



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**IMPLEMENTASI DAN EVALUASI KINERJA ORTHOGONAL  
FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (OFDM)  
MENGUNAKAN WARP**

**Hasan  
NRP. 2212106007**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Suwadi, MT  
Dr. Ir. Titiek Suryani, MT**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015**



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

**IMPLEMENTATION AND PERFORMANCE  
EVALUATION OF ORTHOGONAL FREQUENCY  
DIVISION MULTIPLEXING (OFDM) USING WARP**

**Hasan**

**NRP. 2212106007**

**Supervisors**

**Dr. Ir. Suwadi, MT**

**Dr. Ir. Titiek Suryani, MT**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING**

**Faculty of Industrial Technology**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya 2015**

**IMPLEMENTASI DAN EVALUASI KINERJA  
ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION  
MULTIPLEXING (OFDM) MENGGUNAKAN WARP**

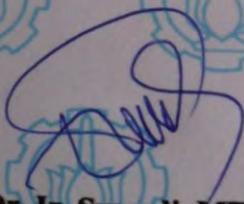
**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

  
**Dr. Ir. Suwadi, MT.**  
**NIP. 19680818 1993031 002**

  
**Dr. Ir. Titiek Suryani, MT.**  
**NIP. 19641130 1989032 001**

**SURABAYA  
JANUARI, 2015**

## Implementasi dan Evaluasi Kinerja *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) Menggunakan WARP

Nama : Hasan  
Pembimbing : Dr. Ir. Suwadi, MT.  
Dr. Ir. Titiek Suryani, MT.

### ABSTRAK

Salah satu permasalahan dalam perkembangan teknologi telekomunikasi yaitu bagaimana mencapai *data rate* yang besar namun dengan *bandwidth* yang tidak lebih besar dari *bandwidth* koheren kanal untuk menghindari terjadinya *Inter-Symbol Interference* (ISI). Salah satu solusi yang ditawarkan yaitu transmisi *multi-carrier*.

Contoh transmisi *multicarrier* yaitu *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dimana *subcarrier-subcarrier* dapat saling tegak lurus satu sama lain sehingga bandwidth yang dibutuhkan menjadi lebih efisien jika dibandingkan dengan *multicarrier* konvensional seperti FDM. Sistem OFDM dapat diimplementasikan pada WARP (*Wireless Open-Access Research Platform*) yang merupakan salah satu jenis SDR (*Software Defined Radio*). SDR merupakan sistem pemancar dan penerima yang menggunakan pemrosesan sinyal digital untuk *coding*, *decoding*, modulasi dan demodulasi data. Modul WARP tersebut digunakan sebagai model pemancar dan penerima pada pengukuran kualitas unjuk kerja sistem OFDM dengan berbagai kondisi.

Hasil dari implementasi dan pengukuran menunjukkan bahwa nilai BER tidak selalu berpengaruh terhadap perubahan jarak karena ketika jarak semakin jauh tidak menjamin nilai BER semakin besar. Sementara dalam hal *obstacle*, nilai BER sangat berpengaruh dimana nilainya akan lebih baik saat tidak adanya *obstacle*. Seperti saat daya pancar sebesar -26.125 dBm nilai BER saat *Line Of Sight* (LOS) sudah 0 sementara *Non Line of Sight* (NLOS) bernilai  $9.3 \times 10^{-6}$ . Untuk lingkungan pengukuran, lingkungan *indoor* menghasilkan kualitas sistem yang paling baik dibandingkan dengan lingkungan lainnya.

Kata kunci: IEEE 802.11, OFDM, *Multicarrier*, *Software Defined Radio*, *Wireless Open-Access Research Platform*



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **Implementation and Performance Evaluation of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Using WARP**

**Name** : Hasan  
**Supervisors** : Dr. Ir. Suwadi, MT.  
Dr. Ir. Titiek Suryani, MT.

### **ABSTRACT**

One of the problems faced in development of telecommunication technology is how to attain a higher data rate but the signal bandwidth must less than the coherence bandwidth in the wireless channel to avoid incurring the inter-symbol interference (ISI). One of the solution which given is a multi-carrier transmission system.

One of the recent multi-carrier transmission system is Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) which the subcarriers are made orthogonal to each other so the usage of bandwidth more efficient than FDM. OFDM system is able to be implemented in Wireless Access Research Platform (WARP) which is a type of Software Defined Radio (SDR). SDR is a transmitter and receiver system that uses digital signal processing for coding, decoding, modulating and demodulating. WARP module is used as a transmitter and receiver models in the measurement of performance OFDM system in different condition.

The result of the implementation and measurement has shown that BER values not always influential about change of distances because when the distance is further not guarantee the BER values increasing. While in case of obstacle, nothing differences in all environment, which is BER value is better when there is no obstacle. When transmit power value -26.125 dBm, BER value for LOS condition is 0 while NLOS condition is  $9.3 \times 10^{-6}$ . For measuring environment, indoor environment created the best performance than others environment.

**Keyword:** IEEE 802.11, OFDM, Multicarrier, Software Defined Radio, Wireless Open-Access Research Platform



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah segala puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul:

### **Implementasi dan Evaluasi Kinerja *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* Menggunakan WARP**

Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi dalam menyelesaikan program studi strata 1 pada jurusan teknik elektro, fakultas teknologi industry, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dalam proses pengerjaan penelitian ini penulis banyak mendapat saran, dorongan, bimbingan serta keterangan-keterangan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan segala hormat dan kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada:

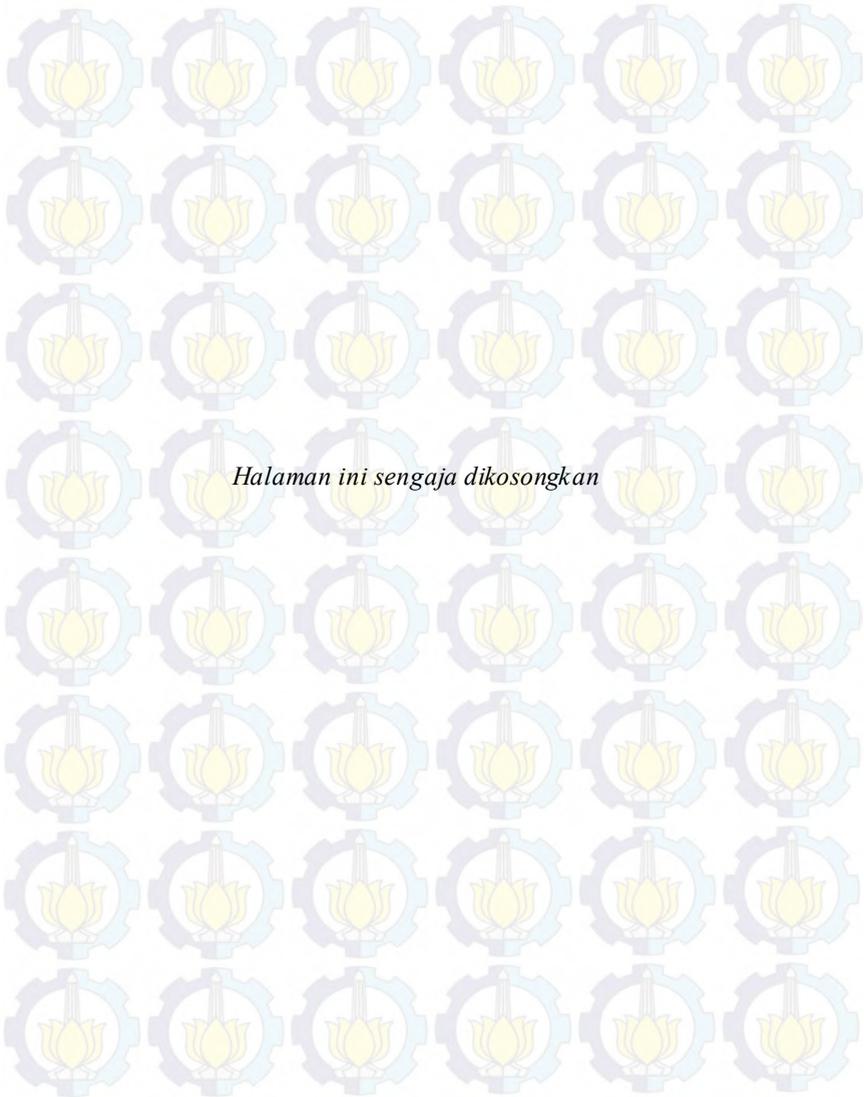
1. Abi yang ada di surga dan umi yang ada di Jakarta, yang selalu mendoakan, mengingatkan, menghibur dan memberikan bantuan materil dan non-materil kepada penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Suwadi, MT dan Ibu Dr. Ir. Titiek Suryani, MT yang telah memberikan bantuan teknis ketika penelitian berlangsung.
3. Teman-teman satu team WARP terutama Dwi Putri Kusumadewi, Lina Mubarakah dan Arimaya yang selalu membantu penulis dalam melakukan pengukuran dan menghibur penulis dengan candaan-candaan yang kurang berkualitas.
4. Semua pihak yang telah memberikan dukungannya, yang tidak mungkin dapat disebutkan satu persatu dalam laporan ini.

Dalam proses perbaikan dan pengembangan kritik dan saran terhadap penelitian ini sangat dibutuhkan untuk mengetahui kekurangan dan kebutuhannya. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb

Surabaya, Januari 2015

Penulis

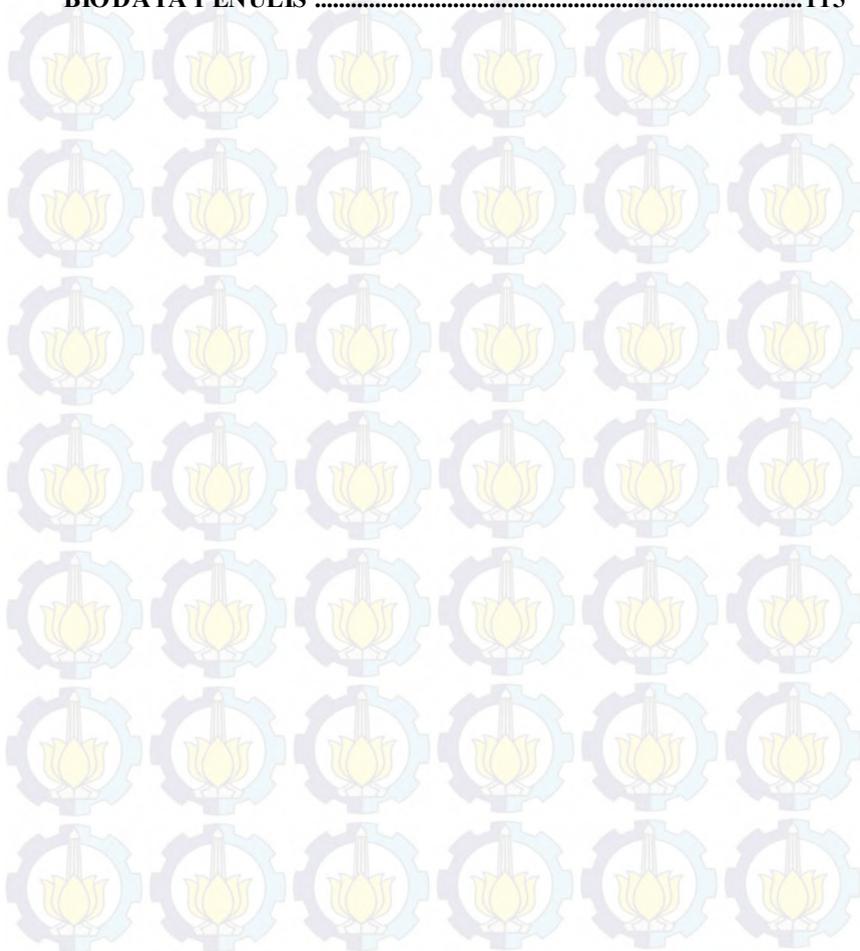


# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>XI</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>XIII</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>XVII</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>XXI</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	2
1.3 BATASAN MASALAH.....	3
1.4 TUJUAN PENELITIAN.....	3
1.5 METODOLOGI PENELITIAN.....	3
1.6 SISTEMATIKA PENELITIAN.....	6
1.7 MANFAAT.....	6
<b>BAB 2 DASAR TEORI</b> .....	<b>7</b>
2.1 TEKNIK <i>ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING</i> (OFDM).....	7
2.2.1 <i>Mapper dan Demapper</i> QPSK.....	8
2.2.2 Pilot.....	10
2.2.3 <i>Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) dan Fast</i> <i>Fourier Transform (FFT)</i> .....	12
2.2.4 Penambahan dan pembuangan <i>Cyclic Prefix (CP)</i> ....	13
2.2.5 Kelebihan dan Kekurangan OFDM.....	15
2.2 IEEE 802.11A/G.....	16
2.3 FADING SKALA KECIL ( <i>SMALL-SCALE FADING</i> ).....	18
2.3.1 <i>Flat Fading</i> .....	18
2.3.2 <i>Frequency Selective Fading</i> .....	20
2.4 <i>WIRELESS OPEN-ACCESS RESEARCH PLATFORM (WARP) DAN</i> WARPLAB.....	21
2.4.1 WARP Board.....	23
2.4.2 WARP Lab.....	26
<b>BAB 3 DESAIN SISTEM OFDM</b> .....	<b>29</b>
3.1 KARAKTERISTIK RADIO BOARD WARP VERSI 1.4.....	29
3.1.1 <i>Gain Setting</i> .....	30

3.1.2	Proses Pengiriman Sinyal dan Komunikasi .....	32
3.2	DESAIN SISTEM OFDM .....	34
3.2.1	Sistem OFDM pada WARP .....	34
3.2.2	Estimasi Kanal .....	45
3.2.3	Estimasi Fasa Error .....	46
3.2.4	Desain <i>Frame</i> .....	48
3.3	SKENARIO PENGUKURAN.....	49
3.3.1	Analisa Sistem OFDM .....	50
3.3.2	Lingkungan <i>Indoor</i> .....	50
3.3.3	Lingkungan Lorong .....	52
3.3.4	Lingkungan <i>Outdoor</i> .....	52
3.3.5	Karakteristik <i>Obstacle</i> dan Parameter Pengukuran ...	53
<b>BAB 4 PENGUKURAN DAN ANALISA DATA .....</b>		<b>57</b>
4.1	ANALISA SISTEM OFDM .....	57
4.1.1	Data Input dan Output .....	57
4.1.2	Modulasi.....	58
4.1.3	Proses IFFT .....	59
4.1.4	Interpolasi .....	60
4.1.5	Spektrum <i>Baseband</i> Sinyal .....	61
4.1.6	Sinyal yang dikirim dan diterima .....	62
4.1.7	Desimasi.....	64
4.1.8	Korelasi LTS .....	66
4.1.9	Estimasi.....	67
4.1.10	<i>Scatterplot</i> sinyal.....	68
4.2	PERBANDINGAN BER DALAM KONDISI LINGKUNGAN <i>INDOOR</i> .....	69
4.2.1	Kondisi LOS .....	70
4.2.2	Kondisi NLOS .....	71
4.2.3	Perbandingan Tiap Jarak .....	72
4.3	PERBANDINGAN BER DALAM KONDISI LINGKUNGAN LORONG .....	76
4.4	PERBANDINGAN BER DALAM KONDISI LINGKUNGAN <i>OUTDOOR</i> .....	79
4.4.1	Kondisi LOS .....	79
4.4.2	Kondisi Non-Line-of-Sight (NLOS) .....	83
4.4.3	Perbandingan Tiap Jarak .....	86
4.5	PERBANDINGAN BER DALAM BERBAGAI MACAM LINGKUNGAN .....	88

<b>BAB 5 PENUTUP</b> .....	<b>97</b>
5.1 KESIMPULAN.....	97
5.2 SARAN.....	98
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>99</b>
<b>LAMPIRAN A – LEMBAR PENGESAHAN PROPOSAL</b> .....	<b>103</b>
<b>LAMPIRAN B – LISTING PROGRAM TUGAS AKHIR</b> .....	<b>105</b>
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	<b>115</b>





*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Parameter Umum dari IEEE 802.11 .....	16
<b>Tabel 3.1</b>	<i>Mapping</i> Modulasi QPSK .....	36
<b>Tabel 3.2</b>	Nilai dari Response Impulse .....	42
<b>Tabel 3.3</b>	Parameter Pengukuran .....	55
<b>Tabel 4.1</b>	Perbandingan BER untuk Keadaan LOS pada Lingkungan <i>Indoor</i> .....	73
<b>Tabel 4.2</b>	Perbandingan BER Fungsi Jarak untuk Keadaan NLOS pada Lingkungan <i>Indoor</i> .....	75
<b>Tabel 4.3</b>	Perbandingan BER pada Jarak 4 meter pada Lingkungan <i>Indoor</i> .....	78
<b>Tabel 4.4</b>	Perbandingan BER pada Jarak 5 meter pada Lingkungan <i>Indoor</i> .....	79
<b>Tabel 4.5</b>	Perbandingan BER pada Jarak 6 meter pada Lingkungan <i>Indoor</i> .....	80
<b>Tabel 4.6</b>	Perbandingan Nilai BER Kondisi LOS Lingkungan Lorong untk Jarak 4 meter dan 5 meter .....	83
<b>Tabel 4.7</b>	Perbandingan Nilai BER Kondisi LOS Lingkungan <i>Outdoor</i> untuk Jarak 4, 5 dan 6 meter .....	84
<b>Tabel 4.8</b>	Perbandingan Nilai BER Kondisi LOS Lingkungan <i>Outdoor</i> untuk Jarak 10, 15 dan 20 meter .....	86
<b>Tabel 4.9</b>	Perbandingan Nilai BER Kondisi NLOS Lingkungan <i>Outdoor</i> untuk Jarak 4, 5 dan 6 meter .....	88
<b>Tabel 4.10</b>	Perbandingan Nilai BER Kondisi NLOS Pengukuran <i>Outdoor</i> untuk Jarak 10, 15 dan 20 meter .....	90
<b>Tabel 4.11</b>	Perbandingan Nilai BER dengan Berbagai Lingkungan untuk Jarak 4 meter.....	95
<b>Tabel 4.12</b>	Perbandingan Nilai BER dengan Berbagai Lingkungan untuk Jarak 5 meter.....	96



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1. 1</b>	Diagram Alir Metode Penelitian .....	4
<b>Gambar 2. 1</b>	Frekuensi OFDM .....	8
<b>Gambar 2. 2</b>	Blok Diagram OFDM .....	9
<b>Gambar 2. 3</b>	Contoh Konstelasi QPSK .....	11
<b>Gambar 2. 4</b>	Susunan <i>Pilot</i> tipe Block .....	11
<b>Gambar 2. 5</b>	Susunan <i>Pilot</i> tipe Comb .....	12
<b>Gambar 2. 6</b>	Susunan <i>Pilot</i> tipe Lattice .....	13
<b>Gambar 2. 7</b>	Fungsi dari <i>Cyclic Prefix</i> .....	14
<b>Gambar 2. 8</b>	<i>Cyclic Prefix</i> pada OFDM .....	15
<b>Gambar 2. 9</b>	<i>Frame</i> IEEE 802.11 .....	16
<b>Gambar 2. 10</b>	Struktur <i>Channel</i> OFDM .....	19
<b>Gambar 2. 11</b>	Karakteristik Kanal <i>Flat Fading</i> .....	20
<b>Gambar 2. 12</b>	Karakteristik Kanal <i>Frequency Selective Fading</i> .....	21
<b>Gambar 2. 13</b>	Komponen-komponen dari Desain Platform .....	22
<b>Gambar 2. 14</b>	Diagram Blok <i>Node WARP</i> .....	25
<b>Gambar 2. 15</b>	Arsitektur WARPLab .....	26
<b>Gambar 2. 16</b>	WARPLab <i>Flow</i> .....	27
<b>Gambar 3. 1</b>	Radio Versi 1.4 .....	29
<b>Gambar 3. 2</b>	Blok Diagram Radio Board .....	31
<b>Gambar 3. 3</b>	Tx Ouput Power vs Gain Setting pada MAX2829 .....	32
<b>Gambar 3. 4</b>	Urutan Pengiriman Sampel IQ pada WARP .....	33
<b>Gambar 3. 5</b>	Diagram Blok Sistem OFDM pada WARP .....	35
<b>Gambar 3. 6</b>	Blok <i>Modulator</i> QPSK .....	36
<b>Gambar 3. 7</b>	Konstelasi QPSK .....	36
<b>Gambar 3. 8</b>	Konversi Serial ke Paralel .....	37
<b>Gambar 3. 9</b>	Susunan <i>Preamble</i> .....	38
<b>Gambar 3. 10</b>	Penempatan Data dan Pilot pada Blok IFFT .....	39
<b>Gambar 3. 11</b>	Blok Diagram Interpolasi .....	40
<b>Gambar 3. 12</b>	Respon Impuls .....	41
<b>Gambar 3. 13</b>	Blok Diagram Desimasi .....	42
<b>Gambar 3. 14</b>	Konversi Paralel ke Serial .....	44
<b>Gambar 3. 15</b>	Blok Demodulator QPSK .....	45
<b>Gambar 3. 16</b>	Konstelasi pada Proses Estimasi Kanal .....	47
<b>Gambar 3. 17</b>	Perbandingan Fasa pada Sinyal dengan Koreksi Fasa .....	48
<b>Gambar 3. 18</b>	Struktur <i>Frame</i> Komunikasi .....	49

<b>Gambar 3. 19</b>	Sketsa Pengukuran Indoor untuk Kondisi LOS .....	51
<b>Gambar 3. 20</b>	Sketsa Pengukuran Indoor untuk Kondisi NLOS.....	51
<b>Gambar 3. 21</b>	Ukuran Fisik Penempatan Perangkat WARP .....	52
<b>Gambar 3. 22</b>	Ukuran Fisik Pengukuran untuk Lingkungan <i>Indoor</i> .....	53
<b>Gambar 3. 24</b>	Ukuran Fisik Pengukuran untuk Lingkungan Lorong .....	54
<b>Gambar 3. 25</b>	Ukuran Fisik Pengukuran untuk Llingkungan <i>Outdoor</i> .....	54
<b>Gambar 3. 26</b>	Dimensi <i>Obstacle</i> .....	55
<b>Gambar 4. 1</b>	<i>Stem</i> Bit Informasi.....	57
<b>Gambar 4. 2</b>	<i>Stem</i> Simbol <i>Real</i> .....	58
<b>Gambar 4. 3</b>	<i>Stem</i> Simbol <i>Imaginer</i> .....	59
<b>Gambar 4. 4</b>	Nilai <i>Real</i> 1 Symbol OFDM .....	60
<b>Gambar 4. 5</b>	Nilai <i>Imaginer</i> 1 Symbol OFDM .....	60
<b>Gambar 4. 6</b>	Sinyal <i>Real</i> .....	61
<b>Gambar 4. 7</b>	Sinyal <i>Imaginer</i> .....	62
<b>Gambar 4. 8</b>	Spektrum Sinyal OFDM .....	63
<b>Gambar 4. 9</b>	Spektrum Sinyal <i>Baseband</i> .....	63
<b>Gambar 4. 10</b>	Sinyal <i>Real</i> .....	64
<b>Gambar 4. 11</b>	Sinyal <i>Imaginer</i> .....	64
<b>Gambar 4. 12</b>	Sinyal <i>Real</i> .....	65
<b>Gambar 4. 13</b>	Sinyal <i>Imaginer</i> .....	65
<b>Gambar 4. 14</b>	Hasil Korelasi LTS.....	66
<b>Gambar 4. 15</b>	Estimasi Kanal .....	67
<b>Gambar 4. 16</b>	Nilai Fasa Error.....	68
<b>Gambar 4. 17</b>	Konstelasi Simbol.....	69
<b>Gambar 4. 18</b>	Konstelasi Simbol saat BER tidak sama dengan 0 .....	70
<b>Gambar 4. 19</b>	Foto Lingkungan di Lab B. 304 dengan Keadaan LOS .....	71
<b>Gambar 4. 20</b>	Perbandingan Kurva BER untuk Lingkungan <i>Indoor</i> dengan Keadaan LOS .....	72
<b>Gambar 4. 21</b>	Foto Lingkungan di Lab B. 304 dengan Keadaan NLOS .....	74
<b>Gambar 4. 22</b>	Perbandingan Kurva BER untuk Lingkungan <i>Indoor</i> dengan Keadaan NLOS .....	74
<b>Gambar 4. 23</b>	Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 4 meter .....	77

<b>Gambar 4.24</b>	Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 5 meter.....	78
<b>Gambar 4.25</b>	Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 6 meter.....	79
<b>Gambar 4.26</b>	Foto Lingkungan Lorong Kondisi LOS.....	82
<b>Gambar 4.27</b>	Perbandingan Kurva BER Kondisi LOS Lingkungan Lorong untuk Jarak 4 dan 5 meter.....	82
<b>Gambar 4.28</b>	Perbandingan Kurva BER Kondisi LOS Lingkungan <i>Outdoor</i> untuk Jarak 4, 5 dan 6 meter.....	84
<b>Gambar 4.29</b>	Perbandingan Kurva BER Kondisi LOS Lingkungan <i>Outdoor</i> untuk Jarak 10, 15 dan 20 meter.....	86
<b>Gambar 4.30</b>	Perbandingan Kurva BER Kondisi NLOS Lingkungan <i>Outdoor</i> untuk Jarak 4, 5 dan 6 meter.....	88
<b>Gambar 4.31</b>	Perbandingan Kurva BER Kondisi NLOS Lingkungan <i>Outdoor</i> untuk Jarak 10, 15 dan 20 meter.....	90
<b>Gambar 4.32</b>	Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 4 meter di Lingkungan <i>Outdoor</i> .....	92
<b>Gambar 4.33</b>	Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 5 meter di Lingkungan <i>Outdoor</i> .....	92
<b>Gambar 4.34</b>	Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 6 meter di Lingkungan <i>Outdoor</i> .....	93
<b>Gambar 4.35</b>	Perbandingan Kurva BER dengan Berbagai Lingkungan untuk Jarak 4 meter.....	93
<b>Gambar 4.36</b>	Perbandingan Kurva BER dengan Berbagai Lingkungan untuk Jarak 5 meter.....	94



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dengan berkembangnya teknologi komunikasi, permintaan akan layanan *data rate* yang lebih besar/cepat seperti multimedia, voice dan data baik yang melalui kabel dan wireless juga meningkat. Untuk mencapai *data rate* yang lebih besar tentu saja membutuhkan *bandwidth* yang lebih besar dalam transmisi *single carrier* karena *bandwidth* minimum yang dibutuhkan sama dengan  $R_s/2$  (Hz) dimana  $R_s$  yaitu *symbol rate*. Ketika *bandwidth* sinyal menjadi lebih besar dibandingkan dengan *bandwidth* koheren pada kanal *wireless*, maka sinyal tersebut akan terkena *multi-path fading* sehingga mengakibatkan terjadinya *Inter-Symbol Interference* (ISI). Secara umum ada *adaptive equalizer* yang dikembangkan untuk mengatasi ISI yang terjadi akibat kanal *multi-path fading*. Tetapi semakin meningkatnya *data rate* maka semakin kompleks pula *equalizer* yang didesain sehingga akan sangat sulit untuk diimplementasikan [1].

Untuk mengatasi masalah tersebut, maka solusi yang tepat untuk *data rate* yang tinggi digunakanlah transmisi *multi-carrier*. Sistem *multi-carrier* sebagai contoh *Frequency Division Multiplexing* (FDM), membagi total *bandwidth* yang tersedia dalam spectrum menjadi *sub band-sub band* untuk transmisi *multiple carrier* dalam bentuk paralel. Oleh karena itu, respon frekuensi yang melalui masing-masing *sub band* relatif datar sehingga lebih kecil jika dibandingkan dengan *bandwidth* koheren pada kanal. Sehingga *equalizer* yang digunakan lebih simple jika dibandingkan dengan transmisi *single carrier* bahkan bisa dihilangkan penggunaannya jika *differential encoding* digunakan. Secara keseluruhan *data rate* yang tinggi dapat dicapai dengan menempatkan *carrier-carrier* tersebut secara berdekatan didalam spectrum karena *data rate* berbanding terbalik dengan periode symbol. Akan tetapi, jika jarak antar *carrier* tersebut terlalu berdekatan satu sama lain dikhawatirkan akan terjadinya *Inter-Carrier Interference* (ICI). Untuk menghindari terjadinya ICI, yaitu dengan menggunakan *guard band* yang ditempatkan antar *carrier* yang berdekatan sehingga *data rate* nya tidak terlalu tinggi [2].

*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) merupakan komunikasi digital *multicarrier* yang digunakan untuk mengatasi kelemahan *data rate* diatas. Sifat orthogonalitas memungkinkan *carrier-carrier* tersebut memiliki jarak yang sempit bahkan hingga saling *overlapped*, tanpa mengalami ICI. Sementara untuk menangani masalah ISI, pada OFDM terdapat *cyclic prefix* yang merupakan suatu *guard interval* dalam domain waktu [1]. OFDM sudah diterapkan oleh berbagai standar sistem telekomunikasi baik dalam teknologi *wireless* maupun *wireline* sebagai contoh yaitu IEEE 802.11g untuk standar (WiFi) *Wireless LANs*.

*Software Define Radio* (SDR) adalah salah satu teknologi yang berkembang pesat untuk industry telekomunikasi. Teknologi SDR berfungsi memaksimalkan *programmable hardware* untuk membangun sebuah radio berbasis *software*. Teknologi SDR dapat diimplementasikan di beberapa fungsi pada system radio, seperti modulasi/demodulasi, pengolahan sinyal, pemrograman dan *link layer protocol* pada *software* [3]. Salah satu jenis dari teknologi SDR yaitu *Wireless Open-Access Research Platform* (WARP). *Platform* WARP dikategorikan sebagai *platform* yang dapat mengimplementasikan algoritma *wireless* yang sangat kompleks [4]. WARP tersebut akan diimplementasikan untuk teknik OFDM dengan menggunakan standar IEEE 802.11g, standar ini dipilih karena memiliki kesamaan dalam hal penggunaan band frekuensi dengan WARP yaitu 2,4 GHz. Kemudian teknik OFDM tersebut akan diuji pada berbagai kondisi pengukuran seperti perbedaan jarak dan *obstacle*. Diharapkan nanti nilai-nilai dari hasil pengukuran tersebut akan dijadikan sebagai suatu analisa untuk mengetahui kemampuan teknik OFDM jika diimplementasikan menggunakan WARP.

## 1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang diharapkan untuk ditemukan solusinya melalui tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mengimplementasikan sistem OFDM pada modul WARP.
2. Bagaimana pengaruh nilai daya yang dipancarkan terhadap nilai BER.
3. Bagaimana pengaruh jarak yang dipancarkan terhadap nilai BER.

4. Bagaimana pengaruh lingkungan *indoor* dan *outdoor* terhadap nilai BER.
5. Bagaimana pengaruh ada atau tidaknya *obstacle* terhadap nilai BER.

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan yang ada, maka dalam prakteknya akan dibatasi seperti:

1. Matlab yang digunakan merupakan matlab versi 2012.
2. WARPLab yang digunakan merupakan WARPLab versi 7.
3. Modulasi yang digunakan yaitu QPSK.
4. Standar system untuk OFDM yang digunakan yaitu IEEE 802.11g.
5. Band frekuensi *carrier* yang digunakan yaitu 2,4 GHz.
6. Daerah pengukuran dibatasi dalam lingkungan *indoor* dan *outdoor* dengan berbagai macam kondisi seperti perubahan jarak dan *obstacle*.

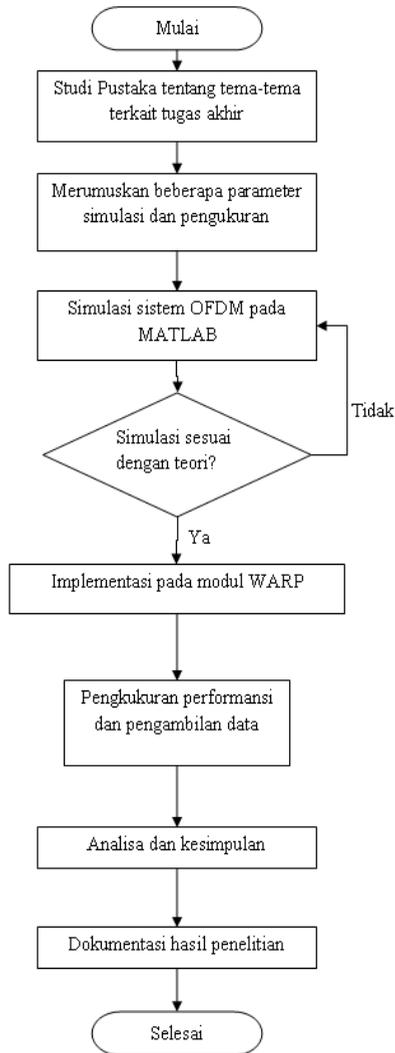
### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan tercapai setelah selesainya tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengimplementasikan sistem OFDM pada modul WARP.
2. Mengetahui kinerja sistem OFDM yang ditunjukkan dengan nilai BER secara *real time*
3. Menganalisa pengaruh jarak terhadap nilai BER.
4. Menganalisa pengaruh daya pancar terhadap nilai BER.
5. Menganalisa pengaruh kondisi lingkungan terhadap nilai BER.
6. Menganalisa pengaruh ada atau tidaknya *obstacle* terhadap nilai BER.

### 1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini dijabarkan dengan diagram alir yang diperlihatkan pada Gambar 1.1:



**Gambar 1. 1** Diagram Alir Metode Penelitian

## 1. Studi Pustaka

Untuk tema yang dijadikan rujukan berkaitan dengan materi yang dibahas pada tinjauan pustaka. Studi pustaka juga akan mengambil sumber-sumber yang berkaitan dengan:

- Tema-tema yang dijabarkan pada bagian ruang lingkup tugas akhir.
- Simulasi system komunikasi.
- Desain pemancar OFDM.
- Desain penerima OFDM.
- Referensi pemrograman modul WARP.
- Referensi WARPLab.

## 2. Perumusan parameter simulasi dan pengukuran

Sebelum proses pengukuran bisa berjalan, yang dilakukan pada tahap ini yaitu menentukan parameter misalnya, jumlah bit yang akan dikirim, teknik modulasi *baseband* yang digunakan, ukuran FFT, banyaknya *subcarrier* data, band frekuensi yang digunakan, kondisi *frame* yang dipancarkan. Parameter yang diambil sebagai acuan performansi adalah *Bit Error Rate* (BER).

## 3. Simulasi OFDM pada Matlab

Proses simulasi ini bertujuan untuk menentukan algoritma yang digunakan pada saat pengukuran. Selain itu juga untuk memastikan algoritma yang digunakan sesuai dengan teori dasar tentang OFDM.

## 4. Implementasi pada modul WARP

Implementasi akan diterapkan pada modul WARP namun dengan kondisi lingkungan *indoor* yang *real*. Proses implementasi dilakukan dengan menggunakan software WARPLab versi 7.1.0.

## 5. Pengukuran performansi dan pengambilan data

Setelah modul WARP bisa digunakan untuk simulasi dengan kondisi kanal *real*, maka proses pengukuran dapat dilakukan. Pada tahapan ini, dilakukan pengumpulan data untuk berbagai kondisi parameter yang ditentukan. Kondisi pengukuran antara lain: daya pancar yang berbeda untuk jarak tertentu, komunikasi *Line Of Sight* (LOS) dan *Non Line Of Sight* (NLOS). Tujuan akhirnya adalah menentukan seberapa baik unjuk kerjanya yang diukur oleh BER system.

## 6. Proses analisa data dan pengambilan kesimpulan

Analisa data dan pengambilan kesimpulan mengacu pada data hasil pengukuran.

## 7. Dokumentasi hasil penelitian

Tahapan akhir ini meliputi pembuatan laporan tugas akhir dan penulisan jurnal ilmiah. Pembuatan laporan tugas akhir untuk beberapa bagian dilakukan bersesuaian dengan pengerjaan tahapan-tahapan diatas. Sedangkan jurnal ilmiah dilakukan setelah laporan tugas akhir selesai.

### 1.6 Sistematika Penelitian

Proses penelitian yang tersusun dalam laporan tugas akhir dapat dijabarkan sebagai berikut:

- BAB 1, Bagian awal pada laporan tugas akhir akan membahas tentang latar belakang, tujuan dan permasalahan-permasalahan yang dihadapi dalam pengerjaan tugas akhir.
- BAB 2, Bagian ini membahas mengenai teori-teori terkait yang membantu dalam proses perumusan masalah system. Teori-teori tersebut juga digunakan sebagai acuan awal dalam penyelesaian permasalahan.
- BAB 3, Bagian ini membahas tentang langkah-langkah desain sistem OFDM. Tahapan ini bertujuan untuk menjelaskan proses desain sistem, kendala-kendala serta penyelesaiannya dalam bentuk implementasi pada alat.
- BAB 4, Bagian ini akan membahas mengenai sistematika pengukuran dan hasilnya. Pada bab tersebut juga dilakukan analisis awal terhadap data-data hasil pengukuran.
- BAB 5, Bagian ini akan membahas kesimpulan berdasarkan hasil-hasil analisa pada bab 4 sebelumnya.

### 1.7 Manfaat

Manfaat yang diharapkan tercapai setelah selesainya tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Mengetahui kendala-kendala dalam proses desain sistem komunikasi dan bagaimana cara menyelesaikannya.
- Memahami proses dan cara kerja teknik OFDM dengan menggunakan kanal *real*.
- Memberikan kontribusi tentang proses desain dan implementasi sistem komunikasi pada WARP.

- Data: dengan masing-masing durasi  $4 \mu\text{s}$  ( $3.2 \mu\text{s} + 0.8 \mu\text{s}$  (*cyclic prefix*)) yang ditransmisikan melalui 52 *subcarrier* dimana 48 untuk data dan 4 untuk *pilot*.

Struktur dari *channel* OFDM 20 MHz diperlihatkan pada Gambar 2.10.

### 2.3 Fading Skala Kecil (*Small-Scale Fading*)

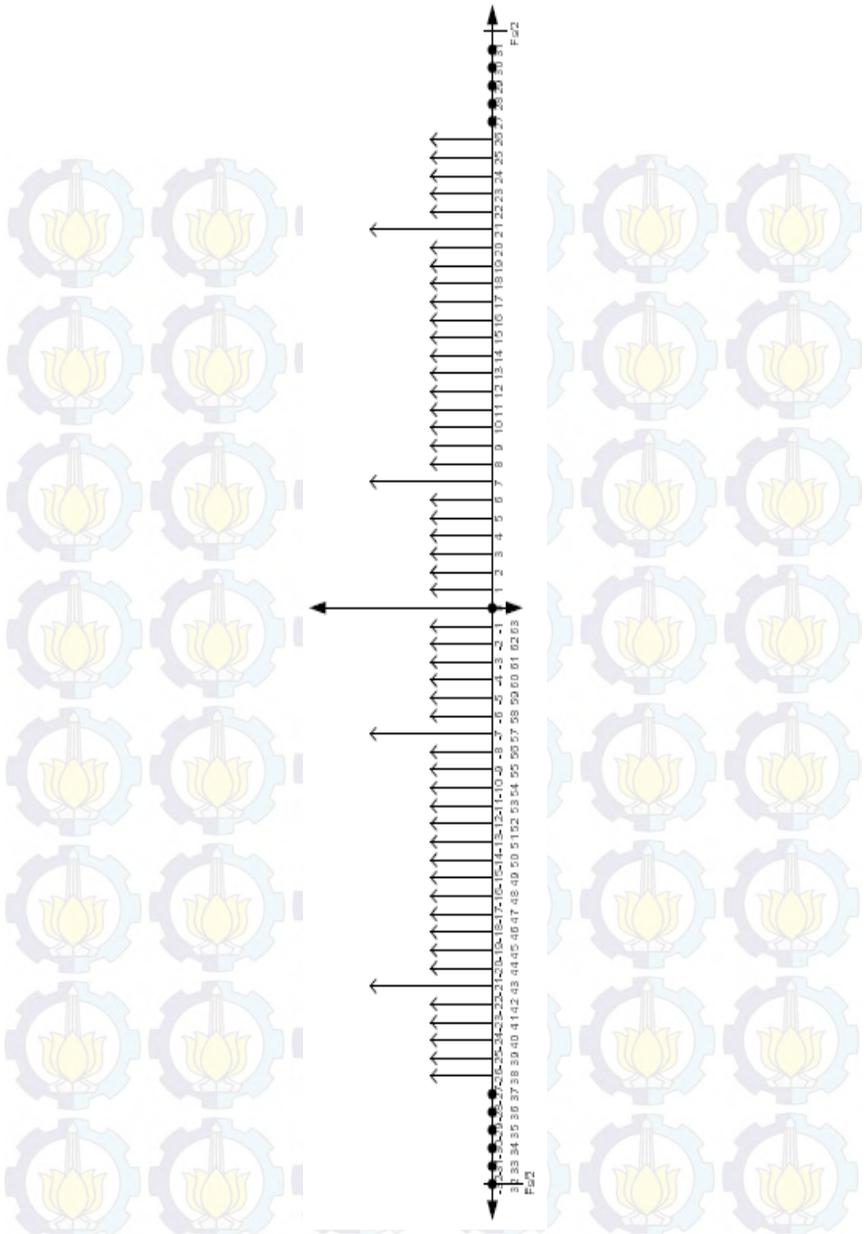
Fading skala kecil merupakan perubahan yang sangat cepat dari amplitude sinyal radio dengan periode waktu atau jarak yang singkat yang menyebabkan menyebabkan bervariasinya level sinyal terima. Secara garis besar, fading skala kecil dikaitkan dengan propagasi *multipath*, kecepatan bergerak (*mobile speed*), objek sekitar dan *bandwidth* sinyal transmisi [1].

Fading skala kecil dibagi menjadi 2 jenis, berdasarkan penyebaran waktu *delay multipath* (*multipath time delay spread*) yang menyebabkan disperse waktu dan penyebaran *doppler* (*doppler speed*) yang menyebabkan dispersi frekuensi. Yang akan dibahas pada laporan tugas akhir ini bagian ini yaitu fading akibat disperse waktu yaitu *flat fading* dan *frequency selective fading*.

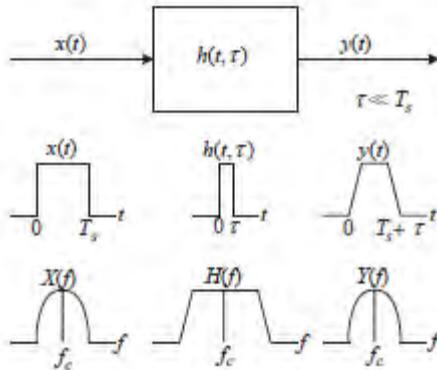
#### 2.3.1 Flat Fading

Jika kanal radio memiliki respon gain yang konstan dan fasa yang linear dengan *bandwidth* yang lebih besar dibandingkan dengan *bandwidth* sinyal transmisi maka sinyal terima akan mengalami *flat fading* [23]. Pada *flat fading*, yang tetap dijaga yaitu respon amplitude yang konstan dan respon fasa yang linear [1]. Namun bagaimanapun juga, kekuatan sinyal yang diterima berubah sepanjang waktu, yang disebabkan fluktuasi pada gain kanal akibat *multipath* [23]. Karakteristik dari kanal *flat fading* diperlihatkan pada Gambar 2.11.

Pada Gambar 2.11 dapat dilihat bahwa jika *gain* kanal berubah sepanjang waktu, perubahan amplitude terjadi pada sinyal terima. Dalam domain waktu, sinyal terima  $y(t)$  memiliki variasi *gain* tetapi spectrum transmisi tetap dijaga [23].



**Gambar 2. 10** Struktur *Channel* OFDM [20]



**Gambar 2. 11** Karakteristik Kanal *Flat Fading* [1]

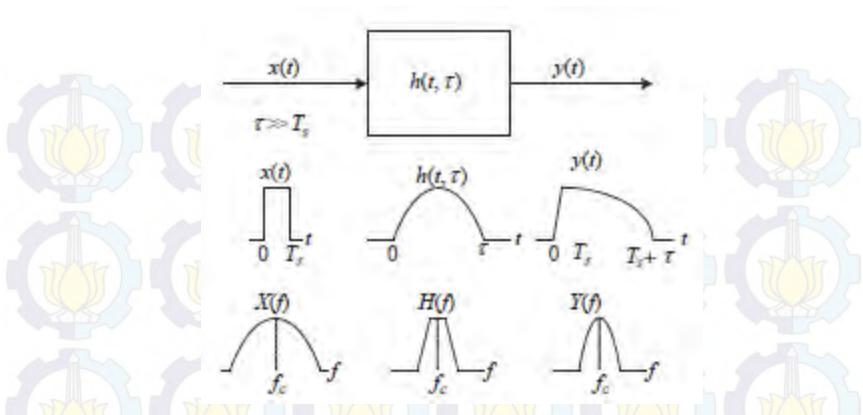
*Bandwidth* yang sempit menyebabkan periode symbol  $T_s$  lebih besar dibandingkan penyebaran *delay*  $\tau$  dari kanal *multipath*  $h(t, \tau)$ . Sepanjang  $T_s$  lebih besar dibandingkan  $\tau$ , symbol pertama tidak berpengaruh terhadap symbol kedua sehingga *Inter-Symbol Interference* (ISI) tidak terlalu signifikan. Secara garis besar, sinyal transmit akan mengalami *flat fading* jika memenuhi syarat [1]:

$$B_s \ll B_c \text{ dan } T_s \gg \sigma_\tau \quad (2.6)$$

Dimana  $B_s$  dan  $T_s$  merupakan *bandwidth* dan periode symbol dari sinyal transmit, sedangkan  $B_c$  dan  $\sigma_\tau$  merupakan *bandwidth* koheren dan penyebaran *delay* RMS.

### 2.3.2 Frequency Selective Fading

Jika kanal memiliki respon gain konstan dan fasa linear dengan *bandwidth* yang lebih kecil jika dibandingkan dengan *bandwidth* sinyal transmisi maka kanal menyebabkan *frequency selective fading* pada sinyal yang diterima. Asal kata dari kanal *frequency selective fading* karena amplitude dari respon frekuensi bervariasi berbeda dengan kanal *flat fading* [1] Karakteristik dari kanal *frequency selective fading* diperlihatkan pada Gambar 2.12.



**Gambar 2. 12** Karakteristik Kanal *Frequency Selective Fading* [1]

Berdasarkan gambar diatas dapat disimpulkan bahwa telah terjadi ISI dalam domain waktu karena penyebaran *delay* kanal  $\tau$  lebih besar dibandingkan dengan periode symbol. Hal inilah yang menyebabkan *bandwidth* sinyal  $B_s$  lebih besar dibandingkan dengan *bandwidth* koheren  $B_c$  dan membuat sinyal terima memiliki perbedaan amplitude dalam respon frekuensi [1]. Secara garis besar, sinyal transmit akan mengalami *frequency selective fading* jika memenuhi syarat [23]:

$$B_s > B_c \text{ dan } T_s < \sigma_\tau \tag{2.7}$$

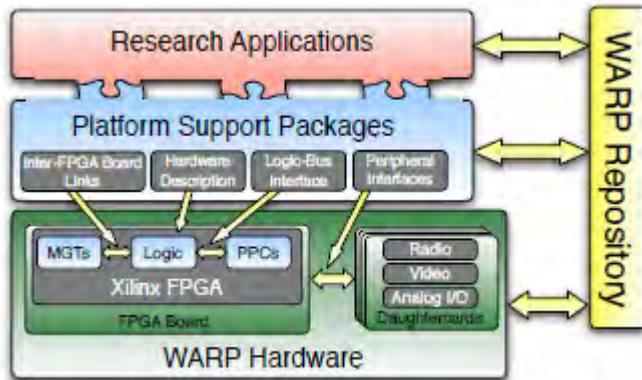
## 2.4 *Wireless Open-Access Research Platform (WARP)* dan **WARPLab**

WARP merupakan suatu *platform wireless* yang dapat diprogram, dapat melakukan *prototype* jaringan *wireless* dari yang dasar hingga kompleks. WARP menggabungkan *hardware* performa tinggi yang dapat diprogram dengan *open-source repository* dari desain-desain referensi dan bahan-bahan sumber [9].

Proyek WARP dimulai pada tahun 2006 oleh Prof. Ashu Sabharwal di Universitas Rice, Amerika [9]. Sebelumnya, proyek ini didanai oleh *National Science Foundation* dengan bantuan langsung dari Xilinx [9].

Proyek WARP telah tumbuh menjadi sebuah usaha mandiri yang *open source* dengan pengguna di seluruh dunia. Dalam penggunaan WARP pada penelitian, terdapat beberapa metode untuk pemrograman perangkat tersebut. Platform ini terdiri dari *hardware* dan implementasi FPGA yang menjadi kunci komunikasi antar blok-blok. *Hardware* pada WARP terdiri dari *FPGA-based processing boards* yang digabungkan untuk radio band lebar (*wideband*) dan *I/O interfaces*. Arsitektur dari WARP diperlihatkan pada Gambar 2.13 yang terdiri dari 4 komponen utama.

1. *Custom Hardware*: dibutuhkan untuk komunikasi *wireless* performa tinggi. *Hardware* menyediakan sumber daya yang *capable* untuk DSP kecepatan tinggi - implementasi algoritma, *scalable* antar koneksi-koneksi untuk mengalokasikan lebih banyak daya pemrosesan yang dibutuhkan dan *extensible* untuk radio, terutama bagian prosesor dan interface ekspansi lainnya.



**Gambar 2.13** Komponen-komponen dari Desain Platform [4]

2. *Platform Support Packages*: mendesain perangkat-perangkat dan modul *interface* level rendah yang didesain untuk memungkinkan penggunaan *hardware* oleh para peneliti pada semua layer desain jaringan wireless.

3. *Open-Access Repository*: penyimpanan pusat untuk semua *source code*, model-model dan file-file desain *hardware*. Penyimpanan pusat tersebut dibawah lisensi BSD-like *open-source*.
4. *Research Applications*: pengimplementasian dari algoritma-algoritma, dapat dilakukan dengan cara custom *hardware* dan *platform support packages*. *Full system* dengan algoritma-algoritma tersebut dapat dengan cepat dibangun menggunakan blok modul standar yang disediakan pada *repository*.

Dalam proses desain, setidaknya terdapat dua metode yang bisa digunakan untuk meneliti desain *physical layer*. Metode pertama dengan menggunakan sistem *non-real-time* yaitu dengan WARPLab. Sistem ini menggunakan kondisi kanal *real-time*, namun dengan pemrosesan data secara *offline* melalui MATLAB [10].

Metode kedua adalah dengan membangun sistem *real-time* yang diinginkan untuk diimplementasikan pada FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Sistem tersebut bisa dibangun secara independen dan berdiri sendiri pada *node* WARP dan menggunakan *system generator* [10].

#### 2.4.1 WARP Board

Proses implementasi sistem komunikasi pada WARP dilakukan pada modul WARP sebagai FPGA dan modul radio sebagai *interface* antara sistem komunikasi dengan pengolahan sinyal digital. Secara umum, sistem WARP dapat dijelaskan dengan blok diagram yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.

Berdasarkan Gambar 2.14 tersebut dapat terlihat bahwa ada 2 komponen utama pada *node* WARP yaitu radio *board* dan FPGA. Sementara untuk warna merah muda menandakan blok pemancar dan warna biru menandakan blok penerima.

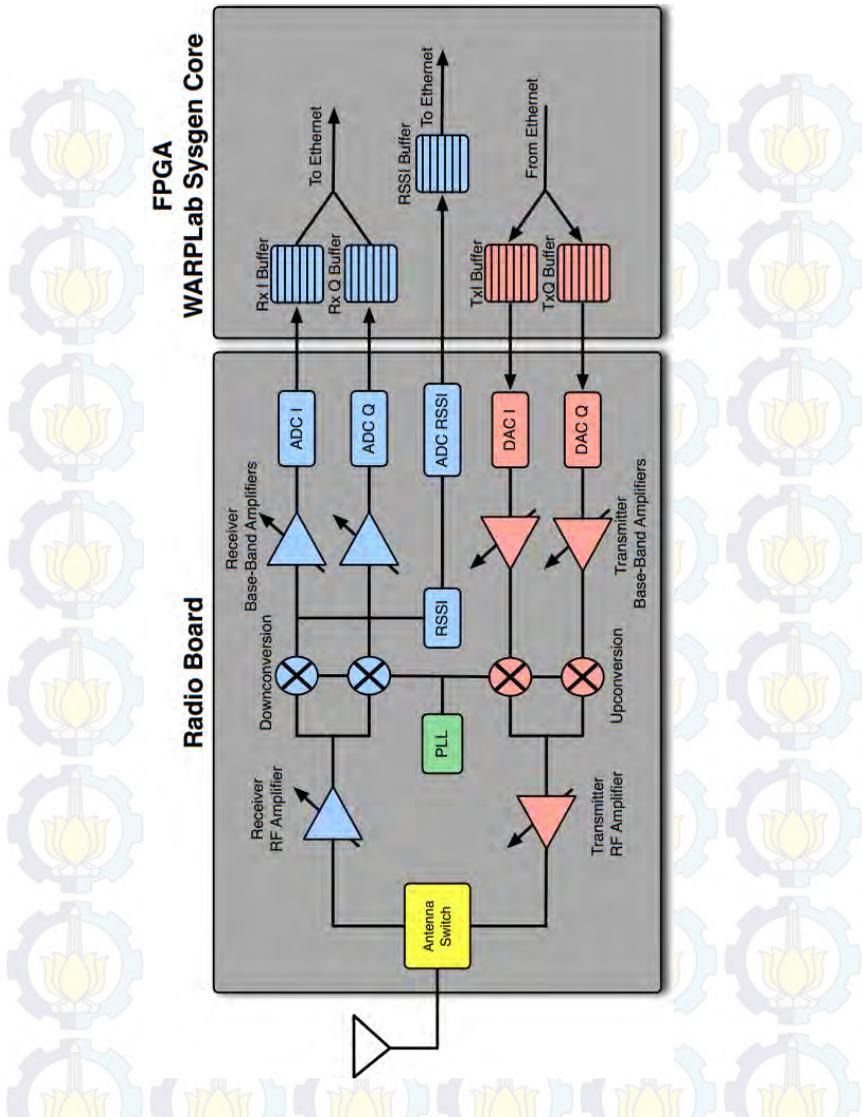
Blok pada jalur pemancar:

1. Tx I/Q Buffer: tempat penyimpanan sampel *inphase* dan *quadrature* yang akan dikirim.

2. DAC I/Q: mengkonversi dari digital ke analog untuk sample *inphase/quadrature*.
3. Tx BB Amplifier: kepanjangan dari *Transmitter Base Band Amplifier*. Terdapat dua amplifier didalamnya yaitu satu untuk sinyal *inphase* dan satu untuk sinyal *quadrature*. Ini merupakan *variable gain amplifier* dimana nilainya dapat dimasukkan oleh user di *workspace* matlab.
4. *Upconversion*: Mengubah sinyal *baseband* ke sinyal RF. Frekuensi *carrier* tergantung pada pengaturan PLL.
5. Tx RF Amplifier: *Transmitter RF amplifier, Variabel gain amplifier*. Nilai ini yang dimasukkan oleh user di *workspace* Matlab.

Blok pada jalur penerima:

1. Rx RF Amplifier: *Receiver RF amplifier, variable gain amplifier*. Nilai ini yang dimasukkan oleh user di *workspace* Matlab.
2. *Downconversion*: mengubah sinyal RF ke sinyal *baseband*. Sinyal *baseband* tersebut terdiri dari sinyal *inphase* dan *quadrature*. *Downconversion* dari RF ini bergantung kepada *setting* PLL.
3. Rx BB Amplifiers: *Receiver Base Band Amplifier*. Amplifier ini terdiri dari 2 bagian, yaitu satu untuk sinyal *inphase* dan satu untuk sinyal *quadrature*. Bagian ini adalah *variable gain amplifier*, keduanya diset dengan nilai gain sama yang dapat dimasukkan oleh user menggunakan Matlab.
4. RSSI: kepanjangan dari *Receive Signal Strength Indicator*. Blok ini mengukur nilai dari RSSI.
5. ADC I/Q: mengkonversi sinyal analog ke digital untuk sample *inphase* dan *quadrature*.
6. ADC RSSI: mengkonversi sinyal digital ke analog untuk pengukuran RSSI. Data RSSI tersedia di  $\frac{1}{4}$  laju data I/Q.
7. Rx I/Q Buffer: tempat penyimpanan sample yang diterima baik dalam bentuk *inphase* maupun *quadrature*.
6. RSSI Buffer: tempat penyimpanan data RSSI.



Gambar 2. 14 Diagram Blok Node WARP

Pengaturan PLL bertujuan untuk menentukan frekuensi pembawa yang dapat diatur ke salah satu dari 14 kanal wi-fi di band 2.4 GHz atau 23 saluran di 5 GHz. Pengaturan ini dapat diatur dari *workspace* matlab.

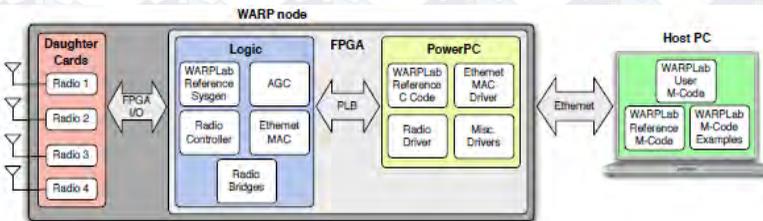
## 2.4.2 WARPLab

WARPLab merupakan sebuah kerangka kerja yang digunakan untuk *physical layer*. Penggunaan dari WARPLab memungkinkan kombinasi dari beberapa sistem multi-antena pada pemancar dan penerima.

Salah satu sifat dari WARPLab yaitu [11]:

- Satu PC/laptop dapat mengontrol banyak node-node WARP.
- MATLAB untuk pemrosesan sinyal.
- Pemrosesan tidak *real time*.
- WARP untuk *interface wireless*.
- Penggunaan *channel* secara *real time*.
- *Sample* yang ditulis pada MATLAB akan disimpan di FPGA.
- *Sample* di FPGA akan dikirim melalui udara menggunakan radio-radio yang tersedia.

Secara keseluruhan, arsitektur dari WARPLab diperlihatkan pada gambar 2.15 dibawah ini:

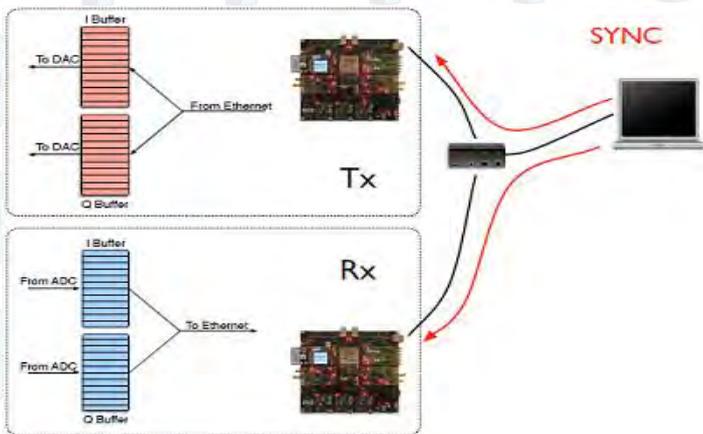


**Gambar 2.15** Arsitektur WARPLab [11]

Sementara untuk aliran kerja dari WARPLab diperlihatkan pada Gambar 2.13 dibawah ini. Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.13, aliran kerja dari WARPLab yaitu [11]:

- Inisialisasi node-node dan setting radio.
- Download vector Tx.
- Enable jalur Tx/Rx.
- Mesin utama Tx/Rx dalam keadaan diam.
- Men-trigger transmisi dan melakukan capture.
- Menerima vector Rx.

Saat ini, versi WARP dan versi WARPLab yang digunakan pada tugas akhir ini adalah versi 2 dan 7. WARPLab 7 memiliki spesifikasi yang lebih terbaru dibandingkan dengan WARPLab sebelumnya yaitu:



**Gambar 2.16** WARPLab Flow [11]

- Paket “sniffing” logika (compatible dengan WARP v3)
  - 10 x pengurangan jitter ‘node-to-node’ dalam memulai siklus Tx/Rx
  - Siklus Tx/Rx mulai lebih cepat yaitu sekitar 12  $\mu$ s
- Mendukung untuk frame Ethernet sampai sekitar 9014 byte, sehingga meningkatkan performance secara signifikan.
- Default buffer sekitar 215 (32 k) sampel (durasi 800  $\mu$ s per siklus Tx/Rx) (hanya compatible dengan WARP v3).



## BAB 2

### DASAR TEORI

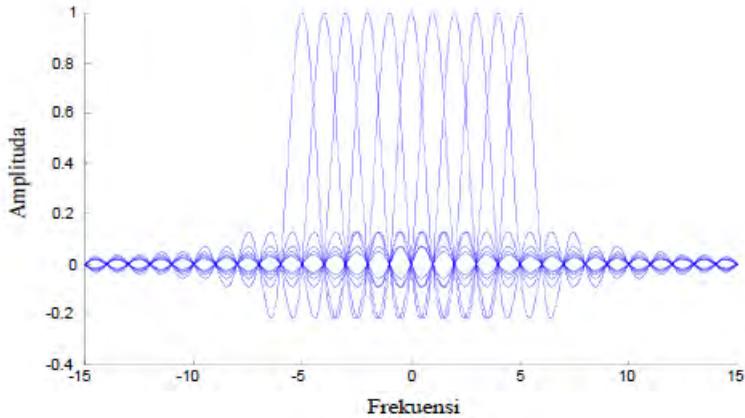
Pada bab ini akan dijabarkan dasar teori yang menjadi acuan dalam pengerjaan penelitian. Pembahasan teori dalam bab 2 memiliki tujuan antara lain pemahaman mendasar tentang teknik OFDM. Terutama mengenai cara kerja dari penerima OFDM seperti proses estimasi kanal maupun estimasi phase error. Kemudian pemahaman tentang parameter IEEE 802.11 yang akan dipakai dalam proses desain sistem. Dan terakhir pemahaman awal tentang perangkat WARP dan penggunaan *framework* WARP Lab dalam implementasi sistem komunikasi nirkabel.

#### 2.1 Teknik *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM)

OFDM merupakan bentuk dari *Multi-Carrier Modulation* (MCM) yang dapat dicapai dengan membagi kanal transmisi tunggal menjadi beberapa *subchannel* atau *subcarrier* yang saling tegak lurus (*orthogonal*) untuk mengoptimalkan efisiensi transmisi data [5]. Secara matematis, keorthogonalan OFDM dapat dijelaskan sebagai berikut. Misalkan fungsi  $X_m(t)$  adalah *subcarrier* ke- $m$  dan  $X_n(t)$  adalah *subcarrier* ke- $n$ . Kedua *subcarrier* ini dikatakan saling *orthogonal* satu sama lain pada *interval*  $a < t < b$  jika memenuhi kondisi [1]:

$$\int_a^b X_m(t) * X_n(t) dt = 0 \quad (2.1)$$

Untuk spektrum frekuensi OFDM diperlihatkan pada Gambar 2.1. Blok diagram OFDM seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.2 dibawah ini. Secara umum, penjelasan untuk setiap blok pada Gambar 2.1 seperti dibawah ini.

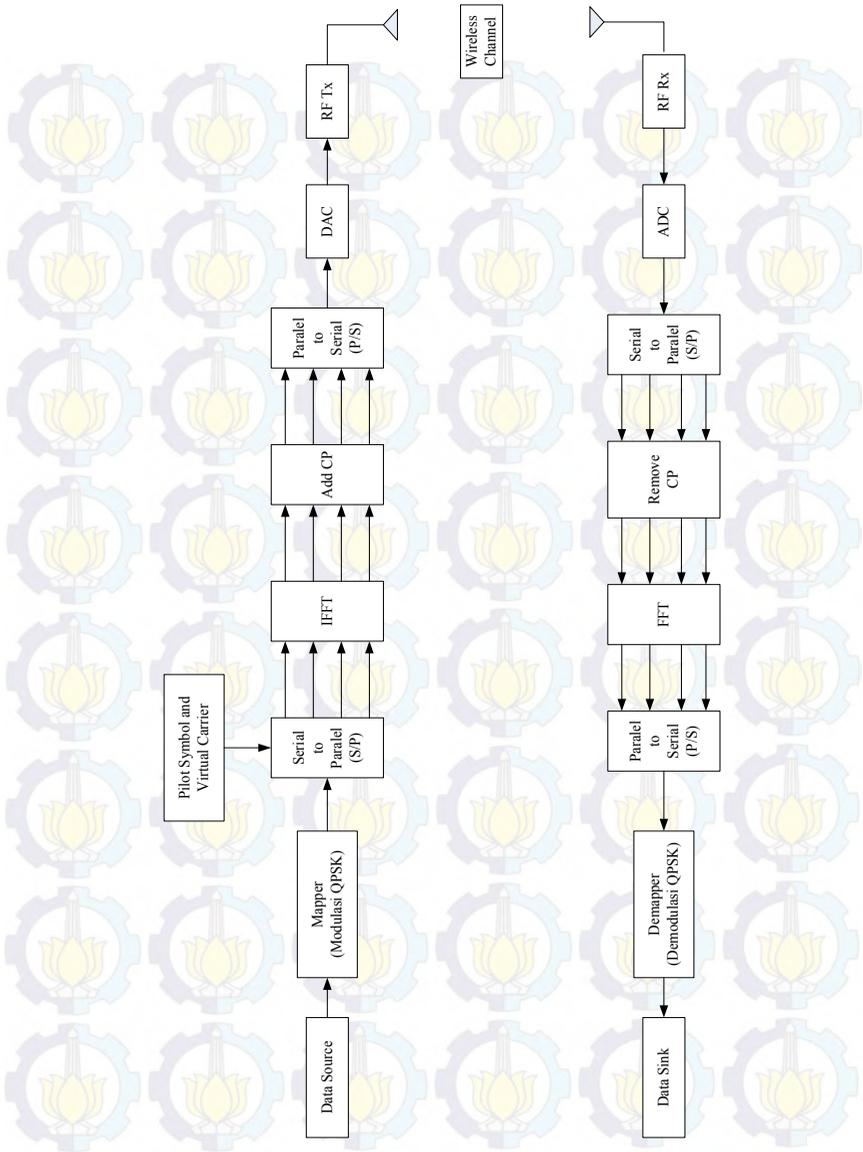


**Gambar 2. 1** Frekuensi OFDM [1]

### 2.2.1 Mapper dan Demapper QPSK

Bit-bit informasi akan dibangkitkan secara acak dan berupa data digital (1 dan 0) dimodulasi phase digital, bentuk gelombang sinyal M digambarkan sebagai [16]:

$$\begin{aligned}
 s_m(t) &= \text{Re} \left[ g(t) e^{j \frac{2\pi(m-1)}{M}} e^{j 2\pi f_c t} \right], \quad m = 1, 2, \dots, M \\
 &= g(t) \cos[2\pi f_c t + 2\pi/M (m - 1)] \\
 &= g(t) \cos\left(\frac{2\pi}{M} (m - 1)\right) \cos 2\pi f_c t - g(t) \sin\left(\frac{2\pi}{M} (m - 1)\right) \sin 2\pi f_c t \quad (2.2)
 \end{aligned}$$



**Gambar 2.2** Blok Diagram OFDM [1]

Dimana:

$g(t)$  = Bentuk sinyal pulsa

$\theta_m = 2\pi(m - 1)/M, m = 1, 2, \dots, M$

QPSK merupakan teknik pengkodean M-ary dimana  $M = 4$ . M berarti digit yang mewakili banyaknya kondisi yang mungkin. Dalam modulasi QPSK ada 4 *phase output* yang berbeda, maka harus ada 4 kondisi input yang berbeda. Karena input digital ke modulator QPSK adalah sinyal biner, maka untuk menghasilkan 4 kondisi input yang berbeda harus dipakai bit input lebih dari 1 bit tunggal. Dalam hal ini, yaitu menggunakan 2 bit, sehingga ada 4 kondisi yang mungkin yaitu: 00, 01, 10 dan 11 [6]. Singkatnya dalam modulasi QPSK menghasilkan output berupa symbol dimana dalam 1 symbol mewakili 2 bit. Contoh gambar konstelasi QPSK yang mengalami pergeseran fasa  $45^\circ$  diperlihatkan pada Gambar 2.3 dibawah ini.

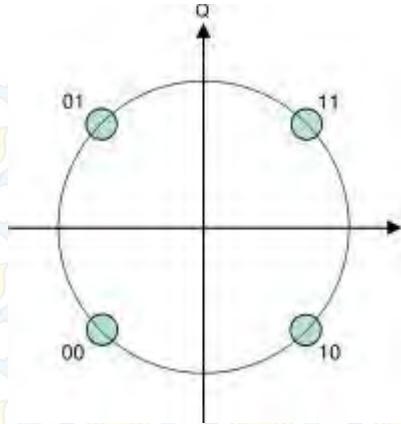
Sementara untuk proses demodulasi berkebalikan dari modulasi, yaitu perubahan dari symbol-symbol menjadi suatu bit. Dimana 1 symbol mewakili 2 bit.

### 2.2.2 Pilot

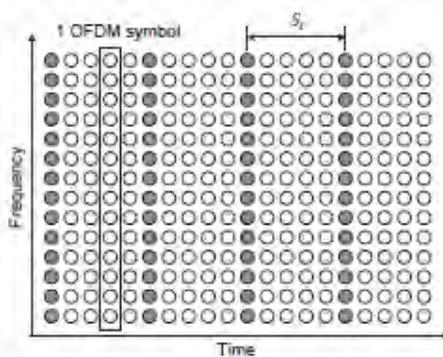
*Pilot* merupakan sebuah symbol yang ditransmisikan pada *predefined-sucarrier*. *Pilot* digunakan untuk mengestimasi fasa noise pada penerima [17]. Struktur *Pilot* memiliki 3 tipe, yaitu [1]:

- Tipe *block*

Pada tipe ini, simbol-simbol OFDM dengan *Pilot-Pilot* pada semua *subcarrier* ditransmisi secara periodic untuk kanal estimasi. Susunan *Pilot* tipe ini diperlihatkan pada Gambar 2.4. Dimana  $S_t$  merupakan periode dari *Pilot* symbol dalam domain waktu. Menggunakan tipe *Pilot* ini, interpolasi dalam domain waktu digunakan untuk mengestimasi kanal sepanjang sumbu x (waktu) [1]. Karena *Pilot* ditempatkan pada semua *subcarrier Pilot symbol* dalam domain waktu, maka tipe *block* ini cocok untuk kanal *frequency selective*.



**Gambar 2.3** Contoh Konstelasi QPSK [16]



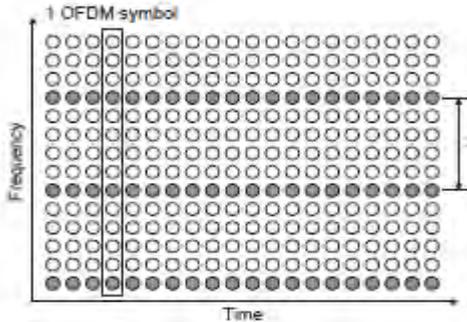
**Gambar 2.4** Susunan *Pilot* tipe Block [1]

- Tipe *comb*

Pada tipe ini, setiap *symbol* OFDM memiliki *symbol Pilot* pada *subcarrier-subcarrier* yang ditempatkan secara periodic, yang mana digunakan untuk interpolasi dalam domain frekuensi untuk estimasi kanal sepanjang sumbu frekuensi. Susunan *Pilot* tipe ini diperlihatkan pada Gambar 2.5. Dimana  $S_f$  merupakan periode dari *Pilot* dalam domain frekuensi. Tipe susunan *Pilot* ini cocok untuk kanal *fast fading* tetapi tidak untuk kanal *frequency selective*.

- Tipe *lattice*

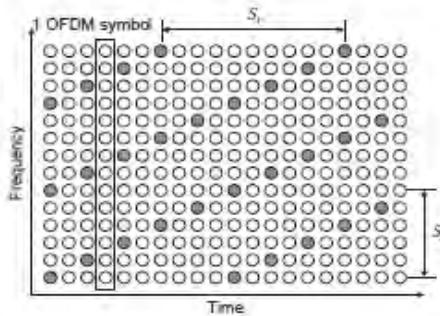
Pada tipe ini, *Pilot* ditaruh baik dalam domain waktu maupun frekuensi dengan periode tertentu. Tujuannya yaitu untuk interpolasi dalam domain waktu/frekuensi untuk estimasi kanal. Susunan *Pilot* ini diperlihatkan pada Gambar 2.6. Dimana  $S_t$  dan  $S_f$  menggambarkan periode dari *symbol-symbol Pilot* dalam domain waktu dan frekuensi.



**Gambar 2. 5** Susunan *Pilot* tipe Comb [1]

### 2.2.3 Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) dan Fast Fourier Transform (FFT)

IFFT dan FFT merupakan kunci utama dalam OFDM. Blok IFFT berfungsi untuk membangkitkan frekuensi *carrier* yang saling orthogonal satu sama lain. Jumlah titik IFFT pada implementasi bernilai  $2^n$ , dengan  $n$  adalah bilangan bulat positif. Titik IFFT bisa diset sesuai dengan jumlah *subcarrier* yang digunakan atau lebih besar. Dalam implementasi di WARP nanti, jumlah titik IFFT merupakan jumlah dari *subcarrier* yang berisi data input dan *guard subcarrier* yang berisi data dengan nilai 0. Sementara blok FFT berfungsi sebagai osilator local pada penerima yang akan memisahkan antara frekuensi *carrier* dengan symbol-symbol OFDM yang berbeda pada frekuensi tersebut. Jumlah titik FFT sama seperti jumlah titik IFFT. Berdasarkan [17], persamaan untuk proses IFFT pada pemancar untuk *sample* ke- $n$  di symbol OFDM ke- $m$  yaitu:



**Gambar 2. 6** Susunan *Pilot* tipe Lattice [1]

$$s_{m,n} = \sqrt{\frac{1}{N}} \sum_{k=0}^{N-1} A_{m,k} e^{j2\pi \frac{kn}{N}}, 0 \leq n \leq N - 1 \quad (2.3)$$

Dimana:

$N$  = Ukuran IFFT

$A_{m,k}$  = Symbol data hasil modulasi pada *subcarrier* ke- $k$  di symbol OFDM ke- $m$

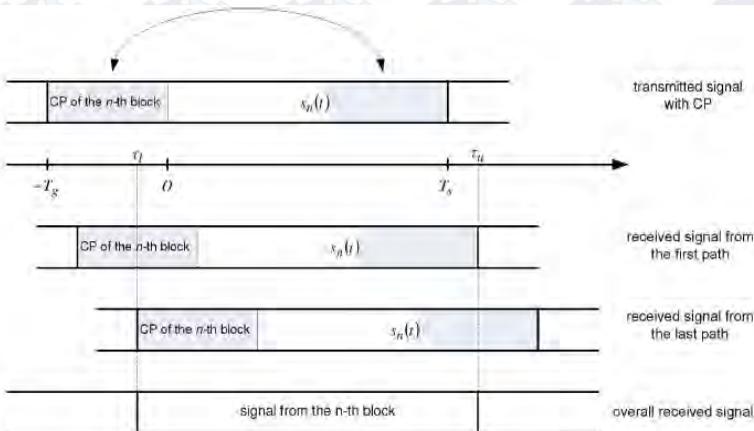
#### 2.2.4 Penambahan dan pembuangan *Cyclic Prefix* (CP)

*Cyclic prefix* merupakan salinan bagian akhir dari suatu symbol OFDM dan menempatkannya pada bagian depan blok symbol tersebut. Tujuan dari adanya *cyclic prefix* yaitu untuk mengurangi kemungkinan terjadinya ISI bukan berarti menghilangkan. Panjang dari *cyclic prefix* harus lebih panjang daripada kanal respons impuls kanal [2]. Untuk lebih jelasnya fungsi dari *cyclic prefix* diperlihatkan pada Gambar 2.7.

Sementara untuk ilustrasi susunan *cyclic prefix* pada OFDM diperlihatkan pada Gambar 2.8. Dimana  $l$  merupakan sampel terakhir dari suatu symbol OFDM, yang kemudian di *copy* dan ditempatkan kebagian awal dari suatu symbol OFDM tersebut. Selain itu, adanya *cyclic prefix* dapat digunakan untuk mendeteksi awal dari masing-

masing symbol OFDM. Hal ini dapat dilakukan karena  $l$  sampel awal dan terakhir berisi nilai yang sama sehingga dapat dikorelasikan [2].

Data *output* merupakan data yang keluar setelah melalui proses OFDM diatas. Diharapkan nilai data *output* dan nilai data *input* akan bernilai sama.



**Gambar 2.7** Fungsi dari *Cyclic Prefix* [18]

Dari gambar diatas dibuat suatu persamaan tentang panjang keseluruhan dari symbol OFDM yaitu:

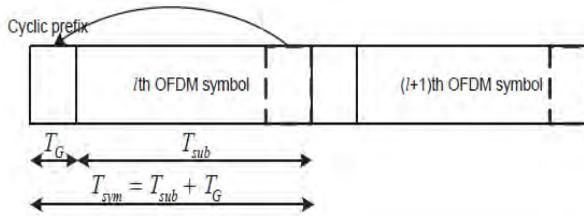
$$T_{sym} = T_{sub} + T_G \quad (2.3)$$

Dimana:

$T_{sub}$  = Panjang symbol OFDM tanpa *cyclic prefix*

$T_G$  = Panjang *cyclic prefix*

$T_{sym}$  = Total panjang symbol OFDM



**Gambar 2. 8** *Cyclic Prefix* pada OFDM [1]

### 2.2.5 Kelebihan dan Kekurangan OFDM

Berdasarkan [2], OFDM memiliki beberapa kelebihan dan kerugian jika dibandingkan dengan sistem modulasi *single carrier*.

- Kelebihan:
  - Tahan terhadap penyebaran *delay* akibat multipath; karena durasi symbol dibuat lebih besar.
  - Tahan terhadap kanal *frequency selective fading*; karena kanal *bandwidth* yang tersedia dikonversi menjadi beberapa *subcarrier* yang sempit. Sehingga bisa diasumsikan *subcarrier* hanya mengalami *flat fading*
  - Efisien dalam hal modulasi dan demodulasi; Modulasi dan demodulasi setiap *subcarrier* hanya menggunakan metode IFFT dan FFT. Dengan menggunakan metode tersebut membuat efisien penggunaan spectrum dengan cara saling *overlap* antar *subcarrier*.
  - Transmisi *bit rate* yang tinggi
  - *Equalizer* yang sederhana; Simbol OFDM lebih besar dari maksimum penyebaran *delay* sehingga menghasilkan kanal *flat fading* yang dapat di *equalizer* dengan mudah
  - Efisiensi spectral yang besar
- Kekurangan:
  - Keakuratan sinkronisasi yang tinggi
  - *Peak to Average Power Ratio* (PAPR) yang tinggi
  - Lebih sensitive terhadap *carrier offset* dan *drift* dibandingkan dengan sistem *single carrier*.

## 2.2 IEEE 802.11a/g

Sistem OFDM dengan segala kelebihanannya sudah diterapkan pada banyak teknologi, sebagai contoh digunakan pada IEEE 802.11a/g dalam system *Wireless* LANs. Parameter-parameter umum dari 802.11a/g diperlihatkan pada Tabel 2.1 dibawah ini:

**Tabel 2.1** Parameter Umum dari IEEE 802.11 [7]

Modulasi:	BPSK, QPSK, 16-QAM atau 64-QAM
Jumlah <i>Subcarrier</i> :	52
Jumlah <i>Pilot Tone</i> :	4
Durasi Symbol OFDM:	4 $\mu$ sec
<i>Guard Interval</i> :	1.6 $\mu$ sec
Spasi <i>Subcarrier</i> :	312,5 kHz
<i>Bandwidth</i> Sinyal:	16,66 MHz
Spasi Kanal:	20 MHz

Sementara untuk susunan dari *frame* IEEE 802.11 diperlihatkan pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** *Frame* IEEE 802.11 [8]

Penjelasan mengenai Gambar 2.8 yaitu:

- *Short Training Field* (STF) atau biasa disebut *Short Training Sequence* (STS): merupakan pengulangan 10x dari *Short Symbol* (SS). Sehingga jika setiap SS memiliki durasi 0.8  $\mu$ s maka durasi untuk STF menjadi 0.8  $\mu$ s \* 10 = 8  $\mu$ s. Fungsi dari STF ini sebagai deteksi sinyal, konvergensi AGC, *diversity selection*, *timing acquisition* dan *coarse frequency acquisition* [5]. *Short Symbol* (SS) terdiri dari 12 *subcarrier*, dimana dimodulasikan oleh elemen dari deretan  $S$ , dengan nilai  $S$  yang digambarkan pada persamaan dibawah ini [5]:

$$S_{26,26} = \sqrt{\frac{13}{6}} \times \{ \{ 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0 \} \} \quad (2.4)$$

Faktor pengali  $\sqrt{\frac{13}{6}}$  digunakan untuk normalisasi daya rata-rata dari hasil symbol OFDM, dimana menggunakan 12 dari 52 *subcarrier*. 52 *subcarrier* ditambah sebuah kanal DC dari deretan  $S$  dipetakan kedalam IFFT dengan panjang 64. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, yang dinamakan STS merupakan pengulangan 10x dari SS dan masing-masing dari SS memiliki 16 *sample* [5].

- *Long Training Field* (LTF) atau biasa disebut *Long Training Symbol* (LTS): terdiri dari *Guard Interval* (GI) dan pengulangan 2x dari *Long Symbol* (LS). Durasi untuk LTF sekitar 8  $\mu$ s yang didapat dari 1.6  $\mu$ s (“long” durasi GI) + (2\*3.2  $\mu$ s (durasi LS)). Fungsi dari LTF yaitu sebagai estimasi kanal, dan *fine frequency acquisition* pada penerima [5]. LTS terdiri dari 53 *subcarrier*, yang dimodulasikan oleh elemen dari deretan  $L$  yang digambarkan pada persamaan dibawah ini [5]:

$$L_{26,26} = \{ 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 0, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, 1 \} \quad (2.5)$$

52 *subcarrier* ditambah 1 kanal DC dari deretan  $L$  dipetakan ke IFFT dengan ukuran 64. Kemudian GI diambil dari 32 *sample* terakhir dari deretan  $L$  [5].

- *Signal Field* (SiG): memiliki durasi 0.8  $\mu$ s. SiG ini ama seperti *cyclic prefix*. Fungsi dari SiG yaitu penggeseran waktu untuk menciptakan “*circular prefix*” yang digunakan pada OFDM dalam menghindari ISI dari frame-frame sebelumnya [5].

## BAB 3

### DESAIN SISTEM OFDM

Pembahasan bab tiga terkait dengan sistem komunikasi OFDM pada WARP. Proses penelitian yang dibahas pada bab tiga meliputi pemahaman tentang perangkat WARP dan karakteristiknya. Kemudian pembahasan tentang sistem dan parameter OFDM yang dijadikan referensi desain sistem. Setelah itu, pembahasan tentang *phase offset* dan estimasi kanal pada sistem OFDM. Dan yang terakhir pembahasan tentang metode pengukuran.

#### 3.1 Karakteristik Radio Board WARP versi 1.4

Salah satu karakteristik utama WARP adalah modul transceiver yang digunakan pada proses komunikasi. Radio board yang digunakan dalam tugas akhir ini yaitu versi 1.4 [15]. Bentuk radio board dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Radio Versi 1.4

Spesifikasi dari radio board yaitu [12]:

- Power supply 5 Volt DC.
- 16-bit I/Q DAC menggunakan IC AD9777.
- 14-bit I/Q ADC menggunakan IC AD9248.
- 10-bit RSSI ADC menggunakan IC AD9200.

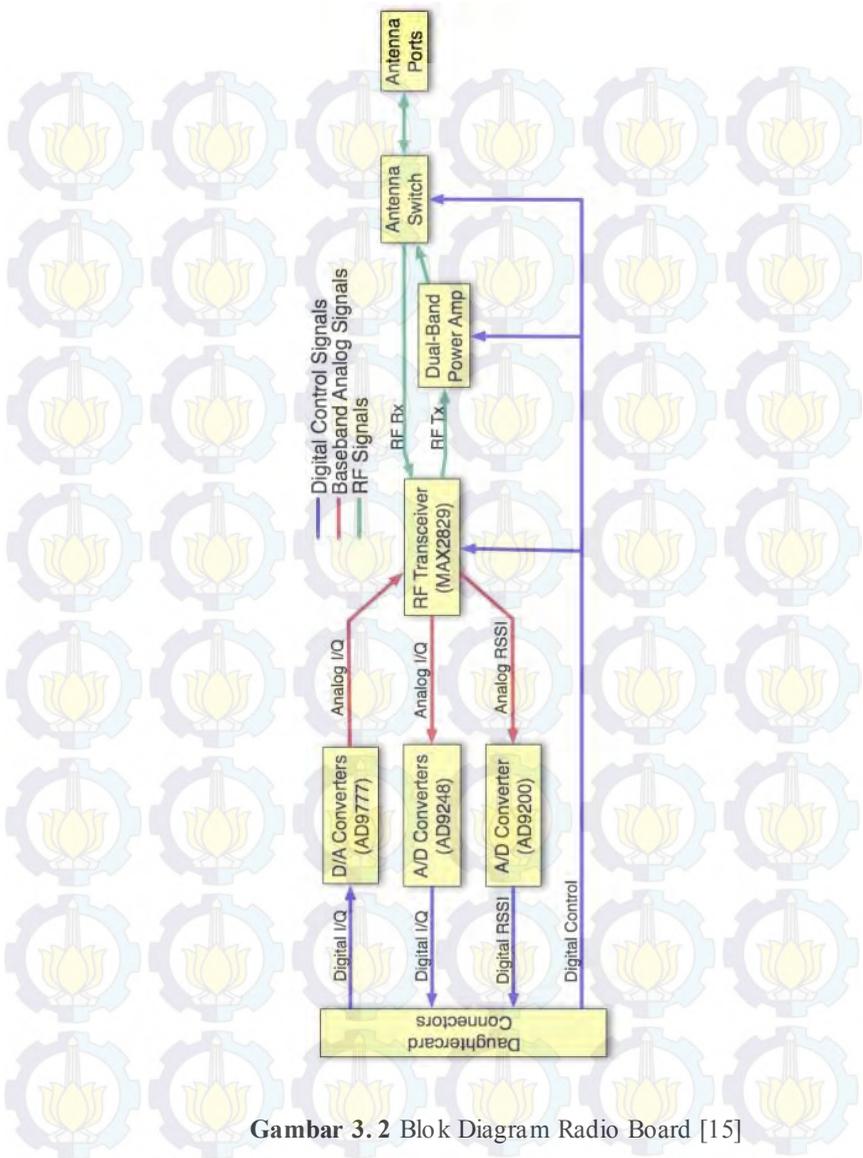
- *Board* menggunakan MAX2829 *transceiver dual-band* dengan spesifikasi
  - o *Dual-band* (2400-2500 MHz, 4900-5875 MHz).
  - o *Bandwidth* hingga 40 MHz.
  - o Dapat diimplementasikan MIMO.

Secara umum, cara kerja radio board dijelaskan pada Gambar 3.2. Ketika radio board bekerja sebagai *transmitter*, sinyal digital dari modul WARP akan diubah menjadi analog melalui AD9777 kemudian dipancarkan menggunakan MAX 2829. Ketika modul bekerja sebagai *receiver*, akan terdapat dua signal analog yang diproses oleh WARP. Sinyal pertama yaitu sinyal I/Q dan kedua adalah sinyal RSSI (*Receive Signal Strength Indicator*) [10].

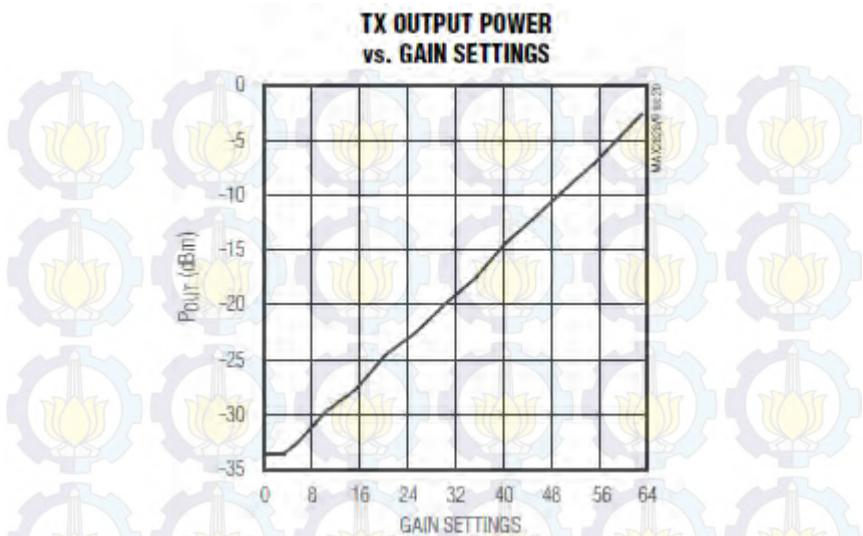
### 3.1.1 Gain Setting

Pengaturan gain melalui WARPLab tergantung kepada *radio board*. Secara umum, pengaturan gain dapat dijelaskan sebagai berikut:

- a) *Transmitter Radio Frequency Gain*  
Perbandingan antara daya tx output dengan gain setting diperlihatkan pada Gambar 3.3.
- b) *Transmitter Baseband Gain*  
Untuk *baseband* gain, terdapat 4 level pengaturan melalui WARPLab yaitu [0, 1, 2, 3] dengan nilai gain *baseband* dalam dB yaitu [-5, -3, -1.5, 0] dB [14].
- c) *Receiver Baseband Gain*  
Pada gain *baseband receiver*, terdapat 32 level pengaturan. Range pengaturan *baseband receiver* yaitu [0:31] dengan nilai dalam dB yaitu [0:63] dB [13].
- d) *Receiver Radio Frequency Gain*  
Pada pengaturan RF gain di penerima terdapat 3 level yaitu [0, 1, 2, 3] dengan nilai dalam dB yaitu [0, 15, 30] dB [13].



Gambar 3.2 Blok Diagram Radio Board [15]



**Gambar 3.3** Tx Ouput Power vs Gain Setting pada MAX2829 [13]

### 3.1.2 Proses Pengiriman Sinyal dan Komunikasi

Proses pemrograman perangkat WARP dilakukan melalui WARPLab dan *software* MATLAB. Langkah-langkah komunikasi dengan menggunakan WARP untuk mengirimkan data seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.4.

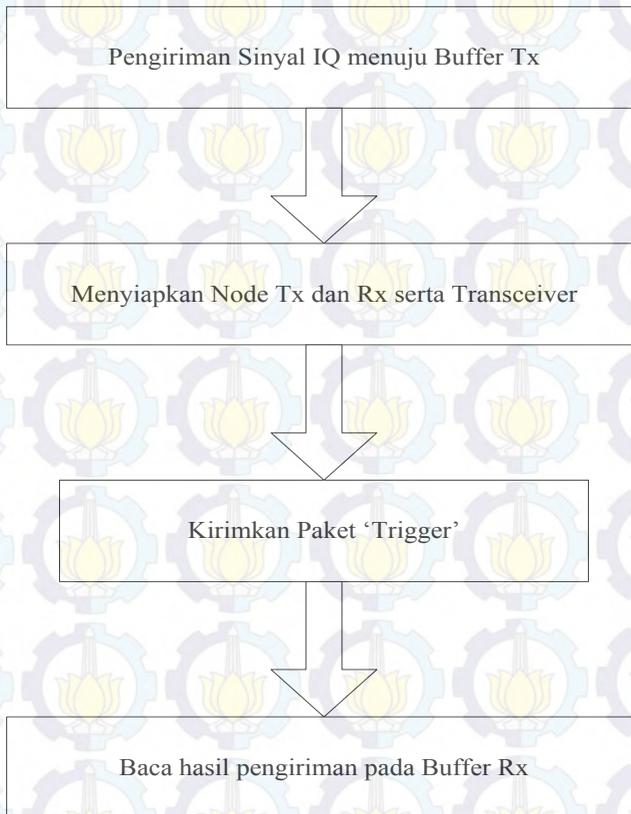
Pada tahap awal, sinyal yang akan dikirim dalam bentuk kompleks IQ (*Inphase Quadrature*) dimana sinyal *inphase* merupakan bagian *real* sementara sinyal *quadrature* merupakan bagian *imaginer*. Sinyal yang akan dikirim disimpan pada *buffer* Tx dengan ukuran  $2^{14}$ .

Setelah proses penyimpanan sinyal pada buffer Tx selesai, maka dilakukan persiapan pengiriman dan penerimaan data dengan mengaktifkan radio pada node pengirim dan penerima.

Proses komunikasi dilakukan dengan mengirimkan sebuah paket ‘*trigger*’ kepada semua *node* secara bersamaan. Ketika sebuah *node*

milik *transmitter* dalam kondisi *enable*, maka *node* tersebut akan memancarkan sinyal yang tadi terdapat pada *buffer*. Jika sebuah *node* milik *receiver* dalam kondisi *enable*, maka *node* tersebut akan menerima sinyal yang dipancarkan oleh *node transmitter*.

Ketika proses komunikasi selesai, data yang dikirimkan oleh *transmitter* akan diterima oleh *node Rx*. Proses pengambilan data dilakukan dengan membaca data yang terdapat pada *buffer* node Rx.



**Gambar 3. 4** Urutan Pengiriman Sampel IQ pada WARP [10]

## 3.2 Desain Sistem OFDM

Tujuan dari proses desain sistem OFDM ini adalah membuat sebuah sistem komunikasi antar dua node WARP sesuai dengan criteria:

- Sistem bisa mengirimkan jumlah bit yang sangat besar, setidaknya mampu mengirimkan 100.000 bit.
- Bisa melakukan proses estimasi kanal
- Bisa melakukan proses estimasi error phase
- Mengurangi kemungkinan kesalahan deteksi symbol atau perbaikan dalam struktur *preamble*.

### 3.2.1 Sistem OFDM pada WARP

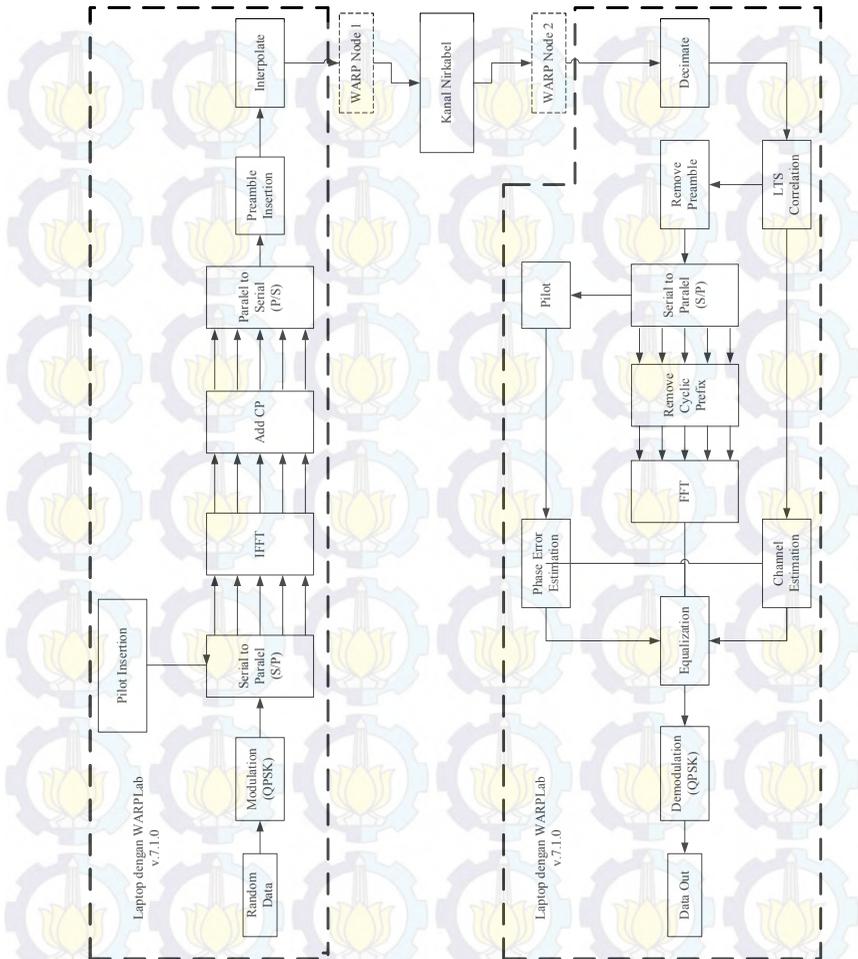
Secara garis besar, sistem OFDM pada WARP diperlihatkan pada Gambar 3.5.

Penjelasan tentang gambar 3.5 diatas yaitu:

Data acak akan dibangkitkan, dengan jumlah sesuai pada desain yang telah dibuat. Kemudian data acak tersebut akan dimodulasi dengan skema modulasi QPSK. Dalam modulasi tersebut setiap dua bit informasi di *mapping* menjadi satu symbol, *mapping* bit informasi menjadi symbol-simbol dapat dilihat pada Gambar 3.6. Sementara untuk ketentuan urutan bit yaitu '*Left-MSB*' seperti yang diperlihatkan pada Tabel 3.1.

Berdasarkan Gambar 3.6 diatas desain modulasi QPSK,  $m$  merupakan bilangan decimal hasil konversi dari bit biner ke decimal dan  $\theta$  merupakan *phase offset*. Sementara untuk konstelasi dari QPSK ditunjukkan pada Gambar 3.7.

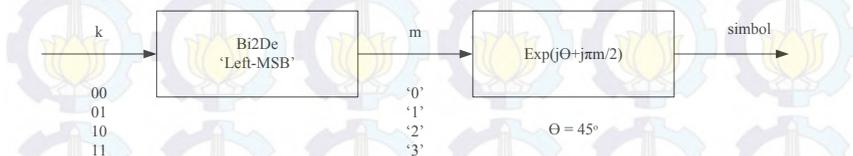
Setelah mengalami proses modulasi, maka data akan dibuat dalam bentuk parallel dengan ukuran sebesar 48x80. Proses pengubahan dari bentuk serial menjadi parallel diperlihatkan pada Gambar 3.8.



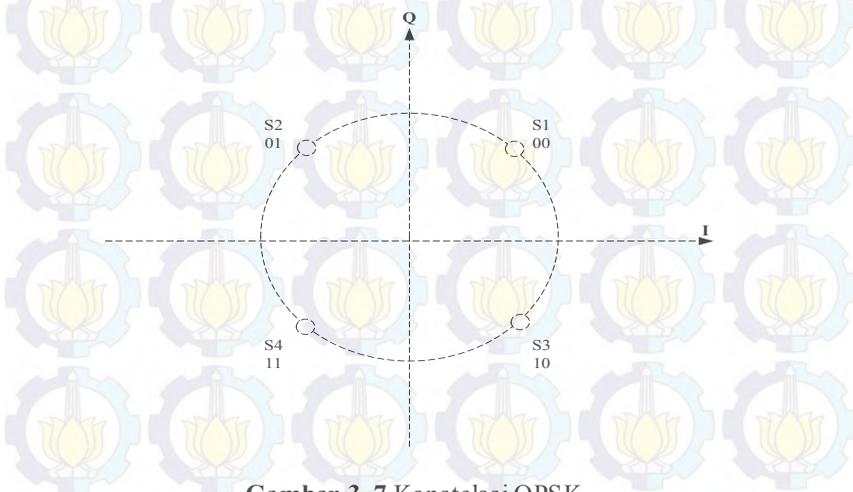
Gambar 3.5 Diagram Blok Sistem OFDM pada WARP

**Tabel 3.1** Mapping Modulasi QPSK

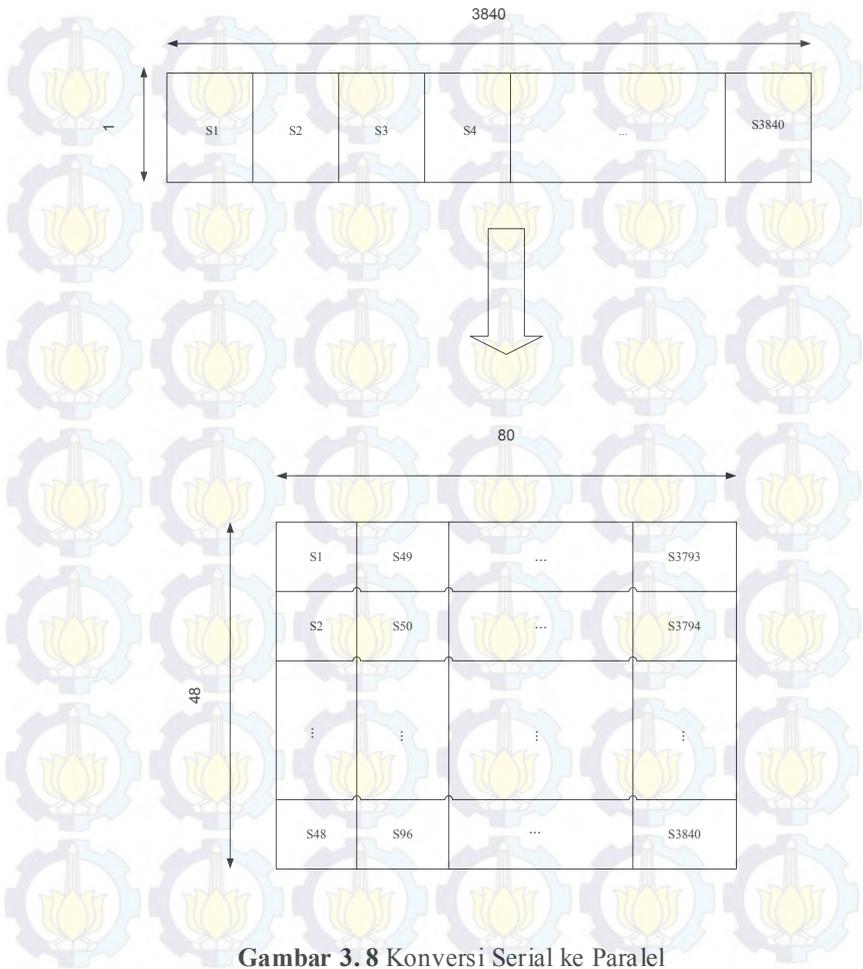
Bit Info (left-msb)	Simbol	Nilai Simbol
00	$S_1$	$0.7071 + 0.7071j$
01	$S_2$	$-0.7071 + 0.7071j$
10	$S_3$	$0.7071 - 0.7071j$
11	$S_4$	$-0.7071 - 0.7071j$



**Gambar 3.6** Blok Modulator QPSK



**Gambar 3.7** Konstelasi QPSK



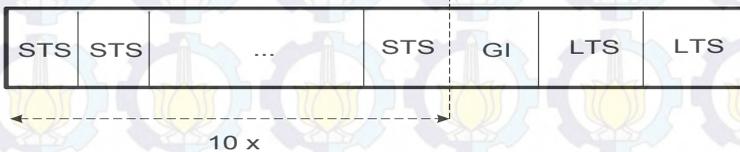
**Gambar 3.8** Konversi Serial ke Paralel

Setelah dalam bentuk paralel, kemudian akan masuk kedalam proses IFFT dengan ukuran 64. Keluaran dari proses IFFT yaitu matriks dengan ukuran 64x80, dari 64 baris yang ada baris yang ditempatkan untuk data yaitu 48 sementara untuk *pilot* yaitu 4 dengan urutan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.10.

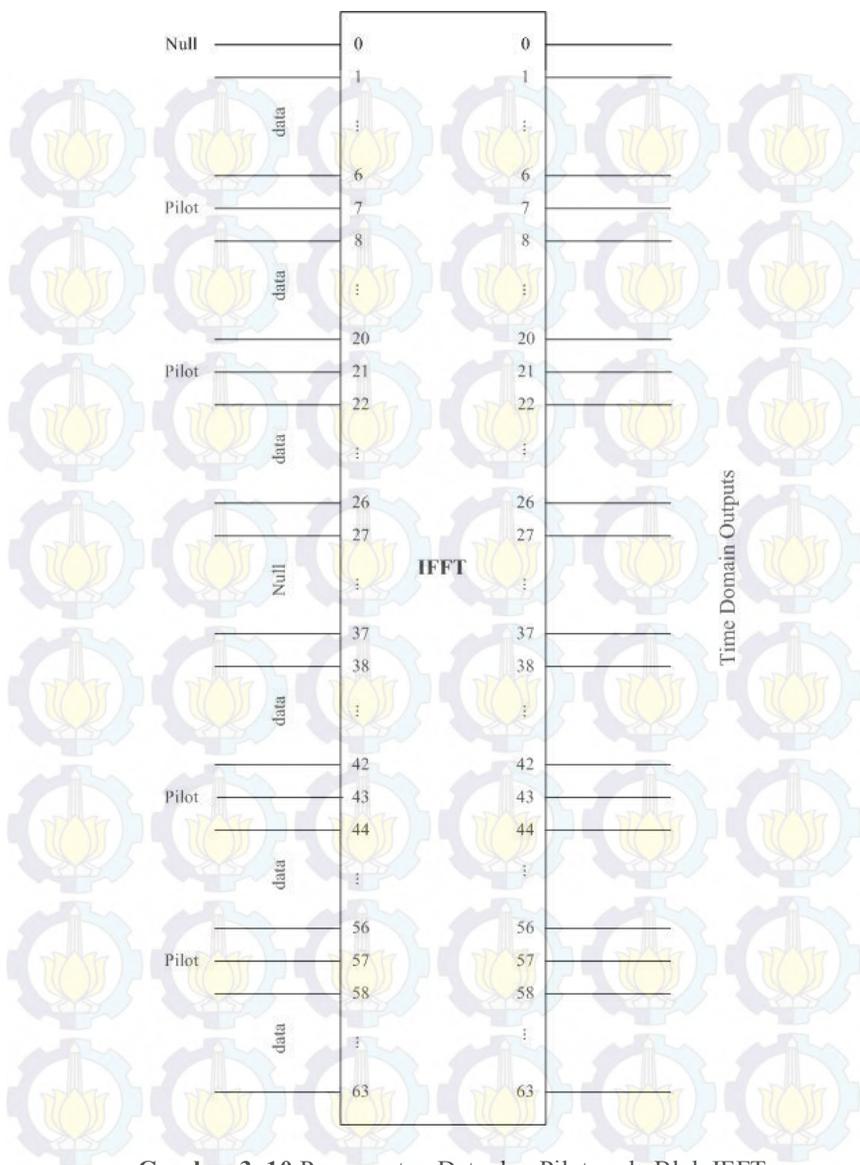
Penempatan struktur *pilot* pada tugas akhir ini menggunakan type *comb. Subcarrier 0* atau DC tidak digunakan untuk menghindari masalah dengan sirkuit RF dan ADC [20]. 11 *subcarrier* tidak digunakan dengan tujuan untuk membuat lebih praktis filter ketika proses *up-sampling* dan *down-sampling* dan sebagai *guard band* antara 2 *channel* yang berdekatan [20]. *Pilot* ditempatkan pada *subcarrier* 7, 21, 43 dan 57 untuk membantu pada saat proses *synchronization* [19].

Setelah semua data dan *pilot* ditempatkan pada posisi masing-masing maka langkah selanjutnya yaitu menambahkan *cyclic prefix* dengan ukuran 25% dari satu symbol OFDM. Dalam hal ini, satu symbol OFDM memiliki ukuran panjang 64 sehingga ukuran *cyclic prefix* nya yaitu 16.

Salinan symbol untuk *cyclic prefix* dimulai pada symbol ke 64 sampai ke 80, yang kemudian dipindahkan pada bagian awal *frame*. Setelah itu, maka langkah selanjutnya yaitu membuat matriks dalam bentuk parallel tersebut menjadi bentuk serial dalam hal ini ukurannya menjadi 1x6400. Kemudian menempatkan *preamble* sebelum data dengan ukuran 1x6400 tersebut. *Preamble* disini merupakan gabungan antara *Short Training Symbol* (STS) dan *Long Training Symbol* (LTS), susunan dari *preamble* ini diperlihatkan pada Gambar 3.10.

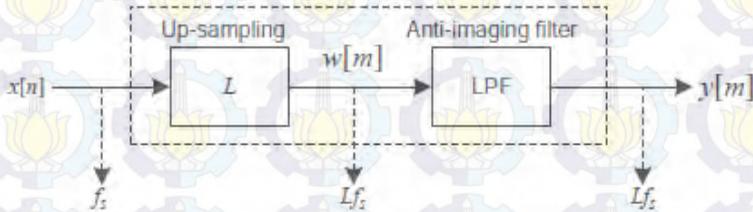


**Gambar 3.9** Susunan *Preamble*



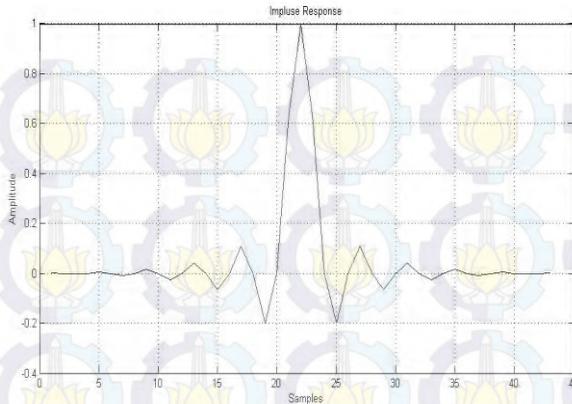
**Gambar 3. 10** Penempatan Data dan Pilot pada Blok IFFT

Pada Gambar 3.9 diatas dapat terlihat bahwa *preamble* tersusun dari 10 kali STS ditambah dengan GI dan 2 kali LTS. Perlu diperhatikan bahwa 1 ukuran STS yaitu 1x16 dan nilai GI merupakan setengah dari ukuran matriks LTS yaitu 1x32 sementara untuk nilai 1 ukuran LTS yaitu 1x64. Jadi total ukuran *preamble* yaitu 1x640. Setelah menempatkan *preamble*, maka langkah selanjutnya yaitu proses interpolasi. Proses ini menjadi cukup penting bila akan diimplementasikan pada WARP, karena bila tidak menggunakan interpolasi maka dikhawatirkan bahwa frekuensi selektif pada kanal *wireless* akan merusak sinyal dan mengakibatkan sinyal OFDM yang kita desain tersebut lebih rentan terhadap error. Untuk proses interpolasi sendiri diperlihatkan pada Gambar 3.11 dibawah ini.



**Gambar 3. 11** Blok Diagram Interpolasi [1]

Pada Gambar 3.11 diatas dapat terlihat bahwa pada proses interpolasi terdapat dua tahap. Tahap pertama yaitu *Up-Sampling* dengan ukuran  $L$  yaitu  $L > 1$  dan tahapan terakhir yaitu sinyal hasil dari proses interpolasi itu akan masuk kedalam *Low Pass Filter* (LPF). Dimana LPF ini merupakan response impulse dari  $h[m]$  [1]. LPF digunakan untuk memfilter sinyal dari hasil *up-sample*. Pada tugas akhir ini,  $L$  yang digunakan yaitu 2, yang harus dipahami yaitu semakin besar ukuran dari  $L$  maka akan semakin sedikit data yang bisa dikirim dalam 1 *frame*. Sementara untuk respon impuls dari LPF yang sudah dinormalisasi yang digunakan pada tugas akhir ini diperlihatkan pada Gambar 3.12 dibawah ini.



**Gambar 3.12** Respon Impuls

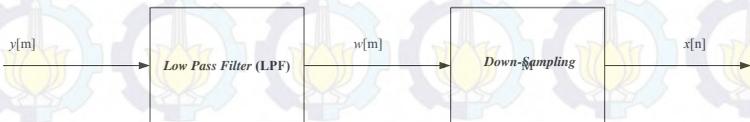
Nilai dari respons impuls yang terdapat pada Gambar 3.12 tersebut berdasarkan [22] ditunjukkan pada Tabel 3.2. Setelah melalui proses interpolasi selesai maka sinyal akan mengalami langkah terakhir sebelum dipancarkan yaitu sinyal akan dinormalisasi untuk mengoptimalkan DAC yang terdapat pada WARP, sehingga nilai sinyal akan berada pada *range* +1 dan -1. Kemudian sinyal tersebut dikirimkan ke *buffer transmitter* melalui Ethernet. Proses transmisi akan berjalan setelah dikirimkan sinyal sinkronisasi ke *node Tx* dan Rx [10].

Setelah sinyal dikirim melalui kanal *real* maka sinyal akan diterima oleh penerima. Berdasarkan Gambar 3.5 maka langkah pertama yang harus dilakukan dipenerima yaitu proses desimasi. Proses desimasi ini memiliki fungsi yang berlawanan dengan proses interpolasi. Proses desimasi sendiri diperlihatkan pada Gambar 3.13 dibawah ini.

Pada proses desimasi ini perbedaan yang mencolok yaitu jika pada proses interpolasi ada blok diagram *up-sampling* dengan variable  $L$  maka proses desimasi ini terdapat blok diagram *down-sampling* dengan variable  $M$ . Namun yang harus diingat yaitu nilai  $L$  dan  $M$  haruslah sama.

**Tabel 3. 2** Nilai dari Response Impulse

<i>Lower Coefficient</i>	<i>Upper Coefficient</i>	<i>Value</i>
H(1)	H(43)	12
H(3)	H(41)	-32
H(5)	H(39)	72
H(7)	H(37)	-140
H(9)	H(35)	252
H(11)	H(33)	-422
H(13)	H(31)	682
H(15)	H(29)	-1086
H(17)	H(27)	1778
H(19)	H(25)	-3284
H(21)	H(23)	10364
H(22)		16384



**Gambar 3. 13** Blok Diagram Desimasi [ 16]

Setelah sinyal mengalami proses desimasi, langkah selanjutnya yaitu melakukan *cross correlation* antara *preamble* yang terdapat pada penerima dengan satu LTS yang terdapat pada bagian pemancar. Rumus untuk *cross correlation* digambarkan pada persamaan [ 19]:

$$C(n) = \sum_{l=0}^M \sum_{k=1}^N r(l*N + k + n) s^*(l*N + k) \quad (3.1)$$

Dimana:

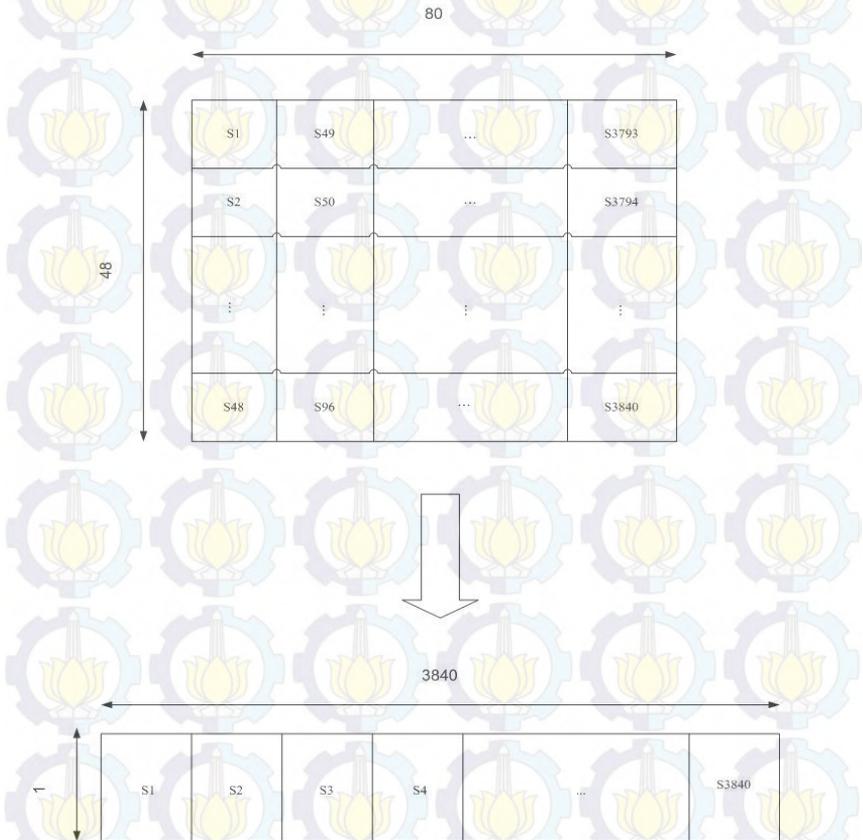
- $r$  : Keseluruhan preamble pada penerima
- $s$  : Satu buah LTS
- $N$  : Panjang dari data OFDM (64 sample)
- $M$  : Jumlah dari LTS yang di *cross corelation*

Proses korelasi ini bertujuan untuk 2 hal yaitu melakukan estimasi kanal dan juga menentukan awal dari *frame* OFDM yang pertama [18]. Untuk proses estimasi kanal sendiri akan dibahas lebih mendalam pada sub-bab selanjutnya. Proses korelasi ini terjadi antara sinyal yang diterima dengan dengan deretan 1 buah LTS yang terdapat pada pemancar sehingga akan didapatkan dua nilai puncak hasil korelasi dengan LTS dikarenakan pada *preamble* terdapat dua buah LTS. Nilai puncak yang terakhir dari hasil korelasi tersebut yang akan digunakan untuk mendapatkan *frame* OFDM yang pertama.

Kemudian setelah mendapatkan hasil korelasi maka kita akan mendapatkan *frame* awal OFDM. Bentuk *frame* OFDM yang sudah ddapat tersebut diubah menjadi dalam bentuk paralel. Setelah itu *cyclic prefix* yang tadi disisipkan pada proses pemancar dihilangkan pada proses ini. Sehingga matriks yang didapat menjadi kembali pada posisi awal yaitu 64x80. Setelah *cyclic prefix* dihilangkan langkah selanjutnya yaitu proses FFT dengan ukuran yang sama seperti pada pemancar yaitu 64. Dalam hal ini, sinyal yang dihasilkan sudah dalam domain frekuensi.

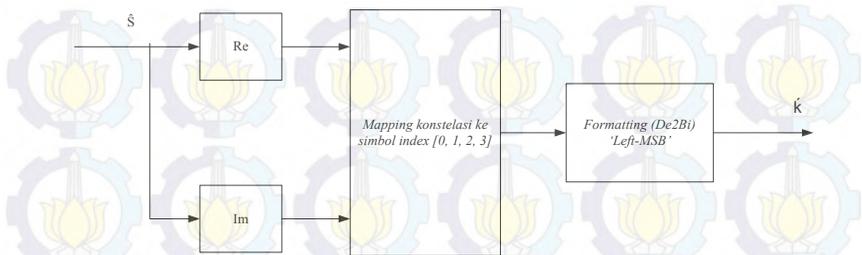
Setelah melalui proses FFT, sinyal tersebut akan mengalami proses *equalizer* dengan kanal estimasi yang didapat pada proses korelasi LTS dan *error phase* dengan menggunakan *pilot*. Proses *error phase* menggunakan *pilot* ini akan dibahas lebih mendalam pada sub-bab selanjutnya. Data-data informasi yang diterima akan diambil setelah proses *equalizer* tersebut. Data informasi tersebut akan diubah menjadi dalam bentuk serial sebelum memasuki proses demodulasi. Proses konversi dari paralel ke bentuk serial diperlihatkan pada Gambar 3.14.

Setelah bentuk data informasi dalam bentuk serial, maka langkah selanjutnya yaitu proses demodulasi. Proses demodulasi ini bertujuan untuk mengubah symbol menjadi bentuk bit informasi. Desain untuk blok demodulasi QPSK ditunjukkan pada Gambar 3.15.



**Gambar 3.14** Konversi Paralel ke Serial

Setelah bit-bit hasil demodulasi didapat, maka akan dibandingkan error yang terdapat antara bit *input* dengan bit *output* yang dinyatakan dalam bentuk rasio / *Bit of Error Rate* (BER).



**Gambar 3. 15** Blok Demodulator QPSK

### 3.2.2 Estimasi Kanal

Estimasi kanal digunakan untuk ekualisasi setiap simbol OFDM didalam sinyal terima. Nilai estimasi kanal digunakan untuk mengkompensasi dari pengurangan nilai magnitudo yang disebabkan oleh frekuensi selektif dari kanal *multipath* dan *noise* [21]. Proses estimasi kanal ini menggunakan metode estimasi kanal *Least-Square* (LS).

Sebuah LTS pada penerima yang sudah melalui proses blok FFT dinotasikan dengan  $R_{l,k}$  ( $l = 0,1$ ) digambarkan dalam bentuk dimana  $W_{l,k}$  ditambah dengan hasil perkalian dari LTS pada pemancar  $d_{l,k}$  dan kanal  $H_{l,k}$ .

$$R_{l,k} = H_{l,k}d_{l,k} + W_{l,k} \quad (3.2)$$

Persamaan estimasi kanal menggunakan LTS berdasarkan [22] diperlihatkan pada persamaan 3.3. Setelah nilai dari estimasi kanal didapat, maka dilakukan proses ekualisasi terhadap *payload* (total keseluruhan simbol OFDM) yang diterima dengan menggunakan persamaan [17] seperti yang diperlihatkan pada persamaan 3.4.

$$\begin{aligned}
 \widehat{H}_k &= \frac{1}{2}(R_{0,k} + R_{1,k}) \frac{1}{d_k} \\
 &= \frac{1}{2}(H_k d_k + W_{0,k} + H_k d_k + W_{1,k}) \frac{1}{d_k} \\
 &= H_k + \frac{1}{d_k} \frac{(W_{0,k} + W_{1,k})}{2}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Pada prakteknya, perubahan nilai saat sebelum melalui estimasi dan sesudah estimasi dalam bentuk konstelasi sangat jelas terlihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.16. Jika dilihat pada Gambar tersebut, fungsi dari estimasi kanal ini yaitu untuk mengembalikan bentuk sinyal ke lingkaran asalnya.

$$xe(k) = x(k) / \widehat{H}_k \tag{3.4}$$

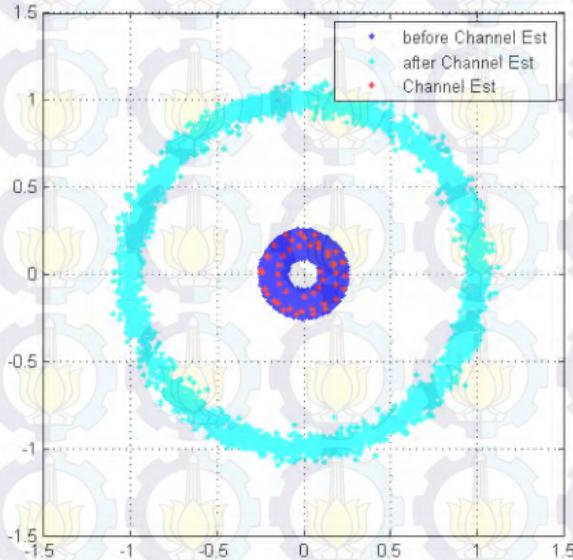
- Dimana
- $xe(k)$  : Sinyal setelah melalui proses ekualisasi
  - $x(k)$  : Sinyal sebelum melalui proses ekualisasi
  - $\widehat{H}_k$  : Nilai estimasi kanal

### 3.2.3 Estimasi Fasa Error

Setelah proses estimasi kanal selesai, maka langkah selanjutnya yaitu melakukan koreksi fasa error. Estimasi ini diperlukan karena meskipun sinyal sudah berada pada lingkaran yang tepat namun masih terdapat sisa (*residual*) error pada *timing offset* yang disebabkan oleh adanya karakteristik variasi waktu pada kanal. Dampak dari error ini yaitu ketidaktepatan letak symbol-symbol OFDM [15].

Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.6 terdapat 4 buah *pilot* yang terdapat pada masing-masing symbol OFDM, *pilot-pilot* tersebut yang akan digunakan untuk mengurangi sisa error pada *timing offset* tersebut. Penempatan letak *pilot* tersebut bertujuan untuk menghindari *pilot* yang akan dikirim terganggu satu sama lain [15].

Proses estimasi fasa error cukup simple yaitu dengan mengalikan symbol yang diterima dengan  $e^{-j\theta}$  dimana  $\theta$  adalah sudut dari estimasi fasa. Secara matematis, operasi perbaikan fasa dilakukan dengan persamaan sebagai berikut:



**Gambar 3. 16** Konstelasi pada Proses Estimasi Kanal

$$s'(k) = s(k) e^{-j\theta} \quad (3.6)$$

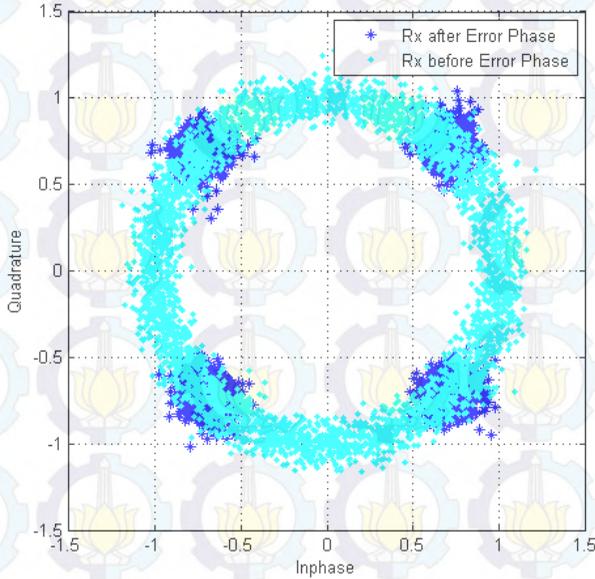
Dimana:

- $s'(k)$  : Nilai sinyal diterima setelah proses koreksi fasa
- $s(k)$  : Nilai sinyal diterima sebelum proses koreksi fasa
- $\theta$  : Sudut dari estimasi fasa

Nilai  $\theta$  didapat dari rata-rata perbedan nilai sudut antara pilot yang diterima dengan pilot yang dipancarkan. Efek dari penggunaan koreksi fasa error pada proses perbaikan fasa bisa dilihat pada Gambar 3.17.

### 3.2.4 Desain *Frame*

Desain *frame* komunikasi pada WARP mengacu pada batasan-batasan yang diambil dari [14]:

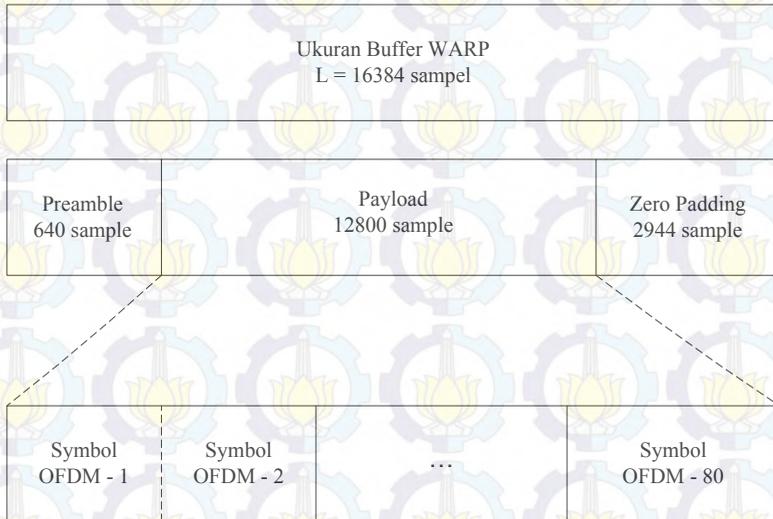


**Gambar 3.17** Perbandingan Fasa pada Sinyal dengan Koreksi Fasa

- *Buffer* WARP terbatas sebanyak  $2^{14}$  atau 16384 sampel
- Frekuensi sampling sistem: 40 MHz

Terlepas dari beberapa batasan tersebut, karena karakteristik dari komunikasi melalui *Ethernet*, maka dalam keseluruhan *frame* harus dialokasikan beberapa sample untuk *delay*. Hal ini menjadi penting karena antara pemancar dan penerima akan terjadi *delay* yang disebabkan proses transmisi dan akuisisi data pada WARP [10]. Pada proses penentuan desain *frame* komunikasi, akan dialokasikan *delay* sebesar 2944 sampel. *Delay* akan diletakkan pada bagian belakang *frame* dengan nilai 0, sehingga *delay* ini bisa disebut juga sebagai *zero padding*.

Secara keseluruhan, desain *frame* komunikasi dapat digambarkan pada Gambar 3.18. setelah struktur *frame* ditentukan, langkah berikutnya yaitu penentuan jumlah symbol yang bisa dikirimkan dalam satu *frame* komunikasi.



**Gambar 3.18** Struktur *Frame* Komunikasi

Sebagai tambahan, tidak semua yang terdapat pada symbol OFDM merupakan data, karena dalam 1 simbol OFDM pada Gambar 3.18 terdapat *cyclic prefix*, *pilot*, data dan *virtual subcarrier*.

### 3.3 Skenario Pengukuran

Pada bagian ini akan dibahas tentang pengukuran pada lingkungan *indoor* dan *outdoor*. Proses pengukuran untuk analisa secara umum dijabarkan pada poin-poin berikut:

- Analisa sistem komunikasi OFDM
- Pengukuran kondisi *line-of-sight* dan *non-line-of-sight* dengan variasi daya pancar dalam lingkungan *indoor*.

- Pengukuran kondisi *line-of-sight* dan *non-line-of-sight* dengan variasi daya pancar dalam lingkungan *outdoor*.

Untuk bagian pengukuran kondisi LOS dan NLOS baik dalam lingkungan *indoor* maupun *outdoor*, kinerja yang diukur yaitu *Bit of Error Rate* (BER) dari setiap pengukuran.

### 3.3.1 Analisa Sistem OFDM

Pengukuran pada sub bab ini bertujuan untuk mengetahui kinerja sistem OFDM. Hal ini diperlukan untuk mengetahui bahwa OFDM mampu mengirimkan informasi bit dalam kondisi ideal.

Kondisi ideal digambarkan sebagai kondisi *Line- of-Sight* antara penerima dan pemancar dengan daya pancar dan gain berada pada level optimum. Level optimum terjadi ketika data yang dikirim dan diterima tidak mengalami error.

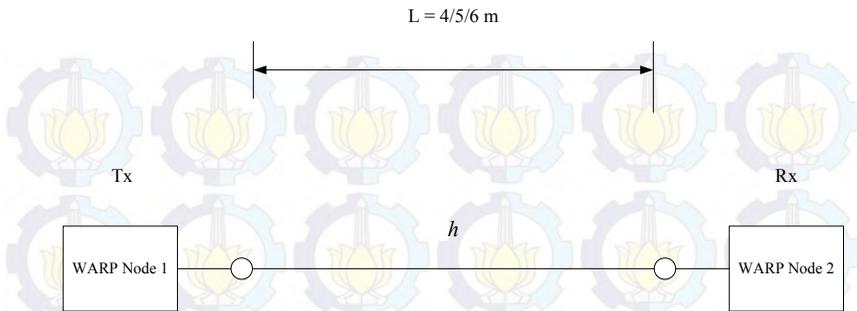
Kriteria pengukuran yang dilakukan dan parameter gain setting pada modul WARP antara lain:

- Jumlah bit yang dikirim : 7680 bit
- Tx Baseband Gain : 2
- Tx Radio Frequency Gain : 25
- Rx Baseband Gain : 2
- Rx Radio Frequency Gain : 2

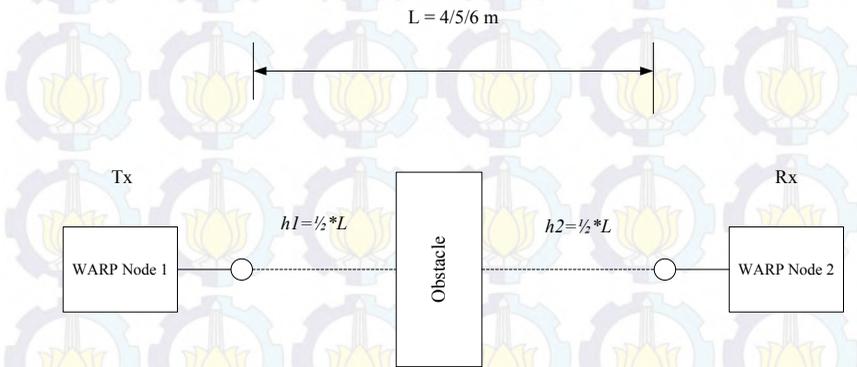
Hasil yang diharapkan dari pengukuran ini adalah memastikan bahwa desain sistem OFDM mampu mengirimkan data pada kondisi ideal.

### 3.3.2 Lingkungan *Indoor*

Untuk lingkungan *indoor* pengukuran dilakukan didalam lab B304 dengan jarak 4, 5 dan 6 m dan masing-masing jarak tersebut memiliki dua kondisi yang berbeda yaitu LOS dan NLOS. Sketsa untuk pengukuran untuk lingkungan *indoor* dengan kondisi LOS dan NLOS diperlihatkan pada Gambar 3.19 dan 3.20.

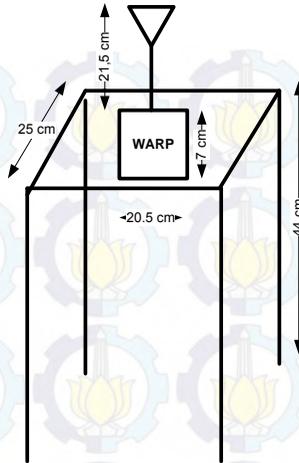


**Gambar 3.19** Sketsa Pengukuran Indoor untuk Kondisi LOS



**Gambar 3.20** Sketsa Pengukuran Indoor untuk Kondisi NLOS

Untuk bagian NLOS, *obstacle* akan ditempatkan ditengah-tengah dari jarak total pengukuran. Sementara itu, akan ada penambahan yaitu perbandingan kurva BER pada masing-masing jarak dalam 2 keadaan tersebut (LOS dan NLOS). Sementara untuk ukuran fisik pada penempatan perangkat WARP dan lingkungan *indoor* diperlihatkan pada Gambar 3.21 dan 3.22. Hasil yang diharapkan dari percobaan *indoor* yaitu untuk mengetahui perbedaan antara nilai BER dengan jarak dan kondisi yang berbeda.



**Gambar 3. 21** Ukuran Fisik Penempatan Perangkat WARP

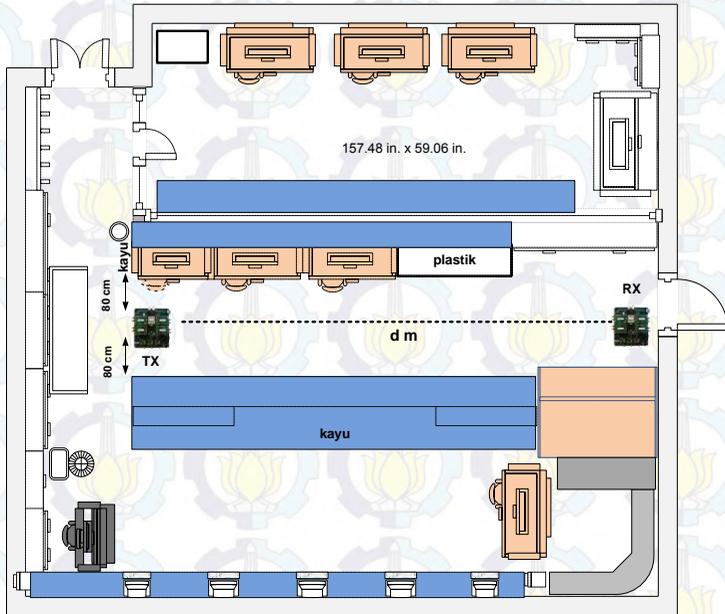
### 3.3.3 Lingkungan Lorong

Untuk lingkungan lorong, pengukuran dilakukan di lorong depan lab B 304 dengan jarak pengukuran 4 dan 5 meter. Pada lingkungan ini, pengukuran dilakukan hanya dalam kondisi LOS dengan tujuan melihat pengaruh lingkungan terhadap kualitas sistem OFDM jika dibandingkan dengan lingkungan *indoor* dan *outdoor*. Ukuran fisik pada pengukuran untuk lingkungan lorong diperlihatkan pada Gambar 3.23.

### 3.3.4 Lingkungan *Outdoor*

Untuk lingkungan *outdoor* pengukuran dilakukan di lapangan parkir dosen elektro dengan jarak yang sama dengan kondisi *indoor* namun lebih lebih jauh dibandingkan pada saat *indoor* karena ditambah dengan beberapa jarak yang dimulai pada saat 10 m dan terus bertambah dengan kelipatan 5 meter hingga mencapai jarak 20 m. Pada masing-masing jarak tersebut juga akan diukur pada dua kondisi yang berbeda sama halnya pada saat pengukuran *indoor*. Untuk skema pengukuran hampir sama semua seperti pada saat lingkungan *indoor* yang membedakan yaitu hanya jaraknya saja. Hasil yang diharapkan pada pengukuran *outdoor* ini yaitu untuk bagaimana perbedaan antara

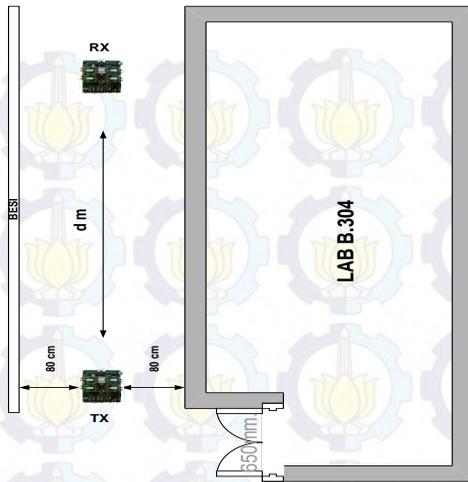
lingkungan *indoor* dan *outdoor* yang notabene lingkungan *outdoor* memiliki pantulan yang lebih jauh sehingga menghasilkan *time delay* yang lebih besar. Ukuran fisik pada pengukuran untuk lingkungan *outdoor* diperlihatkan pada Gambar 3.24.



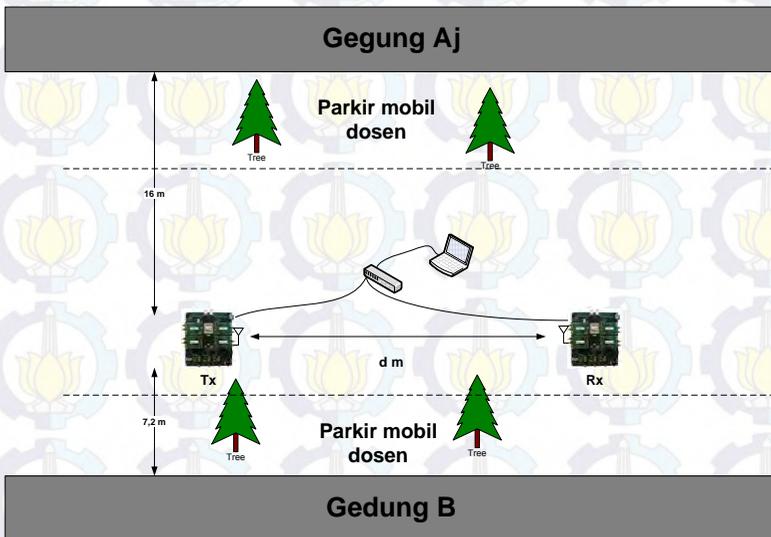
**Gambar 3.22** Ukuran Fisik Pengukuran untuk Lingkungan *Indoor*

### 3.3.5 Karakteristik *Obstacle* dan Parameter Pengukuran

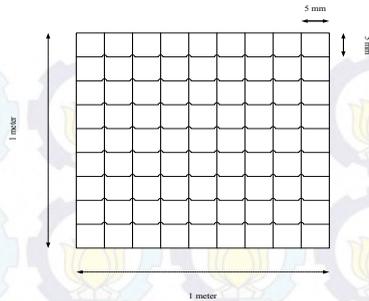
Jenis *obstacle* yang digunakan pada pengukuran baik di *indoor* maupun di *outdoor* terbuat dari kawat kotak ukuran *grid* kawat 5 mm x 5 mm dan *obstacle* berdimensi 1 m x 1 m. Untuk lebih jelasnya diperlihatkan pada Gambar 3.25. Sementara untuk parameter pengukuran diperlihatkan pada Tabel 3.3.



**Gambar 3. 23** Ukuran Fisik Pengukuran untuk Lingkungan Lorong



**Gambar 3. 24** Ukuran Fisik Pengukuran untuk Lingkungan *Outdoor*



**Gambar 3.25** Dimensi *Obstacle*

**Tabel 3.3** Parameter Pengukuran

Parameter	Nilai
<i>Bit rate</i>	24 Mbps
QPSK <i>Symbol rate per carrier</i> (baud rate)	12 MBd
Jumlah <i>subcarrier</i>	64 (48 data + 4 pilot)
OFDM <i>symbol rate</i>	250 kBd
<i>Ratio cyclic prefix</i>	25 %
Bit Terkirim	107520 bit
Jarak <i>node Tx dan Rx</i>	Bervariasi
Setting Gain pada WARP:	
– Tx <i>Baseband</i> :	2
– Tx RF:	0-60 (-35 dBm s/d -4.7 dBm)
– Rx <i>Baseband</i> :	2
– Rx RF:	2
Jenis <i>Obstacle</i>	Jaring-jaring kawat



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 4

### PENGUKURAN DAN ANALISA DATA

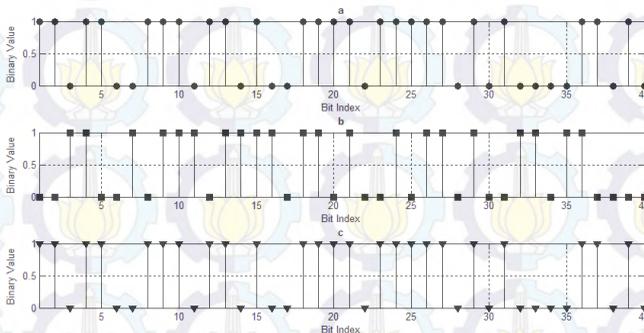
Pada bab 4 akan dilakukan pengukuran dan analisa terhadap sistem OFDM seperti yang sudah dijelaskan pada sub-bagian 3.3.

#### 4.1 Analisa Sistem OFDM

Sistem OFDM yang dibangun sesuai dengan blok implementasi sistem OFDM pada Bab 3 Gambar 3.5. Data hasil implementasi untuk setiap blok ditunjukkan pada Gambar 4.1 sampai dengan Gambar 4.19.

##### 4.1.1 Data Input dan Output

Random bit data yang dibangkitkan pada pemancar dan bit yang diterima pada penerima dari sistem OFDM untuk 40 bit informasi pertama yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Stem Bit Informasi

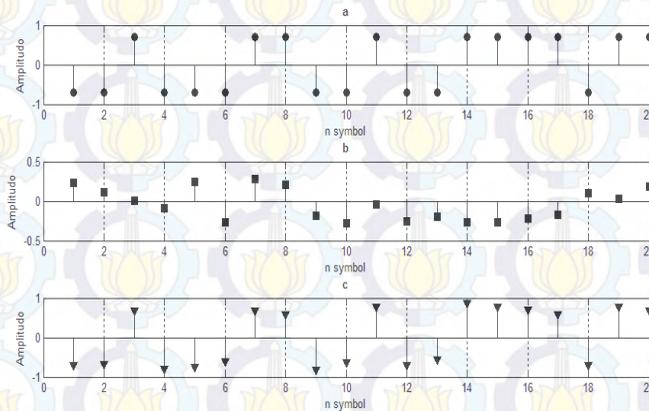
(a) Bit informasi dikirim, (b) Bit informasi sebelum estimasi, (c) Bit informasi sesudah estimasi

Pada Gambar 4.1 dapat terlihat bahwa deretan 40 bit informasi pertama tersebut antara bit yang dikirim dengan yang diterima (telah

melalui proses estimasi) tidak mengalami kerusakan. Hasil pengukuran ini diperoleh pada saat nilai *bit error rate* (BER) = 0 dari total 7680 bit yang dibangkitkan. Jika sudah seperti itu, maka sistem OFDM tersebut telah berhasil diimplementasikan secara *real* pada modul WARP.

#### 4.1.2 Modulasi

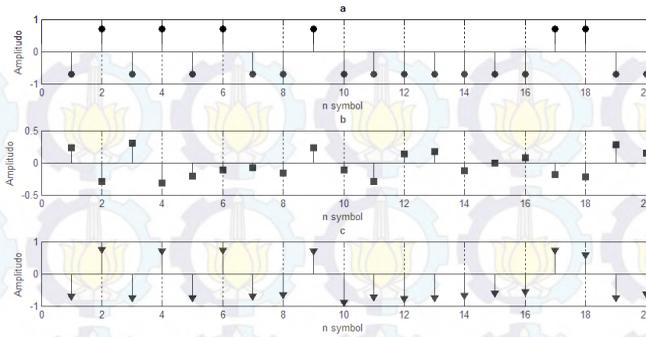
Pada proses QPSK, symbol hasil modulasi pada pemancar, symbol yang diterima di penerima sebelum melalui proses estimasi (baik estimasi kanal maupun estimasi fasa error) dan symbol terima yang sudah melalui proses estimasi ditunjukkan pada Gambar 4.2 untuk nilai *real* dan Gambar 4.3 untuk nilai *imajiner*.



**Gambar 4.2** Stem Simbol *Real*

(a) Pada bagian pemancar, (b) Pada bagian penerima sebelum proses estimasi, (c) Pada bagian penerima setelah proses estimasi

Pada Gambar 4.1, 4.2 dan 4.3 terlihat bahwa proses estimasi merupakan proses yang sangat vital baik itu estimasi kanal maupun estimasi fasa *error*.



**Gambar 4.3** Stem Simbol *Imajiner*

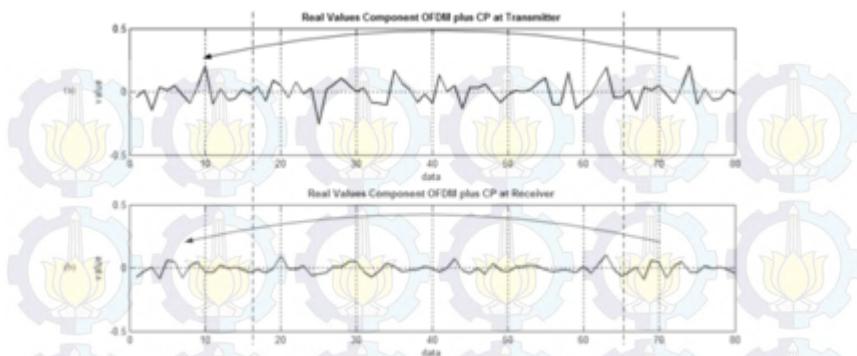
- (a) Pada bagian pemancar, (b) Pada bagian penerima sebelum proses estimasi, (c) Pada bagian penerima setelah proses estimasi

#### 4.1.3 Proses IFFT

Pada proses IFFT yang telah ditambah dengan *cyclic prefix* dengan mengambil sampel 1 symbol OFDM dapat dilihat pada Gambar 4.4 untuk nilai *real* dan 4.5 untuk nilai *imajiner*.

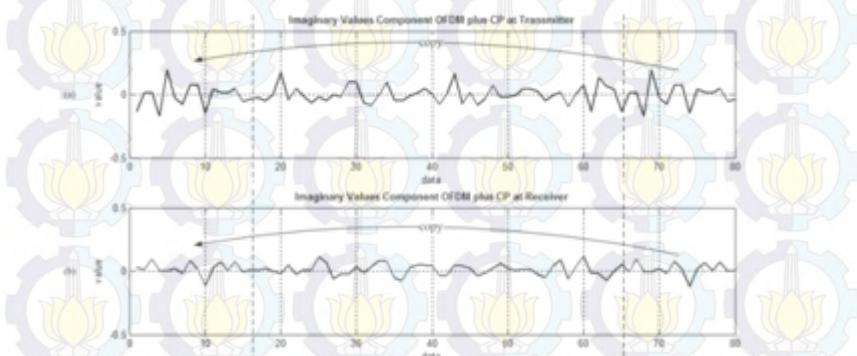
Pada Gambar 4.4 dan 4.5 dapat terlihat dengan jelas bahwa baik nilai *real* maupun *imajiner* terdapat perbedaan antara pada pemancar dengan penerima. Seperti diketahui bahwa sinyal yang diterima oleh penerima melalui kanal *real* pada WARP sudah mengalami banyak gangguan, sebagai contoh atenuasi atau redaman. Sehingga dengan demikian sinyal yang diterima menjadi lebih kecil nilainya. Sementara untuk estimasi dipenerima dilakukan setelah proses FFT, sehingga sinyal pada penerima yang ditunjukkan oleh Gambar 4.4 dan 4.5 belum mengalami proses estimasi.

Kemudian untuk *cyclic prefix* (CP), seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa CP yang digunakan pada tugas akhir berukuran 25% dari total panjang 1 symbol OFDM. Jadi dapat dilihat bahwa 16 data pertama pada masing-masing Gambar 4.4 dan 4.5 merupakan hasil *copy* dari 16 data yang terakhir.



**Gambar 4.4** Nilai *Real* 1 Symbol OFDM

(a) Pada pemancar, (b) Pada penerima



**Gambar 4.5** Nilai *Imaginer* 1 Symbol OFDM

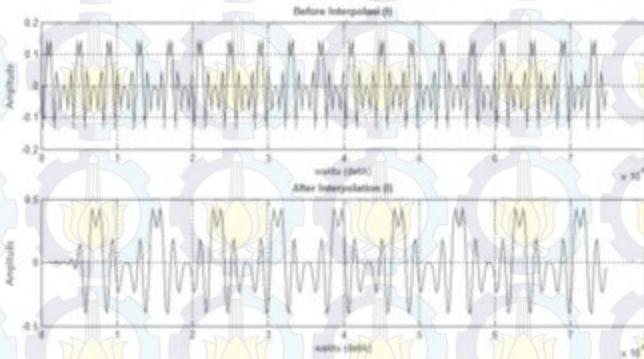
(a) Pada pemancar, (b) Pada penerima

#### 4.1.4 Interpolasi

Seperti yang telah dibahas pada bagian sebelumnya, tujuan dari proses interpolasi ini yaitu untuk meningkatkan *sampling rate* atau menggandakan ukuran sinyal yang akan dikirim dengan tujuan akan

sinyal tersebut tidak rentan terhadap error yang dikarenakan frekuensi selektif pada kanal *wireless*.

Proses sebelum dan sesudah interpolasi baik dalam bentuk *real* maupun *imaginer* diperlihatkan pada Gambar 4.6. dan 4.7.



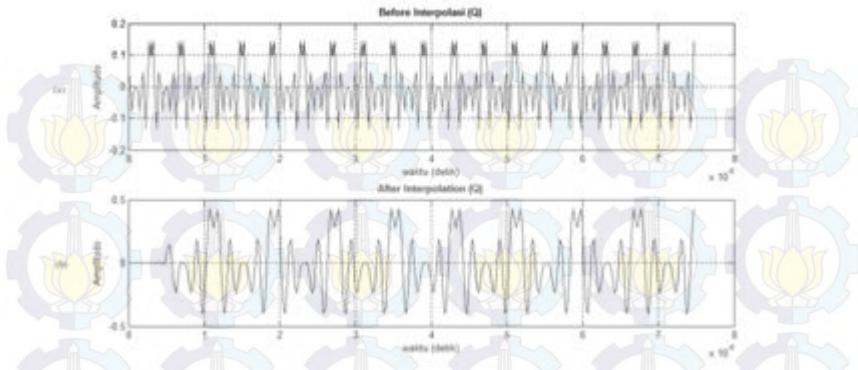
**Gambar 4. 6** Sinyal *Real*

(a) Sebelum Interpolasi, (b) Setelah Interpolasi

Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa ukuran sinyal baik dalam bentuk *real* maupun *imaginer* mengalami pelebaran hingga dua kali jika diamati pada waktu yang sama. Hal ini ditandai dengan jumlah puncak sinyal saat sebelum diinterpolasi sebanyak 19 buah sedangkan saat setelah interpolasi menjadi 9 buah pada saat waktu pengamatan yang sama. Ukuran hasil interpolasi menjadi 2 kali lebih besar dikarenakan pada tugas akhir ini menggunakan ukuran *upsample* = 2.

#### 4.1.5 Spektrum *Baseband* Sinyal

Dengan menggunakan transformasi Fourier, kita mendapatkan bentuk spektrum sinyal OFDM sesuai dengan spesifikasi yang sudah dijelaskan pada bab 2. Bentuk spectrum tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.8.



**Gambar 4.7** Sinyal *Imaginer*

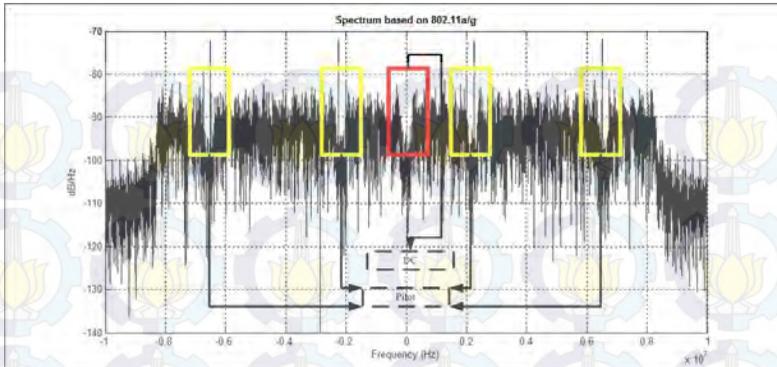
(a) Sebelum Interpolasi, (b) Setelah Interpolasi

Pada gambar diatas memperlihatkan spectrum sinyal OFDM dengan *subcarrier* 64 dimana 48 terisi data dan 4 terisi pilot. Untuk *bandwidth* yang digunakan jika melihat pada gambar tersebut yaitu sekitar 16.25 MHz (-8.125 MHz sampai dengan +8.125 MHz) dari kanal yang disediakan sebesar 20 MHz (-10 MHz sampai dengan +10 MHz). Hal ini sesuai dengan standar dari 802.11 a/g yang sudah dijelaskan pada Tabel 2.1.

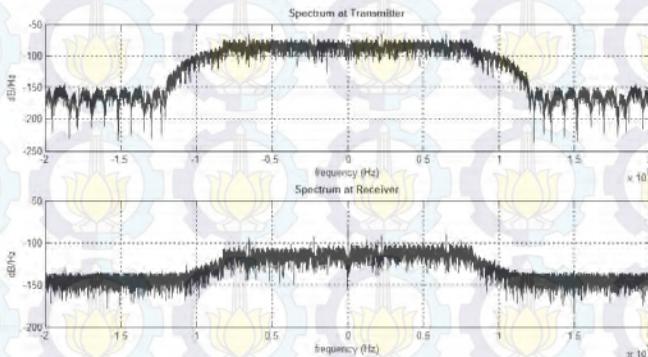
Sementara untuk bentuk spectrum *baseband* secara keseluruhan termasuk *preamble*, *payload* dan *zero padding* diperlihatkan pada Gambar 4.9. Pada gambar tersebut dapat terlihat bahwa *bandwidth* sinyal 12 MHz dimana nilai *bandwidth* tersebut akan menjadi 2 kali lipat saat berada pada *passband*. Sementara untuk spectrum sinyal yang diterima memiliki bentuk yang hampir sama dengan yang dikirim namun berbeda nilai amplitude.

#### 4.1.6 Sinyal yang dikirim dan diterima

Setelah sebelumnya yang ditampilkan dalam bentuk spectrum maka sekarang yang ditampilkan yaitu bentuk sinyal *inphase (real)* dan *quadrature (imaginer)* baik sinyal dikirim maupun diterima diperlihatkan pada Gambar 4.10 dan 4.11.



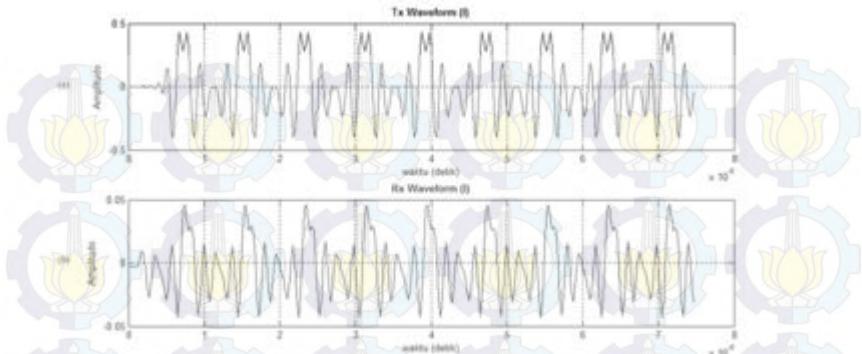
**Gambar 4. 8** Spektrum Sinyal OFDM



**Gambar 4. 9** Spektrum Sinyal *Baseband*

(a) Pada penerima, (b) Pada pemancar

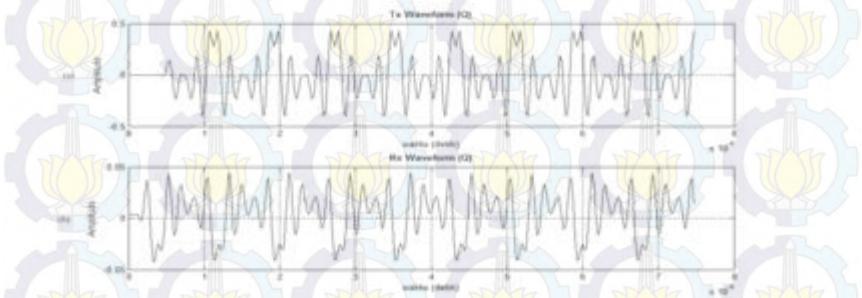
Pada kedua gambar tersebut sekali lagi memperlihatkan bahwa nilai amplitude dan bentuk antara sinyal yang dikirim dengan yang diterima mengalami perbedaan. Hal ini dapat disebabkan karena sinyal yang diterima tersebut sudah mengalami redaman. Sementara jika diperhatikan lebih seksama dari kedua gambar tersebut juga terlihat adanya *delay* meskipun sangat kecil.



**Gambar 4.10** Sinyal *Real*

(a) Pada pemancar, (b) Pada penerima

Untuk yang bagian *quadrature* sinyal yang diterima memiliki bentuk yang berkebalikan dengan yang dipancarkan. Hal inilah yang mengakibatkan terjadinya perbedaan fasa pada penerima sehingga fasa error ini perlu dilakukan.



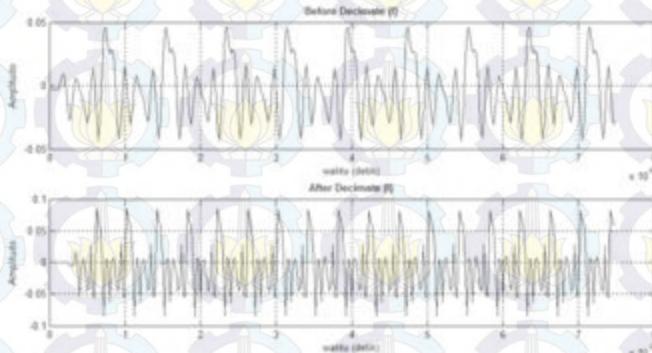
**Gambar 4.11** Sinyal *Imaginer*

(a) Pada pemancar, (b) Pada penerima

#### 4.1.7 Desimasi

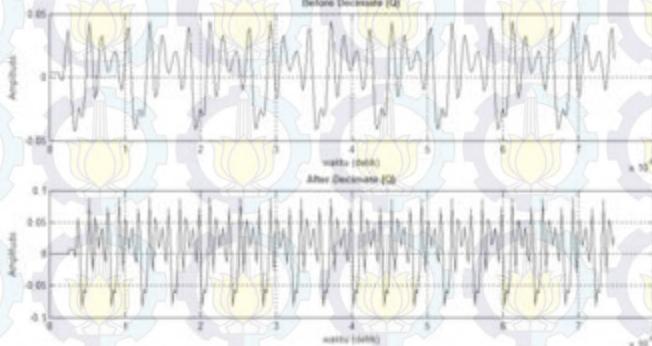
Setelah sebelumnya dibagian pemancar sinyal yang akan dikirim mengalami proses interpolasi. Maka ketika dipenerima sinyal

mengalami proses berkebalikan dari interpolasi yaitu desimasi. Sehingga informasi dalam 1 symbol OFDM kembali dalam bentuk asalnya. Bentuk dari proses desimasi baik sinyal *inphase* maupun *quadrature* diperlihatkan pada Gambar 4.12 dan 4.13.



**Gambar 4.12** Sinyal *Real*

(a) Sebelum, (b) Sesudah



**Gambar 4.13** Sinyal *Imaginer*

(a) Sebelum, (b) Sesudah

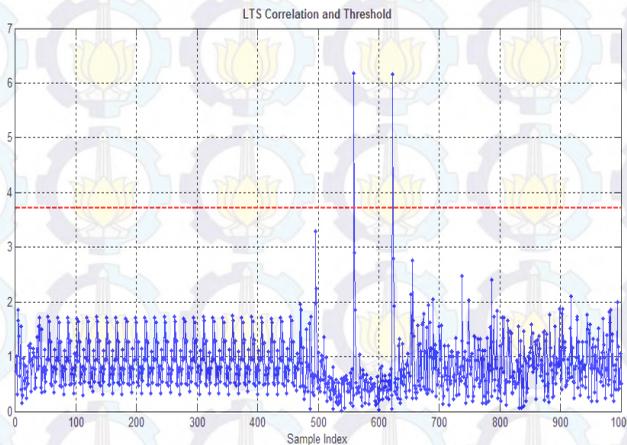
Seperti fungsinya, maka terlihat bahwa ukuran hasil dari desimasi baik pada sinyal *real* maupun *imaginer* menjadi lebih kecil. Hal ini

ditandai dengan jumlah puncak sinyal yang bertambah menjadi dua kali lipat, saat sebelum didesimasi jumlah puncak sinyal berjumlah 9 buah sedangkan saat setelah desimasi menjadi 18 buah dengan waktu pengamatan yang sama.

#### 4.1.8 Korelasi LTS

Pada bagian sebelumnya sudah banyak menjelaskan tentang peran dari korelasi LTS ini. Pada sub bab ini akan diperlihatkan hasil dari korelasi yang diperlihatkan pada Gambar 4.14.

Pada Gambar 4.14 tersebut terlihat bahwa ada 2 nilai puncak yang dihasilkan dari korelasi LTS. Sementara untuk garis merah menandakan nilai *threshold* yang diijinkan. Nilai *threshold* yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu 0.6 dari nilai puncak.



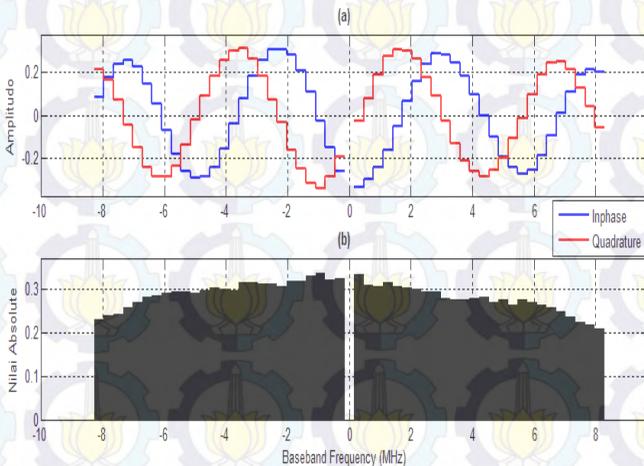
**Gambar 4.14** Hasil Korelasi LTS

Dua nilai puncak tersebut menandakan lokasi dari 2 buah LTS yang digunakan dalam sistem tersebut. Nilai puncak tersebut berada pada *sample* ke 559 dan 623, jika diperhatikan dari kedua nilai puncak tersebut maka didapat bahwa selisih dari kedua nilai tersebut yaitu 64 sesuai dengan banyaknya *sample* dalam 1 buah LTS. Perlu dipahami

bahwa kedua nilai puncak tersebut berbeda-beda pada setiap pengukuran. Kemudian dari kedua nilai tersebut dapat diketahui letak symbol OFDM yang pertama.

#### 4.1.9 Estimasi

Proses estimasi ini terdiri dari estimasi kanal dan fasa error dimana keduanya memiliki fungsi yang berbeda seperti yang sudah dijelaskan pada bab 3. Untuk nilai estimasi kanal baik sinyal *inphase* dan *quadrature* dan kompleks magnitude diperlihatkan pada Gambar 4.15.

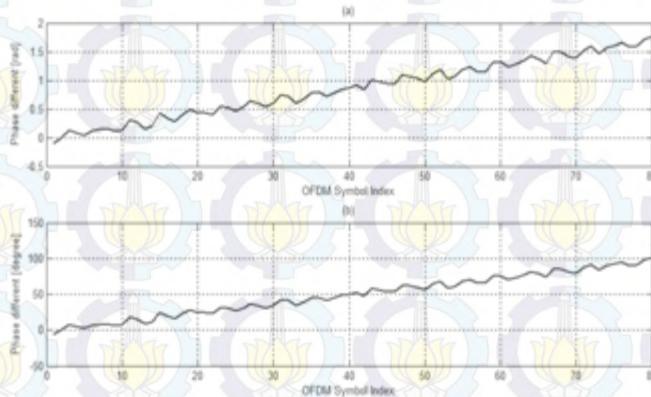


**Gambar 4.15** Estimasi Kanal

(a) *Inphase & Quadrature*, (b) *Magnitude*

Pada gambar diatas memperlihatkan nilai estimasi kanal pada setiap *subcarrier* baik nilai *inphase*, *quadrature* maupun nilai *magnitude* dalam domain frekuensi. Dapat disimpulkan bahwa nilai estimasi pada setiap *subcarrier* berbeda-beda meskipun tidak terlalu terlihat. Nilai estimasi ini tergantung dari berapa penurunan nilai magnitude setelah melewati kanal pada setiap *subcarrier*. Dampak dari perubahan nilai estimasi kanal tersebut sudah dibahas pada Bab 3.

Sementara untuk nilai fasa error dalam bentuk radian dan derajat diperlihatkan pada Gambar 4.16. Dalam hal fasa error, gambar diatas membandingkan nilai perubahan fasa baik dalam bentuk derajat maupun radian dengan total jumlah symbol OFDM. Berdasarkan gambar tersebut sangat jelas terlihat bahwa gambar tersebut merupakan fasa linear.



**Gambar 4.16** Nilai Fasa Error

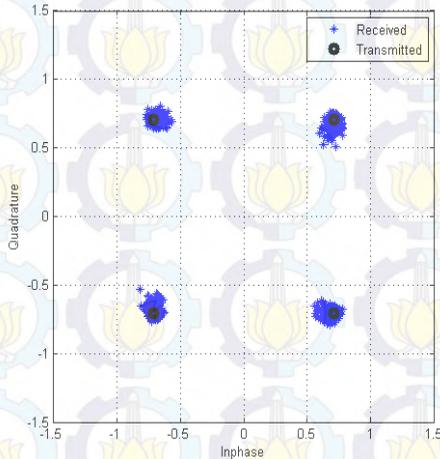
(a) Dalam bentuk radian, (b) Dalam bentuk derajat

Selain itu dapat dilihat juga bahwa saat symbol OFDM yang pertama, nilai fasa error sangat kecil sekali jika dibandingkan dengan symbol OFDM kedua dan seterusnya. Hal ini menandakan bahwa posisi symbol OFDM yang pertama mendekati posisi referensi yang terdapat pada pemancar, sehingga perubahannya kecil. Begitu juga saat nilai fasa error semakin besar menandakan bahwa posisi symbol OFDM tersebut semakin menjauhi posisi referensi. Hal itulah yang dinamakan offse phase antara pemancar dan penerima.

#### 4.1.10 Scatterplot sinyal

Scatterplot ini berfungsi untuk memberikan gambaran tentang wilayah deteksi symbol pada sistem komunikasi QPSK. Bentuk scatterplot yang akan ditampilkan pada Gambar 4.17 merupakan perbandingan antara symbol yang diterima dan dipancarkan. Perlu

diketahui bahwa symbol yang diterima ini sudah melalui proses estimasi baik estimasi kanal ataupun fasa error.



**Gambar 4. 17** Konstelasi Simbol

Dalam gambar tersebut dapat dilihat bahwa kedudukan symbol yang diterima mendekati posisi symbol yang dikirim dengan kata lain mendekati *decision area*. Sehingga pada saat pembacaan symbol yang diterima akan sama dengan symbol yang dikirim yang berarti nilai BER yang dihasilkan yaitu 0.

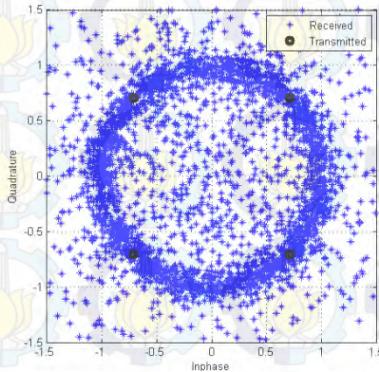
Contoh dari konstelasi dimana letak symbol yang diterima berada jauh dengan *decision area* diperlihatkan pada Gambar 4.18. Gambar tersebut diambil saat tidak melakukan proses interpolasi dengan jumlah bit yang sama. Nilai BER yang dihasilkan yaitu 0,4402.

## 4.2 Perbandingan BER dalam Kondisi Lingkungan *Indoor*

Berikut ini adalah hasil pengukuran pada lingkungan *indoor* yang sudah dijabarkan pada bagian 3.3. Hasil pengukuran dibagi menjadi 3 bagian, pertama kondisi LOS, kedua kondisi NLOS dan terakhir perbandingan tiap jarak.

### 4.2.1 Kondisi LOS

Untuk Kondisi LOS ditunjukkan pada Gambar 4.19. Sementara untuk hasil pengukuran pada kondisi tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.20 dan Tabel 4.1.



**Gambar 4. 18** Konstelasi Simbol saat BER tidak sama dengan 0

Berdasarkan Gambar 4.20 dan Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan nilai BER dalam keadaan LOS dengan jarak yang berbeda-beda. Teknik OFDM yang terbaik yaitu saat jarak terpendek yaitu 4 meter hal ini dikarenakan saat daya pancar  $-26.125$  dBm nilai BER yang diperoleh sudah 0 padahal dengan daya pancar sebesar itu untuk jarak 5 dan 6 meter nilai BER yang diperoleh sebesar  $2.79 \times 10^{-5}$  dan  $3.35 \times 10^{-5}$ . Sementara untuk jarak 5 meter membutuhkan daya pancar yang lebih besar yaitu sekitar  $-20.125$  dBm untuk memperoleh nilai BER = 0. Sedangkan untuk jarak 6 meter sekilas terlihat sedikit lebih baik nilai BER yang dihasilkan jika dibandingkan dengan 5 meter. Karena jika untuk jarak 5 meter membutuhkan daya pancar sebesar  $-20.125$  dBm maka untuk jarak 6 meter membutuhkan daya yang sedikit lebih rendah yaitu sebesar  $-21.8125$  dBm. Hal ini pun menunjukkan bahwa sistem OFDM baik dalam hal menanggulangi masalah jarak yang selalu jadi kendala dalam sistem komunikasi.



**Gambar 4.19** Foto Lingkungan di Lab B. 304 dengan Keadaan LOS

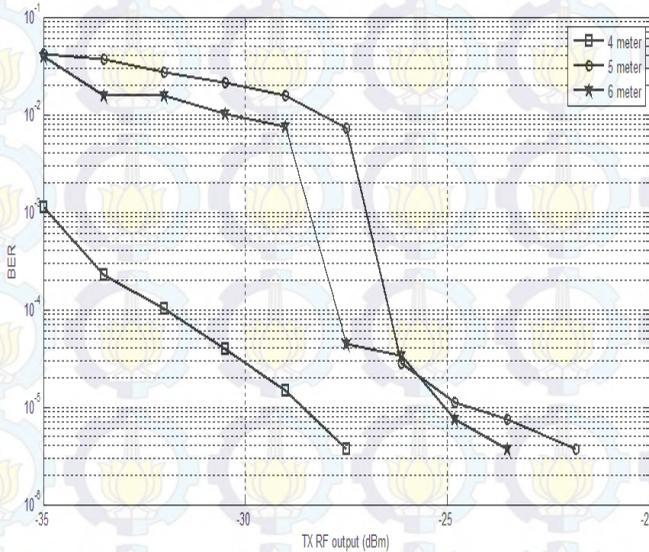
#### **4.2.2 Kondisi NLOS**

Untuk Kondisi NLOS ditunjukkan pada Gambar 4.21. Sementara untuk hasil pengukuran pada kondisi tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.22 dan Tabel 4.2.

Berdasarkan Gambar 4.22 dan Tabel 4.2 dapat dilihat perbedaan nilai BER saat keadaan NLOS dengan jarak yang berbeda-beda. Jika pada sub-bab sebelumnya nilai BER pada jarak 6 meter sedikit lebih baik jika dibandingkan dengan jarak 5 meter. Maka untuk keadaan NLOS terlihat sebaliknya, bahwa 5 meter lebih baik dibandingkan dengan 6 meter.

Secara garis besar, nilai BER lebih baik saat jarak antara pemancar dan penerima semakin dekat. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan saat jarak semakin bertambah maka sinyal yang diterima oleh penerima akan semakin kecil. Untuk jarak 4 meter nilai BER sama dengan 0 diperoleh saat daya pancar sebesar  $-23.5$  dBm padahal untuk jarak 5 dan 6 meter dengan daya pancar sebesar itu nilai BER yang diperoleh yaitu  $3.11 \times 10^{-4}$  dan 0.0163. Sementara untuk jarak 5 meter nilai BER terkecil yang diperoleh yaitu  $1.86 \times 10^{-6}$  saat daya pancar sebesar  $-15.6025$  dBm. Sedangkan untuk jarak 6 meter nilai BER terkecil yang diperoleh

$9.49 \times 10^{-5}$  dengan daya pancar yang sama pada saat jarak 5 meter. Meskipun nilai BER yang diperoleh saat jarak 5 dan 6 meter tidak ada yang bernilai 0, namun secara keseluruhan sistem komunikasi dengan teknik OFDM ini dapat dikategorikan baik karna nilai BER yang dihasilkan lebih dari  $10^{-3}$  saat daya pancar sebesar -15.0625 dBm.



**Gambar 4. 20** Perbandingan Kurva BER untuk Lingkungan *Indoor* dengan Keadaan LOS

### 4.2.3 Perbandingan Tiap Jarak

Pada sub bab ini, akan ditampilkan kurva BER saat keadaan LOS dan NLOS untuk setiap jarak baik 4, 5 maupun 6 meter. Untuk jarak 4 meter diperlihatkan pada Gambar 4.23 dan Tabel 4.3. Sementara untuk jarak 5 meter diperlihatkan pada Gambar 4.24 dan Tabel 4.4. Sedangkan untuk jarak 6 meter diperlihatkan pada Gambar 4.25 dan Tabel 4.5.

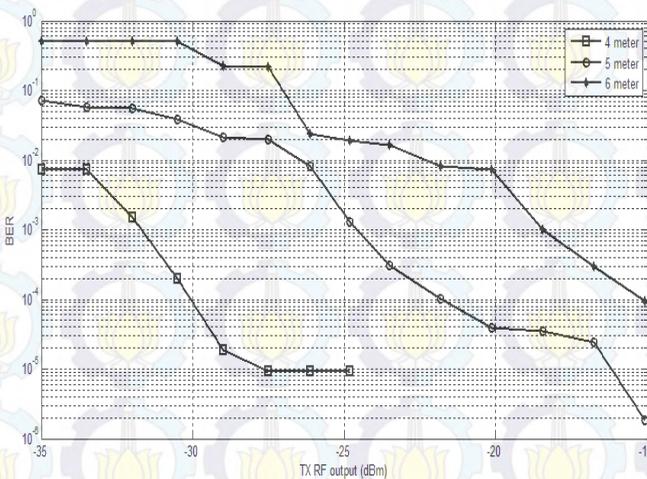
**Tabel 4. 1** Perbandingan BER untuk Keadaan LOS pada Lingkungan *Indoor*

	Jarak			Daya Pancar (dBm)
	4 meter	5 meter	6 meter	
Bit Error Rate (BER)	1.10E-03	0.0414	0.0395	-35
	2.23E-04	0.0364	0.0156	-33.5
	1.02E-04	0.0271	0.0155	-32
	3.90E-05	0.0215	0.0101	-30.5
	1.48E-05	0.0158	0.0075	-29
	3.72E-06	0.0072	4.46E-05	-27.5
	0	2.79E-05	3.35E-05	-26.125
	0	1.12E-05	7.44E-06	-24.8125
	0	7.44E-06	3.72E-06	-23.5
	0	3.72E-06	0	-21.8125
	0	0	0	-20.125
	0	0	0	-18.4375
	0	0	0	-16.75
	0	0	0	-15.0625

Berdasarkan Gambar 4.23 dan Tabel 4.3 dapat terlihat bahwa saat tanpa *obstacle* nilai BER lebih baik dibandingkan dengan adanya *obstacle*. Hal ini tentunya tidak mengherankan dikarenakan fungsi dari adanya *obstacle* itu yaitu untuk meredam sinyal yang dikirim. Sinyal yang teredam itu tergantung banyak hal, seperti permitivitas relative bahan sehingga kekuatan sinyal yang diterima oleh penerima saat adanya *obstacle* akan lebih rendah jika dibandingkan dengan tanpa *obstacle*. Kekuatan sinyal yang diterima itulah yang mengakibatkan error yang diterima akan lebih besar saat adanya *obstacle* dibandingkan tanpa *obstacle*. Sebagai pembuktian saat daya pancar sebesar -26.125 dBm nilai BER yang dihasilkan dalam keadaan tanpa *obstacle* yaitu 0 sementara keadaan dengan *obstacle* bernilai  $9.3 \times 10^{-6}$ .



**Gambar 4. 21** Foto Lingkungan di Lab B. 304 dengan Keadaan NLOS



**Gambar 4. 22** Perbandingan Kurva BER untuk Lingkungan *Indoor* dengan Keadaan NLOS

**Tabel 4. 2** Perbandingan BER Fungsi Jarak untuk Keadaan NLOS pada Lingkungan *Indoor*

	Jarak			Daya Pancar (dBm)
	4 meter	5 meter	6 meter	
Bit Error Rate (BER)	0.0074	0.0723	0.5	-35
	0.0072	0.0579	0.5	-33.5
	0.0015	0.0549	0.5	-32
	2.00E-04	0.0381	0.5	-30.5
	1.86E-05	0.0215	0.2214	-29
	9.30E-06	0.0197	0.2165	-27.5
	9.30E-06	0.0081	0.0239	-26.125
	9.30E-06	0.0013	0.0192	-24.8125
	0	3.11E-04	0.0163	-23.5
	0	1.02E-04	0.0083	-21.8125
	0	3.96E-05	0.0074	-20.125
	0	3.53E-05	0.001	-18.4375
	0	2.42E-05	2.96E-04	-16.75
	0	1.86E-06	9.49E-05	-15.0625

Sementara berdasarkan Gambar 4.24 dan Tabel 4.4 nilai yang didapatkan sesuai dengan teori yang sudah dijelaskan pada paragraf sebelumnya. Sebagai pembuktian ketika daya pancar sebesar -20.125 dBm nilai BER yang dihasilkan saat tanpa adanya *obstacle* bernilai 0 sementara saat adanya *obstacle* bernilai  $3.96 \times 10^{-5}$ .

Begitu juga yang terlihat pada Gambar 4.25 dan Tabel 4.5, nilai yang didapat sesuai dengan teori di atas. Bahkan jika dilihat lebih jelas, maka akan terlihat saat adanya *obstacle* dimana nilai daya pancar yang lebih kecil dari -29 dBm maka nilai BER yang dihasilkan sangat besar sekali. Saat daya pancar bernilai -21.8125 dBm nilai BER yang dihasilkan saat tanpa *obstacle* yaitu 0 sementara saat adanya *obstacle* yaitu 0.0083. Namun, jika melihat dari semua kurva *indoor* tersebut baik

kondisi LOS maupun NLOS dari jarak 4 hingga 6 meter, teknik OFDM ini tetap dapat dikategorikan baik untuk diimplementasikan.

Berdasarkan [24], untuk lingkungan *indoor* memiliki nilai *range RMS delay* sebesar  $\leq 50$  ns. Sedangkan berdasarkan Tabel 3.3, nilai *periode symbol* QPSK dan *periode symbol* OFDM diperlihatkan pada persamaan 4.1 dan 4.2.

$$T_s = \frac{1}{R_s}, T_s = \frac{1}{12 \times 10^6}, T_s = 83,3 \text{ ns} \quad (4.1)$$

$$T_{OFDM} = \frac{1}{R_{OFDM}}, T_{OFDM} = \frac{1}{250 \times 10^3}, T_{OFDM} = 4000 \text{ ns} \quad (4.2)$$

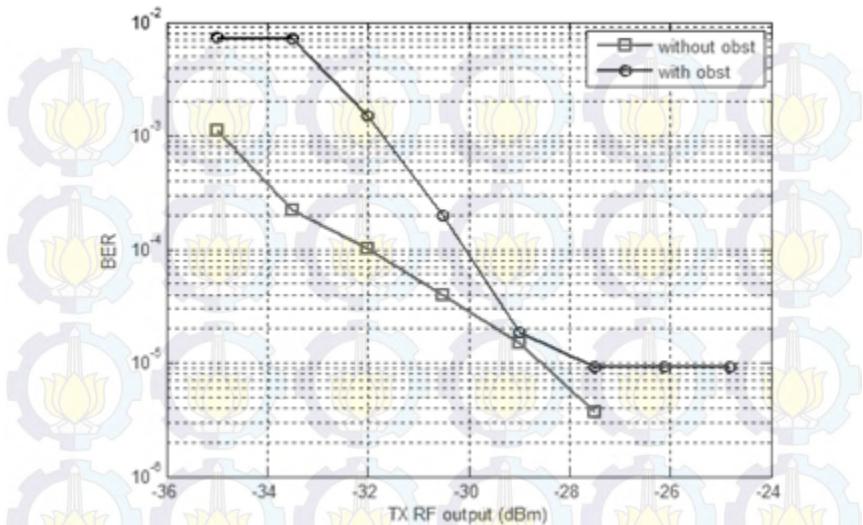
Sesuai dengan persamaan 4.1 dan 4.2 jika dibandingkan dengan nilai *RMS delay* maka dapat dikatakan sesuai pada persamaan 2.6 tidak terdapat *frequency selective fading*.

### 4.3 Perbandingan BER dalam Kondisi Lingkungan Lorong

Pada sub-bab ini dilakukan perbandingan nilai BER untuk lingkungan lorong. Lingkungan lorong dengan keadaan LOS di lantai 3 gedung B ditunjukkan pada Gambar 4.26. Tujuan dilakukannya pengukuran pada lingkungan lorong ini untuk menambah variasi lingkungan yang diukur agar memperdalam analisa.

Pada pengukuran di lorong ini yang diukur yaitu pada jarak 4 dan 5 meter. Dimana untuk masing-masing jarak tersebut hanya dalam kondisi LOS saja. Hasil pengukuran diperlihatkan pada Gambar 4.27 dan Tabel 4.6.

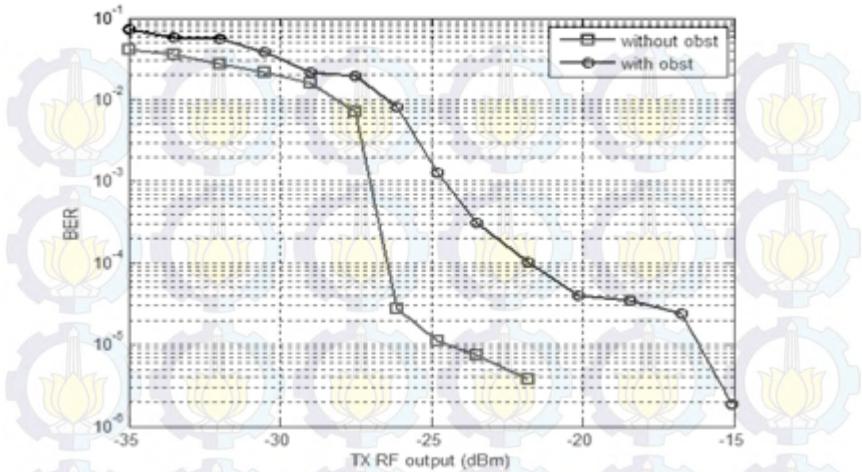
Berdasarkan Gambar 4.27 dan Tabel 4.6 kita tidak dapat menyimpulkan jarak 4 meter lebih baik jika dibandingkan dengan 5 meter. Hal ini disebabkan pada saat daya pancar diantara -35 dBm sampai -24.8125 dBm kualitas sistem OFDM pada jarak 5 meter lebih baik jika dibandingkan dengan jarak 4 meter.



**Gambar 4.23** Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 4 meter

Sementara saat daya pancar melebihi -24.8125 dBm kualitas sistem OFDM pada jarak 4 meter lebih baik jika dibandingkan pada jarak 5 meter. Hal ini didasarkan karena pada saat daya pancar -16.75 dBm nilai BER untuk jarak 4 meter sama dengan 0 sementara untuk jarak 5 meter BER yang dihasilkan  $3.72 \times 10^{-6}$ .

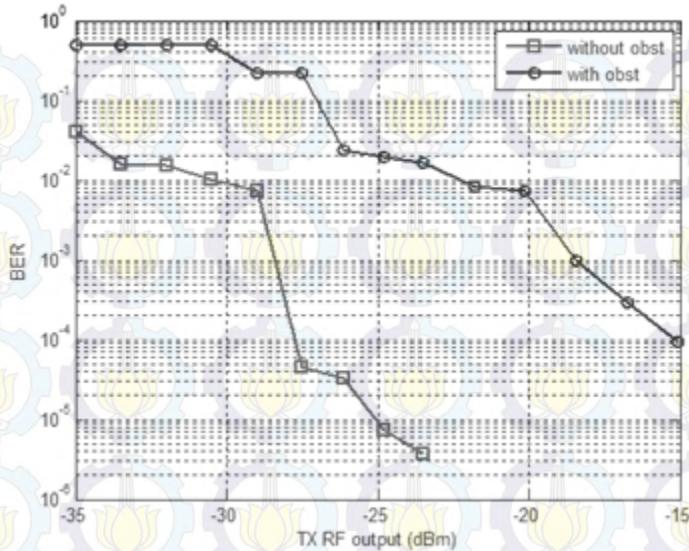
Untuk lingkungan lorong, berdasarkan [25] memiliki nilai range untuk RMS *delay* sebesar 100-150 ns. Dengan *range* nilai seperti itu berdasarkan persamaan 2.6 dapat dikatakan bahwa jika tanpa teknik OFDM maka akan terjadi *frequency selective fading* sementara ketika menggunakan teknik OFDM tidak terjadi *frequency selective fading* dikarenakan  $T_s \gg \sigma_\tau$ .



Gambar 4.24 Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 5 meter

Tabel 4.3 Perbandingan BER pada Jarak 4 meter pada Lingkungan Indoor

Bit Error Rate (BER)	Kondisi		Daya Pancar (dBm)
	Tanpa Obstacle	Dengan Obstacle	
1.1E-3	7.4E-3	-35	
2.23E-4	7.2E-3	-33.5	
1.02E-4	1.5E-3	-32	
3.9E-5	2E-4	-30.5	
1.48E-5	1.86E-5	-29	
3.72E-6	9.3E-6	-27.5	
0	9.3E-6	-26.125	
0	9.3E-6	-24.8125	
0	0	-23.5	



Gambar 4.25 Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 6 meter

#### 4.4 Perbandingan BER dalam Kondisi Lingkungan *Outdoor*

Berikut ini adalah hasil pengukuran pada lingkungan *outdoor* seperti yang sudah dijabarkan pada bagian 3.3. Hasil pengukuran tersebut dibagi menjadi 3 bagian, yang pertama kondisi LOS, kedua NLOS dan terakhir perbandingan tiap jarak.

##### 4.4.1 Kondisi LOS

Hasil pengukuran dalam kondisi LOS untuk jarak 4, 5 dan 6 diperlihatkan pada Gambar 4.28 dan Tabel 4.7. Pada Gambar dan Tabel tersebut dapat dilihat dari ketiga jarak tersebut sistem OFDM terbaik diperlihatkan pada saat jarak 4 meter. Hal ini dikarenakan hanya membutuhkan daya pancar sebesar -12.625 dBm untuk menghasilkan nilai BER sama dengan 0 sementara dengan daya pancar yang sama pada jarak 5 dan 6 meter menghasilkan nilai BER sebesar  $6.88 \times 10^{-3}$  dan  $3.1 \times 10^{-6}$ .

**Tabel 4. 4** Perbandingan BER pada Jarak 5 meter pada Lingkungan *Indoor*

	Kondisi		Daya Pancar (dBm)
	Tanpa Obstacle	Dengan Obstacle	
Bit Error Rate (BER)	0.0414	0.0723	-35
	0.0364	0.0579	-33.5
	0.0271	0.0549	-32
	0.0215	0.0381	-30.5
	0.0158	0.0215	-29
	0.0072	0.0197	-27.5
	2.79E-05	0.0081	-26.125
	1.12E-05	0.0013	-24.8125
	7.44E-06	3.11E-04	-23.5
	3.72E-06	1.02E-04	-21.8125
	0	3.96E-05	-20.125
	0	3.53E-05	-18.4375
	0	2.42E-05	-16.75
	0	1.86E-06	-15.0625

Untuk jarak 5 dan 6 meter dapat dilihat bahwa pada jarak 6 meter kualitas sistem OFDM jauh lebih baik jika dibandingkan dengan 5 meter. Hal ini dikarenakan pada saat pengukuran jarak 5 meter kondisi kanal sedang sangat buruk jika dibandingkan dengan 6 meter mengingat pengukuran pada jarak 5 dan 6 meter dilakukan pada hari yang berbeda.

Sementara untuk jarak 10, 15 dan 20 meter diperlihatkan pada Gambar 4.29 dan Tabel 4.8. Untuk jarak 10, 15 dan 20 meter dibuat gambar terpisah dengan pada saat jarak 4, 5 dan 6 meter seperti yang sudah dijelaskan pada bab 3.

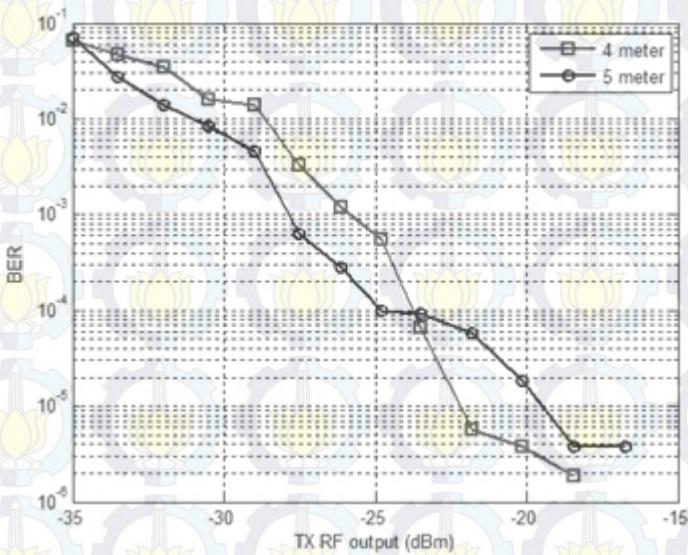
**Tabel 4. 5** Perbandingan BER pada Jarak 6 meter pada Lingkungan *Indoor*

	Kondisi		Daya Pancar (dBm)
	Tanpa Obstacle	Dengan Obstacle	
Bit Error Rate (BER)	0.0395	0.5	-35
	0.0156	0.5	-33.5
	0.0155	0.5	-32
	0.0101	0.5	-30.5
	0.0075	0.2214	-29
	4.46E-05	0.2165	-27.5
	3.35E-05	0.0239	-26.125
	7.44E-06	0.0192	-24.8125
	3.72E-06	0.0163	-23.5
	0	0.0083	-21.8125
	0	0.0074	-20.125
	0	0.001	-18.4375
	0	2.96E-04	-16.75
	0	9.49E-05	-15.0625

Pada hasil pengukuran tersebut dapat terlihat bahwa hasil yang didapatkan hampir sama saat jarak 4, 5 dan 6 meter dimana sistem OFDM yang paling baik yaitu pada saat jarak yang paling dekat dalam hal ini yaitu 10 meter. Sementara untuk jarak 15 dan 20 meter tidak terlalu terlihat pada jarak yang lebih baik karena pada saat daya pancar pada *range* -20.125 dBm sampai -12.625 dBm jarak 15 meter lebih baik namun saat daya pancar -10 dBm sampai -4.71 dBm jarak 20 meter lebih baik.



**Gambar 4. 26** Foto Lingkungan Lorong Kondisi LOS



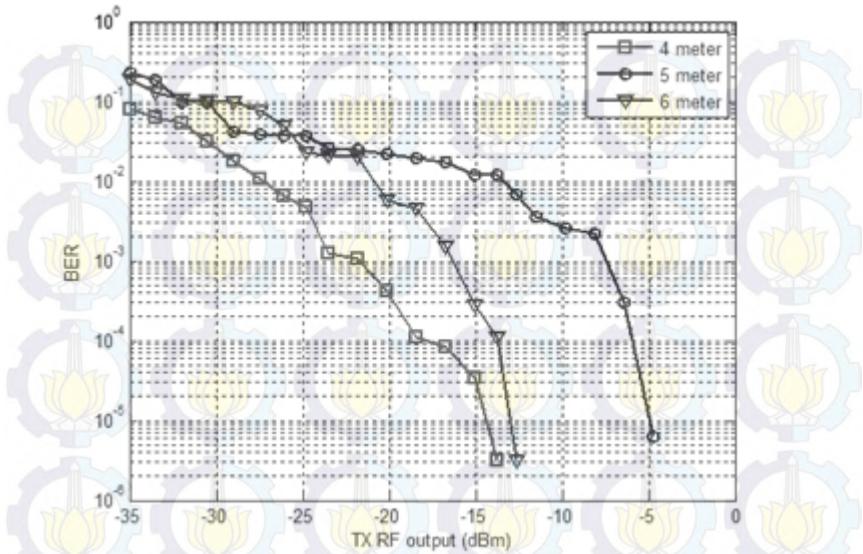
**Gambar 4. 27** Perbandingan Kurva BER Kondisi LOS Lingkungan Lorong untuk Jarak 4 dan 5 meter

**Tabel 4. 6** Perbandingan Nilai BER Kondisi LOS Lingkungan Lorong untuk Jarak 4 meter dan 5 meter

	Jarak		Daya Pancar (dBm)
	4 meter	5 meter	
Bit Error Rate (BER)	6.58E-02	7.00E-02	-35
	4.72E-02	2.76E-02	-33.5
	3.50E-02	1.39E-02	-32
	1.60E-02	8.29E-03	-30.5
	1.40E-02	4.64E-03	-29
	3.30E-03	6.23E-04	-27.5
	1.20E-03	2.79E-04	-26.125
	5.54E-04	9.86E-05	-24.8125
	6.70E-05	9.30E-05	-23.5
	5.58E-06	5.77E-05	-21.8125
	3.72E-06	1.86E-05	-20.125
	1.86E-06	3.72E-06	-18.4375
	0.00E+00	3.72E-06	-16.75
	0.00E+00	0.00E+00	-15.0625

#### 4.4.2 Kondisi Non-Line-of-Sight (NLOS)

Hasil pengukuran dalam kondisi NLOS untuk jarak 4, 5 dan 6 diperlihatkan pada Gambar 4.30 dan Tabel 4.9. Jika saat pengukuran LOS *outdoor* dengan jarak 4, 5 dan 6 meter dapat terlihat dengan jelas pada jarak berapa sistem bekerja maksimal, namun dalam kondisi NLOS tidak dapat terlihat dengan jelas pada jarak berapa sistem bekerja maksimal. Hal ini dikarenakan nilai BER yang dihasilkan tidak dapat diprediksi namun jika diambil saat daya pancar yang paling besar yaitu -4.714 dBm dapat dilihat bahwa pada jarak 6 meter sistem bekerja paling maksimal karena menghasilkan nilai BER yang paling kecil yaitu  $6.2 \times 10^{-5}$  jika dibandingkan saat jarak 4 dan 5 meter yang menghasilkan nilai BER  $1.55 \times 10^{-4}$  dan  $3.72 \times 10^{-4}$ .



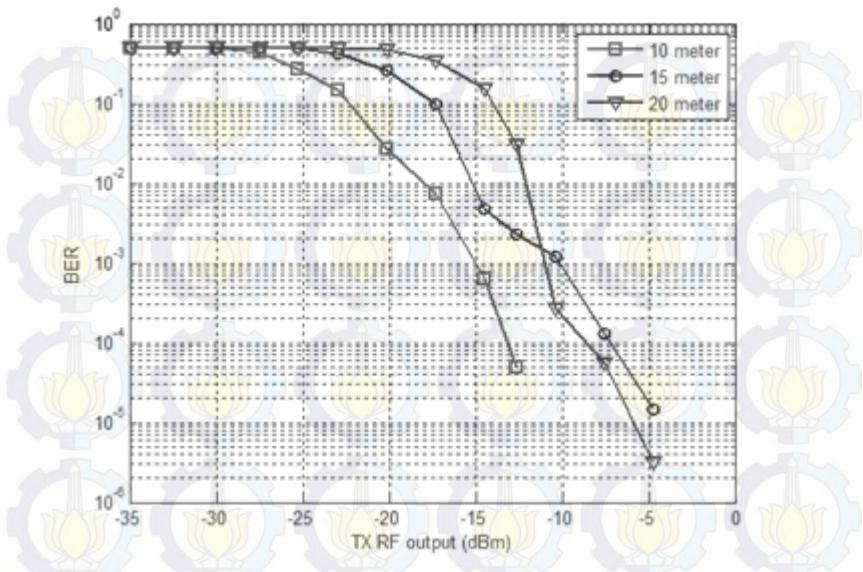
**Gambar 4.28** Perbandingan Kurva BER Kondisi LOS Lingkungan *Outdoor* untuk Jarak 4, 5 dan 6 meter

Nilai BER yang tidak menentu ini dapat dikarenakan kondisi kanal pada saat pengukuran yang tidak dapat diprediksi. Namun secara keseluruhan pada ketiga jarak tersebut sistem dapat dikategorikan baik.

Sementara untuk hasil pengukuran dalam kondisi NLOS pada jarak 10, 15 dan 20 meter diperlihatkan pada Gambar 4.31 dan Tabel 4.10. Sama seperti hasil pengukuran yang diperlihatkan pada Gambar 4.30 dan Tabel 4.9 dimana tidak dapat diketahui dengan jelas pada jarak berapa sistem OFDM bekerja maksimal. Namun jika diambil saat daya pancar yang paling besar yaitu  $-4.714$  dBm dapat dilihat bahwa sistem bekerja yang paling maksimal justru saat jarak antara pemancar dan penerima paling jauh yaitu 20 meter dengan nilai BER yang dihasilkan yaitu  $1.67 \times 10^{-4}$  jika dibandingkan saat jarak 10 dan 15 meter yang menghasilkan nilai BER  $2.79 \times 10^{-4}$  dan  $5.15 \times 10^{-4}$ .

**Tabel 4. 7** Perbandingan Nilai BER Kondisi LOS Lingkungan *Outdoor* untuk Jarak 4, 5 dan 6 meter

	Jarak			Daya Pancar (dBm)
	4 meter	5 meter	6 meter	
Bit Error Rate (BER)	8.13E-02	2.26E-01	1.84E-01	-35
	6.18E-02	1.86E-01	1.30E-01	-33.5
	5.27E-02	9.92E-02	1.05E-01	-32
	3.11E-02	9.90E-02	1.00E-01	-30.5
	1.78E-02	4.17E-02	9.91E-02	-29
	1.06E-02	3.94E-02	7.70E-02	-27.5
	6.43E-03	3.72E-02	4.89E-02	-26.125
	4.75E-03	3.72E-02	2.30E-02	-24.8125
	1.24E-03	2.59E-02	2.08E-02	-23.5
	1.07E-03	2.45E-02	2.05E-02	-21.8125
	4.15E-04	2.24E-02	5.68E-03	-20.125
	1.12E-04	1.92E-02	4.47E-03	-18.4375
	8.37E-05	1.72E-02	1.50E-03	-16.75
	3.41E-05	1.22E-02	2.76E-04	-15.0625
	3.10E-06	1.20E-02	1.12E-04	-13.75
	0	6.88E-03	3.10E-06	-12.625
	0	3.51E-03	0	-11.5
	0	2.59E-03	0	-9.8125
	0	2.15E-03	0	-8.125
	0	3.01E-04	0	-6.429
	0	6.20E-06	0	-4.714



**Gambar 4.29** Perbandingan Kurva BER Kondisi LOS Lingkungan *Outdoor* untuk Jarak 10, 15 dan 20 meter

Bila diperhatikan lebih jauh dari nilai BER yang dihasilkan terdapat perubahan nilai BER yang sangat drastic yaitu pada saat nilai daya pancar tertinggi. Dimana saat daya pancar tertinggi tersebut sistem masuk dalam kategori baik untuk ketiga jarak tersebut.

Seperti halnya dalam lingkungan *indoor* dan lorong, untuk lingkungan *outdoor* pun memiliki nilai *range RMS delay* sebesar 150 – 250 ns [24]. Berdasarkan *range* tersebut terlihat bahwa saat tanpa menggunakan teknik OFDM terjadi *frequency selective fading* namun hal tersebut dapat diatasi dengan menggunakan teknik OFDM.

#### 4.4.3 Perbandingan Tiap Jarak

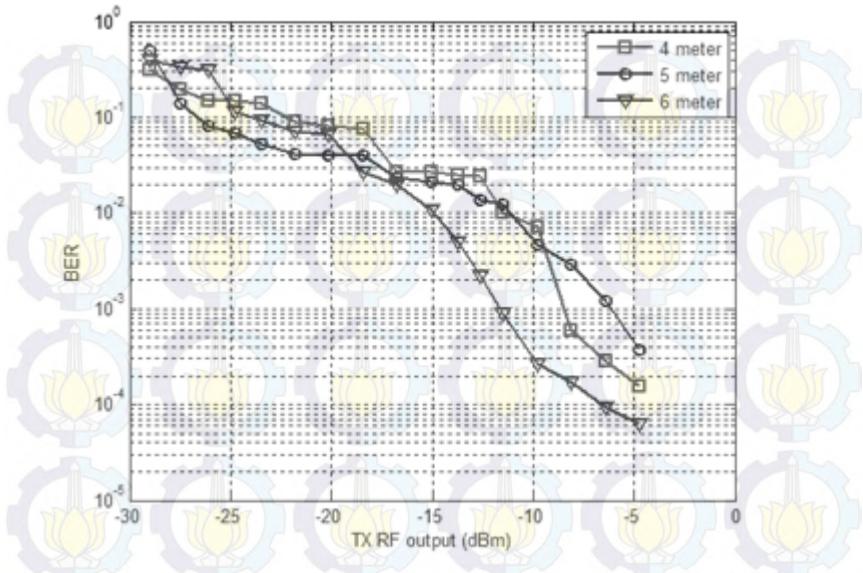
Pada sub-bab ini, akan menampilkan pengaruh *obstacle* pada masing-masing jarak. Jarak yang akan ditampilkan yaitu 4, 5 dan 6

meter. Untuk jarak 4, 5 dan 6 meter, diperlihatkan pada Gambar 4.32, 4.33 dan 4.34.

**Tabel 4. 8** Perbandingan Nilai BER Kondisi LOS Lingkungan *Outdoor* untuk Jarak 10, 15 dan 20 meter

	Jarak			Daya Pancar (dBm)
	10 meter	15 meter	20 meter	
Bit Error Rate (BER)	0.4993	0.4996	0.5008	-35
	0.4999	0.5001	0.4995	-32.5
	0.5001	0.4987	0.5008	-30
	0.4335	0.4995	0.4994	-27.5
	0.2687	0.4874	0.4994	-25.25
	0.1487	0.4215	0.5003	-22.937
	0.0273	0.256	0.4729	-20.125
	0.0073	0.0974	0.3474	-17.312
	6.30E-04	0.0048	0.1525	-14.5
	5.02E-05	0.0023	0.0301	-12.625
	0	0.0012	2.70E-04	-10.375
	0	1.30E-04	5.58E-05	-7.562
	0	1.49E-05	3.16E-05	-4.71

Seperti halnya dalam lingkungan *indoor*, pada lingkungan *outdoor* pun sangat jelas terlihat perbedaan antara tanpa *obstacle* maupun dengan *obstacle* baik itu pada jarak 4, 5 maupun 6 meter. Bahwa sistem OFDM dengan kondisi tanpa *obstacle* lebih baik jika dibandingkan dengan adanya *obstacle*. Karena memang mengatasi sinyal yang lemah karena adanya *obstacle* bukan merupakan kelebihan sistem OFDM.



**Gambar 4.30** Perbandingan Kurva BER Kondisi NLOS Lingkungan *Outdoor* untuk Jarak 4, 5 dan 6 meter

#### 4.5 Perbandingan BER dalam Berbagai Macam Lingkungan

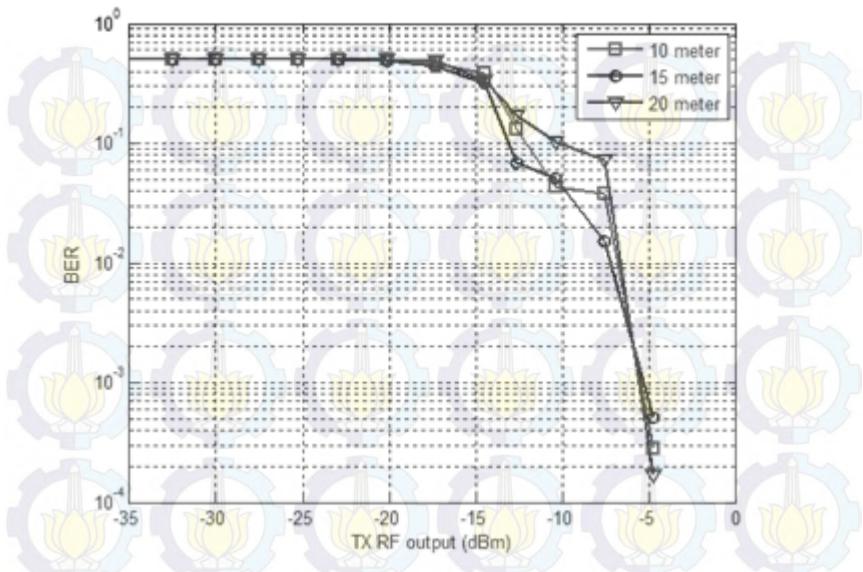
Pada sub bab ini akan dilakukan perbandingan dari berbagai macam lingkungan pengukuran pada jarak dan kondisi yang sama. Yang akan dibandingkan yaitu saat kondisi LOS dengan lingkungan *indoor*, *outdoor* dan lorong untuk jarak 4 dan 5 meter. Perbandingan pada jarak 4 meter diperlihatkan pada Gambar 4.32 dan Tabel 4.11. Sementara untuk 5 meter diperlihatkan pada Gambar 4.33 dan Tabel 4.12.

Untuk jarak 4 meter dapat terlihat dengan jelas perbedaan kualitas sistem OFDM dari berbagai lingkungan. Kualitas sistem yang terbaik tentu saja terjadi ketika berada didalam *indoor* hal ini dikarenakan pantulan dari *multipath* di ruangan *indoor* sangat pendek jika dibandingkan dengan lingkungan lorong dan *outdoor*. Sementara untuk lingkungan lorong dan *outdoor* pantulan dari *multipath* yang lebih

pendek sehingga kualitas sistem saat lorong lebih baik jika dibandingkan dengan *outdoor*.

**Tabel 4. 9** Perbandingan Nilai BER Kondisi NLOS Lingkungan *Outdoor* untuk Jarak 4, 5 dan 6 meter

	Jarak			Daya Pancar (dBm)
	4 meter	5 meter	6 meter	
Bit Error Rate (BER)	3.17E-01	0.4996	3.98E-01	-29
	1.97E-01	1.39E-01	3.38E-01	-27.5
	1.52E-01	8.09E-02	3.16E-01	-26.125
	1.51E-01	6.92E-02	1.13E-01	-24.8125
	1.39E-01	5.24E-02	9.21E-02	-23.5
	9.00E-02	4.09E-02	7.10E-02	-21.8125
	8.04E-02	4.00E-02	6.66E-02	-20.125
	7.66E-02	3.96E-02	2.64E-02	-18.4375
	2.69E-02	2.36E-02	1.97E-02	-16.75
	2.66E-02	2.13E-02	1.08E-02	-15.0625
	2.50E-02	1.99E-02	4.93E-03	-13.75
	2.45E-02	1.37E-02	2.19E-03	-12.625
	1.01E-02	1.22E-02	8.84E-04	-11.5
	7.23E-03	4.70E-03	2.67E-04	-9.8125
	5.95E-04	2.95E-03	1.74E-04	-8.125
	2.82E-04	1.23E-03	9.30E-05	-6.428
1.55E-04	3.72E-04	6.20E-05	-4.714	

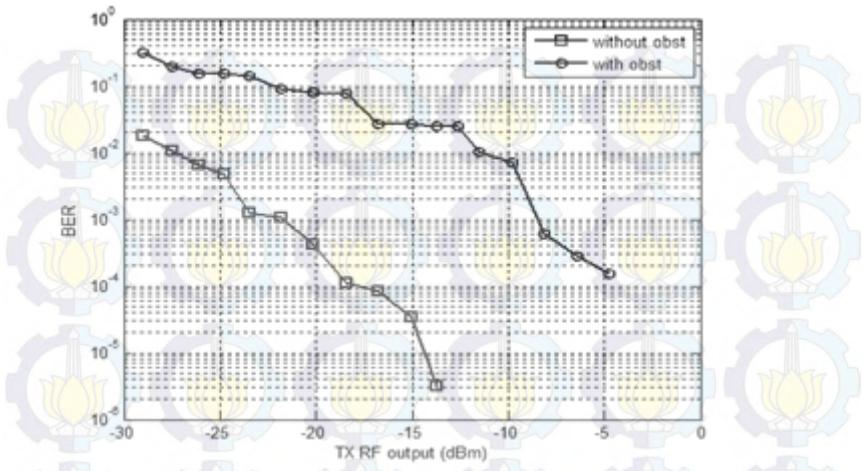


**Gambar 4.31** Perbandingan Kurva BER Kondisi NLOS Lingkungan *Outdoor* untuk Jarak 10, 15 dan 20 meter

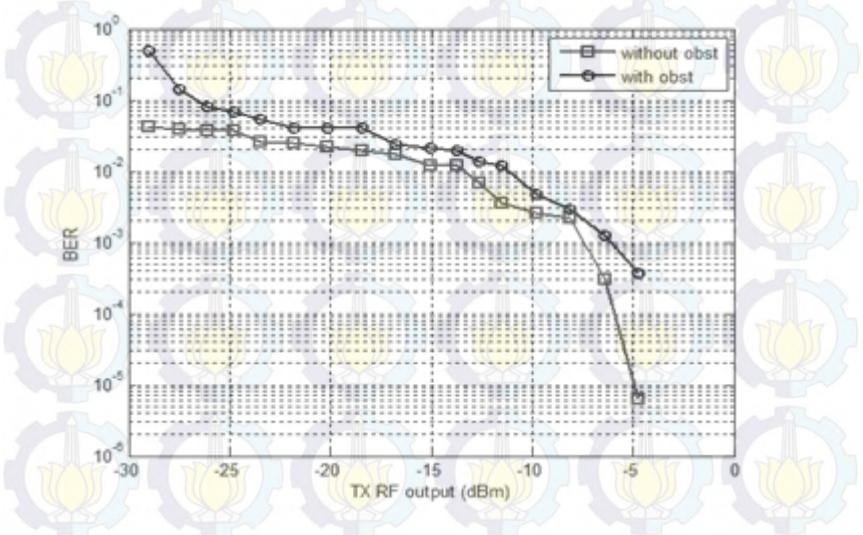
Sama dengan halnya saat 4 meter, untuk 5 meter pun seperti itu. Kualitas sistem terbaik terjadi saat di lingkungan *indoor* meskipun pada saat *gain* tertentu kualitas kondisi lorong lebih baik jika dibandingkan dengan *indoor* namun tetap secara keseluruhan kondisi *indoor* lebih baik karena saat daya pancar sebesar -20.125 dBm nilai BER yang didapat yaitu 0 sementara untuk lorong menghasilkan  $1.86 \times 10^{-5}$ . Sementara untuk lingkungan *outdoor* terlihat sangat jauh sekali perbedaannya jika dibandingkan dengan kondisi lorong. Hal ini karena pada saat pengukuran *outdoor* kondisi kanal memang sangat buruk seperti yang sudah dibahas pada bagian sebelumnya.

**Tabel 4. 10** Perbandingan Nilai BER Kondisi NLOS Pengukuran *Outdoor* untuk Jarak 10, 15 dan 20 meter

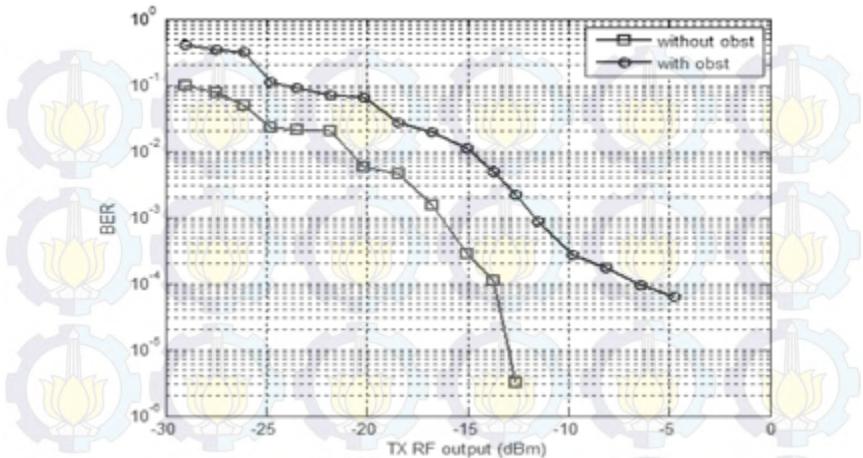
	Jarak			Daya Pancar (dBm)
	10 meter	15 meter	20 meter	
Bit Error Rate (BER)	0.5019	0.5005	0.5016	-35
	0.5004	0.5003	0.5009	-32.5
	0.5002	0.5	0.5008	-30
	0.5001	0.4999	0.5007	-27.5
	0.4996	0.4993	0.5006	-25.25
	0.4995	0.4993	0.4998	-22.937
	0.4994	0.4956	0.4993	-20.125
	0.4597	0.4425	0.4881	-17.312
	0.3881	0.3186	0.3343	-14.5
	0.1322	0.0687	0.1696	-12.625
	0.0438	0.0505	0.1035	-10.375
	0.038	0.0153	0.0718	-7.562
	2.79E-04	5.15E-04	1.67E-04	-4.714



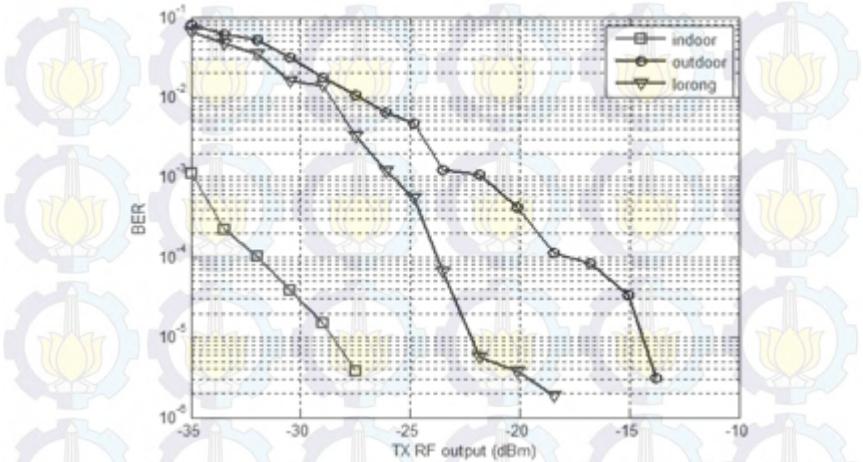
Gambar 4. 32 Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 4 meter di Lingkungan *Outdoor*



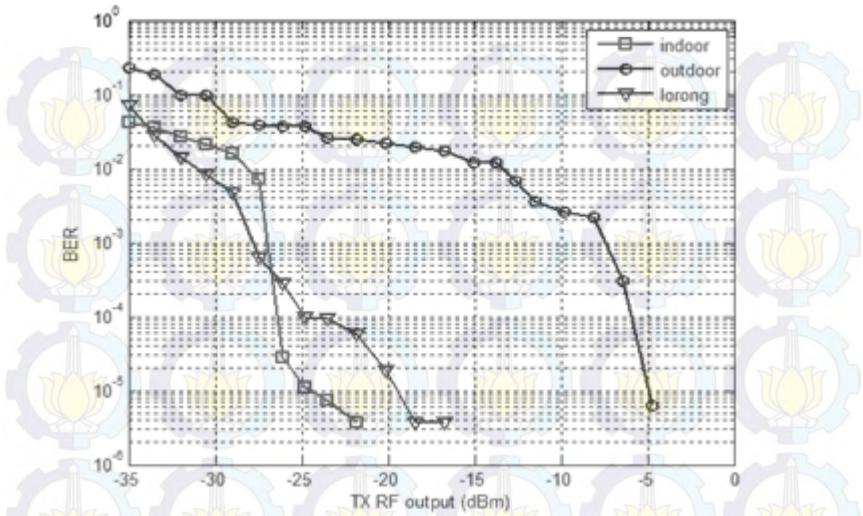
Gambar 4. 33 Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 5 meter di Lingkungan *Outdoor*



Gambar 4.34 Perbandingan Kurva BER untuk Jarak 6 meter di Lingkungan *Outdoor*



Gambar 4.35 Perbandingan Kurva BER dengan Berbagai Lingkungan untuk Jarak 4 meter



Gambar 4.36 Perbandingan Kurva BER dengan Berbagai Lingkungan untuk Jarak 5 meter

**Tabel 4. 11** Perbandingan Nilai BER dengan Berbagai Lingkungan untuk Jarak 4 meter

	Tempat			Daya Pancar (dBm)
	Indoor	Lorong	Outdoor	
Bit Error Rate (BER)	1.10E-03	6.58E-02	8.13E-02	-35
	2.23E-04	4.72E-02	6.18E-02	-33.5
	1.02E-04	3.50E-02	5.27E-02	-32
	3.90E-05	1.60E-02	3.11E-02	-30.5
	1.48E-05	1.40E-02	1.78E-02	-29
	3.72E-06	3.30E-03	1.06E-02	-27.5
	0	0.0012	6.43E-03	-26.125
	0	5.54E-04	4.75E-03	-24.8125
	0	6.70E-05	1.24E-03	-23.5
	0	5.58E-06	1.07E-03	-21.8125
	0	3.72E-06	4.15E-04	-20.125
	0	1.86E-06	1.12E-04	-18.4375
	0	0	8.37E-05	-16.75
	0	0	3.41E-05	-15.0625
	0	0	3.10E-06	-13.75
0	0	0.00E+00	-12.625	

**Tabel 4. 12** Perbandingan Nilai BER dengan Berbagai Lingkungan untuk Jarak 5 meter

	Tempat			Daya Pancar (dBm)
	Indoor	Lorong	Outdoor	
Bit Error Rate (BER)	0.0414	7.00E-02	2.26E-01	-35
	0.0364	2.76E-02	1.86E-01	-33.5
	0.0271	1.39E-02	9.92E-02	-32
	0.0215	8.29E-03	9.90E-02	-30.5
	0.0158	4.64E-03	4.17E-02	-29
	0.0072	6.23E-04	3.94E-02	-27.5
	2.79E-05	2.79E-04	3.72E-02	-26.125
	1.12E-05	9.86E-05	3.72E-02	-24.812
	7.44E-06	9.30E-05	2.59E-02	-23.5
	3.72E-06	5.77E-05	2.45E-02	-21.812
	0	1.86E-05	2.24E-02	-20.125
	0	3.72E-06	1.92E-02	-18.437
	0	3.72E-06	1.72E-02	-16.75
	0	0	1.22E-02	-15.062
	0	0	1.20E-02	-13.75
	0	0	6.88E-03	-12.625
	0	0	3.51E-03	-11.5
	0	0	2.59E-03	-9.8125
	0	0	2.15E-03	-8.125
	0	0	3.01E-04	-6.429
0	0	6.20E-06	-4.714	

## BAB 5

### PENUTUP

Pada bab 5, akan dibahas mengenai kesimpulan dari hasil pengukuran dan analisa data serta saran berdasarkan hasil-hasil pengukuran.

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisa yang sudah dilakuakn pada Bab IV, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- a. Dalam pengimplementasian sistem OFDM pada WARP, proses estimasi dipenerima merupakan proses yang sangat penting untuk mengatasi error yang ada baik berupa estimasi kanal maupun estimasi fasa error.
- b. Perbandingan kinerja sistem OFDM ditunjukkan pada nilai BER yang diperoleh dengan mengubah jarak antara pemancar dan penerima. Nilai BER tidak selalu berpengaruh terhadap perubahan jarak untuk lingkungan yang sama. Karena saat jarak lebih jauh terkadang nilai BER yang dihasilkan lebih baik dibandingkan dengan jarak dekat. Seperti pada lingkungan lorong, saat daya pancar sebesar -24.812 dBm nilai BER untuk jarak 5 meter sebesar  $9.86 \times 10^{-5}$  sementara untuk jarak 4 meter sebesar  $5.54 \times 10^{-4}$ .
- c. Perbandingan kinerja sistem OFDM ditunjukkan pada nilai BER yang diperoleh dengan mengubah daya pancar. Nilai BER akan semakin kecil terhadap bertambahnya daya yang dipancarkan untuk jarak antar pemancar dan penerima yang tetap. Dengan kata lain, nilai BER berbanding terbalik terhadap daya pancar. Kondisi ini berlaku untuk setiap pengukuran.
- d. Perbandingan kinerja sistem OFDM ditunjukkan pada nilai BER yang diperoleh dengan berbagai kondisi lingkungan yang berbeda dalam hal ini yaitu *indoor*, lorong dan *outdoor*. Nilai BER yang paling besar terjadi pada saat lingkungan *outdoor* jika dibandingkan dengan lingkungan *indoor* dan lorong. Hal ini dikarenakan pada *outdoor* terdapat pantulan *multipath* yang lebih jauh jika dibandingkan dengan lorong dan *indoor*. Seperti saat jarak 4 meter, dengan daya pancar sebesar -26.125 dBm nilai BER

untuk lingkungan *indoor* yaitu 0 sementara untuk lingkungan lorong  $1.2 \times 10^{-3}$  dan *outdoor*  $6.43 \times 10^{-3}$ .

- e. Perbandingan kinerja sistem OFDM ditunjukkan pada nilai BER yang diperoleh dengan ada atau tidaknya *obstacle*. Nilai BER saat adanya *obstacle* lebih besar jika dibandingkan tanpa *obstacle*, hal ini dikarenakan *obstacle* tersebut meredam sinyal yang ditransmit sehingga sinyal yang diterima akan lebih rendah jika dibandingkan tanpa *obstacle* terlebih lagi sistem OFDM tidak didesain untuk mengatasi redaman sinyal akibat *obstacle*. Seperti saat jarak 4 meter, saat daya pancar sebesar -26.125 dBm untuk keadaan LOS BER yang dihasilkan yaitu 0 sementara untuk NLOS bernilai  $9.3 \times 10^{-6}$ .

## 5.2 Saran

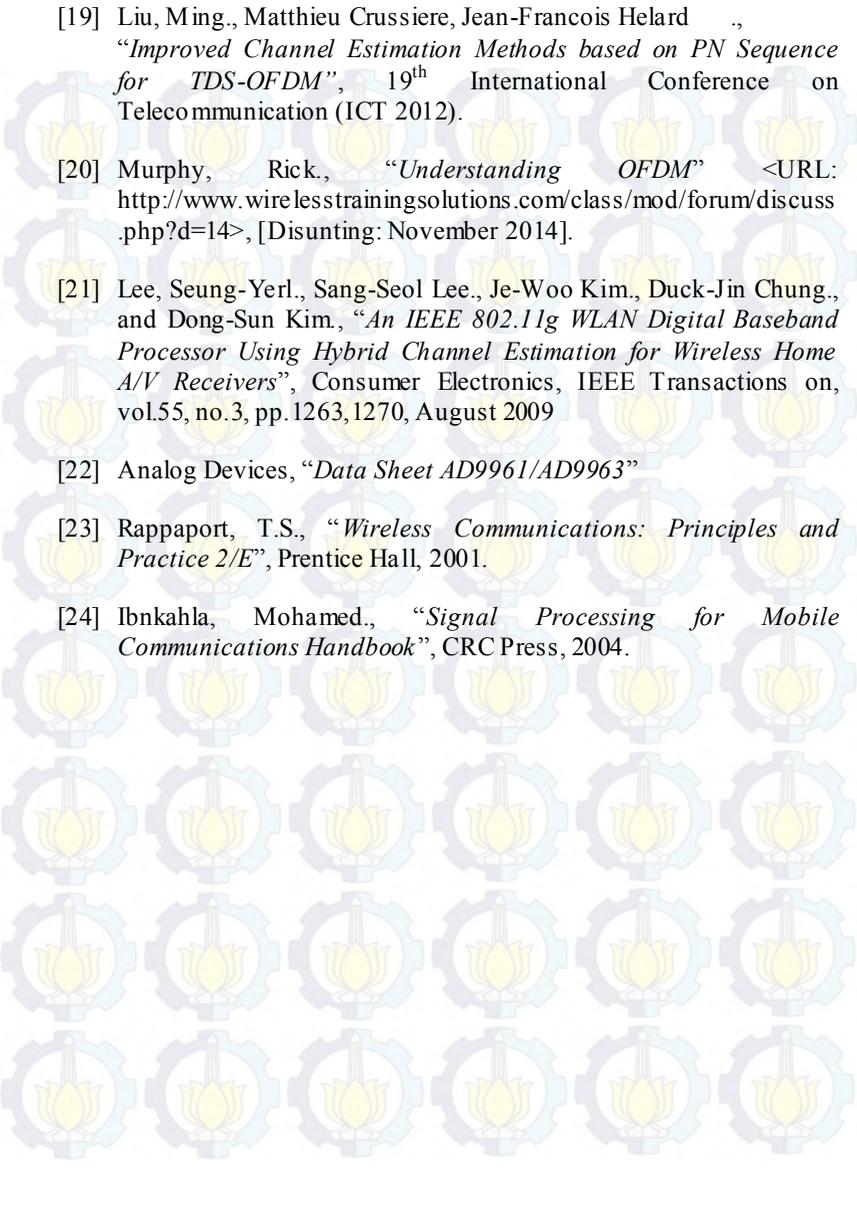
Selama proses pengerjaan penelitian ini, saran yang bisa diajukan sebagai bahan pengembangan lebih lanjut antara lain

- a. *Subcarrier* yang digunakan lebih banyak.
- b. Modulasi *bandpass* PSK atau QAM yang digunakan dengan nilai M lebih dari 4 untuk meningkatkan *data rate* radio.
- c. Mempelajari penggunaan *automatic gain control*.
- d. Variasi informasi yang dikirim seperti suara, *image* atau video.
- e. Pengukuran daya noise diperlukan untuk mengetahui SNR pada penerima. Sehingga, dapat dianalisa perbandingan antara teori pada kondisi kanal Rayleigh dengan kondisi kanal *indoor*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cho, Yong Soo., Jaekwon Kim., Won Young Yang., Chung-Gu Kang, “*MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*”, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore, 2010.
- [2] Bhardwaj, Manushree., Arun Gangwar., & Soni Devendra., “*A Review on OFDM: Concept, Scope & its Applications*”. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSRJMCE) ISSN : 2278-1684 Volume 1, 2012.
- [3] Yani, Kalfika, “*Software Defined Radio (SDR)*” <URL: [http://www.len.co.id/len\\_web/artikel\\_detail/?mg%3D%3D](http://www.len.co.id/len_web/artikel_detail/?mg%3D%3D)>, 2012.
- [4] Murphy, Patrick., Ashu Sabharwal., Behnaam Aazhang, “*Design of WARP: A Wireless Open-Access Research Platform*”, Department of Electrical and Computer Engineering, Rice University.
- [5] Lui, Cheuk Kwan, “*Method of Synchronization Using IEEE 802.11a OFDM Training Structure For Indoor Wireless Applications*”, Master of Engineering Thesis, Simon Fraser University, 2004.
- [6] Proakis, John G., Masoud Salehi, “*Digital Communications*”, The McGraw-Hill Companies, Inc., USA, 2008.
- [7] Villanean, Juha, “*802.11 a/g OFDM PHY*”, Postgraduate Course in Radio Communications.
- [8] Sathish, V, “*Time Synchronization and Low Complexity Detection for High Speed Wireless Local Area Network*”, AU-KBC Research Centre, MIT Campus, Chennai, India.
- [9] WARP Project-Wireless Open Access Research Platform, “*About the WARP Project*” <URL: <http://warproject.org/trac/wiki/about>>, [Disunting: Oktober 19, 2014].

- [10] Murphy, Patrick., Melissa Duarte., “*Physical Layer Prototyping using WARPLab*”, Rice University, USA, 2011.
- [11] Darwis, Rizadi Sasmita, “*Implementasi Sistem Komunikasi SISO dan MIMO 2x2 pada Platform WARP*”, Tesis Magister Teknik Elektro, ITS, 2014.
- [12] Maxim Integrated Product Inc, “MAX2828/MAX2829 Single-/Dual-Band 802.11a/b/g World-Band Transceiver ICs Datasheet”. 2004.
- [13] WARP Project-Wireless Open Access Research Platform, “*X245 Interface Module Module Implementation*” <URL: [http://warpproject.org/trac/wiki/WARPLab/Reference/Interface/X245#tx\\_gains](http://warpproject.org/trac/wiki/WARPLab/Reference/Interface/X245#tx_gains)>, [Disunting: November 5, 2014].
- [14] WARP Project-Wireless Open Access Research Platform, “*WARP Radio Board Overview*” <URL: [http://warpproject.org/trac/wiki/HardwareUsersGuides/RadioBoard\\_v1.4](http://warpproject.org/trac/wiki/HardwareUsersGuides/RadioBoard_v1.4)>, [Disunting: November 5, 2014].
- [15] Wang, Xun., Ying Xu., Zhiyong Feng., “*Physical-layer Network Coding in OFDM System: Analysis and Performance*”, International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINA COM), 2012.
- [16] Hayes, Monson H., “*Schaum’s Outline of Theory and Problems of Digital Signal Processing*”, USA, 1999.
- [17] Abhayawardhana, V.S., I.J. Wassell., “*Common Phase Error Correction with Feedback for OFDM in Wireless Communication*”, IEEE Global Telecommunications Conference, 2002.
- [18] Hwang, Taewon., Chenyang Yang., Gang Wu., Shaoqian Li., Geoffrey Ye Li., “*OFDM and Its Wireless Applications: A Survey*”, IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol. 58, no. 4, Mei 2009.

- 
- [19] Liu, Ming., Matthieu Crussiere, Jean-Francois Helard ,  
“*Improved Channel Estimation Methods based on PN Sequence  
for TDS-OFDM*”, 19<sup>th</sup> International Conference on  
Telecommunication (ICT 2012).
- [20] Murphy, Rick., “*Understanding OFDM*” <URL:  
[http://www.wirelesstrainingolutions.com/class/mod/forum/discuss  
.php?d=14](http://www.wirelesstrainingolutions.com/class/mod/forum/discuss.php?d=14)>, [Disunting: November 2014].
- [21] Lee, Seung-Yerl., Sang-Seol Lee., Je-Woo Kim., Duck-Jin Chung.,  
and Dong-Sun Kim., “*An IEEE 802.11g WLAN Digital Baseband  
Processor Using Hybrid Channel Estimation for Wireless Home  
A/V Receivers*”, Consumer Electronics, IEEE Transactions on,  
vol.55, no.3, pp. 1263,1270, August 2009
- [22] Analog Devices, “*Data Sheet AD9961/AD9963*”
- [23] Rappaport, T.S., “*Wireless Communications: Principles and  
Practice 2/E*”, Prentice Hall, 2001.
- [24] Ibnkahla, Mohamed., “*Signal Processing for Mobile  
Communications Handbook*”, CRC Press, 2004.



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# LAMPIRAN A – LEMBAR PENGESAHAN PROPOSAL

Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri – ITS

## TE141599 TUGAS AKHIR – 4 SKS

Nama Mahasiswa : Hasan  
Nomer Pokok : 2212106007  
Bidang Studi : Teknik Telekomunikasi dan Multimedia  
Tugas Diberikan : Semester Gasal 2014/2015  
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ir. Suwadi, MT  
2. Dr. Ir. Titiek Suryani, MT

23 SEP 2014

Judul Tugas Akhir : **Implementasi dan Evaluasi Kinerja Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Menggunakan WARP**  
*Implementation and Performance Evaluation of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Using WARP*

### Uraian Tugas Akhir :

Perkembangan dari teknik modulasi digital dalam dunia telekomunikasi sangat cepat, yang terbaru yaitu OFDM. OFDM digunakan/diterapkan pada banyak teknologi, sebagai contoh digunakan pada IEEE 802.11g dalam system *Wireless* LANS. Teknik OFDM menyediakan efisiensi spektrum dan kecepatan transmisi yang tinggi. Teknik OFDM tersebut dimungkinkan untuk pengaplikasiannya pada *platform Wireless Open-Access Research Platform (WARP)* yang merupakan salah satu jenis SDR (*Software Defined Radio*). Modul WARP tersebut akan digunakan sebagai model pemancar dan penerima untuk pengukuran kualitas unjuk kerja system OFDM standar IEEE 802.11g pada suatu lingkungan *indoor* dan *outdoor* dengan berbagai jenis kondisi seperti perbedaan jarak dan *obstacle*. Kemudian setelah dilakukan pengukuran, nilai-nilai yang didapat dari berbagai kondisi pengukuran tersebut akan dijadikan sebagai suatu analisa.

Kata Kunci : OFDM, IEEE 802.11g, WARP, *Software Defined Radio*

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

  
Dr. Ir. Suwadi, MT  
NIP. 19680818 1993031 002

  
Dr. Ir. Titiek Suryani, MT  
NIP. 19641130 1989032 001

Mengetahui,  
Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS.  
Ketua,

Menyetujui,  
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia  
Koordinator,

  
Dr. Tri Arief Sardjono, ST, MT  
NIP. 19700212 1995121 001

  
Dr. Ir. Endrovano, DEA  
NIP. 19650404 1991021 001



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN B – LISTING PROGRAM TUGAS AKHIR

```

- Frame Tx
% file ini merupakan fungsi transmit OFDM
%% parameter-parameter
N_Sym_per_SC      = 1120;
% jumlah total dari symbol per-subcarrier
N_Sym_per_SC_new  = 80;
% jumlah sekali kirim symbol per-subcarrier
Mod_Order         = 4;
% (QPSK = 4)
TX_SCALE          = 1.0;
% skala untuk gelombang transmit ([0:1])
Interp_Rate       = 2;
% nilai interpolasi (1 atau 2)
SC_Pilots         = [8 22 44 58];
% penempatan subcarrier untuk letak pilot
SC_Data           = [2:7 9:21 23:27 39:43 45:57
                    59:64];
% penempatan subcarrier untuk letak data
N_SC              = 64;
% jumlah dari subcarrier
F                 = 64;
% ukuran dari FFT
new_variable      = F/64;
% menentukan jumlah kelipatan
CP_length         = F/4;
% panjang dari cyclic prefix
N_Data_Sym        = N_Sym_per_SC * length(SC_Data)
% jumlah total symbol keseluruhan
LTS_Corr_Thresh   = 0.6;
% batas minimum untuk korelasi LTS
Decimate_Rate     = Interp_Rate;

% Mendefinisikan Respon Filter Interpolasi
interp_filt2      = zeros(1,43);
interp_filt2([1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21]) = [12 -32
72 -140 252 -422 682 -1086 1778 -3284 10364];
interp_filt2([23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43]) =
interp_filt2(fliplr([1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21]));
interp_filt2(22)  = 16384;

```

```

interp_filt2          =
interp_filt2./max(abs(interp_filt2));

%% Mendefinisikan Preamble
% Short Training Symbol
sts_f = zeros(1,64);
sts_f(1:27) = [0 0 0 0 -1-1i 0 0 0 -1-1i 0 0 0
1+1i 0 0 0 1+1i 0 0 0 1+1i 0 0 0 1+1i 0 0];
sts_f(39:64) = [0 0 1+1i 0 0 0 -1-1i 0 0 0 1+1i 0 0
0 -1-1i 0 0 0 -1-1i 0 0 0 1+1i 0 0 0];
sts_t = ifft(sqrt(13/6).*sts_f, 64);
sts_t = sts_t(1:16);
% Long Training Symbol
lts_f = [0 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1 -1 -1 -1 -1 1 1 -1
-1 1 -1 1 -1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 -1 -1 1
1 -1 1 -1 1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1 1 1 1];
if new_variable > 1
    lts_f = repmat(lts_f, 1, new_variable);
    [row, coloumn] = size(lts_f);
end
lts_t = ifft(lts_f, F);
preamble = [repmat(sts_t, 1, 30)
            lts_t((end/2)+1:end) lts_t lts_t];

%% Mendefinisikan Payload
bit_input = N_Data_Sym * log2(Mod_Order)
% jumlah bit yang dibangkitkan
bit_input_self = randi([0 1],bit_input,1);
% mengubah panjang input dengan bit '0'
% dan '1'
tx_data = bi2de(reshape(bit_input_self,
                        log2(MOD_ORDER),
                        length(bit_input_self)/log2(MOD_
ORDER)).','left-msb'));
% mengubah nilai bit menjadi nilai symbol

%% Proses Modulasi Baseband
k = log2(Mod_Order);
ph_off = pi/4;
h_bb_mod = modem.pskmod('M', Mod_Order,
                        'PhaseOffset', ph_off,
                        'SymbolOrder', 'Gray');
tx_syms = modulate(h_bb_mod, tx_data);

```

```

%% Proses Sebelum IFFT
tx_syms_mat = reshape(tx_syms,
    length(SC_Data),N_Sym_per_SC);
[row, column] = size(tx_syms_mat);
n_frame = column/N_Sym_per_SC_new;
new_column = N_Sym_per_SC_new *
    length(SC_Data);
new_matriks = reshape(tx_syms_mat, n_frame,
    new_column);
new_frame = zeros(1, new_column);

%% Proses N Frame & Transmit
for ii = 1:n_frame
    new_frame = new_matriks(ii,:);
    pilots = [1 1 1 1].';
    pilots_mat = repmat(pilots, 1,
        N_Sym_per_SC_new);
    new_frame_sc = reshape(new_frame,
        length(SC_IND_DATA), N_SYMS_PER_SC_new);

    % mengkonstruksi matriks input IFFT
    ifft_in_mat = zeros(F, N_SYMS_PER_SC_new);
    % memasukkan nilai data dan pilot
    ifft_in_mat(SC_Data, :) = new_frame_sc;
    ifft_in_mat(SC_Pilots, :) = pilots_mat;
    % proses IFFT
    tx_payload_mat = ifft(ifft_in_mat, F);
    % memasukkan cyclic prefix
    tx_cp = tx_payload_mat(end-CP_LEN+1 :
        end, :);
    tx_payload_mat = [tx_cp; tx_payload_mat];
    % mengubah dalam bentuk vektor
    tx_payload_vec = reshape(tx_payload_mat, 1,
        numel(tx_payload_mat));
    % memasukan preamble
    tx_vec = [preamble tx_payload_vec];
    % mengisi zero padding
    tx_vec_padded = [tx_vec
        zeros(1, (16384/INTERP_RATE) -
            length(tx_vec))];
    % proses interpolasi
    if (Interp_Rate == 1)
        tx_vec_air = tx_vec_padded;
    end
end

```

```

else
    tx_vec_2x = zeros(1, 2*numel(tx_vec_padded));
    tx_vec_2x(1:2:end) = tx_vec_padded;
    tx_vec_air = filter(interp_filt2, 1, tx_vec_2x);
end
% men-skala vektor Tx
tx_vec_air_new(ii,:) = TX_SCALE .* tx_vec_air ./ max(abs(tx_vec_air));
end

```

#### - Frame Rx

```

% file ini merupakan fungsi receive OFDM
%% Proses Desimasi
for ii = 1:n_frame
    rx_vec_air_new = (rx_vec_air_warp(ii,:));

    if(DECIMATE_RATE == 1)
        raw_rx_dec = rx_vec_air_new;
    elseif(DECIMATE_RATE == 2)
        raw_rx_dec = filter(interp_filt2, 1, rx_vec_air_new);
    end
    raw_rx_dec = raw_rx_dec(1:2:end);
end
%% Korelasi LTS
lts_corr = abs(conv(conj(fliplr(lts_t)), sign(raw_rx_dec)));
% menghilangkan sample awal dan akhir
lts_corr = lts_corr(F/2:end-F/2);
% menemukan puncak dari LTS
lts_peaks = find(lts_corr > LTS_CORR_THRESH*max(lts_corr));
% menentukan puncak korelasi sebagai payload LTS
[LTS1, LTS2] = meshgrid(lts_peaks, lts_peaks);
[lts_second_peak_index, y] = find(LTS2-LTS1 == length(lts_t));
% bila tidak terdapat nilai puncak

```

```

if (isempty(lts_second_peak_index))
    fprintf('No LTS Correlation Peaks Found!\n');
    return;
end
% menentukan symbol payload dan preamble
payload_ind = lts_peaks (max
    (lts_second_peak_index)) + ((F/2));
lts_ind      = payload_ind-(2.5*F);
if lts_ind > length(raw_rx_dec) - 159
    lts_ind = length(raw_rx_dec) - 159;
end
% proses estimasi kanal
if new_variable > 1
    rx_lts = raw_rx_dec(lts_ind :
        lts_ind+((new_variable*159)+(new_v
            ariable-1)));
else
    rx_lts = raw_rx_dec(lts_ind : lts_ind+159);
end
if new_variable > 1
    rx_lts1 = rx_lts(-F+-FFT_OFFSET +
        [((new_variable*97)-(new_variable-
            1)):(new_variable*160)]);
else
    rx_lts1 = rx_lts(-F+-FFT_OFFSET + [97:160]);
end
if new_variable > 1
    rx_lts2 = rx_lts(-FFT_OFFSET +
        [((new_variable*97)-(new_variable-
            1)):(new_variable*160)]);
else
    rx_lts2 = rx_lts(-FFT_OFFSET + [97:160]);
end
rx_lts1_f = fft(rx_lts1);
rx_lts2_f = fft(rx_lts2);
% menghitung kanal estimasi
rx_H_est = lts_f .* (rx_lts1_f + rx_lts2_f)/2;

%% Pemrosesan Payload Rx
if payload_ind > length(raw_rx_dec) -
    (N_SYMS_PER_SC_new*(F+CP_LEN)-1)
    payload_ind = length(raw_rx_dec) -
        (N_SYMS_PER_SC_new*(F+CP_LEN)-1);
end

```

```

payload_vec          = raw_rx_dec(payload_ind
    :payload_ind+N_SYMS_PER_SC_new*(F+CP_LEN)-1);
rx_payload_mat      = reshape(payload_vec,
    (F+CP_LEN), N_SYMS_PER_SC_new);
% menghapus nilai cyclic prefix
rx_payload_mat_noCP = rx_payload_mat(CP_LEN-
    FFT_OFFSET+[1:F], :);
% menghitung nilai FFT
syms_f_mat = fft(rx_payload_mat_noCP, F);
% proses equalisasi
syms_eq_mat = syms_f_mat./repmat(rx_H_est.', 1,
    N_SYMS_PER_SC_new);
% mengambil nilai pilot dan menghitung phase error
per-symbol
pilots_f_mat        = syms_eq_mat
    (SC_IND_PILOTS,:);
pilot_phase_err     = angle(mean(pilots_f_mat
    .*pilots_mat));
pilot_phase_corr = repmat(exp(-1i *
    pilot_phase_err), F, 1);
% menghitung koreksi fasa pilot per symbol
syms_eq_pc_mat      = syms_eq_mat .*
    pilot_phase_corr;
payload_syms_mat    = syms_eq_pc_mat(SC_IND_DATA,
    :);
new_matriks_rx      = reshape(payload_syms_mat, 1,
    new_coloumn);
payload_syms_mat_new(ii,:) = new_matriks_rx;
end

%% Demodulasi
rx_syms_new         = reshape(payload_syms_mat_new,
    length(SC_IND_DATA), N_SYMS_PER_SC);
rx_syms             = reshape(rx_syms_new, 1,
    N_DATA_SYMS);
rx_syms             = rx_syms.';
h_bb_demod          = modem.pskdemod('M',MOD_ORDER,
    'PhaseOffset',ph_off,'SymbolOrder','Gray');
rx_data             = demodulate(h_bb_demod, rx_syms);

%% Data Output
bit_output_self     = de2bi(rx_data,'left-msb');

```

```

bit_output_self      = reshape
    (bit_output_self.',prod(size
    (bit_output_self),1);
[num_err, SER]      = biterr(bit_output_self,
    bit_input_self)
- WARP Transmit

function [rx_vec_air,rx_RSSI,rx_gains] =
warp_transmit(tx_vec_air,TxGainRF,TxGainBB,RxGainRF,Rx
GainBB,fc,channel)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Set up the WARPLab experiment
% Prepare for Transmit Using WARP
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

USE_AGC = false;
    % false = if use gain control
    % true  = if not use gain control
NUMNODES = 2;

% create a vector of node objects
nodes = wl_initNodes(NUMNODES);

fprintf('Begin WARP Tx-Rx...\n')
tic;

% create a UDP broadcast trigger and tell each node
to be ready for it
eth_trig = wl_trigger_eth_udp_broadcast;
wl_triggerManagerCmd(nodes,'add_ethernet_trigger',[eth
_trig]);

% get IDs for the interfaces on the boards. Since
this example assumes
% each board has the same interface capabilities, we
only need to get
% the IDs from one of the boards
[RFA,RFB] = wl_getInterfaceIDs(nodes(1));

% set up the interface for the experiment

```

```

wl_interfaceCmd(nodes, 'RF_ALL', 'tx_gains', TxGainBB, TxGainRF);
wl_interfaceCmd(nodes, 'RF_ALL', 'channel', fc, channel);
if(USE_AGC)
    wl_interfaceCmd(nodes, 'RF_ALL', 'rx_gain_mode', 'automatic');
    wl_basebandCmd(nodes, 'agc_target', -10);
    wl_basebandCmd(nodes, 'agc_trig_delay', 500);
else
    wl_interfaceCmd(nodes, 'RF_ALL', 'rx_gain_mode', 'manual');
end;

wl_interfaceCmd(nodes, 'RF_ALL', 'rx_gains', RxGainRF, RxGainBB);
end;

% use the transmitter's I/Q buffer size to determine
% how long our transmission can be
TX_NUM_SAMPS = nodes(1).baseband.txIQLen;
SAMP_FREQ = nodes(1).baseband.samp_freq;
wl_basebandCmd(nodes(1), 'tx_buff_clk_freq');

% set up the baseband for the experiment
wl_basebandCmd(nodes, 'tx_delay', 0);
wl_basebandCmd(nodes, 'tx_length', TX_NUM_SAMPS);
example_mode_string = 'hw';

node_tx = nodes(1);
node_rx = nodes(2);
RF_TX = RFA;
RF_RX = RFA;

Ts = 1/(wl_basebandCmd(nodes(1), 'tx_buff_clk_freq'));
Ts_RSSI = 1/(wl_basebandCmd(nodes(1), 'rx_rssi_clk_freq'));

% mulai
tx_vec_air = tx_vec_air.';
tx_vec_air_size = size(tx_vec_air);

```

```

rx_vec_air          =
zeros(TX_NUM_SAMPS,tx_vec_air_size(2));
rx_RSSI            =
zeros(TX_NUM_SAMPS/4,tx_vec_air_size(2));
rx_gains           = zeros(3,tx_vec_air_size(2));

% melakukan transmit dan receive
wl_interfaceCmd(node_tx,RF_TX,'tx_en');
wl_interfaceCmd(node_rx,RF_RX,'rx_en');
wl_basebandCmd(node_tx,RF_TX,'tx_buff_en');
wl_basebandCmd(node_rx,RF_RX,'rx_buff_en');

for m=1:tx_vec_air_size(2);

    wl_basebandCmd(node_tx,[RF_TX], 'write_IQ',
tx_vec_air(:,m) );

    % send trigger
    eth_trig.send();

    % get received data

    % first RF
    rx_vec_air(:,m) =
wl_basebandCmd(node_rx,[RF_RX], 'read_IQ', 0,
TX_NUM_SAMPS);
    rx_RSSI(:,m) =
wl_basebandCmd(node_rx,[RF_RX], 'read_RSSI',0,TX_NUM_SA
MPS/(Ts_RSSI/Ts));
    rx_gains(:,m) =
wl_basebandCmd(node_rx,[RF_RX], 'agc_state');

end

% disable all RF to both node
wl_basebandCmd(nodes,'RF_ALL','tx_rx_buff_dis');
wl_interfaceCmd(nodes,'RF_ALL','tx_rx_dis');

rx_vec_air      = rx_vec_air.';
pr_time = toc;
fprintf('\nDone. Process time = %f s \n',pr_time);
end

```



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Purwakarta pada tanggal 3 Maret 1992. Telah menyelesaikan sekolah dasar di SDN Duren Sawit 01 Pagi Jakarta Timur pada tahun 2003. Sekolah menengah per tama di SMPN 27 Jakarta sampai tahun 2006, sekolah menengah atas di SMAN 61 Jakarta sampai tahun 2009, kuliah jilid pertama penulis di Politeknik Negeri Jakarta (PNJ) sampai tahun 2012. Penulis melanjutkan pendidikan jilid kedua di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2013 dengan jurusan Teknik Elektro program studi Teknik Telekomunikasi. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email [hasan.badjrie@gmail.com](mailto:hasan.badjrie@gmail.com)