Pada simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada tabel 4.2 dapat disimpulkan besarnya nilai VIF pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* berpengaruh pada

besarnya frekuensi *Doppler* yang terdapat pada kanal dan teknik interpolasi yang digunakan.

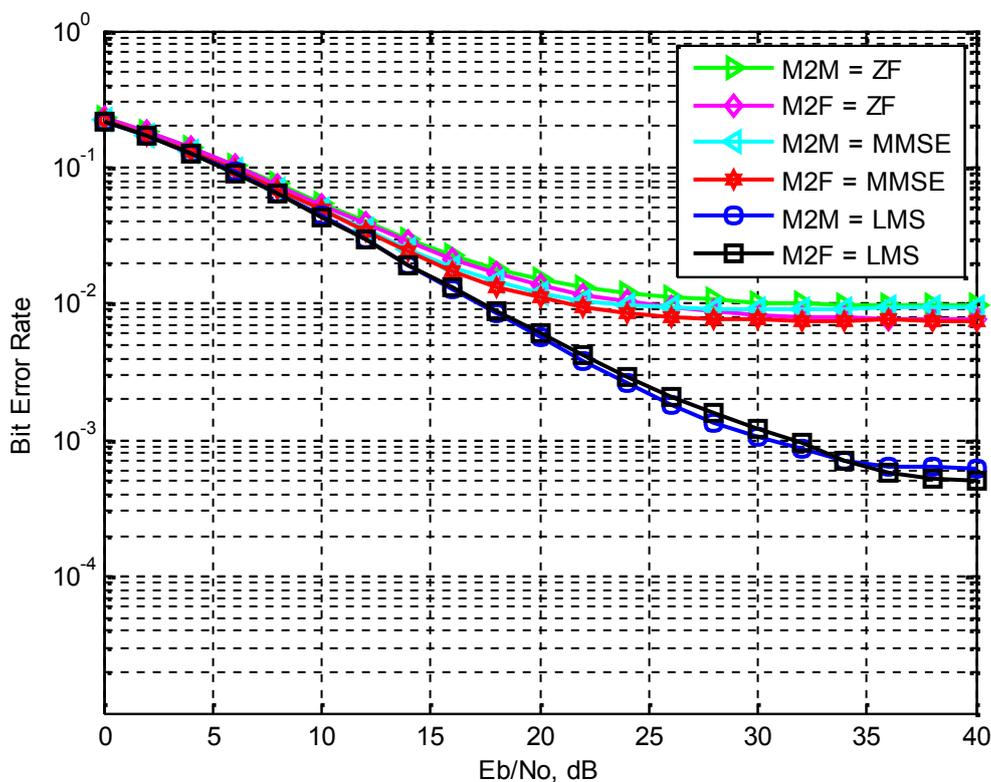
#### 4.4 Perbandingan Teknik *Equalizer* Pada Kanal *Mobile-To-Mobile Rayleigh Fading* dan *Mobile-To-Fix Rayleigh Fading*

Perbandingan mitigasi ICI pada kanal *mobile* yang berbeda dapat dilihat dengan melakukan mitigasi ICI pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan *mobile-to-fix rayleigh fading* yang terkena ICI dan *noise* menggunakan *zero forcing equalizer*, MMSE *equalizer* dan LMS *equalizer*. Perbandingan akan dilakukan pada frekuensi *Doppler* ternormalisasi sebesar **0.05** dan frekuensi *Doppler* ternormalisasi sebesar **0.25** agar dapat diketahui pengaruh mitigasi ICI pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* ketika frekuensi *Doppler* bernilai kecil dan ketika frekuensi *Doppler* bernilai besar.



Gambar 4.3. Grafik teknik *equalizer* pada kanal *mobile* ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi sebesar **0.05**

Gambar 4.3 memperlihatkan dilihat mitigasi ICI pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi sebesar **0.05** menggunakan *zero forcing equalizer* dan *MMSE equalizer* memiliki kinerja lebih baik dibandingkan pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*. Berbeda dengan *zero forcing equalizer* dan *MMSE equalizer*, ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi sebesar **0.05** kinerja mitigasi ICI menggunakan *LMS equalizer* pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* memiliki kinerja lebih baik dibandingkan pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*.



Gambar 4.4. Grafik teknik *equalizer* pada kanal *mobile* ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi sebesar **0.25**

Pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*, ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi sebesar **0.05** nilai BER  $10^{-3}$  dapat dicapai dengan  $E_b/N_0$  28dB menggunakan *zero forcing equalizer* dan  $E_b/N_0$  26dB menggunakan *MMSE equalizer*. Sedangkan pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* mitigasi ICI nilai BER  $10^{-3}$  dapat dicapai dengan  $E_b/N_0$  32dB menggunakan *zero forcing equalizer* dan  $E_b/N_0$  30dB

menggunakan MMSE *equalizer*. Ketika menggunakan LMS *equalizer* pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* didapat nilai yang hampir mencapai BER  $10^{-5}$ .

Gambar 4.4 memperlihatkan mitigasi ICI pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi sebesar **0.25** menggunakan *zero forcing equalizer*, MMSE *equalizer* dan LMS *equalizer* memiliki kinerja lebih baik dibandingkan pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*.

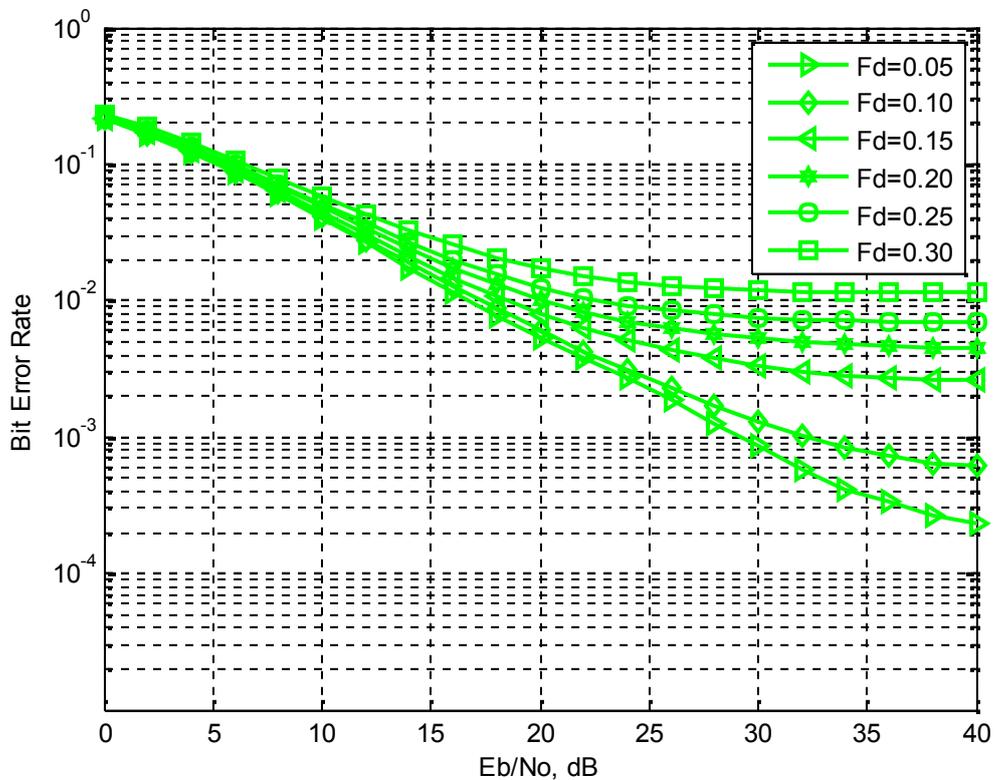
Pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* mitigasi ICI nilai BER  $10^{-2}$  dapat dicapai dengan Eb/No 22dB menggunakan *zero forcing equalizer* dan Eb/No 20dB menggunakan MMSE *equalizer*. Sedangkan pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* mitigasi ICI nilai BER  $10^{-2}$  dapat dicapai dengan Eb/No 30dB menggunakan *zero forcing equalizer* dan Eb/No 24dB menggunakan MMSE *equalizer*. Ketika menggunakan LMS *equalizer* dapat dilihat pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* didapat nilai yang mendekati nilai BER  $10^{-4}$  dibandingkan pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*.

#### **4.5 Unjuk Kerja Mitigasi ICI pada Kanal Mobile-to-Fix Rayleigh Fading**

Unjuk kerja mitigasi ICI pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* dapat dilihat dengan membandingkan antara nilai BER dengan Eb/No dengan menggunakan frekuensi *Doppler* ternormalisasi yang bervariasi dari 0.05 sampai 0.30.

Dari simulasi yang telah dilakukan seperti gambar 4.5 mitigasi ICI dilakukan menggunakan *zero forcing equalizer* untuk mendapatkan BER  $10^{-3}$  diperlukan Eb/No sebesar 29dB ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.05** dan Eb/No sebesar 32dB ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.10**. Pada simulasi ini juga dapat dilihat BER  $10^{-2}$  tidak dapat dicapai ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.30**.

Pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* mitigasi ICI sangat dipengaruhi oleh besarnya pengaruh dari frekuensi *Doppler* yang terdapat pada kanal. Namun dengan adanya *zero forcing equalizer* mitigasi ICI dapat ditingkatkan. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.5 ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.25** didapatkan BER  $10^{-2}$  dengan Eb/No 22dB.



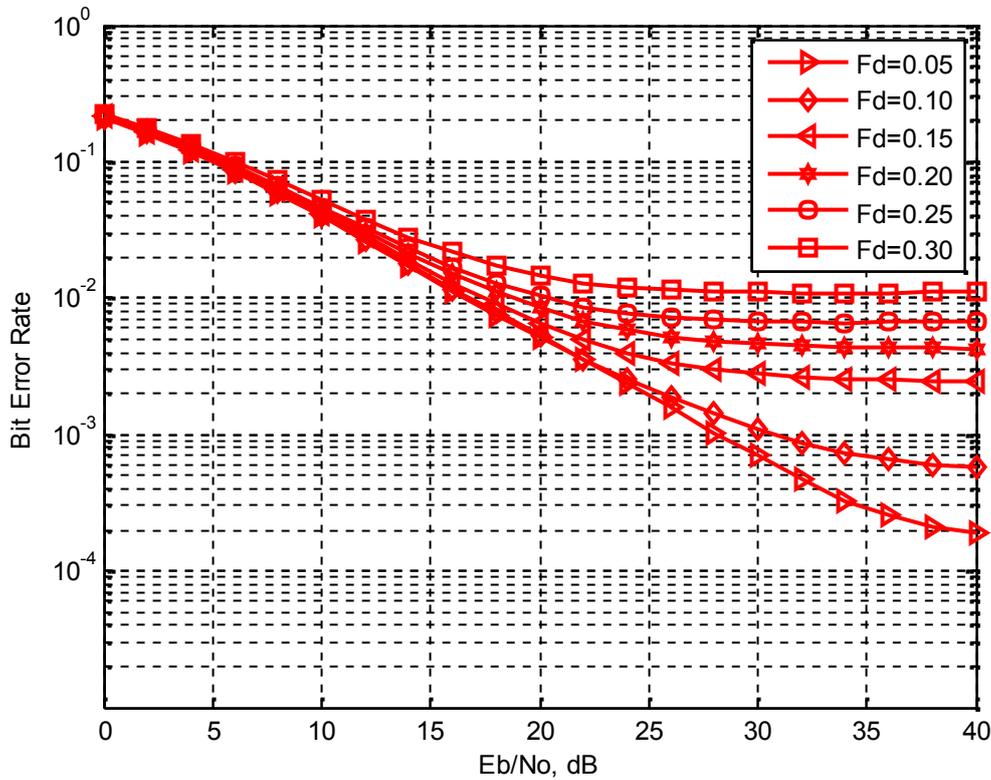
Ga

mbar 4.5. Grafik perbandingan BER dengan Eb/No pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* menggunakan *zero forcing equalizer*

Selain menggunakan *zero forcing equalizer* juga akan dilakukan mitigasi ICI menggunakan *MMSE equalizer*. Perbedaan antara *zero forcing equalizer* dengan *MMSE equalizer* yaitu diperhitungkannya faktor *noise* pada *MMSE equalizer* sehingga mitigasi ICI yang dilakukan menjadi semakin baik seperti pada gambar 4.6.

Dari simulasi yang telah dilakukan seperti gambar 4.6 mitigasi ICI dilakukan menggunakan *MMSE equalizer* untuk mendapatkan BER  $10^{-3}$  diperlukan Eb/No sebesar sekitar 28dB ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.05 dan 30dB untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.10. Sedangkan ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.30 tidak mampu mencapai BER  $10^{-2}$ .

Pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* kinerja mitigasi ICI menggunakan MMSE *equalizer* mengalami peningkatan. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.6 ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.25** didapatkan BER  $10^{-2}$  dengan  $E_b/N_0$  20dB.

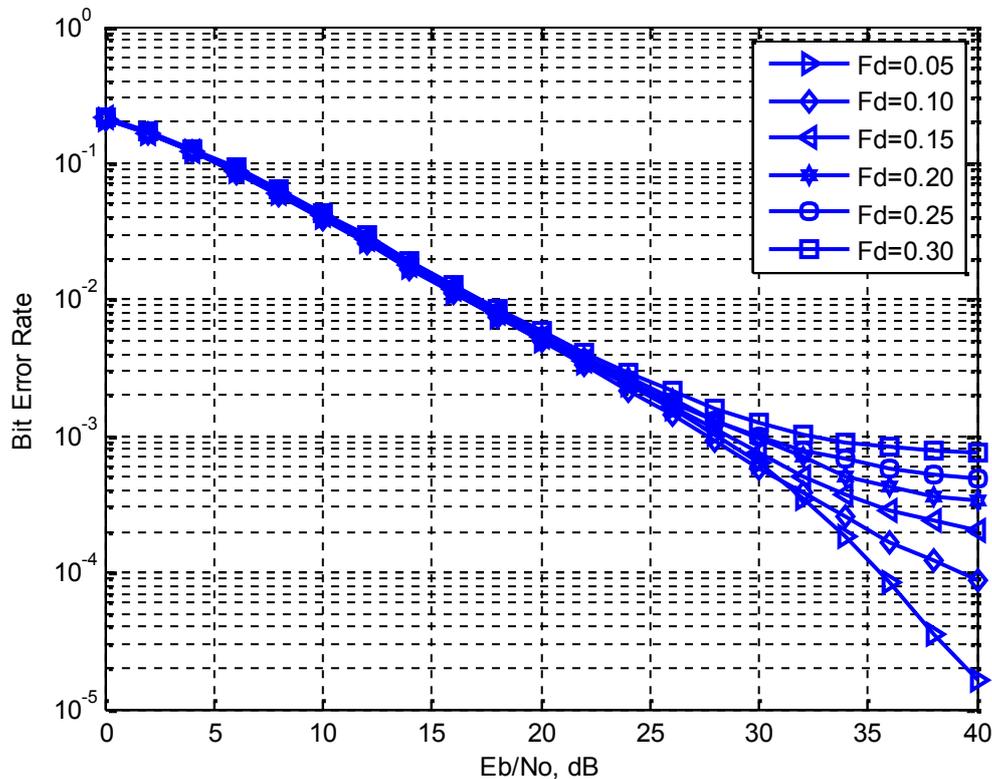


Gambar 4.6. Grafik perbandingan BER dengan  $E_b/N_0$  pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* menggunakan MMSE *equalizer*

Setelah menggunakan *zero forcing equalizer* dan MMSE *equalizer*, mitigasi ICI juga akan dilakukan menggunakan LMS *equalizer*. Perbedaan antara LMS *equalizer* dengan *zero forcing equalizer* dan MMSE *equalizer* adalah koefisien dilakukan secara bertahap disesuaikan untuk berkumpul ke filter yang meminimalkan kesalahan antara *equalizer* dan sinyal yang diterima. Melalui proses yang berulang-ulang, semua langkah filter disesuaikan dengan setiap periode sampel dalam urutan percobaan sehingga mitigasi ICI yang dilakukan menjadi semakin baik seperti pada gambar 4.7.

Dari simulasi yang telah dilakukan seperti gambar 4.7 menunjukkan perbandingan BER dengan  $E_b/N_0$  menggunakan LMS *equalizer* pada kanal *mobile-to-fix rayleigh*

*fading*. Pada gambar 4.7 terlihat untuk mendapatkan nilai BER  $10^{-4}$  diperlukan Eb/No sebesar 36dB ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.05 dan 39dB ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.10.



Gambar 4.7. Grafik perbandingan BER dengan Eb/No pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* menggunakan LMS equalizer

Pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* mitigasi ICI menggunakan LMS equalizer mengalami peningkatan. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.7 ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.30 didapatkan BER  $10^{-2}$  dengan Eb/No 17dB.

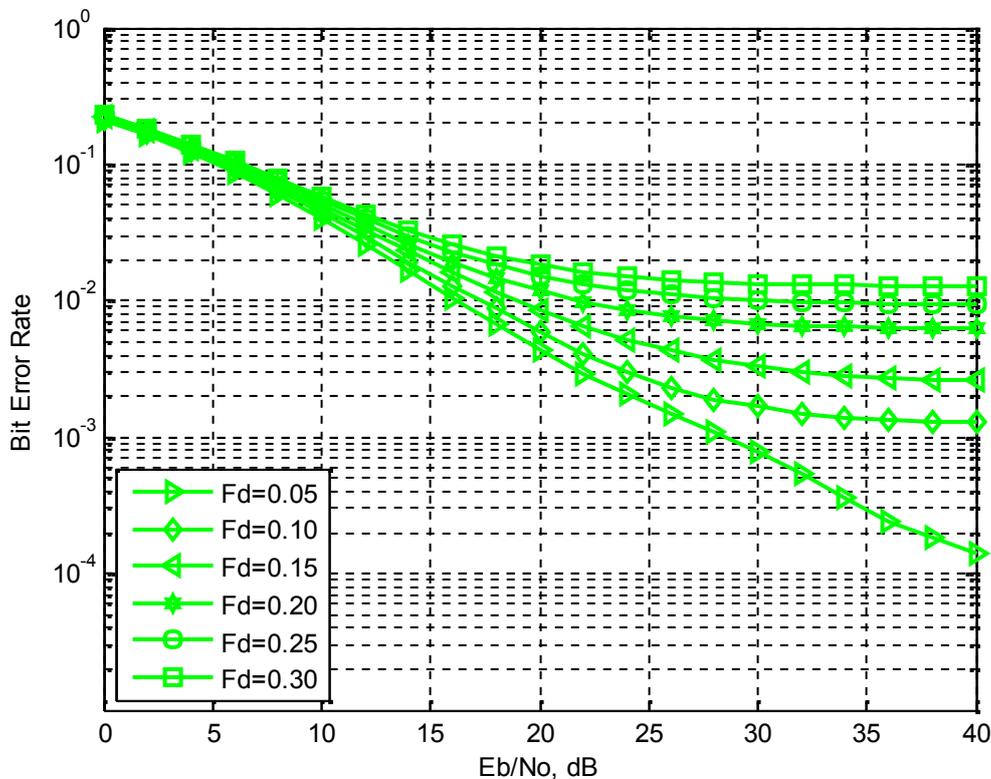
Dari simulasi dan analisis yang dilakukan pada gambar 4.5 sampai gambar 4.7 dengan diterapkannya *zero forcing equalizer* dan MMSE equalizer dan LMS equalizer pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* dapat disimpulkan mitigasi ICI sangat dipengaruhi oleh besarnya pengaruh dari frekuensi *Doppler* yang terdapat pada kanal. Mitigasi ICI menggunakan LMS equalizer memiliki kinerja paling baik yaitu dapat mencapai BER  $10^{-3}$  ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.30 dengan Eb/No 32dB. Mitigasi ICI

menggunakan LMS *equalizer* terbukti dapat meningkatkan kinerja dari mitigasi ICI pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*.

#### 4.6 Unjuk Kerja Mitigasi ICI pada *Kanal Mobile-to-Mobile Rayleigh Fading*

Unjuk kerja mitigasi ICI pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dapat dilihat dengan membandingkan antara nilai BER dengan  $E_b/N_0$  dengan menggunakan frekuensi *Doppler* ternormalisasi yang bervariasi dari 0.05 sampai 0.30.

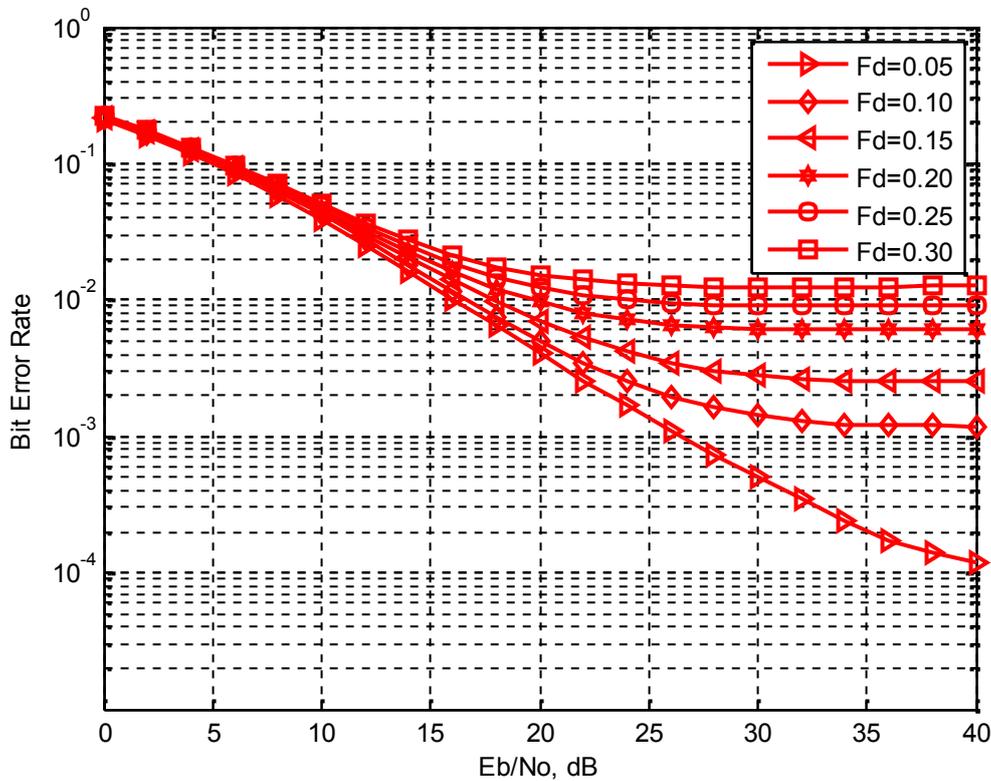
Dari simulasi yang telah dilakukan seperti gambar 4.8 mitigasi ICI dilakukan menggunakan *zero forcing equalizer* untuk mendapatkan BER  $10^{-3}$  diperlukan  $E_b/N_0$  sebesar 28dB ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.05. Pada simulasi ini juga dapat dilihat BER  $10^{-2}$  tidak dapat dicapai ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.30.



Gambar 4.8. Grafik perbandingan BER dengan  $E_b/N_0$  pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* menggunakan *zero forcing equalizer*

Pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* mitigasi ICI sangat dipengaruhi oleh besarnya pengaruh dari frekuensi *Doppler* yang terdapat pada kanal. Namun dengan adanya *zero forcing equalizer* mitigasi ICI dapat dilakukan. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.8 ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.25** didapatkan BER  $10^{-2}$  dengan  $E_b/N_0$  30dB.

Selain menggunakan *zero forcing equalizer* juga akan dilakukan mitigasi ICI menggunakan MMSE *equalizer*. Perbedaan antara *zero forcing equalizer* dengan MMSE *equalizer* yaitu diperhitungkannya faktor *noise* pada MMSE *equalizer* sehingga mitigasi ICI yang dilakukan menjadi semakin baik seperti pada gambar 4.9.



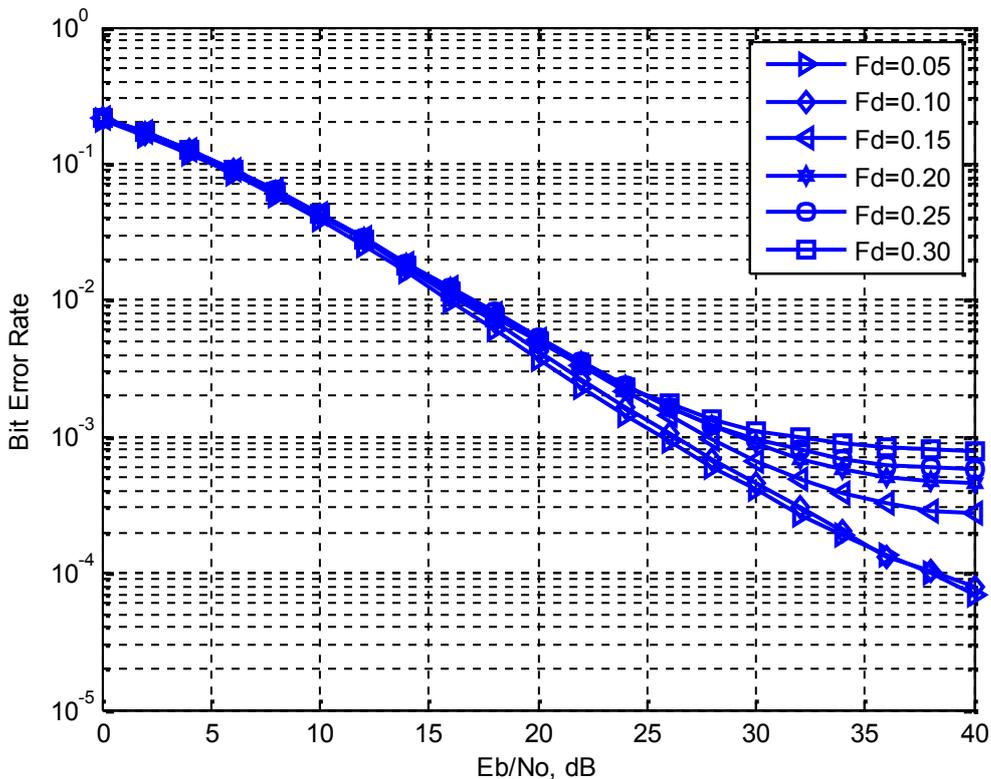
Gambar 4.9. Grafik perbandingan BER dengan  $E_b/N_0$  pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* menggunakan MMSE *equalizer*

Dari simulasi yang telah dilakukan seperti gambar 4.9 mitigasi ICI dilakukan menggunakan MMSE *equalizer* untuk mendapatkan BER  $10^{-3}$  diperlukan  $E_b/N_0$  sebesar

sekitar 27dB ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.05**. Sedangkan ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.30** tidak mampu mencapai BER  $10^{-2}$ .

Pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* mitigasi ICI menggunakan MMSE *equalizer* mengalami peningkatan. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.9 ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.25** didapatkan BER  $10^{-2}$  dengan Eb/No 24dB.

Setelah menggunakan *zero forcing equalizer* dan MMSE *equalizer*, mitigasi ICI juga akan dilakukan menggunakan LMS *equalizer*. Perbedaan antara LMS *equalizer* dengan *zero forcing equalizer* dan MMSE *equalizer* adalah koefisien dilakukan secara bertahap disesuaikan untuk berkumpul ke filter yang meminimalkan kesalahan antara *equalizer* dan sinyal yang diterima. Melalui proses yang berulang-ulang, semua langkah filter disesuaikan dengan setiap periode sampel dalam urutan percobaan sehingga mitigasi ICI yang dilakukan menjadi semakin baik seperti pada gambar 4.10.



Ga

mbar 4.10. Grafik perbandingan BER dengan Eb/No pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* menggunakan LMS *equalizer*

Dari simulasi yang telah dilakukan seperti gambar 4.10 menunjukkan perbandingan BER dengan Eb/No menggunakan LMS *equalizer* pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*. Pada gambar 4.10 terlihat untuk mendapatkan nilai BER  $10^{-4}$  diperlukan Eb/No sebesar 37dB ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.05 dan frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.10.

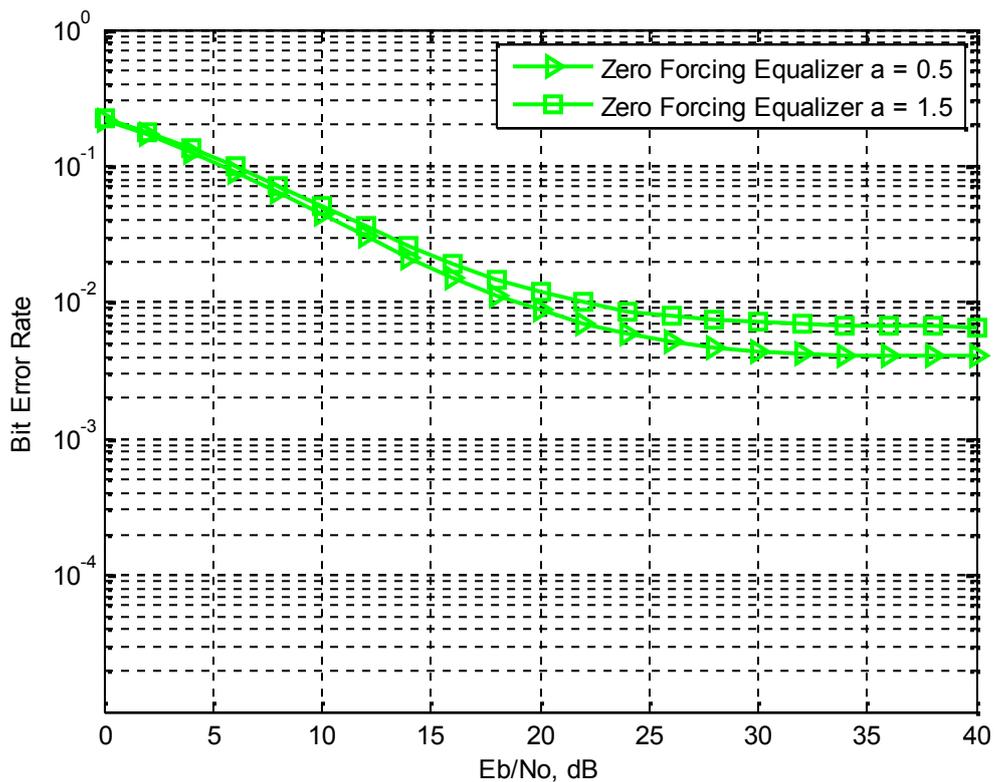
Pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* mitigasi ICI menggunakan LMS *equalizer* mengalami peningkatan. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.10 ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.30 didapatkan BER  $10^{-2}$  dengan Eb/No 17dB.

Dari simulasi dan analisis yang dilakukan pada gambar 4.8 sampai gambar 4.10 dengan diterapkannya *zero forcing equalizer* dan MMSE *equalizer* dan LMS *equalizer* pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dapat disimpulkan mitigasi ICI sangat dipengaruhi oleh besarnya pengaruh dari frekuensi *Doppler* yang terdapat pada kanal. Mitigasi ICI menggunakan LMS *equalizer* memiliki kinerja paling baik yaitu dapat mencapai BER  $10^{-3}$  ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.30 dengan Eb/No 30dB. Mitigasi ICI menggunakan LMS *equalizer* terbukti dapat meningkatkan kinerja dari mitigasi ICI pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*.

#### 4.7 Unjuk Kerja Mitigasi ICI pada Kanal Mobile-to-Mobile Rayleigh Fading Menggunakan Variabel $\alpha$

Pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* akan dilakukan unjuk kerja mitigasi ICI dengan menggunakan variabel  $\alpha$  yang berfungsi untuk membedakan frekuensi *Doppler* yang terdapat pada *transmitter* ( $F_{d1}$ ) dan frekuensi *Doppler* yang terdapat pada *receiver* ( $F_{d2}$ ). Simulasi ini dilakukan untuk melihat besarnya pengaruh yang disebabkan oleh frekuensi *Doppler* yang terjadi pada  $F_{d1}$  dan  $F_{d2}$ .

Pada simulasi kali ini akan menggunakan frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.20 pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dengan variabel  $\alpha$  yang berbeda. Gambar 4.11 menunjukkan bahwa dengan menggunakan *zero forcing equalizer* untuk nilai  $\alpha = 0.5$  memiliki BER yang lebih kecil dibandingkan dengan  $\alpha = 1.5$ .

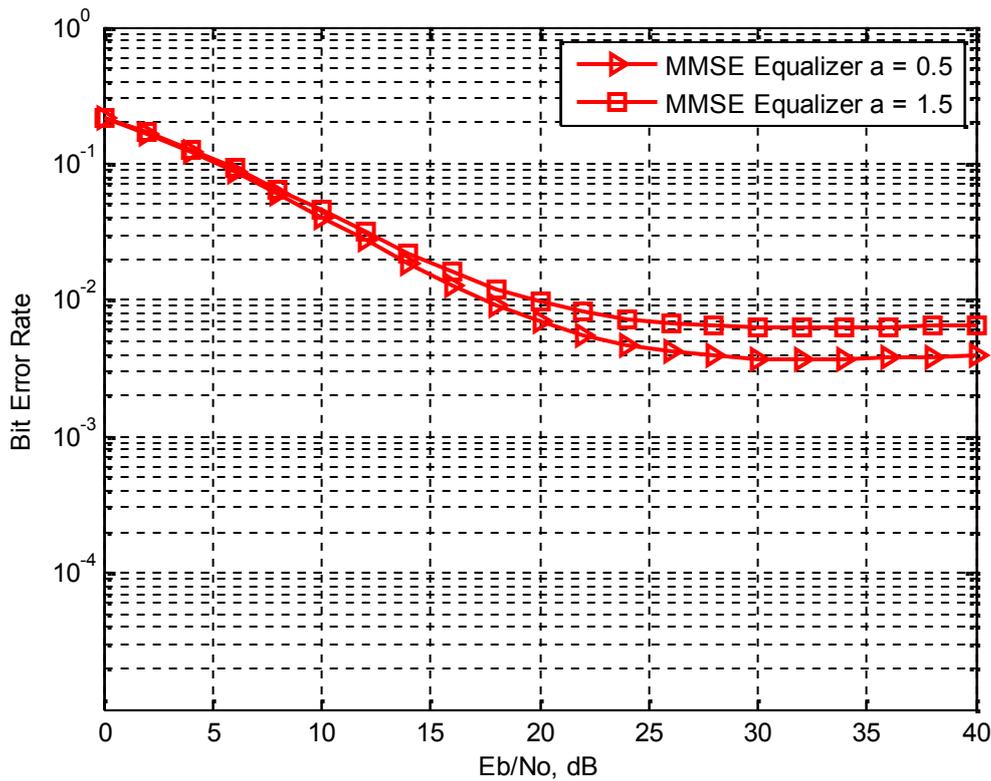


Ga

mbar 4.11. Grafik perbandingan BER dengan  $E_b/N_0$  pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* menggunakan *zero forcing equalizer* dengan variabel  $a$  yang berbeda

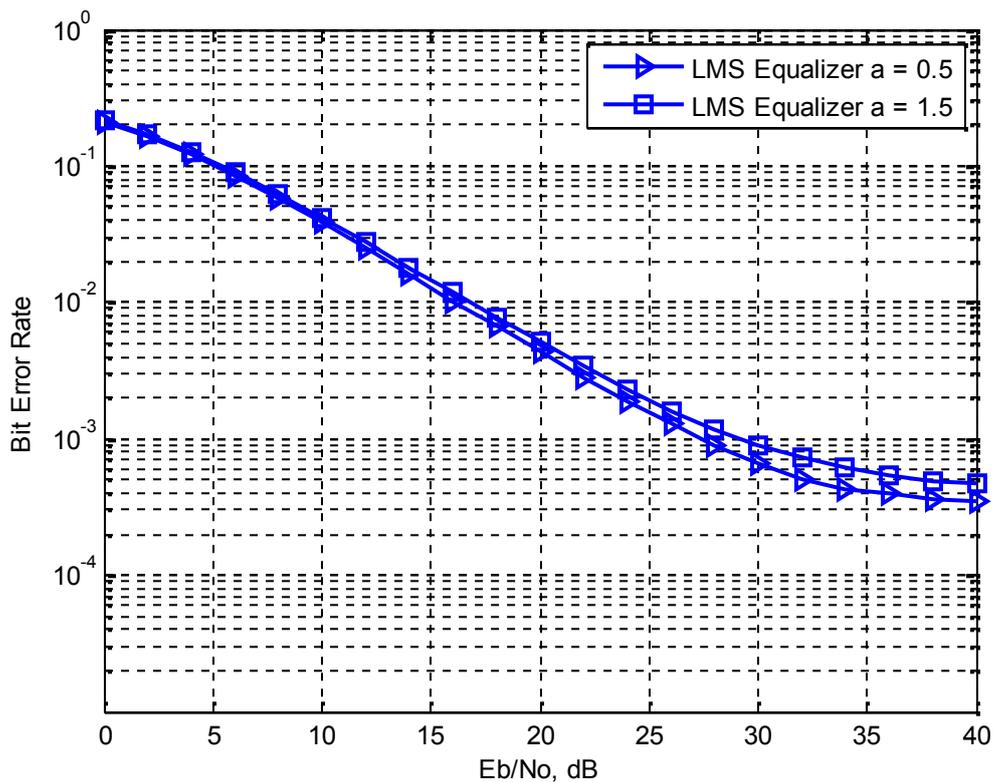
Selain menggunakan *zero forcing equalizer* juga dilakukan simulasi menggunakan *MMSE equalizer* dengan frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.20 pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dengan variabel  $a$  yang berbeda. Gambar 4.12 menunjukkan bahwa dengan menggunakan *MMSE equalizer* untuk nilai  $a = 0.5$  memiliki BER yang lebih kecil dibandingkan dengan  $a = 1.5$ .

Setelah simulasi dilakukan menggunakan *zero forcing equalizer* dan *MMSE equalizer* juga dilakukan simulasi menggunakan *LMS equalizer* dengan frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.20 pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dengan variabel  $a$  yang berbeda. Gambar 4.13 menunjukkan bahwa dengan menggunakan *LMS equalizer* untuk nilai  $a = 0.5$  memiliki BER yang lebih kecil dibandingkan dengan  $a = 1.5$ .



Gambar 4.12. Grafik perbandingan BER dengan Eb/No pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* menggunakan MMSE *equalizer* dengan variabel  $a$  yang berbeda

Pada simulasi yang dilakukan pada gambar 4.11 sampai gambar 4.13 dapat disimpulkan ketika nilai frekuensi *Doppler* pada *transmitter* dan frekuensi *Doppler* pada *receiver* tidak sama dapat mempengaruhi mitigasi ICI. Dari simulasi ini juga dapat bahwa diketahui frekuensi *Doppler* pada *receiver* memiliki pengaruh yang lebih besar dari frekuensi *Doppler* pada *transmitter*. Sehingga pada simulasi ini mitigasi ICI meningkat ketika nilai  $F_{d2}$  lebih kecil dari  $F_{d1}$  yaitu ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi  $0.20$  mampu mencapai BER  $10^{-3}$  dengan Eb/No 27dB dengan menggunakan LMS *equalizer*.



Ga

mbar 4.13. Grafik perbandingan BER dengan Eb/No pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* menggunakan LMS *equalizer* dengan variabel  $a$  yang berbeda

#### 4.8 Analisa

Mitigasi ICI sangat dipengaruhi frekuensi *Doppler* yang terdapat pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*. Semakin besar frekuensi *Doppler* yang terjadi pada kanal maka akan semakin besar terjadi terjadinya ICI pada kanal. Namun *error* yang diakibatkan oleh ICI dapat dikurangi dengan menggunakan mitigasi ICI yang tepat.

Dengan menggunakan teknik *equalizer*, pengaruh dari frekuensi *Doppler* dapat diatasi sehingga mitigasi ICI dapat ditingkatkan. Mitigasi ICI menggunakan LMS *equalizer* memiliki kinerja yang paling baik dalam mitigasi ICI yaitu dapat mencapai BER  $10^{-3}$  ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0.30 dengan Eb/No 30dB pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*.

Pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* ketika nilai frekuensi *Doppler* pada *transmitter* dan frekuensi *Doppler* pada *reciever* tidak sama dapat mempengaruhi mitigasi ICI. Frekuensi *Doppler* pada *reciever* memiliki pengaruh yang lebih besar daripada frekuensi *Doppler* pada *transmitter*.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Dari simulasi dan analisa yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Mitigasi ICI menggunakan *zero forcing equalizer* pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* hanya mampu bertahan pada BER  $10^{-2}$  ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.25** dengan Eb/No 22dB dan pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* hanya mampu bertahan pada BER  $10^{-2}$  ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.25** dengan Eb/No 30dB.
2. Mitigasi ICI menggunakan MMSE *equalizer* pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* hanya mampu bertahan pada BER  $10^{-2}$  ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.25** dengan Eb/No 20dB dan pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* hanya mampu bertahan pada BER  $10^{-2}$  ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.25** dengan Eb/No 24dB.
3. Mitigasi ICI menggunakan LMS *equalizer* pada kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* hanya mampu bertahan pada BER  $10^{-2}$  ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.25** dengan Eb/No 17dB dan pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* hanya mampu bertahan pada BER  $10^{-2}$  ketika frekuensi *Doppler* ternormalisasi **0.25** dengan Eb/No 17dB.
4. Ketika frekuensi *Doppler* 0.30 *zero forcing equalizer* dan MMSE *equalizer* tidak dapat melakukan mitigasi ICI dengan baik karena tidak dapat mencapai BER  $10^{-2}$  yang merupakan standar komunikasi suara.
5. Pada kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading*, frekuensi *Doppler* pada *reciever* memiliki pengaruh yang lebih besar daripada frekuensi *Doppler* pada *transmitter*.

#### 5.2 Saran

Penelitian dibidang mitigasi ini dapat dikembangkan lagi kedepannya baik itu pada mitigasi dan kanal yang akan digunakan. Pada mitigasi bisa dikembangkan dengan menggunakan teknik *equalizer* lainnya seperti RLS *equalizer* dan teknik lainnya.

Sedangkan pada kanal dapat dikembangkan dengan menggunakan kanal lebih dari satu pada sisi pengirim dan penerima

## DAFTAR PUSTAKA

- Arshad, Kamran (2002), "*Channel Estimation in OFDM Systems*", Thesis King Fahd University of Petroleum And Mineral.
- Astuti, Dian Widi (2012), "Analisa Simulasi Performansi Penggunaan Orthogonal Frequency Division Multiplexing pada Sistem Digital Video Broadcasting-Terrestrial", *Universitas Mercu Bauana*.
- Budiarti, Rika (2011), "Kinerja Sistem Mud-Sic Multicarrier CDMA dengan Modulasi QPSK", *Politeknik Elektronika Negeri Surabaya Institut Teknologi Sepuluh Nopember*. [www.eepis-its.edu/uploadta/downloadmk.php?id=1543](http://www.eepis-its.edu/uploadta/downloadmk.php?id=1543) (diakses 23 Oktober 2012).
- Chang, Wen-Thong and I-Hao Shih (2005), "OFDM Block Iterative Decision Feedback Equalizer for Multipath Channel Results", *Department of Communication Engineering, University of National Chiao Tung University*.
- Hermanto, Dudik (2012), "Evaluasi Kinerja Teknik Estimasi Kanal Berdasarkan Pola Pengaturan Simbol Pilot Pada Sistem OFDM", *Universitas Diponegoro*.
- Hrycak, Tomasz (2006), "Low-Complexity Time-Domain ICI Equalization For OFDM Communications Over Rapidly Varying Channels", *Vienna University of Technology Gusshausstrasse*.
- Ilyasa, Tito (2007), "OFDM pada Komunikasi Digital Pita Lebar", *Universitas Indonesia*.
- Ip, Ezra and Alan Pak Tao Lau, Daniel J. F. Barros, Joseph M. Kahn (2008), "Coherent detection in optical fiber systems", *Vol. 16, No. 2 / Optics Express 754*.
- Jeon, Won Gi (1999), "An Equalization Technique for Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Systems in Time-Variant Multipath Channels", *IEEE Transactions on Communications, Vol. 47, No. 1*.
- Juliandy, Tonny (2009), "*Simulasi Teknik Pengkodean Regular Low Density Parity Check Code Pada Sistem Mc-CDMA*", Skripsi Universitas Sumatera Utara.
- Naim M, Muh. Khaerul (2011), "Estimasi Doppler Spread pada Sistem Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) dengan Metode Subspace Tracking", <http://digilib.its.ac.id/public/ITS-Undergraduate-16818-Paper-700068.pdf> (diakses 30 Oktober 2012).
- Patel C. S. (2006), "*Wireless Channel Modeling, Simulation, and Estimation*", Thesis School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology.

- Putri, Agriska Prenadita (2011), "*Penggunaan Metode Ridge Trace dan Variance Inflation Factors (VIF) pada Regresi Ridge*", Skripsi Universitas Negeri Yogyakarta.
- Reuter, Michael (1999), "Nonlinear Effects in LMS Adaptive Equalizers", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 47, no. 6.
- Setiawan, Eko Fajar (2006), "Analisis Kinerja Sistem COFDM Menggunakan Prediksi Kanal MMSE dan Prediksi Kanal Adaptif pada Kanal Fading Rayleigh", *Sekolah Tinggi Teknologi Telkom*.
- Smalley, David (1994), "Equalization Concepts: A Tutorial", *Atlanta Regional Technology Center*.
- Symington, Andrew (2009), "*A Hardware Testbed for Measuring IEEE 802.11g DCF Performance*", Thesis University of Cape Town.
- Tu, Kai and Dario Fertonani (2010), "Mitigation of Intercarrier Interference in OFDM Systems over Underwater Acoustic Channels", *Kwangju Institute of Science and Technology*.
- Wang, Fei (2011), "*Pilot-Based Channel Estimation in OFDM System*", Thesis University of Toledo.
- Wang, Li-Chun (2009), "Statistical Analysis of a Mobile-to-Mobile Rician Fading Channel Model", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 1.
- Xiao, Yao (2003), "*Orthogonal frequency division multiplexing modulation and intercarrier interference cancellation*", Thesis Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.
- Zajić, Alenka G and Gordon L. Stuber (2006), "A New Simulation Model for Mobile-to-Mobile Rayleigh Fading Channels", *Appears in the Proceedings of IEEE WCNC'06*.
- Zheng, Yahong R. and Chengshan Xiao (2002), "Improved Models for the Generation of Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms", *IEEE Communications Letters*, Vol. 6, No. 6.

