

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

Hasan, Suwadi, Titiek Suryani

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: hasanbadjrie12@mhs.ee.its.ac.id, suwadi110@gmail.com, titiks@ee.its.ac.id

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*. Cara kerja transmisi *multi-carrier* yaitu membagi total *bandwidth* signal yang tersedia menjadi beberapa *subcarrier-subcarrier* dengan *bandwidth* yang sempit. Sehingga *bandwidth* masing-masing *subcarrier* yang dihasilkan tersebut menjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan *bandwidth* koheren kanal. Salah satu transmisi *multi-carrier* yang terbaru 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. Spesifikasi sistem OFDM yang digunakan pada tugas akhir ini menggunakan standar IEEE 802.11. Hasil dari implementasi dan pengukuran menunjukkan bahwa nilai BER tidak selalu berpengaruh terhadap perubahan jarak untuk lingkungan yang sama. Sementara dalam hal *obstacle*, nilai BER sangat berpengaruh dimana nilainya akan lebih baik saat tidak adanya *obstacle* sebagai contoh ketika tanpa LoS dengan daya pancar sebesar -26.125 dBm nilai BER sudah 0 sementara NLoS bernilai 9.3×10^{-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*

I. PENDAHULUAN

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].

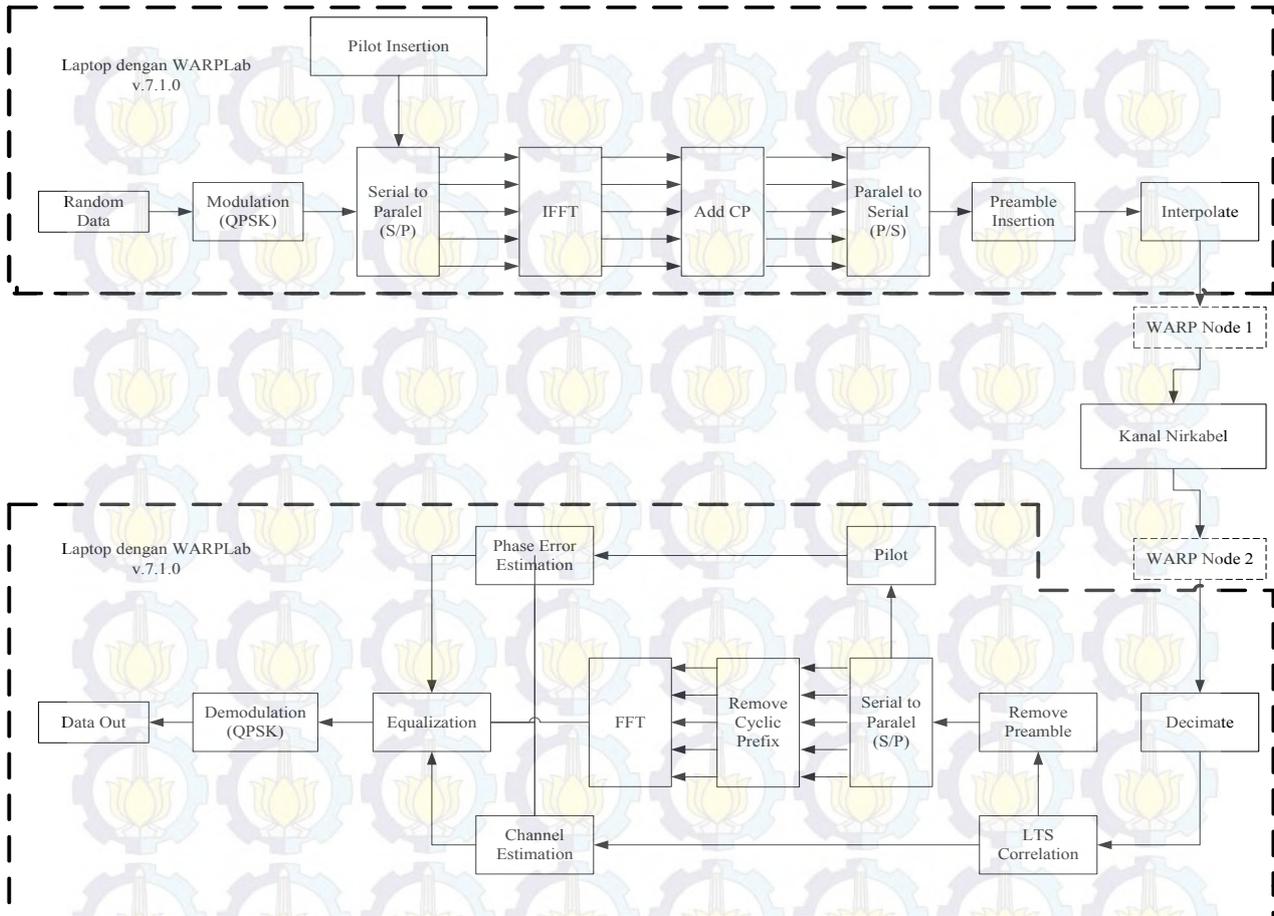
Untuk mengatasi masalah tersebut, maka solusi yang tepat untuk *data rate* yang tinggi digunakanlah transmisi *multi-carrier*. Karena pada transmisi *multi-carrier* total *bandwidth* yang tersedia dalam spectrum dibagi menjadi *sub band-sub band* untuk transmisi *multi-carrier* dalam bentuk parallel sehingga *bandwidth* untuk masing-masing *sub band* relative lebih kecil jika dibandingkan dengan *bandwidth* koheren. Sebagai contoh transmisi *multi-carrier* yaitu OFDM, dimana pada OFDM ini memungkinkan *carrier-carrier* tersebut memiliki jarak yang sempit bahkan hingga saling *overlapped* sehingga lebih hemat *bandwidth* jika dibandingkan dengan *multi-carrier* yang lain seperti *Frequency Division Multiplexing* (FDM). OFDM sendiri sudah diterapkan untuk berbagai standar sistem telekomunikasi baik dalam teknologi *wireless* maupun *wireline* sebagai contoh yaitu IEEE 802.11g untuk standar (WiFi) *Wireless LANs*.

Pada paper ini, proses implementasi dan evaluasi kinerja OFDM menggunakan komunikasi SISO (*Single-Input Single-Output*) sehingga hanya menggunakan antenna pemancar dan penerima masing-masing satu buah. Komunikasi tersebut dapat diimplementasikan pada sebuah SDR sebagai contoh yaitu WARP. WARP yang merupakan model sistem komunikasi nirkabel tersebut akan diimplementasikan untuk teknik OFDM dengan berbagai kondisi pengukuran.

II. METODE PENELITIAN

A. Desain Sistem OFDM

Untuk desain sistem OFDM pada WARP memang tidak terlalu berbeda jauh dengan sistem OFDM secara keseluruhan. Untuk blok diagram secara keseluruhan diperlihatkan pada Gambar 1. Penjelasannya sebagai berikut. Bit-bit acak dibangkitkan, kemudian dimodulasi QPSK dengan perbedaan fasa 45° . Proses ini bertujuan



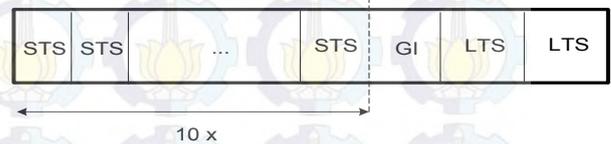
Gambar 1. Diagram Blok Sistem OFDM pada WARP

untuk mengubah bentuk bit informasi menjadi symbol. Tabel 1 menunjukkan nilai symbol hasil modulasi tersebut.

Setelah itu, maka data akan dibuat dalam bentuk parallel dengan ukuran 48x80. Proses selanjutnya yaitu IFFT dengan ukuran 64. Dari 64 itu, 48 berisi data, 4 pilot dan lainnya kosong. Setelah proses IFFT, maka selanjutnya yaitu menambahkan *cyclic prefix* dengan ukuran 25% dari satu symbol OFDM dalam hal ini ukurannya yaitu 16. Setelah ditambah dengan *cyclic prefix*, selanjutnya penambahan *preamble*. *Preamble* disini merupakan gabungan antara *Long Training Symbol* (LTS) dan *Short Training Symbol* (STS). Susunan dari *preamble* diperlihatkan pada Gambar 2. Setelah penambahan *preamble*, kemudian sinyal melalui proses interpolasi. Interpolasi berfungsi untuk meningkatkan *sampling rate* dari sinyal transmisi sehingga dapat dimodulasi ke frekuensi yang lebih tinggi [3].

Tabel 1. Nilai Simbol Hasil Modulasi QPSK

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



Gambar 2. Susunan Preamble [2]

Proses interpolasi ini terdiri dari 2 tahap pertama yaitu *up-sample* dan kedua yaitu filter *low pass filter* (LPF) [1]. Efek dari interpolasi ini yaitu ukuran sinyal menjadi lebih besar tergantung dari ukuran *up-sample*. Setelah melalui proses interpolasi, maka sinyal akan dinormalisasi untuk mengoptimalkan *Digital to Analog Converter* (DAC) yang terdapat pada WARP sehingga sinyal berada di *range* +1 dan -1. Kemudian sinyal tersebut dikirimkan ke *buffer transmitter* melalui Ethernet. Proses transmisi akan berjalan setelah dikirimkan paket sinkronisasi ke node *transmitter* dan *receiver*.

Sementara proses pada penerima yaitu sebagai berikut. Pertama sinyal yang diterima mengalami proses desimasi, proses desimasi ini merupakan kebalikan dari interpolasi yaitu menurunkan *sample rate*. Proses desimasi ini terdapat dua tahap yaitu pertama filter LPF dan kedua *down-sample* dengan ukuran yang sama seperti interpolasi [4]. Setelah proses desimasi, langkah selanjutnya yaitu melakukan *cross correlation* antara *preamble* yang terdapat pada penerima dengan satu LTS yang terdapat pada pemancar. Rumus untuk *cross correlation* digambarkan pada persamaan [3]:

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

Dimana r adalah keseluruhan *preamble* pada penerima, s merupakan satu buah LTS, N merupakan panjang data OFDM dan M merupakan jumlah dari LTS yang di *cross correlation*. Proses *cross-correlation* ini bertujuan untuk melakukan estimasi kanal dan menentukan awal dari *frame* OFDM yang pertama [5]. Setelah awal dari *frame* OFDM yang pertama didapat, langkah selanjutnya yaitu menghilangkan nilai *cyclic prefix* yang kemudian dilanjutkan dengan proses FFT dengan ukuran yang sama seperti pada IFFT yaitu 64. Setelah proses FFT dilakukan maka langkah selanjutnya yaitu proses *equalizer* dimana proses ini bertujuan untuk mengatasi nilai magnitudo dan respon fasa yang rusak [3]. Untuk mengatasi nilai magnitudo menggunakan hasil dari *cross-correlation* sementara untuk mengatasi respon fasa menggunakan *pilot*. Setelah proses *equalizer*, maka data informasi akan melalui proses demodulasi yang memiliki fungsi berkebalikan dengan modulasi. Setelah hasil demodulasi selesai, maka didapat keluaran bit informasi dimana nilai keluaran bit informasi tersebut haruslah sama dengan bit informasi yang dibangkitkan pada pemancar.

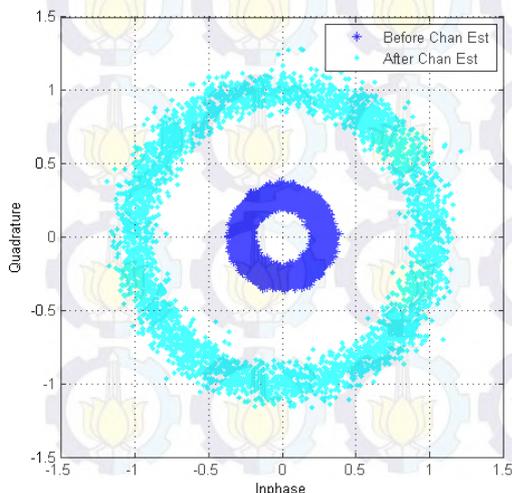
B. Estimasi Kanal

Estimasi kanal digunakan untuk mengkompensasi dari pengurangan nilai magnitudo yang disebabkan oleh *multipath* pada kanal dan juga *noise* [3]. Proses estimasi kanal sebagai berikut. Pertama, 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 $H_{l,k}$, seperti yang diperlihatkan pada Persamaan dibawah ini.

$$R_{l,k} = H_{l,k} d_{l,k} + W_{l,k} \quad (2)$$

Sementara estimasi kanal menggunakan LTS berdasarkan [6] yaitu:

$$\widehat{H}_k = \frac{1}{2} (R_{0,k} + R_{1,k}) \frac{1}{d_k}$$



Gambar 3. Konstelasi Sinyal pada Proses Estimasi Kanal

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} (H_k d_k + W_{0,k} + H_k d_k + W_{1,k}) \frac{1}{d_k} \\ &= H_k + \frac{1}{d_k} \frac{(W_{0,k} + W_{1,k})}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

Setelah nilai dari estimasi kanal didapat, maka dilakukan proses ekualisasi terhadap *payload* (total keseluruhan symbol OFDM) yang diterima dengan menggunakan persamaan [7]:

$$xe(k) = x(k) / \widehat{H}_k \quad (4)$$

Dimana $xe(k)$ adalah sinyal setelah melalui proses ekualisasi, $x(k)$ adalah sinyal sebelum melalui proses ekualisasi dan \widehat{H}_k merupakan nilai estimasi kanal. Perubahan nilai saat sebelum melalui estimasi dan sesudah estimasi dalam bentuk konstelasi sangat jelas terlihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

C. Estimasi Fasa Error

Setelah proses estimasi kanal selesai, maka langkah selanjutnya yaitu melakukan koreksi fasa error. Estimasi ini diperlukan karna meskipun sinyal sudah berada pada lingkaran yang tepat namun masih terdapat sisa (*residual*) error pada frekuensi dan *timing offset* yang disebabkan oleh adanya karakteristik variasi waktu pada kanal. Dampak dari error ini yaitu ketidaktepatan letak symbol-symbol OFDM [8]. Proses estimasi fasa error cukup simple yaitu dengan mengalikan symbol yang diterima dengan $e^{-j\theta}$ dimana θ adalah sudut dari estimasi fasa. Secara matematis, operasi perbaikan fasa dilakukan dengan persamaan sebagai berikut:

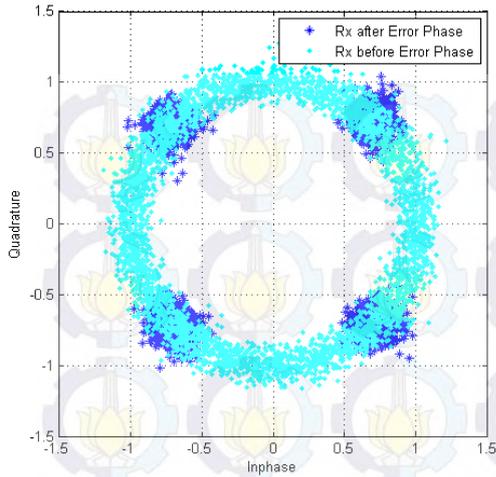
$$s'(k) = s(k) e^{-j\theta} \quad (5)$$

Dimana $s'(k)$ merupakan nilai sinyal diterima setelah proses koreksi fasa, $s(k)$ adalah nilai sinyal diterima sebelum proses koreksi fasa, sedangkan θ sudut dari estimasi fasa. Nilai θ 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 4.

D. Desain Frame

Desain *frame* untuk komunikasi melalui WARP mengacu pada batasan-batasan yang diambil dari [9] seperti *buffer* pada WARP terbatas sebanyak 2^{14} atau 16384 sampel dan frekuensi sampling sistem 40 MHz. Proses desain *frame* ini memiliki tujuan untuk memastikan sistem komunikasi dapat mengirimkan informasi dengan batasan perangkat.

Karakteristik dari komunikasi antar node WARP 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.



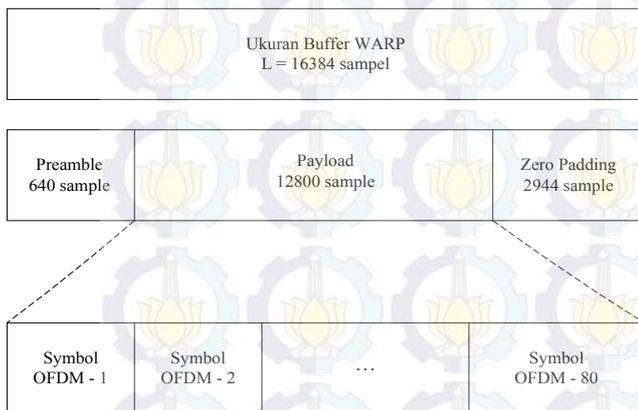
Gambar 4. Perbandingan Fasa pada Sinyal dengan Koreksi Fasa

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 dilihat pada Gambar 5. Sebagai tambahan, tidak semua yang terdapat pada simbol OFDM merupakan data, karena dalam 1 simbol OFDM terdapat *cyclic prefix*, *pilot*, data dan *virtual subcarrier*.

III. HASIL DAN DISKUSI

Hasil pengukuran-pengukuran berikut bertujuan untuk menganalisa dari *performance* OFDM dalam berbagai macam kondisi. Parameter yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2. Kondisi pengukuran yang dilakukan mengacu pada Gambar 6 dan 7.

Berhubung banyaknya kondisi pengukuran yang dilakukan, maka yang akan ditunjukkan pada bagian ini beberapa *sample* pengukuran yang bisa dijadikan sebagai suatu kesimpulan.



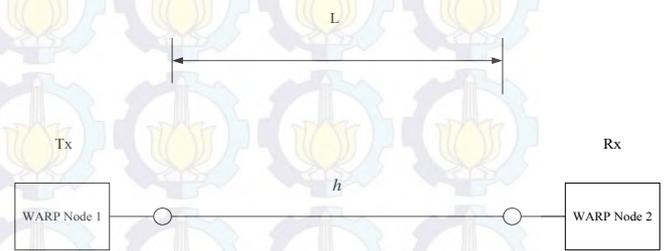
Gambar 5. Struktur *Frame* Komunikasi

Tabel 2. Parameter Pengukuran

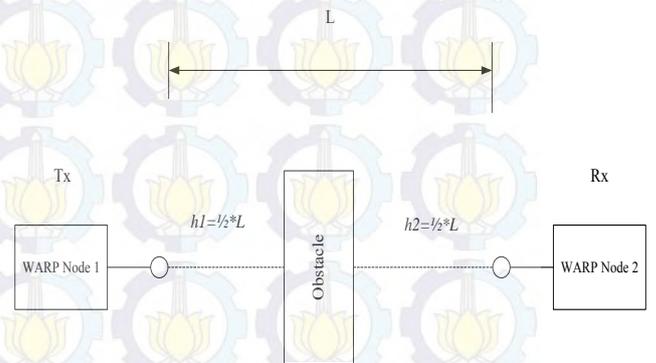
Parameter	Nilai
Bit Terkirim	107520 bit
Jarak <i>node</i> Tx dan Rx	Bervariasi
Setting Gain pada WARP:	-35 dBm s/d -4.7 dBm
Jenis <i>Obstacle</i>	Kawat

Hasil pengukuran terhadap perbedaan jarak dalam kondisi LoS di lingkungan lorong diperlihatkan pada Gambar 8. Dapat dilihat pada Gambar tersebut tidak begitu terlihat jelas kinerja yang lebih baik antara jarak 4 dan 5 meter. Meskipun untuk nilai daya pancar -16.75 dBm nilai BER untuk 4 meter sudah 0, namun saat daya pancar kurang dari -25 dBm kinerja 5 meter lebih baik jika dibandingkan dengan 4 meter.

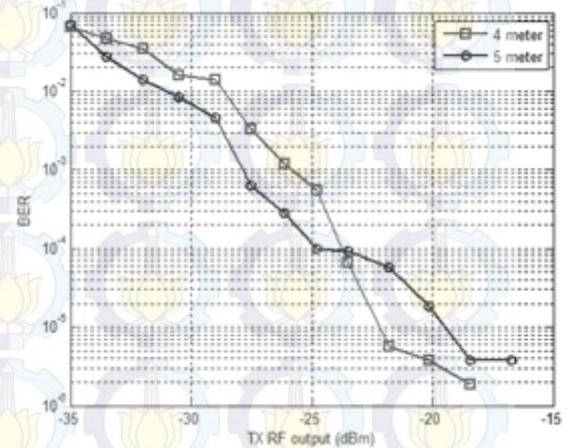
Perbandingan antara kondisi LoS dan NLoS pada jarak 4 meter di lingkungan *indoor* diperlihatkan pada Gambar 9. Untuk Gambar 9 dapat terlihat dengan jelas bahwa kinerja saat keadaan LoS lebih baik jika dibandingkan dengan NLoS karena saat daya pancar sebesar -26.125 dBm untuk keadaan LoS nilai BER sudah 0 sementara untuk NLoS bernilai 9.3×10^{-6} , hal ini bisa dikarenakan karena teknik OFDM tidak di desain untuk menanggulangi *obstacle*.



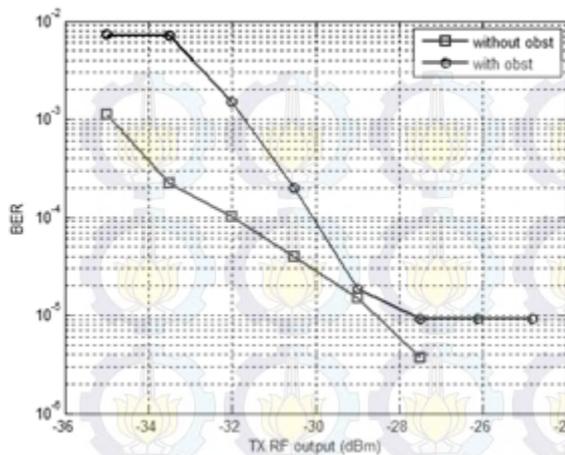
Gambar 6. Sketsa Pengukuran untuk Kondisi LoS



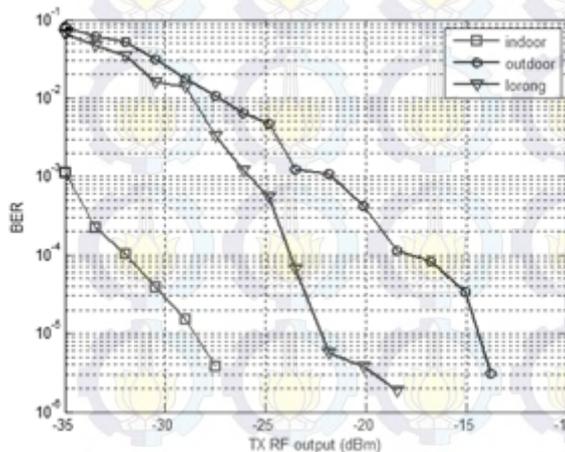
Gambar 7. Sketsa Pengukuran untuk Kondisi NLoS



Gambar 8. Perbandingan Jarak untuk Kondisi LoS dan Lingkungan Lorong



Gambar 9. Perbandingan antara LoS dan NLoS dengan Jarak dan Lingkungan yang sama



Gambar 10. Perbandingan Lingkungan untuk Kondisi LoS dengan Jarak 4 meter

Sementara untuk jarak dan kondisi yang sama namun dengan lingkungan yang berbeda diperlihatkan pada Gambar 10. Pada Gambar tersebut juga terlihat dengan sangat jelas bahwa kinerja terbaik dicapai saat di *indoor*. Karena pada saat daya pancar sebesar -26.125 dBm nilai BER untuk *indoor* yaitu 0 sementara untuk lingkungan lorong 1.2×10^{-3} dan *outdoor* 6.43×10^{-3} . Hal ini dikarenakan lingkungan *indoor* memiliki area pantulan yang lebih pendek jika dibandingkan dengan lingkungan lorong dan *outdoor*.

IV. KESIMPULAN

Dalam pengimplementasian sistem OFDM pada WARP, proses estimasi dipenerima merupakan proses yang sangat penting untuk mengatasi error yang terjadi pada kanal *real* baik berupa estimasi kanal maupun estimasi fasa error.

Kinerja OFDM untuk perbandingan jarak menunjukkan bahwa dalam kondisi lingkungan yang sama nilai BER tidak terlalu berbeda jauh bahkan terdapat kondisi dimana jarak yang lebih jauh memiliki nilai BER yang lebih kecil. Sementara untuk hal *obstacle*, kinerja yang lebih baik selalu saat keadaan LoS jika dibandingkan dengan NLoS sebagai contoh saat daya pancar sebesar -26.125 dBm untuk keadaan LoS nilai BER sudah 0 sementara

untuk NLoS bernilai 9.3×10^{-6} . Sedangkan dalam hal lingkungan pengukuran, butuh daya sebesar sebesar -26.125 dBm untuk nilai BER *indoor* yaitu 0 sementara untuk lingkungan lorong 1.2×10^{-3} dan *outdoor* 6.43×10^{-3} . Sehingga *indoor* memiliki kinerja yang paling baik karena memiliki jarak pantulan yang paling singkat diantara lingkungan lainnya.

Namun, secara keseluruhan dari berbagai kondisi pengukuran tersebut teknik OFDM dapat dikatakan memiliki kinerja yang baik untuk diterapkan karena tidak terdapat kondisi *frequency selective fading*.

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] Lui, Cheuk Kwan, "Method of Synchronization Using IEEE 802.11a OFDM Training Structure For Indoor Wireless Applications", Simon Fraser University, 2004.
- [3] Vercimak, Luke., Karl Weyeneth., "Software Defined Radio", Bradley University.
- [4] Hayes, Monson H., "Schaum's Outline of Theory and Problems of Digital Signal Processing", USA, 1999.
- [5] 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.
- [6] 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".
- [7] Abhayawardhana, V.S., I.J. Wassell., "Common Phase Error Correction with Feedback for OFDM in Wireless Communication", Department of Engineering, University of Cambridge, UK.
- [8] Wang, Xun., Ying Xu., Zhiyong Feng., "Physical-layer Network Coding in OFDM System: Analysis and Performance", Beijing University of Post and Telecommunications, China, 2012.
- [9] WARP Project-Wireless Open Access Research Platform, "WARP Radio Board Overview".

