



UNIVERSITAS INDONESIA

**REDUKSI PAPR PADA OFDM DENGAN MENGGUNAKAN
TRANSFORMASI WAVELET DAN TEKNIK *CLIPPING***

SKRIPSI

RANDY SATRIA PUTRA
0906602995

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA
DEPOK
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**REDUKSI PAPR PADA OFDM DENGAN MENGGUNAKAN
TRANSFORMASI WAVELET DAN TEKNIK *CLIPPING***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**RANDY SATRIA PUTRA
0906602995**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA
DEPOK
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Randy Satria Putra

NPM : 0906602995

Tanda Tangan :



Tanggal : 27 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Randy Satria Putra

NPM : 0906602995

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : **REDUKSI PAPR PADA OFDM DENGAN MENGGUNAKAN TRANSFORMASI WAVELET DAN TEKNIK *CLIPPING***

Telah berhasil dipertahankan dihadapan dewan penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Dadang Gunawan, M.Eng

Penguji : Dr. Ir. Arman D. Diponogoro

Penguji : Dr. Muhammad Suryanegara, ST, M.Sc

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 27 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penyusunan Skripsi ini dapat diselesaikan. Penyusunan skripsi ini bertujuan untuk melengkapi syarat-syarat dalam rangka mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi tidak lepas dari dukungan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof.Dr.Ir.Dadang Gunawan, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik
2. Filbert H Juwono, ST.M.T, yang telah meluangkan waktunya untuk berdiskusi.
3. Kedua orang tua dan adik-adikku tercinta yang tak henti-hentinya telah memotivasi dan memberikan dukungan moril dan doa.
4. Hersha Shella L, yang selalu menemani saat suka dan duka.
5. Teman-teman S1 dan S2 Teknik Elektro UI yang menjadi teman diskusi yang baik dan selalu menularkan semangatnya.

Praktikan menyadari sepenuhnya bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih banyak kekurangan, karena keterbatasan pengetahuan dan kemampuan, untuk itu kritik dan saran yang membangun dari pembaca sangat diharapkan demi kesempurnaan Skripsi. Demikian kata pengantar ini dibuat, semoga laporan ini dapat bermanfaat dan menjadi inspirasi bagi semua pihak.

Depok , Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Randy Satria Putra

NPM : 0906602995

Program Studi : Teknik Elektro

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

REDUKSI PAPR PADA OFDM DENGAN MENGGUNAKAN
TRANSFORMASI WAVELET DAN TEKNIK *CLIPPING*

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/format-kan mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal : 11 Juni 2011

Yang menyatakan



(Randy Satria Putra)

v

Universitas Indonesia

ABSTRAK

Nama : Randy Satria Putra
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : REDUKSI PAPR PADA OFDM DENGAN
MENGUNAKAN TRANSFORMASI WAVELET DAN
TEKNIK *CLIPPING*

Proses transmisi sinyal dari pengirim menuju ke penerima dalam system telekomunikasi memiliki gangguan *noise* dan *multipath fading* yang disebabkan oleh *reflection*, *scattering*, atau *difraction*. *Data rate* yang tinggi pada kanal *fading* menyebabkan *bandwidth* koheren kanal menjadi lebih sempit jika dibandingkan dengan *bandwidth* sinyal sehingga kanal mengalami frekuensi selektif *fading*. Untuk mengatasinya, salah satunya adalah dengan digunakannya teknik modulasi *multi carrier* dengan tujuan agar sinyal mengalami *flat fading* pada tiap *subcarrier*. Teknik *multi carrier* yang populer digunakan adalah *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM). Namun, salah satu kekurangan teknik ini adalah nilai *Peak to Average Power Ratio* (PAPR) yang tinggi. PAPR merupakan perbandingan daya puncak dengan daya rata-rata sinyal. Nilai PAPR yang tinggi menyebabkan penurunan performansi sistem OFDM. Skripsi ini membahas perancangan dan analisis metode reduksi PAPR dengan menggunakan transformasi wavelet dan teknik *clipping* agar didapatkan reduksi PAPR yang lebih baik sehingga dapat meningkatkan performansi OFDM. Dari hasil perancangan dan analisa didapatkan penurunan nilai PAPR yang signifikan, khususnya pada wavelet *rbio3.7* dan teknik *Deep Clipping*.

ABSTRACT

Name : Randy Satria Putra
Study Program : Electrical Engineering
Title : COMBINING WAVELET TRANSFORMATION AND
CLIPPING TECHNIQUE FOR PAPR REDUCTION IN
OFDM

The process of signal transmission from transmitter to receiver in a telecommunication system has some disturbance such as noise and multipath fading caused by reflection, scattering, or diffraction. High data rate in the fading channel causes the channel coherent bandwidth becomes narrower compared to the signal bandwidth so that the channel has frequency selective fading. To overcome this problem, the multi carrier modulation technique is used with the aim to have a flat signal fading on each subcarrier. The well-known multi-carrier technique is Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM). However, one of the drawbacks of this technique is the Peak to Average Power Ratio (PAPR) is high. PAPR is ratio between the peak power and the average power of the signal. High PAPR values causes degradation in system's performance. This thesis designs and analyses PAPR reduction using wavelet transform and clipping techniques in order to obtain better PAPR reduction to improve the performance of OFDM system. The results of design and analysis show a significant reduction in PAPR value, especially when wavelet rbio3.7 and Deep Clipping techniques are used.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABATRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	5
1.3. Tujuan Penelitian	6
1.4. Batasan Masalah	6
1.5. Sistematika Penulisan	6
BAB II SISTEM OFDM DAN WAVELET	8
2.1. Teknik OFDM	8
2.2. Modulasi OFDM	12
2.3. <i>Cyclic Prefix</i>	13
2.4. <i>Peak to Average Power Ratio (PAPR)</i>	14
2.5. <i>Wavelet</i>	17
2.5.1. Keluarga Wavelet	17
2.5.2. Transformasi Wavelet	18
2.6. <i>Clipping</i>	25
2.6.1 <i>Classical Clipping</i>	26
2.6.1 <i>Deep Clipping</i>	26

BAB III PEMODELAN SISTEM	26
3.1. Umum	26
3.2. Pemodelan Sistem OFDM dengan <i>Wavelet Transform</i>	26
3.3. Pemodelan Sistem OFDM dengan <i>Wavelet Transform</i> dan Teknik <i>Clipping</i>	27
3.4. Fungsi <i>Clipping</i>	28
3.5. Indikator Kinerja PAPR	29
BAB IV ANALISA HASIL SIMULASI	30
4.1. Analisa PAPR sistem OFDM dengan Menggunakan Transformasi Wavelet	30
4.1.1. Penentuan Jenis <i>Wavelet</i> yang paling optimal untuk mereduksi PAPR	31
4.2. Analisa PAPR sistem OFDM dengan Menggunakan Transformasi Wavelet dan Teknik <i>Clipping</i>	36
BAB IV KESIMPULAN	37
DAFTAR REFERENSI	

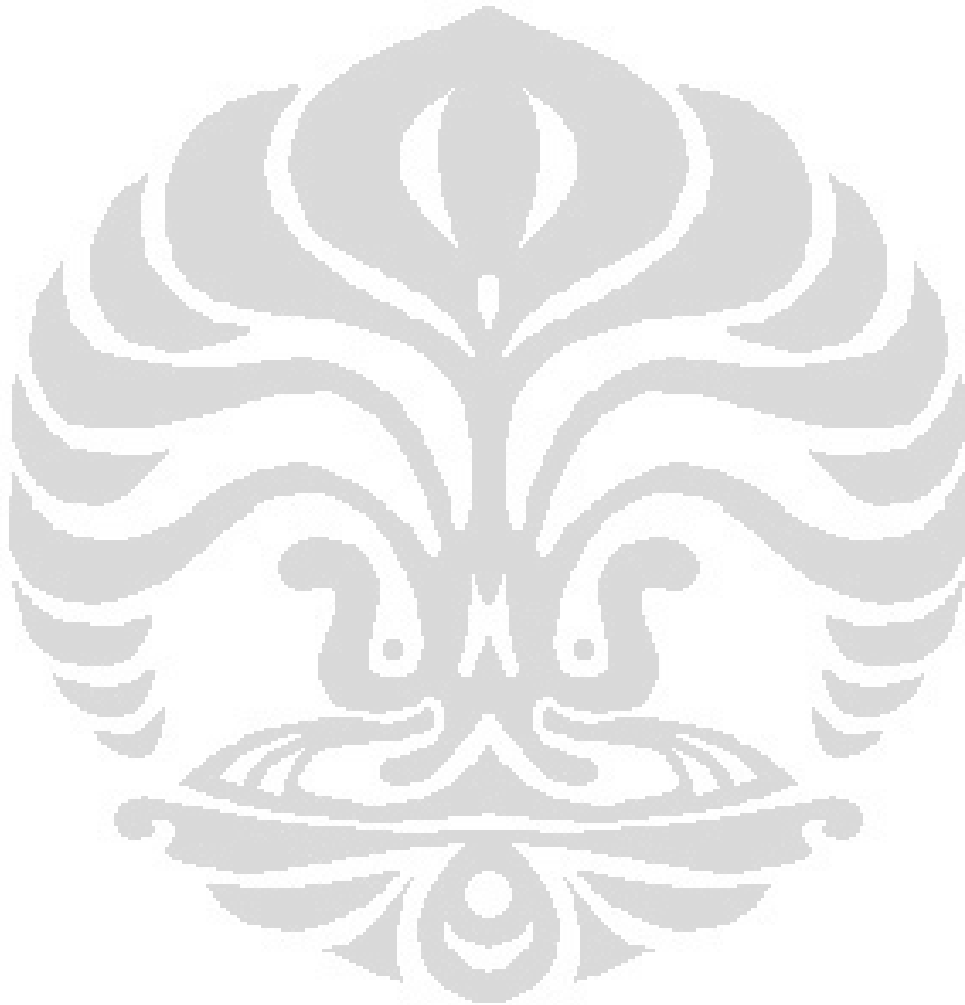
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Perubahan Teknologi <i>Mobile Broadband</i>	1
Gambar 1.2. Gambaran Efisiensi <i>Bandwidth</i> sinyal pada sistem OFDM dibandingkan sistem <i>multicarrier</i> biasa	4
Gambar 2.1 Konsep Sinyal OFDM : (a) Teknik <i>Multicarrier</i> Konvensional dan (b) OFDM	8
Gambar 2.2. Diagram Blok Sistem OFDM	9
Gambar 2.3. Sistem OFDM Dengan Bank Osilator	9
Gambar 2.4. Sistem OFDM Menggunakan IFFT/FFT	10
Gambar 2.5. Spektrum OFDM	11
Gambar 2.6 Modulasi dan Demodulasi OFDM	13
Gambar 2.7. Ilustrasi <i>Cyclic Prefix</i>	14
Gambar 2.8. Representasi <i>Peak Power</i> dengan <i>Average Power</i>	15
Gambar 2.9. Keluarga Wavelet (a).Haar, (b). <i>Daubechies4</i> , (c). <i>Coiflet1</i> , (d). <i>Symlet2</i> , (e). <i>Meyer</i> , (f). <i>Morlet</i> , (g). <i>Maxican Hat</i>	18
Gambar 2.10. Proses Dekomposisi pada Transformasi Wavelet Diskrit	19
Gambar 2.11. Rekonstruksi sinyal Koefisien Aproksimasi	22
Gambar 2.12. Rekonstruksi sinyal Koefisien Detail	22
Gambar 2.13. Invers Transformasi Wavelet Diskrit	23
Gambar 2.14. Perbandingan fungsi alih <i>Clipping</i> , <i>Classical Clipping</i> dan <i>Deep Clipping</i>	25
Gambar 3.1. Konfigurasi Sistem <i>transmitter</i> OFDM dengan <i>Wavelet Transform</i>	26
Gambar 3.2. Konfigurasi Sistem <i>transmitter</i> OFDM dengan <i>Wavelet Transform</i> dan teknik <i>Clipping</i>	27
Gambar 4.1. Perbandingan PAPR W-OFDM Menggunakan Keluarga <i>Daubechies</i> Terhadap OFDM Konvensional	31
Gambar 4.2. Perbandingan PAPR W-OFDM Menggunakan Keluarga <i>Symlet</i> Terhadap OFDM Konvensional	32

Gambar 4.3. Perbandingan PAPR W-OFDM Menggunakan Keluarga *Coiflet*
Terhadap OFDM Konvensional 33

Gambar 4.4. Perbandingan PAPR W-OFDM Menggunakan Keluarga *Wavelet Biorthogonal*
Terhadap OFDM Konvensional 34

Gambar 4.5. Perbandingan PAPR *Wavelet* OFDM dengan Teknik *Clipping*
Terhadap OFDM Konvensional 36



BAB I

PENDAHULUAN

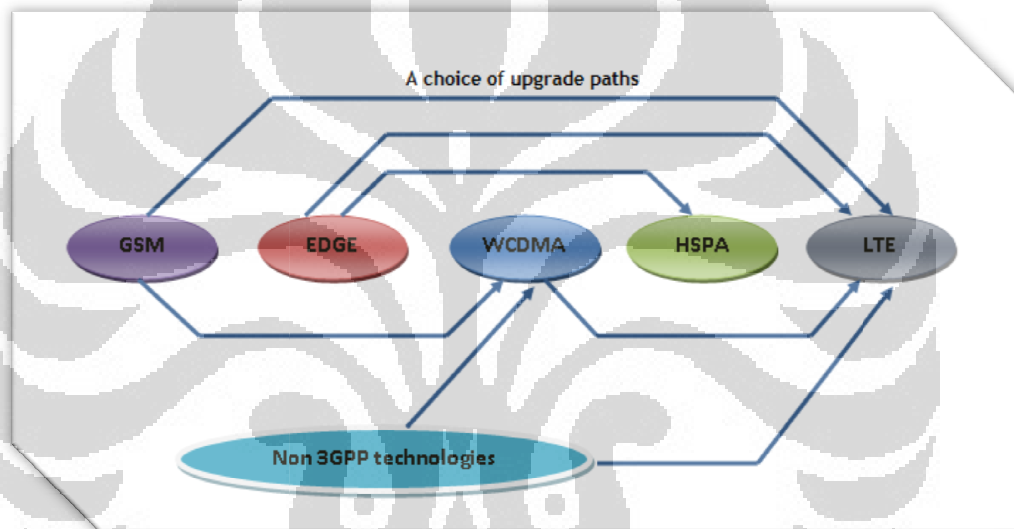
1.1 . Latar Belakang

Wireless Technology atau teknologi nirkabel, atau lebih sering disingkat *wireless* adalah teknologi elektronik yang beroperasi tanpa kabel. *Wireless technology* dapat dimanfaatkan untuk komunikasi dan pengontrolan. Untuk komunikasi, dikenal *wireless communication* yaitu transfer informasi berupa layanan suara, data, dan multimedia tanpa penggunaan kabel seperti pada ponsel, jaringan komputer nirkabel, atau satelit.

Keberadaan berbagai sistem radio seperti, jaringan telepon seluler, akses LAN nirkabel, dan sistem nirkabel pita lebar saat ini dituntut untuk dapat melakukan komunikasi dengan kecepatan data yang sangat tinggi. Hal inilah yang menghasilkan teknologi dengan konflik antar tuntutan kebutuhan *data rate* yang lebih tinggi dan keterbatasan spektrum radio, sehingga memberi kesimpulan akan kebutuhan penggunaan spektrum dengan efisiensi spektral yang tinggi. Peningkatan efisiensi spektral dilakukan dengan penggunaan modulasi yang fleksibel dan skema coding, dimana sumber daya sistem secara adaptif dialokasikan ke pengguna berdasarkan *data rate* yang diminta dan kualitas kanal. Teknik *multicarrier* menjadi kandidat potensial untuk sistem nirkabel pita lebar karena keunggulannya dalam ketahanan terhadap distorsi kanal dan interferensi *narrowband*, efisiensi spektral yang tinggi, fleksibilitas yang tinggi dan mendukung skema modulasi adaptif [1].

Teknologi Jaringan **LTE** (*Long Term Evolution*) didefinisikan dalam standar 3GPP *Release 8* yang dirancang untuk menyediakan efisiensi spektrum yang lebih baik, peningkatan kapasitas radio, dan biaya operasional yang lebih murah. LTE belum dapat disebut dengan teknologi 4G, LTE yang ditetapkan 3GPP pada *Release 8* dan *9* belum memenuhi semua persyaratan dan standarisasi ITU (*International Standard Union*)[2]. LTE merupakan teknologi komunikasi bergerak generasi berikutnya yang didesain untuk memindahkan jumlah data yang

sangat besar. Teknologi ini dikatakan sebagai cara yang hemat dan efisien, dengan mengoptimalkan penggunaan pita frekuensi dan mengangkat kecepatan akses seringan seras di udara. Teknologi LTE sendiri merupakan pengembangan teknologi dari aplikasi GSM dan CDMA yang sudah ada di Indonesia saat ini. Pada Gambar 1.1 diperlihatkan bila pada GSM (2G), berevolusi menjadi GPRS (2,5G), yang dilanjutkan dengan EDGE, serta EDGE Evolved. Maka di WCDMA (3G), berevolusi menjadi HSPA (3,5G) dan HSPA+, maka solusi berikutnya adalah penggunaan LTE yang mempunyai layanan kapasitas *gigabytes* di atas semuanya.



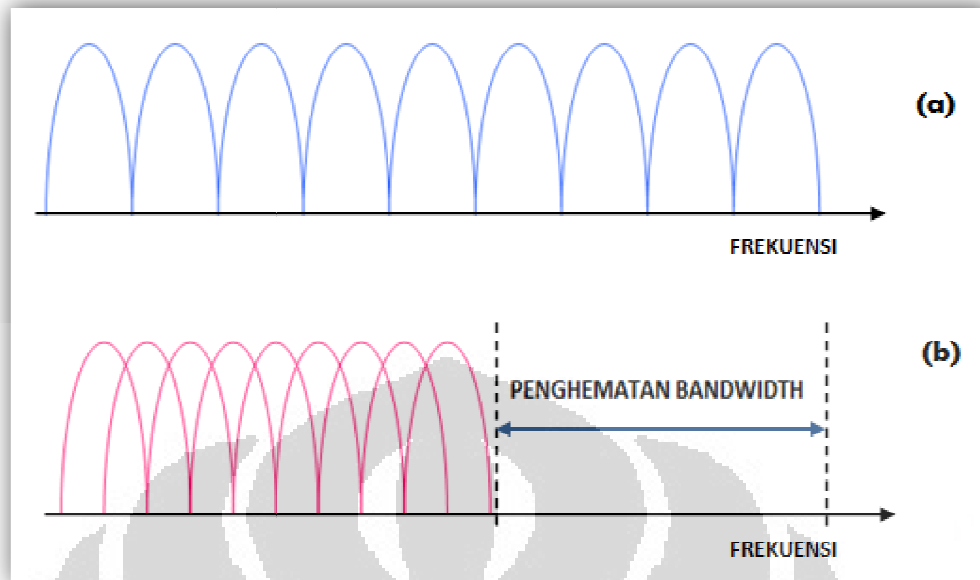
Gambar 1.1. Perubahan Teknologi *Mobile Broadband*

Ke depan, target peningkatan kualitas LTE adalah mempunyai rataan data tinggi seperti *downlink* lebih besar dari 100 Mbps, *uplink* lebih dari 50 Mbps, serta *cell-edge* data rates 2 sampai 3 kali HSPA *Relay 6*. Peningkatan tersebut masih ditambah dengan tingkat *delay* LTE yang rendah, karena *user plane* RTT (*Round Trip Time*) lebih kecil dari 10 ms, dan *channel set-up* lebih rendah dari 100 ms. Bahkan kinerja teknologi LTE-Advanced pada uji laboratorium terakhir oleh 3GPP, jaringan ini menunjukkan kemampuan menyediakan kecepatan akses data yang signifikan, yaitu hingga 3 Gbps (*downlink*) dan 1,5 Gbps (*uplink*). LTE mempunyai kualitas bagus dalam melakukan service penyiaran, dengan biaya yang lebih rendah dan efektif [3].

Teknologi LTE ini menggunakan OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) untuk *downlink* dan SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*) untuk *uplink*. Pada OFDM, sinyal masukan akan dibagi kedalam *subchannel-subchannel*, kemudian dengan menggunakan IDFT/IFFT, sinyal output OFDM akan menjadi *orthogonal* satu sama lain. Sehingga bila ada distorsi pada jalur komunikasi yang menyebabkan ISI (*intersymbol interference*) dan ICI (*intercarrier interference*), maka pada stasiun penerima, setiap *subchannel* masih dapat dipisahkan dengan menggunakan DFT/FFT.

Berikut adalah beberapa hal penting tentang OFDM yaitu [4] :

- OFDM membagi sinyal input kedalam *subcarrier-subcarrier* dengan *rate* yang rendah, dan bersifat efisien pada spektrum *orthogonal*, untuk mentransmisikan sinyal-sinyal dengan *rate* yang tinggi. Gambaran efisiensi spektrum per satuan luas (bit/s/Hz/m^2) sinyal OFDM dibandingkan dengan sistem *multicarrier* biasa adalah bisa ditunjukkan oleh Gambar 1.2.
- OFDM memanfaatkan *cyclic prefix* pada *interval guard* untuk menjamin tidak terjadinya ISI dan ICI.
- OFDM tidak sensitif terhadap *timing offset*, tapi sensitif terhadap *frequency offset* dan *phase noise*.
- OFDM tidak membutuhkan ekualiser dalam domain waktu dan hanya membutuhkan sebuah ekualiser dalam domain frekuensi, untuk memperbaiki perubahan amplitudo dan fase. Tetapi OFDM dapat memanfaatkan sebuah ekualiser dalam domain waktu untuk memperpendek periode '*guard*'.
- OFDM dapat menunjukkan puncak-puncak yang tak terkontrol. *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR) adalah permasalahan yang sering terjadi dalam sistem OFDM.



Gambar 1.2. Gambaran Efisiensi *Bandwidth* sinyal pada sistem OFDM dibandingkan sistem *multicarrier* biasa.

OFDM merupakan teknik yang cukup menarik perhatian karena dapat mempertahankan performansinya dalam kondisi kanal yang buruk. Aplikasi dari penggunaan OFDM secara meluas adalah pada teknologi *Terrestrial Digital Video Broadcast (DVB-T)*, *IEEE 802.11 Wireless Local Area Network (WLAN)*, *IEEE 802.16 Broadband Wireless Access (BWA)* khususnya *IEEE 802d WiMAX*, *IEEE 802.20 mobile-BWA* dan *mobile multimedia access communication (MMAC)* serta standar selular 4G seperti LTE.

Namun teknologi OFDM ini memiliki beberapa kelemahan yaitu PAPR yang tinggi dan sensitivitas terhadap *error frekuensi carrier*. Sinyal OFDM sendiri merupakan hasil superposisi aliran data kecepatan rendah yang dimodulasi pada frekuensi *subcarrier* berbeda. PAPR adalah perbandingan antara daya puncak sinyal (*Peak Power*) dengan daya rata-rata sinyal (*Average Power*). PAPR yang tinggi dihasilkan karena setelah dilakukan proses IFFT, hasil superposisi dari dua atau lebih *subcarrier* dapat menghasilkan variasi daya dengan nilai *peak* yang besar. Hal ini disebabkan oleh modulasi masing-masing *subcarrier* dengan frekuensi yang berbeda. Sehingga apabila beberapa *subcarrier* mempunyai fasa yang koheren, maka akan muncul amplitudo dengan level yang jauh lebih besar dari daya rata-rata sinyalnya [4].

PAPR yang tinggi dapat meningkatkan kekompleksitasan dari Analog to Digital Converter (A/D) dan Digital to Analog Converter (D/A). dan juga mengurangi efisiensi dari power amplifier [5]. Ada beberapa teknik yang telah diajukan untuk mereduksi PAPR ini yaitu *clipping*, *block coding*, *selective mapping (SLM)* dan *Tone Reservation* [6]. Teknik tersebut memperoleh reduksi PAPR dengan dampak peningkatan daya sinyal transmisi, peningkatan BER, *data-rate loss*, peningkatan kompleksitas komputasi dan sebagainya.

Salah satu alternatif untuk mereduksi PAPR adalah menggunakan skema sistem OFDM dengan fungsi wavelet. Dalam beberapa penelitian sistem ini telah terbukti dapat mereduksi PAPR dan lebih dikenal dengan sebutan *Discrete Wavelet Transform OFDM (DWT-OFDM)* [7][8]. Terdapat juga beberapa penelitian yang dilakukan dengan menggunakan teknik *clipping*. Penelitian Palicot et al menunjukkan kinerja dari beberapa teknik *Clipping* seperti *Classical Clipping*, *Heavyside Clipping*, *Deep Clipping* dan *Smooth Clipping* untuk sistem OFDM [9]. Beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya dengan menggunakan teknik *clipping* hanya dilakukan dengan menggunakan metode OFDM konvensional, sehingga dalam skripsi ini akan dicoba menerapkan teknik *Wavelet Transform* pada OFDM dan penambahan teknik *clipping*. Dengan mengkombinasikan kedua teknik tersebut diharapkan dapat mereduksi PAPR pada sistem OFDM menjadi lebih baik lagi.

1.2 Permasalahan

Teknik OFDM memiliki beberapa kelemahan yaitu PAPR yang tinggi dan sensitivitas terhadap error frekuensi *carrier*. Sensitivitas terhadap error frekuensi menyebabkan terjadinya *frequency offset* sehingga sinyal OFDM kehilangan keorthogonalitasannya atau terjadi ICI. PAPR terjadi karena adanya variasi daya dengan nilai *peak* yang besar yang dihasilkan dari superposisi aliran data kecepatan rendah yang dimodulasi dengan frekuensi *subcarrier* berbeda. PAPR terjadi yang tinggi menyebabkan interferensi dengan sinyal dari kanal lain, selain itu juga menyebabkan meningkatnya kekompleksitasan *A/D converter* maupun *D/A converter* serta mengurangi efisiensi dari *power amplifier*. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka digunakanlah teknik-teknik reduksi PAPR, yang salah satunya adalah metode teknik *Wavelet Transform* dengan *clipping*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas skripsi ini adalah untuk merancang dan menganalisa teknik reduksi PAPR pada sistem OFDM dengan menggunakan teknik *Wavelet Transform* dengan *clipping*.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut dan juga mempermudah serta menyederhanakan analisis maka diberikan batasan dengan beberapa parameter dan asumsi sebagai berikut yaitu :

1. Simulasi yang digunakan adalah simulasi *baseband*
2. Sistem menggunakan teknik kompresi *Discrete Wavelet Transform (DWT)*.
3. Jenis *Wavelet* yang digunakan adalah *Daubechies*, *Symlet*, *Coiflet*, *Biorsplines*, dan *Reversebior*.
4. Teknik Clipping yang digunakan adalah *classical clipping* dan *deep clipping*.
5. Teknik modulasi yang digunakan adalah *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)*
6. Simulasi menggunakan *m-file* dengan perangkat lunak MATLAB.

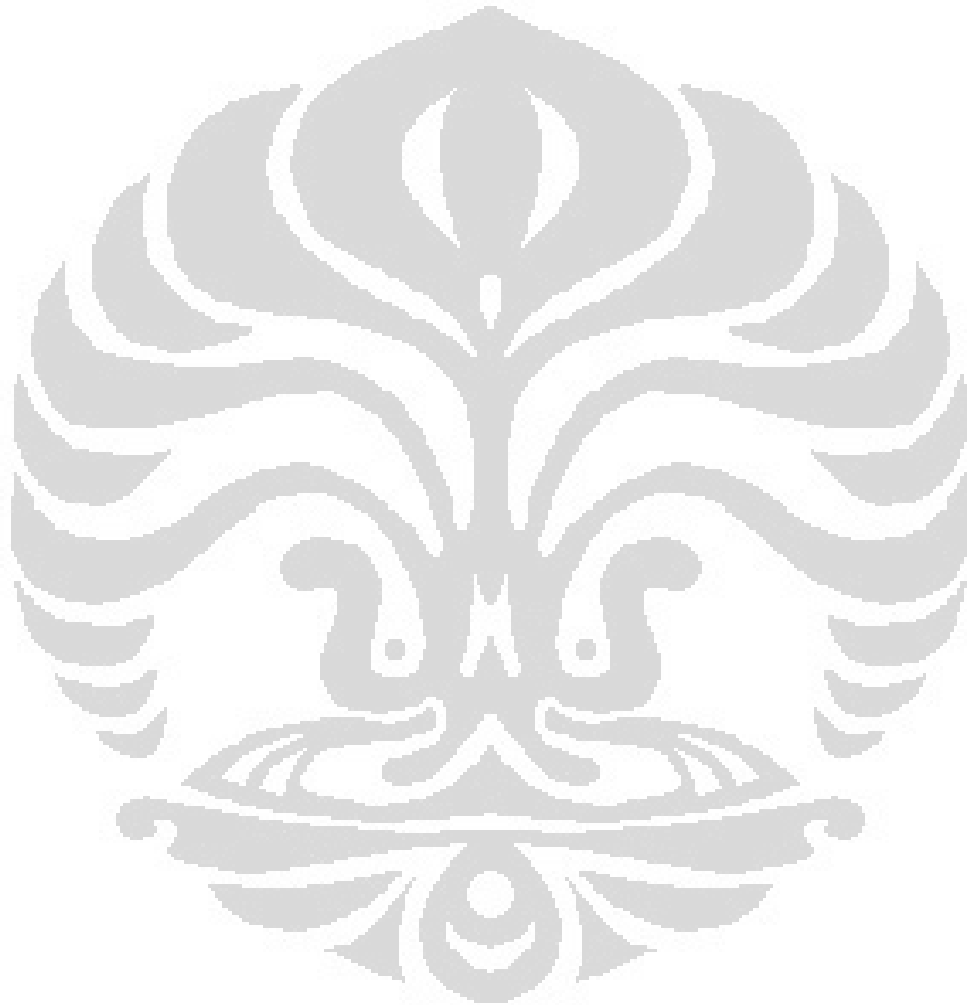
1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Draft Skripsi ini adalah sebagai berikut :

- BAB I Pada bab ini akan diuraikan tentang latar belakang masalah, permasalahan, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.
- BAB II Pada bab ini akan dijelaskan lebih lanjut tentang transmisi OFDM dan PAPR. Prinsip dasar OFDM, teknik *Wavelet Transform* termasuk inversnya dan teknik *Clipping*.
- BAB III Pada bab ini akan diuraikan tentang pemodelan sistem OFDM dengan metode *Wavelet Transform* dengan *Clipping* dan bagaimana model perancangan simulasinya.

BAB IV Pada bab ini berisikan tentang hasil simulasi dan pembahasan dari kinerja PAPR dalam sistem yang dilakukan pada skripsi ini..

BAB V Pada bab ini akan disimpulkan mengenai tujuan akhir dari penelitian dalam skripsi, beberapa hal yang akan dilakukan dalam skripsi serta hasil atau *output* yang diharapkan dari penelitian dalam skripsi.

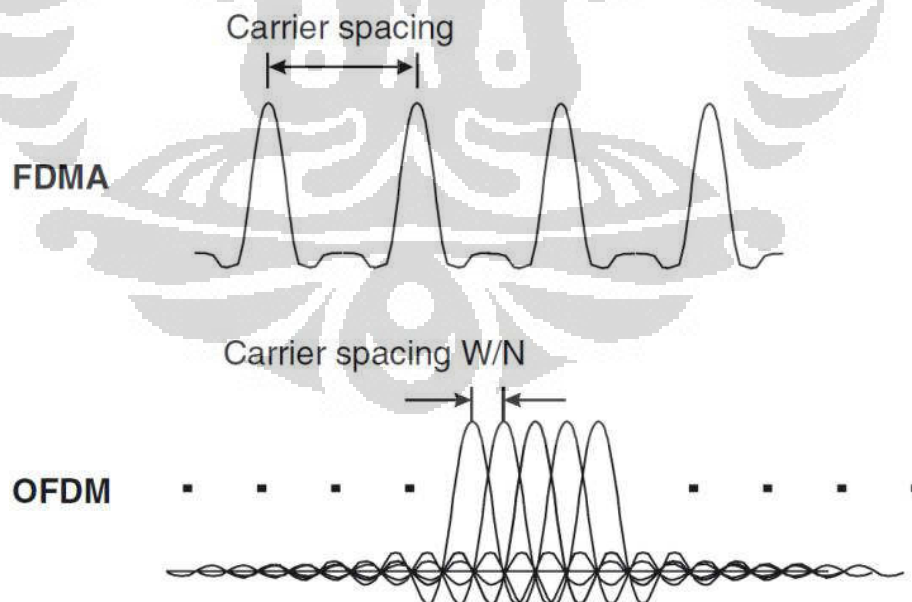


BAB II

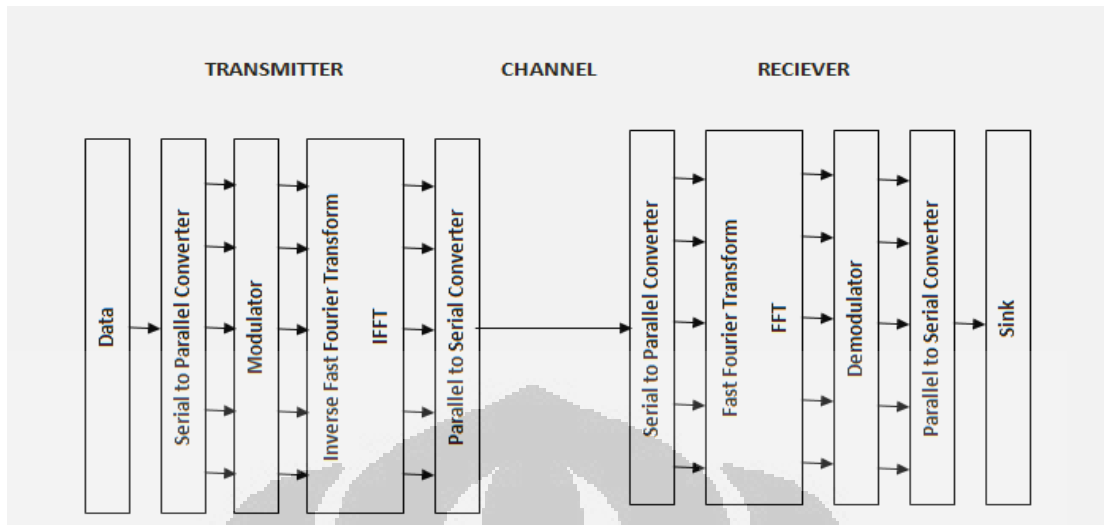
SISTEM OFDM DAN WAVELET

2.1. Teknik OFDM

OFDM merupakan teknik transmisi yang digunakan dalam sistem komunikasi digital yang menggunakan beberapa frekuensi sehingga sinyal yang dikirimkan akan saling *orthogonal* satu dengan yang lain. OFDM mentransmisikan data serial dengan bit rate tinggi, yang dibagi-bagi dalam beberapa *frame* data dengan bit rate lebih rendah. Hal ini dilakukan dengan memodulasikan data *input* dengan sejumlah *carrier*, sehingga data terbagi-bagi dalam beberapa subkanal. Dengan kata lain, OFDM ini menggunakan prinsip *multicarrier modulation*. Namun pada skema *multicarrier* konvensional tidak efisien dalam penggunaan spektrum. Perbandingan konsep skema OFDM yang saling tumpang tindih dengan *multicarrier* konvensional pada Gambar 2.1 menunjukkan OFDM dapat memberi efisiensi spektral yang lebih. Spasi antar *subcarrier* (W/N) dinyatakan dalam $\Delta f = 1/T$ dimana T adalah waktu modulasi simbol per *subcarrier*.

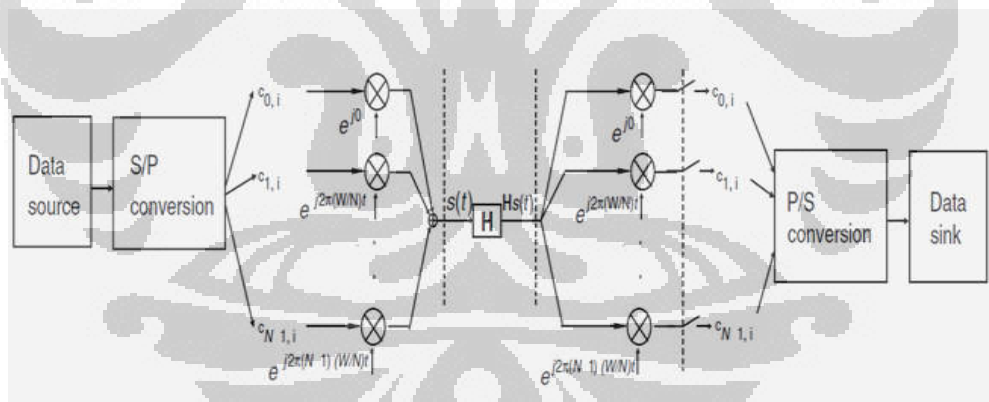


Gambar 2.1 Konsep Sinyal OFDM [11]: (a) Teknik *Multicarrier* Konvensional dan (b) OFDM.



Gambar 2.2. Diagram Blok Sistem OFDM

Pada Gambar 2.2 ditunjukkan diagram blok dari sistem OFDM. Teknik ini digunakan untuk merancang sistem komunikasi dengan *bandwidth* yang lebih efisien yaitu dengan cara membagi *bandwidth* yang tersedia menjadi beberapa subkanal



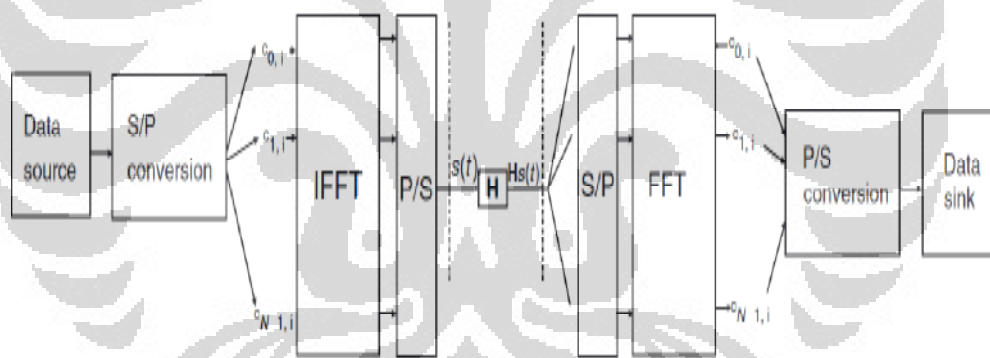
Gambar 2.3 Sistem OFDM Dengan Bank Osilator [10]

OFDM dapat diinterpretasikan dalam dua cara, yang pertama adalah analog dimana data dijadikan data paralel N dimana masing-masing data melalui osilator lokal yang akan melakukan osilasi pada frekuensi *subcarrier*. Bank osilator tersebut membutuhkan perangkat lokal osilator yang banyak sehingga akan sulit diimplementasi secara aktual. Sistem OFDM analog diilustrasikan pada Gambar 2.3, aliran data serial dilewatkan melalui konverter *serial-to-parallel* yang membagi data menjadi sejumlah kanal paralel. Data pada setiap kanal akan dimasukan

kedalam modulator sedemikian rupa sehingga intul N kanal terdpat N modulator yang frekuensi *carrier*-nya adalah c_0, c_1, \dots, c_{N-1} . Antara kanal yang bersebelahan berada sebesar Δf dan *bandwidth* keseluruhan W dari N *carrier* termodulasi adalah $W = N \cdot \Delta f$. selanjutnya N *carrier* yang termodulasi tersebut digabungkan untuk menghasilkan sinyal OFDM. Transmisi OFDM dapat dipandang sebagai modulasi sekumpulan fungsi orthogonal $\varphi_k(t)$, dengan [11] :

$$\begin{aligned} \varphi_k(t) &= e^{j2\pi(W/N)t} & 0 \leq t \leq T \\ &= 0 & \text{yang lain} \end{aligned} \quad \dots(2.1)$$

Cara kedua adalah digital, dimana data paralel melalui transformasi IFFT/FFT atau DFT/IDFT. Cara ini dapat menghilangkan penggunaan bank osilator untuk implementasi OFDM. Sistem diilustrasikan pada Gambar 2.4.

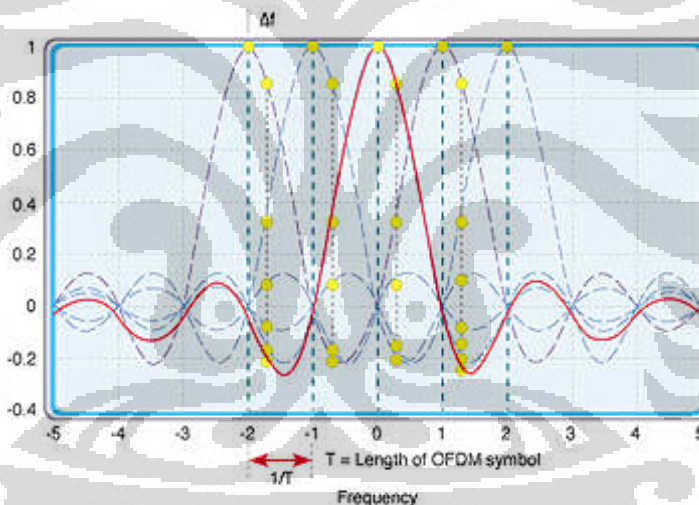


Gambar 2.4. Sistem OFDM Menggunakan IFFT/FFT [10].

Skema transmisi OFDM adalah tipe lain dari sistem *multicarrier* dengan spektra yang dirancang saling tumpang tindih untuk mendapatkan efisiensi *bandwidth*. Dengan menggunakan teknik ini, maka jika semula sebuah sistem transmisi mempunyai *bandwidth* sebesar W , maka jika dibagi kedalam sejumlah N subkanal maka akan didapatkan *bandwidth* untuk setiap subkanal sebesar W/N . Pada Pada teknik transmisi *multicarrier* diketahui bahwa sinyal informasi dikirim melalui masing-masing subkanal, dimana banyaknya subkanal adalah sama dengan banyaknya *subcarrier* yaitu sebanyak N . Akibatnya terjadi penurunan *bitrate* sebesar faktor N . Hal ini juga menyebabkan periode simbol meningkat N kali semula. Pada domain frekuensi, *bandwidth* menjadi N kali lebih kecil daripada

bandwidth sinyal. Sinyal pada masing-masing subkanal dimodulasi pada frekuensi tertentu, kemudian sinyal termodulasi tersebut dijumlahkan terlebih dahulu kemudian dikirimkan. Frekuensi masing-masing *subcarrier* harus tetap terjaga keorthogonalannya agar tidak saling berinterferensi. Hal ini cukup dapat diimplementasikan dengan suatu transformasi *Fourier*.

Jika spektrum sinyal OFDM dari *subcarrier-subcarrier* berbeda diamati, maka dapat ditunjukkan keorthogonalitas antar simbol dengan frekuensi *subcarrier* yang berbeda. Gambar spektrum OFDM tersebut dapat direpresentasikan oleh Gambar 2.5. Pada Gambar 2.5 nampak bahwa spektrum pada tiap *subcarrier* memiliki *null* di pusat frekuensi *subcarrier* yang lain, sehingga tidak terjadi interferensi antar *subcarrier*. Spektrum OFDM yang lebar dibagi menjadi beberapa *subcarrier* dengan bandwidth yang sempit.



Gambar 2.5. Spektrum OFDM [4]

Pada sistem OFDM yang digunakan dalam simulasi, karena kanal yang digunakan bersifat *frequency flat* (durasi simbol \gg maximum *excess delay*) untuk tiap *subcarrier*, maka sinyal yang ditransmisikan di kanal, terhindar dari ISI dan ICI, sehingga sinyal yang diterima masih bisa *discovery* dengan baik oleh *receiver* walaupun masih ada efek fading kanal yang cukup mempengaruhi sinyal terkirim.

2.2. Modulasi OFDM

Transmitter OFDM memetakan bit informasi menjadi sekuen simbol PSK (*Phase Shift Keying*) atau QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) yang akan dikonversi secara subsekuensial ke aliran N paralel [12]. Tiap simbol N dari konversi S/P (*serial to parallel*) dibawa ke *subcarrier* yang berbeda. $X_l k$ adalah simbol transmit l pada *subcarrier* k , untuk $l = 0, 1, 2, \dots, \infty$, $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Karena konversi S/P, durasi waktu transmisi untuk simbol N diperpanjang hingga NT_s , yang membentuk simbol OFDM tunggal dengan panjang T_{sym} ($T_{sym} = NT_s$). Sinyal OFDM untuk *subcarrier* k ditunjukkan pada persamaan (2.2).

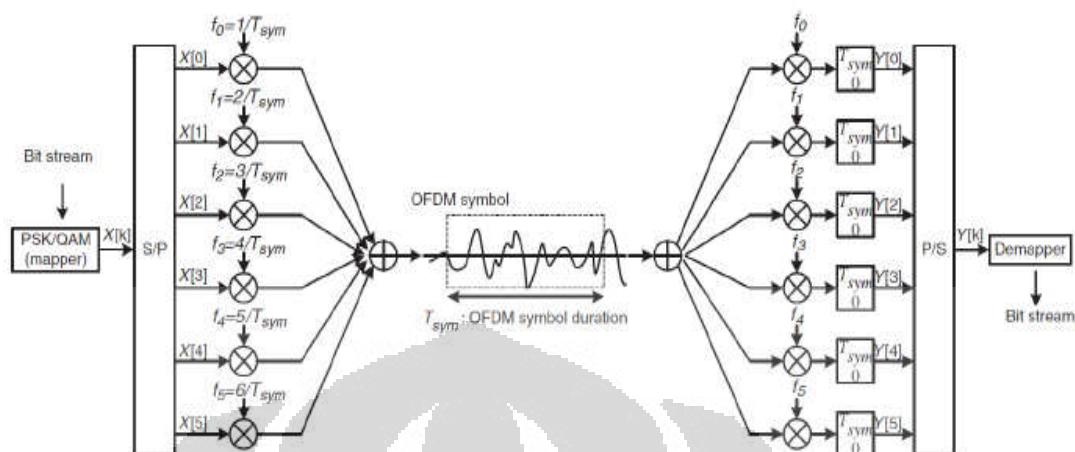
$$\Psi_{l,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})}, & 0 < t \leq T_{sym} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \dots(2.2)$$

Maka sinyal OFDM pada ranah waktu diskrit adalah:

$$x_l[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j\frac{2\pi kn}{N}}, \text{ untuk } n = 0, 1, \dots, N - 1 \dots(2.3)$$

persamaan (2.3) diatas dapat disebut N -point IDFT dari PSK atau QAM simbol $\{X_l[k]\}_{k=0}^{N-1}$ data dan dapat dikomputasi secara efisien dengan IFFT. Simbol OFDM baseband yang diterima $y_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})}$, $lT_{sym} < t \leq lT_{sym} + nT_s$, dimana simbol tertransmisi $X_l k$ dapat direkonstruksi oleh ortogonalitas antar *subcarrier* pada persamaan (2.4).

$$Y_l[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} X_l[i] e^{j2\pi(i-k)n/N} = X_l[k] \dots(2.4)$$



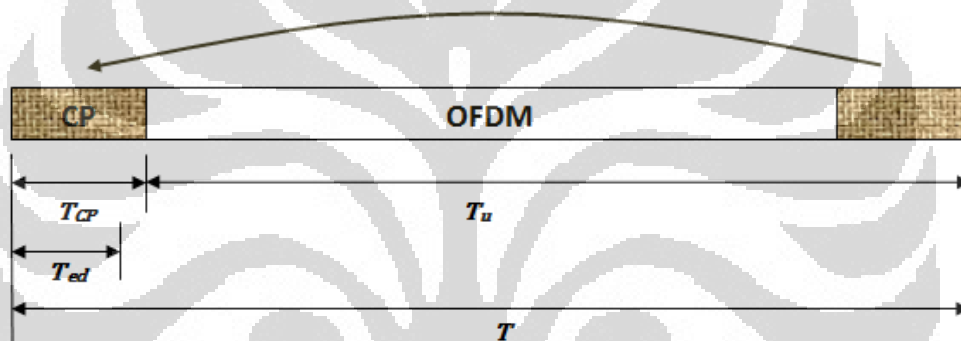
Gambar 2.6 Modulasi dan Demodulasi OFDM [12]

Persamaan (2.4) adalah DFT N -point dari fungsi $y(n)$ dan dapat dikomputasi secara efisien menggunakan FFT. Gambar 2.6 mengilustrasikan proses modulasi dan demodulasi OFDM. Simbol ranah frekuensi $X[k]$ memodulasi *subcarrier* dengan frekuensi dari $f_k = k/T_{sym}$, dan kemudian melalui proses demodulasi menggunakan ortogonalitas antar *subcarrier* pada *receiver*. Panjang simbol bertambah pada $T_{sym} = NT_s$ dengan mentransmisikan simbol N secara paralel.

2.3. Cyclic Prefix

Sinyal OFDM dalam domain waktu dilengkapi dengan *Cyclic Prefix* untuk menghilangkan pengaruh dispersi waktu. Panjang dari *Cyclic Prefix* melebihi *excess delay* maksimum kanal yang berfungsi untuk menghilangkan *Inter Symbol Interference* (ISI). Ide dasarnya adalah mengambil bagian simbol OFDM dari belakang ke depan untuk menghasilkan *guard period*. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.7. Gambar tersebut memperlihatkan bagaimana *Cyclic Prefix* mencegah ISI. Seperti terlihat dari gambar tersebut, panjang maximum *excess delay* (T_{ed}) adalah lebih kecil dari panjang *cyclic extension* (T_{cp}). Bagian sinyal yang terdistorsi tetap tinggal dengan *guard interval* yang akan di *remove* (dihilangkan) di penerima sehingga ISI bisa dicegah. *Cyclic Prefix* diambil dari simbol pada bagian akhir dari durasi total simbol OFDM dan kemudian diletakan di depan simbol yang akan dikirimkan.

Dengan menyisipkan *cyclic prefix* berarti maka akan menambahkan panjang simbol OFDM dari T_u menjadi $T_u + T_{CP}$, dengan T_{CP} adalah panjang *cyclic prefix*. Jika kolerasi pada *reciever* masih tetep dilakukan dalam selang waktu $T = 1/\Delta f$, orthogonalitas akan tetap dipertahankan sebab tidak bertumpang tindih dengan simbol yang lain. Kelemahan dari adanya penyisipan *cyclic prefix* adalah bahwa hanya sebesar $T_u/(T_u + T_{CP})$ dari daya sinyal yang diterima yang digunakan oleh OFDM demodulator [11]. Hal ini mengimplikasikan adanya daya yang hilang pada demodulasi. Selain itu, penyisipan *clytic prefix* juga mengakibatkan hilangnya *bandwidth* karena OFDM *symbol rate* dikurangi tanpa adanya pengurangan *bandwidth* sinya secara keseluruhan.

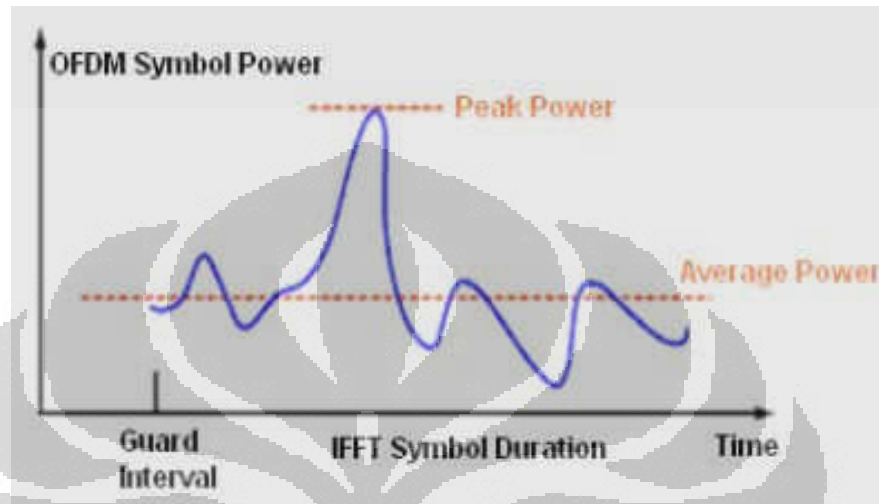


Gambar 2.7. Ilustrasi *Cyclic Prefix*

2.4. Peak to Average Power Ratio (PAPR)

Kendala yang dihadapi dalam sistem OFDM adalah nilai PAPR yang tinggi. PAPR adalah perbandingan antara daya puncak sinyal (*Peak Power*) dengan daya rata-rata sinyal (*Average Power*) [4]. PAPR merupakan ukuran dari fluktuasi tepat sebelum amplifier. PAPR sinyal hasil dari *mapping* PSK (*Phase Shift Keying*) *baseband* sebesar 0 dB karena semua simbol mempunyai daya yang sama. Setelah dilakukan proses IDFT/IFFT, hasil superposisi dari dua atau lebih *subcarrier* dapat menghasilkan variasi daya dengan nilai *peak* yang besar. Hal ini disebabkan oleh modulasi masing-masing *subcarrier* dengan frekuensi yang berbeda sehingga apabila beberapa *subcarrier* mempunyai fasa yang koheren, maka akan muncul

amplitudo dengan level yang jauh lebih besar dari daya sinyalnya. Gambar 2.8 menunjukkan representasi Daya Puncak dan Daya rata-rata simbol OFDM dalam domain waktu.



Gambar 2.8. Representasi *Peak Power* dengan *Average Power* [5]

Dengan adanya Nilai PAPR yang besar pada OFDM maka dibutuhkan *amplifier* dengan *dynamic range* yang lebar untuk mengakomodasi amplitudo sinyal. Jika hal ini tidak terpenuhi maka akan terjadi distorsi linear yang menyebabkan *subcarrier* menjadi tidak *orthogonal* dan pada akhirnya menurunkan performansi OFDM. Secara matematis, PAPR suatu sinyal $S(t)$ (hasil *mapping* PSK *baseband*) dideskripsikan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 PAPR &= \frac{P_{\max}}{P_{\text{av}}} = \frac{\max_{0 \leq t \leq T_s} |S(t)|^2}{E[|S(t)|^2]} \\
 &= \frac{\max_{0 \leq t \leq T_s} |S(t)|^2}{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} |S(t)|^2 dt}
 \end{aligned}$$

$$\text{dimana } |S(t)|^2 = \left[\sqrt{S(t) \cdot S^*(t)} \right]^2$$

... (2.5)

misal untuk sinyal hasil dari *mapping* PSK *base band* dinyatakan sebagai :

$$S_k(t) = A_k e^{\frac{j2\pi k t}{T}} \quad \dots(2.6)$$

maka nilai daya *peaknya* sebesar :

$$\begin{aligned} P_{\max} &= \max[S_k(t) \cdot S_k^*(t)] \\ &= \max[A_k e^{\frac{j2\pi k t}{T}} \cdot A_k e^{\frac{-j2\pi k t}{T}}] \\ &= A_k^2 \end{aligned} \quad \dots (2.7)$$

dan nilai daya rata-ratanya :

$$\begin{aligned} P_{av} &= E[|S_k(t)|^2] \\ &= E[S_k(t) \cdot S_k^*(t)] \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \left(A_k e^{\frac{j2\pi k t}{T}} \cdot A_k e^{\frac{-j2\pi k t}{T}} \right) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T A_k^2 dt \\ &= A_k^2 \end{aligned} \quad \dots (2.8)$$

sehingga nilai PAPRnya sebesar :

$$\begin{aligned} PAPR_{\text{mapping}} &= \frac{P_{\max}}{P_{av}} = \frac{A_k^2}{A_k^2} = 1 \\ &= 0 \text{ dB} \end{aligned} \quad \dots (2.9)$$

Jadi untuk menghitung PAPR adalah :

$$PAPR = \frac{P_{\max}}{P_{av}} \quad \dots (2.10)$$

2.5. Wavelet

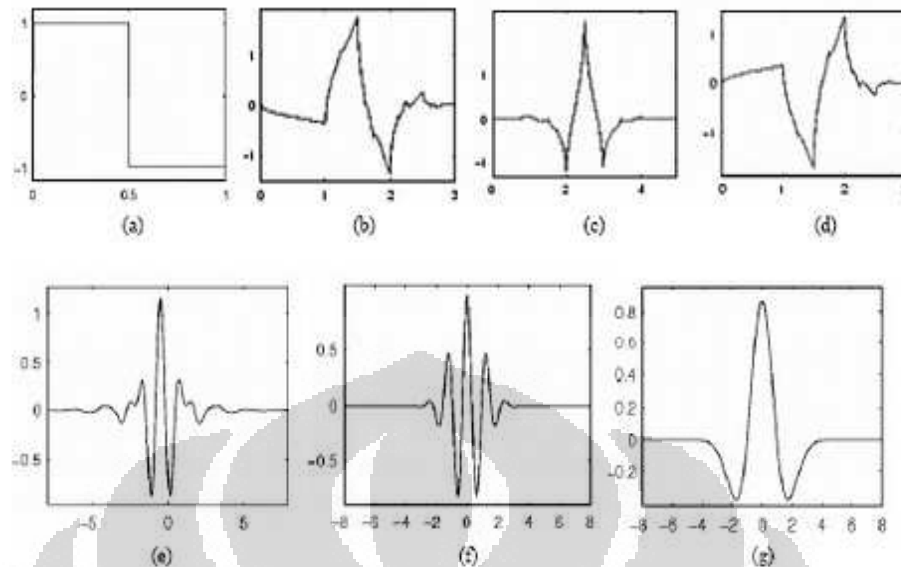
Wavelet merupakan gelombang singkat (*small wave*) yang energinya terkonsentrasi pada suatu selang waktu untuk memberikan kemampuan analisis transien, ketidakstasioneran, atau fenomena berubah terhadap waktu (*time varying*). Karakteristik dari *wavelet* antara lain adalah beresilasi singkat, translasi (pergeseran), dan dilatasi (skala).

2.5.1 Keluarga Wavelet

Ada beberapa fungsi dasar yang dapat digunakan sebagai induk wavelet untuk transformasi wavelet. Karena induk wavelet menghasilkan seluruh fungsi wavelet yang digunakan dalam transformasi melalui translasi dan *scaling*, maka induk wavelet menentukan karakteristik yang dihasilkan oleh transformasi wavelet. Oleh sebab itu aplikasi yang diinginkan harus terperinci dan diperhitungkan juga pemilihan induk wavelet yang sesuai dengan tujuan agar penggunaan transformasi wavelet efektif. Masing-masing keluarga wavelet memiliki karakterisasi yang berbeda di mana secara umum dapat dilihat dari parameter sebagai berikut [13]:

- a. *Spatial Compactness*
- b. *Orthogonality* atau *Biorthogonality*
- c. *Regularity*
- d. *Symetry* atau *Asymmetry*

Gambar 2.9 Menggambarkan fungsi wavelet yang sering digunakan. Haar wavelet adalah salah satu wavelet yang paling tua dan sederhana dan *daubechies wavelet* adalah wavelet yang terpopuler diantara keluarga wavelet. *Daubechies wavelet* mempresentasikan dasar proses sinyal wavelet dan digunakan dalam beberapa aplikasi, sering juga disebut Maxflat wavelet karena respon frekuensi memiliki kedataran maksimum pada frekuensi 0 dan π . *Daubechies*, *Symlet*, dan *Coiflet* merupakan keluarga wavelet yang mendukung wavelet orthogonal. *Mayer*, *Morlet* dan *Maxican Hat wavelet* termasuk dalam *wavelet symmetry* karena simetris dalam bentuk atau tampilan. Wavelet dipilih berdasarkan tampilan dan kemampuannya dalam menganalisa sinyal terhadap sebuah aplikasi yang diinginkan.



Gambar 2.9. Keluarga Wavelet (a).Haar, (b).Daubechies4, (c).Coiflet1, (d).Symlet2, (e).Meyer, (f).Morlet, (g).Mexican Hat [13].

2.5.2 Transformasi Wavelet

Dengan berkembangnya teknik-teknik analisa sinyal maka muncullah suatu konsep baru yang dapat mengatasi kekurangan dari *fourier transform* dan teknik analisa sinyal tersebut dinamakan dengan *Wavelet Transform*. *Wavelet transform* mulai diperkenalkan pada tahun 1980-an oleh Morlet dan Grossman sebagai fungsi matematis untuk merepresentasikan data atau fungsi sebagai alternative transformasi-transformasi matematika yang lahir sebelumnya untuk menangani masalah resolusi. *Wavelet transform* memiliki kemampuan untuk menganalisa suatu data dalam domain waktu dan domain frekuensi secara bersamaan. Analisa data pada *wavelet transform* dilakukan dengan mendekomposisikan suatu sinyal ke dalam komponen-komponen frekuensi yang berbeda-beda dan selanjutnya masing-masing komponen frekuensi tersebut dapat dianalisa sesuai dengan skala resolusinya atau level dekomposisinya. Hal ini seperti proses *filtering*, dimana sinyal dalam domain waktu dilewatkan ke dalam *low-pass filter (LPF)* dan *highpass filter (HPF)* untuk memisahkan komponen frekuensi tinggi dan frekuensi rendah .

Transformasi wavelet adalah metode aproksimasi dari suatu fungsi basis wavelet $\psi(t)$ dengan bantuan lokalisasi waktu dan frekuensi. Untuk melakukan aproksimasi dibutuhkan fungsi lain yang berlaku sebagai “jendela” aproksimasi yang terlokalisir pada interval waktu tertentu. Fungsi tersebut didefinisikan sebagai fungsi ψ yaitu :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad \dots (2.11)$$

Fungsi diatas disebut dengan fungsi wavelet atau *mother wavelet*. Dengan menambahkan 2(dua) parameter yaitu parameter dilasi (a) dan parameter translasi (b), maka fungsi *mother wavelet* tersebut dapat diskalakan dan digeser sepanjang domain waktu tertentu. Dengan memasukkan parameter a dan parameter b tersebut ke dalam persamaan fungsi *mother wavelet*, maka diperoleh suatu persamaan fungsi wavelet yaitu :

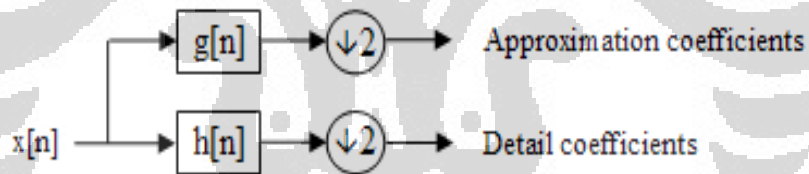
$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \dots (2.12)$$

Dengan a dan b adalah bilangan riil. Dengan mereduksi a membuat wavelet semakin sempit sebaliknya membuat fungsi wavelet melebar. Sedangkan parameter b digunakan untuk melokalisir kurva wavelet pada pusat interval $t=b$.

Berdasarkan jenis sinyal yang diprosesnya, *wavelet transform* dapat dibagi menjadi dua bagian besar, yaitu *Continuous Wavelet Transform (CWT)* dan *Discrete Wavelet Transform (DWT)*. Transformasi wavelet diskrit digunakan untuk melakukan transformasi ke dalam fungsi wavelet terhadap data-data diskrit. Hasil transformasi diskrit ini diperoleh dengan mencuplik (mensampling) nilai a dan b dengan $a = (a_0)^s$ dan $b = lab_0$, dimana s dan l adalah bilangan *integer*. Dengan memasukkan nilai a dan b tersebut ke dalam persamaan (2.12), maka didapatkan persamaan matematis fungsi wavelet sebagai berikut :

$$\psi_{s,l}(t) = a_0^{-s/2} \psi(a_0^{-s} t - lb_0) \quad \dots (2.13)$$

Transformasi wavelet diskrit dari suatu sinyal *input* x , dapat dikalkulasi dengan melewati sinyal *input* ke dalam suatu deretan filter. Dengan kata lain hasil transformasi diskrit dari suatu sinyal *input* x , didapatkan dari suatu proses dekomposisi. Proses dekomposisi sinyal disini adalah adanya proses konvolusi sinyal *input* x dengan *low pass filter* yang memiliki respon *impulse* g dan adanya proses konvolusi sinyal *input* x dengan *high pass filter* yang memiliki respon respon *impulse* h . Proses dekomposisi sinyal *input* x dengan *low pass filter* akan menghasilkan koefisien aproksimasi sedangkan proses dekomposisi sinyal *input* x dengan *high pass filter* akan menghasilkan koefisien detail. Sehingga pada proses transformasi wavelet diskrit terhadap sinyal *input* x , akan menghasilkan 2 keluaran yaitu koefisien Aproksimasi dan koefisien Detail. Transformasi wavelet diskrit yang menghasilkan koefisien aproksimasi dan koefisien detail melalui 1 (satu) kali proses dekomposisi disebut juga Transformasi wavelet diskrit 1 level (*one-level wavelet transformation*). Gambar 2.10 merupakan gambaran proses transformasi wavelet diskrit yang paling dasar dan hanya melakukan 1 (satu) kali dekomposisi sinyal.



Gambar 2.10. Proses Dekomposisi pada Transformasi Wavelet Diskrit

dimana :

$x[n]$: Sinyal asli

$g[n]$: *Low-Pass Filter (LPF)*

$h[n]$: *High-Pass Filter (HPF)*

Proses pada Gambar 2.10 dapat dijelaskan dalam persamaan matematis sebagai berikut :

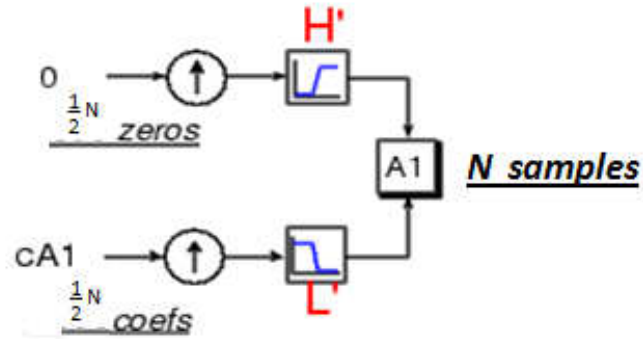
$$\begin{aligned} y_{low} &= (x * g) \downarrow 2 \\ y_{high} &= (x * h) \downarrow 2 \end{aligned} \quad \dots (2.14)$$

Dari persamaan (2.14) dapat dijelaskan bahwa proses dekomposisi sinyal terdiri atas proses konvolusi sinyal *input* dengan *low pass filter* dan *high pass filter* kemudian hasil konvolusi tersebut masing-masing akan di *downsampling* dengan faktor 2, jadi kalau misalnya sinyal *input* diskrit memiliki n sampel maka *output* proses dekomposisi sinyal dengan *high pass filter* dan *low pass filter* masing-masing akan menghasilkan sampel berjumlah $\frac{1}{2}$ dari jumlah sampel sinyal *input* semula sebelum proses dekomposisi, yaitu sebesar $\frac{n}{2}$ sampel.

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa keluaran dari proses dekomposisi sinyal pada transformasi wavelet tersebut ada 2 (dua) yaitu Koefisien Aproksimasi (**cA**) dan Koefisien detail (**cD**). Koefisien aproksimasi ini mengandung sebagian besar energi sinyal informasi sedangkan Koefisien detail hanya mengandung sedikit energi sinyal informasi.

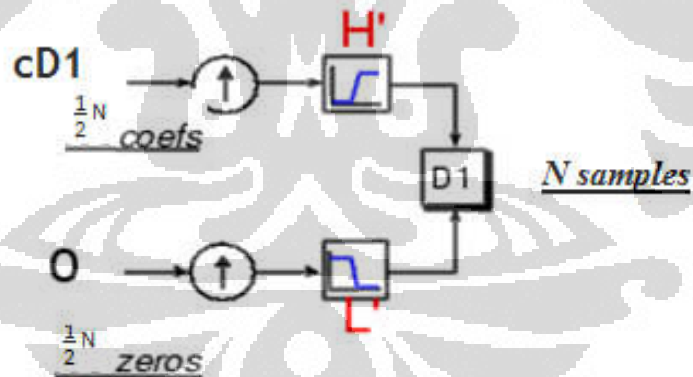
Setelah dilakukan proses dekomposisi di pemancar, untuk proses rekonstruksi sinyal di penerima dapat dijabarkan sebagai berikut :

1. Sinyal hasil konvolusi koefisien aproksimasi dengan *low pass filter*, digabungkan dengan sinyal hasil konvolusi deretan vektor nol dengan *highpass filter* menghasilkan koefisien **A1** dengan jumlah sampel berjumlah 2 x dari jumlah sampel koefisien aproksimasi. Digabungkan disini berarti deretan vektor hasil konvolusi deretan vektor nol dengan *highpass filter* berada pada elemen ganjil sedangkan deretan vektor hasil konvolusi koefisien aproksimasi dengan *low pass filter* berada pada elemen genap. Proses ini dapat digambarkan oleh Gambar 2.11.



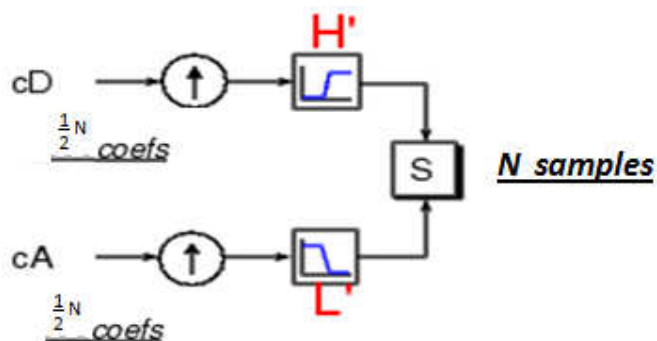
Gambar 2.11. Rekonstruksi sinyal Koefisien Aproksimasi

2. Sinyal hasil konvolusi koefisien detail dengan *high pass filter*, digabungkan dengan sinyal hasil konvolusi deretan vektor nol dengan *low pass filter* menghasilkan koefisien **D1** dengan jumlah sampel berjumlah 2 x dari jumlah koefisien detail. Digabungkan disini berarti deretan vektor hasil konvolusi deretan vektor nol dengan *low pass filter* berada pada elemen genap sedangkan deretan vektor hasil konvolusi koefisien detail dengan *high pass filter* berada pada elemen ganjil. Proses ini dapat digambarkan oleh Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Rekonstruksi sinyal Koefisien Detail

Kemudian tahap terakhir adalah hasil dari kedua Proses rekonstruksi yang telah dijelaskan sebelumnya (Proses 1 dan Proses 2) dijumlahkan untuk menghasilkan koefisien-koefisien sinyal yang sama dengan koefisien sinyal sebelum proses dekomposisi. Hasil terakhir dari Proses rekonstruksi inilah yang disebut sebagai Proses **Invers Transformasi Wavelet Diskrit**. Tahap terakhir dari proses rekonstruksi sinyal ini dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Invers Transformasi Wavelet Diskrit

Secara matematis proses *Invers* Transformasi Wavelet Diskrit tersebut dijelaskan melalui persamaan berikut :

$$S = A1 + D1 \quad \dots (2.15)$$

dimana :

S : Koefisien hasil terakhir proses rekonstruksi sinyal (hasil proses Invers Transformasi Wavelet Diskrit)

$A1$: Koefisien hasil rekonstruksi sinyal koefisien aproksimasi

$D1$: Koefisien hasil rekonstruksi sinyal koefisien detail

2.6. Clipping

Cara paling sederhana untuk mengurangi PAPR adalah memotong sinyal amplitudo puncak menjadi terbatas ke level maksimum yang dibutuhkan. Walau menjadi solusi tersederhana, *clipping* menyebabkan terjadinya distorsi *in-band*, yang menyebabkan penurunan BER, kedua distorsi non-linear pada sinyal OFDM secara signifikan meningkatkan level emisi *Out-Of-Band* (OOB).

Teknik *Clipping* yang digunakan pada skripsi ini adalah *Classical Clipping* dan *Deep Clipping*.

2.6.1 Classical Clipping

Classical Clipping telah dianalisa dalam suatu percobaan yang telah dilakukan sebelumnya [9]. *Classical Clipping* adalah salah satu teknik *clipping* yang populer untuk mereduksi PAPR dan sering disebut juga *hard clipping* atau *soft clipping*. Penggunaan *Classical Clipping* berpengaruh pada performansi sistem OFDM, termasuk *Power Spectral Density* (PSD), *Peak Average Power Ratio* (PAPR), dan perhitungan *Bit Error Rate* (BER). Fungsi dasar *Classical Clipping* ditunjukkan pada persamaan (2.16).

$$f(r) = \begin{cases} r, & r \leq A \\ A, & r > A \end{cases} \quad \dots(2.16)$$

dimana :

r = sinyal masukan

A = level *clipping*

2.6.2 Deep Clipping

Telah diketahui bahwa *Deep Clipping* adalah jenis *clipping* yang bertujuan untuk memecahkan masalah *peaks regrowth* yang disebabkan oleh penyaringan (*filtering*) OBB. Pada teknik *Deep Clipping*, fungsi *clipping* telah dimodifikasi untuk pemotongan lebih “dalam” pada puncak amplitudo yang tinggi. Parameter kedalaman *clipping* ditentukan terlebih dahulu untuk mengontrol kedalaman *clipping* tersebut. Fungsi dasar *Classical Clipping* ditunjukkan pada persamaan (2.17).

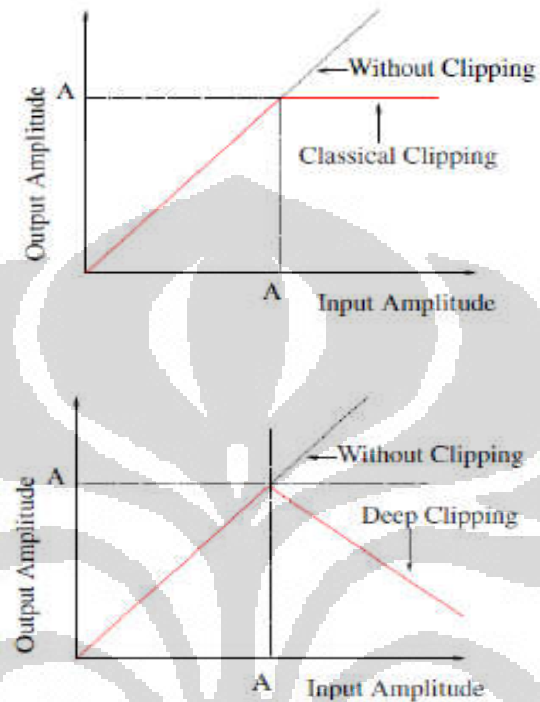
$$f(r) = \begin{cases} r, & r \leq A \\ A - p(r - A), & A < r \leq \frac{1+p}{p}A \\ 0, & r > \frac{1+p}{p}A \end{cases} \quad \dots(2.17)$$

dimana :

r = sinyal masukan

A = level *clipping* p = (*depth factor*) *clipping*.

Karakteristik perbandingan teknik *clipping* untuk *Classical Clipping* (CC) dan *Deep Clipping* (DC) ditunjukkan pada Gambar 2.14 untuk perbandingan fungsi alih *Clipping*.



Gambar 2.14. Perbandingan fungsi alih *Clipping*, *Classical Clipping* dan *Deep Clipping* [9]

BAB III

PEMODELAN SISTEM

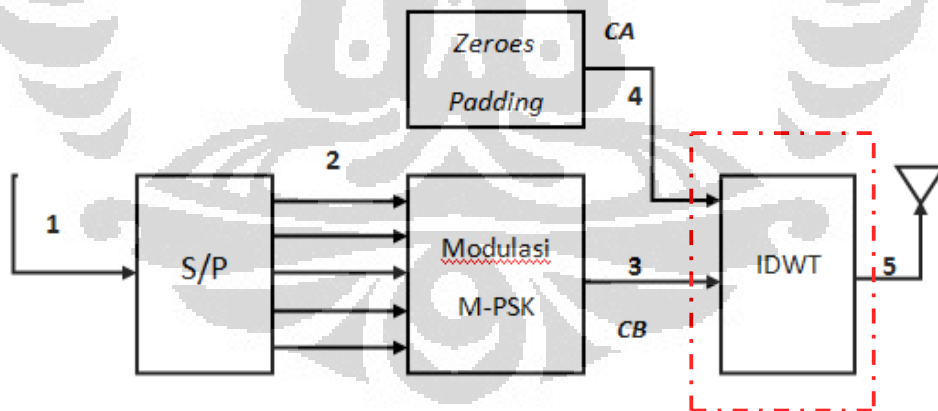
3.1. Umum

Pada Skripsi ini akan dimodelkan Konfigurasi Sistem OFDM dengan *Wavelet Transform* dan sistem OFDM dengan *Wavelet Transform* dan teknik *Clipping*.

3.2. Pemodelan Sistem OFDM dengan *Wavelet Transform*

Sistem Pemancar sistem OFDM dengan *Wavelet Transform* memiliki 4 elemen penting yaitu :

1. *Serial to parallel converter*
2. Modulator QPSK
3. Penambahan *zeroes padding*
4. Proses *Wavelet Transform*



Gambar 3.1. Konfigurasi Sistem *transmitter* OFDM dengan teknik *Wavelet Transform*.

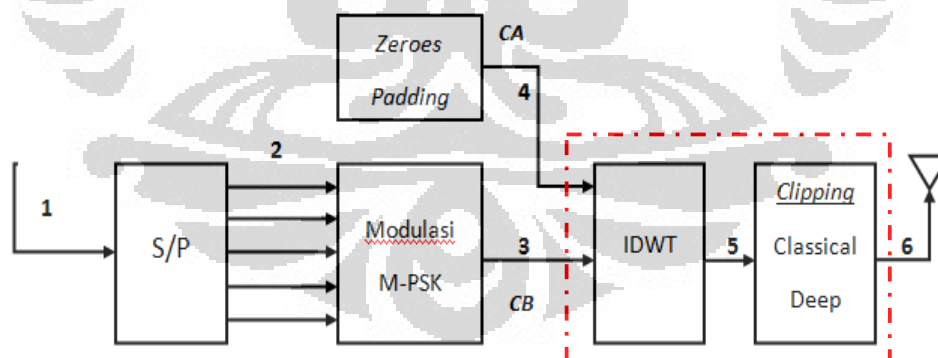
Sistem pada Gambar 3.1 dijelaskan sebagai berikut. Langkah 1, Sinyal informasi dalam bentuk bit akan diubah ke dalam bentuk parallel melalui beberapa jalur subkanal, kemudian dipetakan menggunakan modulator QPSK menjadi symbol kompleks pada langkah 2. Keluaran dari modulator QPSK pada langkah 3 akan

menjadi masukan ke blok IDWT sebagai koefisien Aproksimasi (*Coefficient Aproximate, CA*) Langkah 4 merupakan penambahan zeroes padding yang akan menjadi masukan untuk blok IDWT sebagai Koefisien Detail (*Coefficient Detail, CD*), panjang dari Koefisien Detail akan mengikuti panjang dari Koefisien Aproksimasi. Sinyal W-OFDM (*Wavelet-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) akan keluar setelah melewati blok IDWT pada langkah 5 dan sinyal mempunyai ini mempunyai nilai PAPR yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem OFDM konvensional, pada ranah waktu sinyal tersebut akan ditransmisikan melalui kanal.

3.3. Pemodelan Sistem OFDM dengan *Wavelet Transform* dan teknik *Clipping*

Sistem Pemancar sistem OFDM dengan *Wavelet Transform* dan teknik *Clipping* memiliki 5 elemen penting yaitu :

1. *Serial to parallel converter*
2. Modulator QPSK
3. Penambahan *zeroes padding*
4. Proses *Wavelet Transform*
5. Proses *Clipping*



Gambar 3.2. Konfigurasi Sistem *transmitter* OFDM dengan *Wavelet Transform* dan teknik *Clipping*.

Sistem pada Gambar 3.2 dijelaskan sebagai berikut. Sama seperti langkah pada sistem sebelumnya, namun pada sistem ini dilakukan penambahan proses *Clipping*. Langkah 1, Sinyal informasi dalam bentuk bit akan diubah ke dalam bentuk paralel

melalui beberapa jalur subkanal, kemudian dipetakan menggunakan modulator QPSK menjadi symbol kompleks pada langkah 2. Keluaran dari modulator QPSK pada langkah 3 akan menjadi masukan ke blok IDWT sebagai koefisien Aproksimasi (*Coefficient Approximate, CA*) Langkah 4 merupakan penambahan zeroes padding yang akan menjadi masukan untuk blok IDWT sebagai Koefisien Detail (*Coefficient Detail, CD*), panjang dari Koefisien Detail akan mengikuti panjang dari Koefisien Aproksimasi. Proses pada blok IDWT sendiri merupakan pengganti dari proses IFFT pada sistem OFDM konvensional. Sinyal W-OFDM (*Wavelet-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) keluar setelah melewati blok IDWT menuju blok *Clipping* pada langkah 5. Selanjutnya sinyal W-OFDM akan dilakukan proses *Clipping* untuk lebih mereduksi PAPR, teknik *Clipping* yang dilakukan adalah *Classical Clipping* dan *Deep Clipping*. Dan pada langkah 6 sinyal pada ranah waktu akan ditransmisikan melalui kanal.

3.4. Fungsi *Clipping*

Fungsi dari *Classical Clipping* dan *Deep clipping* adalah memotong sinyal sesuai dengan level *clipping* yang ditentukan sebagai ambang batas amplitudo dari sinyal. Proses *clipping* dijelaskan sebagai berikut:

1. *Clipping* menggunakan input sinyal W-OFDM setelah proses *inverse Discrete Wavelet Transform (IDWT)* pada *transmitter*.
2. Nilai σ RMS sebagai normalisasi rasio *clipping* dikalkulasi menggunakan input sinyal OFDM.
3. Rasio *clipping* CR yang digunakan sebagai ambang batas proses *clipping* dikalkulasi dengan persamaan 3.1, dengan A adalah level *clipping* yang telah ditentukan.

$$CR = \frac{A}{\sigma} \quad \dots(3.1)$$

dimana :

CR = rasio *clipping*

A = level *clipping*

σ = nilai normalisasi rasio *clipping*

4. *Classical Clipping* menggunakan 2 syarat yaitu. Amplitudo dari sinyal OFDM akan diloloskan ketika amplitudo dari sinyal lebih kecil atau sama dengan CR . Ketika sinyal r pada kondisi lebih besar dari ambang batas CR , maka sinyal mengalami proses *clipping* dengan pemotongan amplitudo dengan level CR .
5. *Deep Clipping* menggunakan 3 syarat yaitu: Amplitudo dari sinyal OFDM akan diloloskan ketika amplitudo dari sinyal lebih kecil atau sama dengan CR . Ketika sinyal r pada kondisi $CR < r \frac{1+p}{p} \leq CR$, maka sinyal mengalami proses *clipping* dengan persamaan $A - p * (r - A)$ dengan p adalah faktor kedalaman (*depth factor*) *Clipping*. Ketika $r > \frac{1+p}{p} CR$, maka amplitudo sinyal mengalami proses *clipping* dengan nilai amplitudo '0'.

3.5. Indikator Kinerja PAPR

Sebagai pembatasan masalah dan analisa. Hasil simulasi yang akan dianalisa adalah hasil reduksi PAPR, kemudian hasil simulasi akan dibandingkan dengan penggunaan jenis *wavelet* dan teknik *Clipping* pada referensi acuan.

PAPR dapat dikalkulasi dengan persamaan (2.10) pada Bab 2. Umumnya, PAPR dideskripsikan secara statistik dengan menggunakan *Complementary Cumulative Distribution Function* (CCDF) dimana $CCDF = 1 - CDF$. CDF merupakan kumulatif dari nilai PAPR. Setelah didapatkan nilai kumulatif CDF maka didapatkan nilai CCDF dimana hasilnya dibagi dengan jumlah simbol yang dikirimkan untuk mendapatkan probabilitas munculnya nilai PAPR lebih dari nilai PAPR tertentu. Hasil PAPR digambarkan dengan grafik CCDF terhadap probabilitas. CCDF digunakan untuk mengetahui probabilitas level PAPR yang melebihi ambang batas tertentu. PAPR dikalkulasi setelah proses *Inverse Discrete Wavelet Transformation* (IDWT) dan *Clipping*.

BAB IV ANALISA HASIL SIMULASI

4.1. Analisa PAPR sistem OFDM dengan Menggunakan Transformasi Wavelet

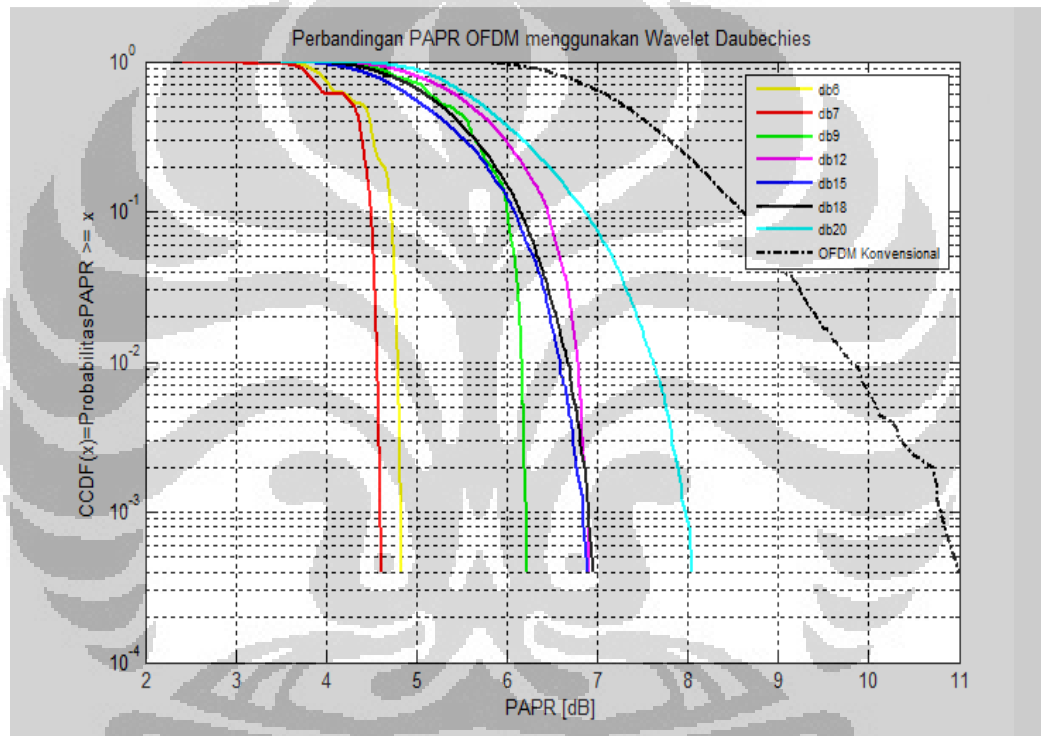
Pada subbab 4.1 akan dilakukan analisa perbandingan PAPR pada sistem OFDM konvensional dengan sistem OFDM menggunakan transformasi wavelet. Dilakukan pula perbandingan nilai PAPR pada sistem OFDM menggunakan transformasi wavelet dengan beberapa jenis wavelet yang tersedia pada program Matlab.

Simulasi yang dilakukan menggunakan parameter sebagai berikut :

- Modulasi QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*)
- Jumlah bit info 640.000
- Jumlah titik FFT / IFFT = 256
- Oversampling 4 x
- Panjang Cyclic Prefix = 25 % [23]
- Sistem menggunakan teknik kompresi *Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)* untuk OFDM konvensional dan *Inverse Discrete Wavelet Transform (IDWT)* untuk W-OFDM.
- Jenis Wavelet yang digunakan adalah keluarga *wavelet Daubechies*, *Symlet*, dan *Coiflet* untuk *wavelet* ortogonal dan keluarga *wavelet BiorSplines* dan *Reversebior* untuk keluarga *wavelet* biorthogonal.
- Rasio *clipping* = 1.4 [24]
- Depth Factor = 0.6 [25]

4.1.1. Penentuan Jenis *Wavelet* yang paling optimal untuk mereduksi PAPR

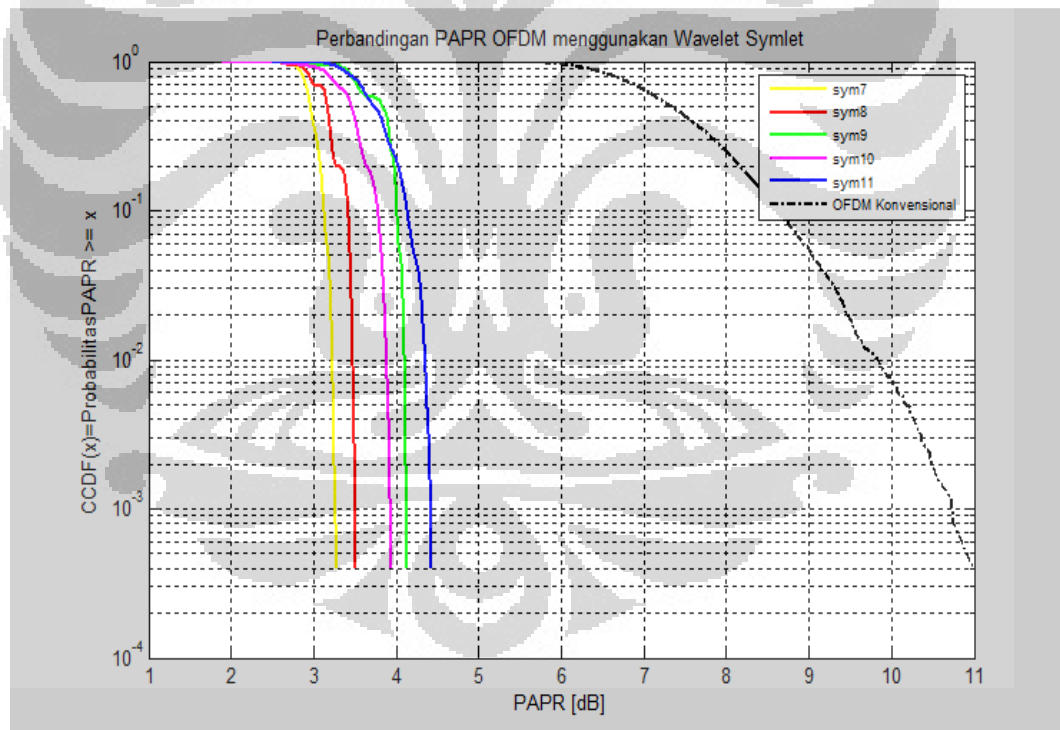
Telah dijelaskan pada bab II jika wavelet memiliki beberapa jenis, pada skripsi ini akan digunakan beberapa jenis wavelet yang fungsi-fungsinya telah didukung oleh program MATLAB. Keluarga *wavelet* yang akan dianalisa manakah jenis wavelet yang paling optimal untuk mereduksi PAPR adalah keluarga *wavelet Daubechies*, *Symlet*, dan *Coiflet* untuk *wavelet* othogonal dan keluarga *wavelet BiorSplines* dan *Reversebior* untuk keluarga *wavelet* biorthogonal.



Gambar 4.1. Perbandingan PAPR W-OFDM Menggunakan Keluarga *Daubechies* Terhadap OFDM Konvensional.

Pada analisa pertama dilakukan dengan menggunakan keluarga wavelet orthogonal yaitu *Daubechies*. Nilai reduksi PAPR *Daubechies_6* (*db6*), *Daubechies_7* (*db7*), *Daubechies_9* (*db9*), *Daubechies_12* (*db12*), *Daubechies_15* (*db15*), *Daubechies_18* (*db18*), dan *Daubechies_20* (*db20*) dibandingkan dengan OFDM konvensional. Suatu wavelet *Daubechies* dengan ordo wavelet N (dbN), memiliki nilai *Vanishing moment* sama dengan N . *Vanishing moment* menunjukkan kemampuan wavelet dalam merepresentasikan

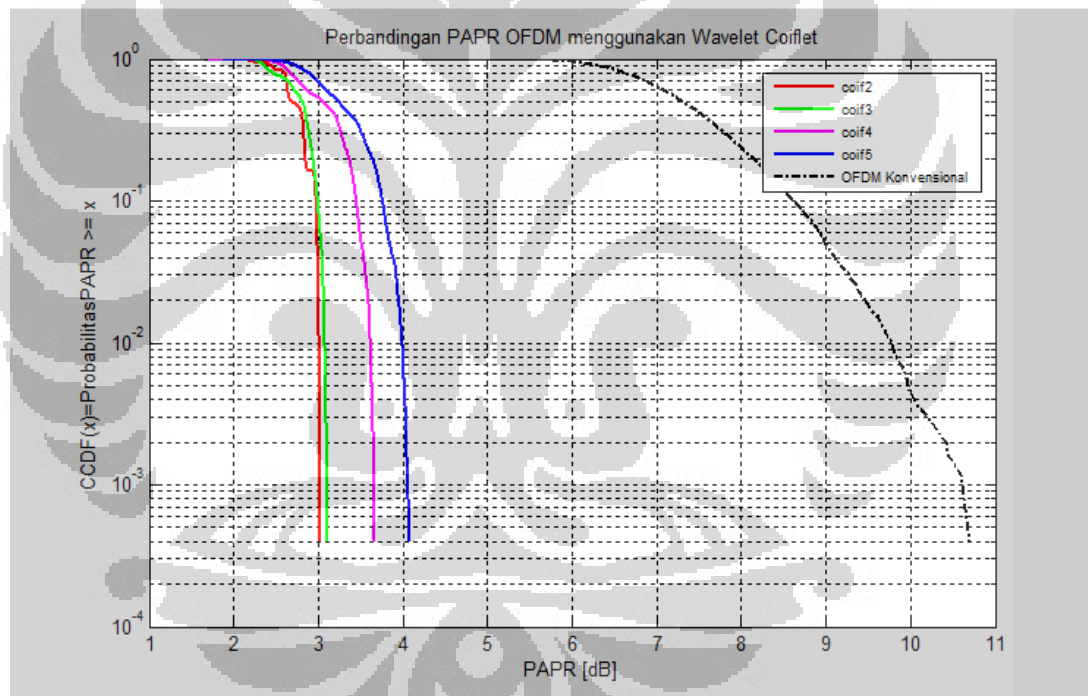
sifat polinomial dan sifat polinomial yang dimiliki oleh wavelet akan berpengaruh dalam penentuan jumlah koefisien filter wavelet. Semakin besar jumlah filter yang dimiliki oleh suatu wavelet filter *Daubechies*, maka semakin baik filter tersebut dalam melakukan pemilihan frekuensi. Untuk reduksi PAPR sistem OFDM semakin kecil nilai ordo N wavelet *Daubechies* semakin baik nilai reduksi PAPR, walaupun pada percobaan menunjukkan bahwa orde 7 wavelet *Daubechies* lebih baik daripada orde 6 wavelet *Daubechies* hal ini mungkin dikarenakan reduksi PAPR sistem OFDM lebih baik dengan sifat polinomial wavelet pada wavelet *Daubechies* orde 7. Hasilnya pengurangan nilai PAPR yang terkecil pada *Daubechies_20 (db20)* sebesar 3 dB dan pengurangan terbesar terjadi pada penggunaan wavelet *Daubechies_7 (db7)* yaitu sebesar 6,4 dB.



Gambar 4.2. Perbandingan PAPR W-OFDM Menggunakan Keluarga *Symlet* Terhadap OFDM Konvensional.

Analisa kedua dilakukan dengan menggunakan keluarga wavelet orthogonal yaitu *Symlet*. Nilai reduksi PAPR *Symlet_7 (sym7)*, *Symlet_12*

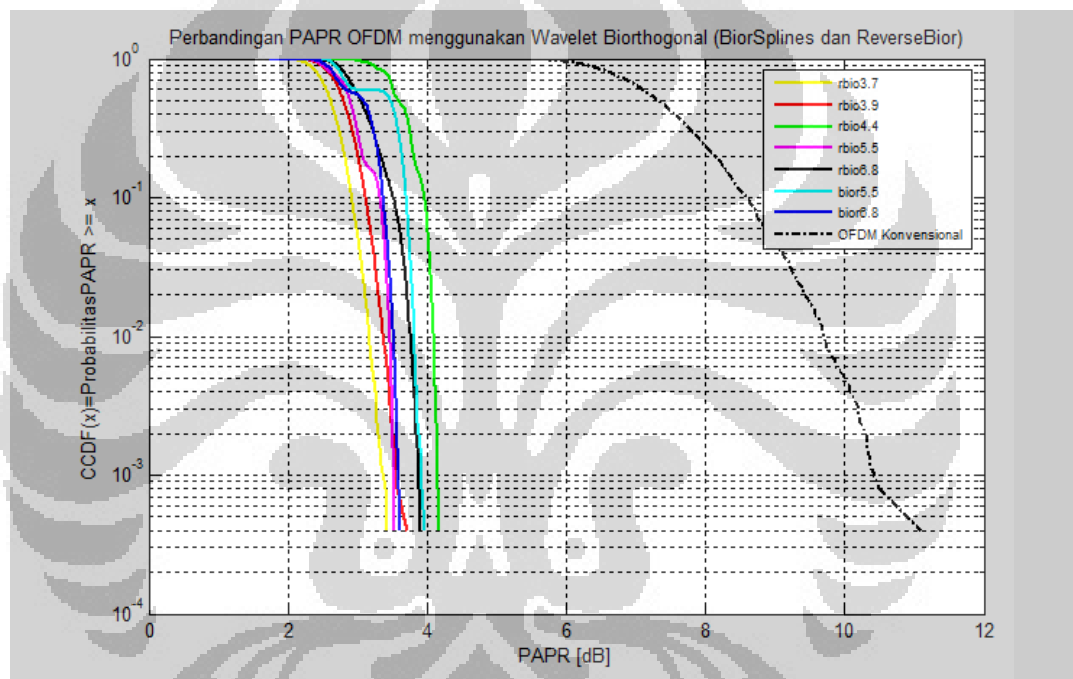
(*sym8*), *Symlet_9* (*sym9*), dan *Symlet_10* (*db10*), dan *Symlet_11* (*sym11*) dibandingkan dengan OFDM konvensional. Wavelet *Symlet* merupakan modifikasi dari wavelet *Daubechies* dalam hal peningkatan kesimetrian pada saat tetap mempertahankan bentuk yang paling sederhana oleh karena itu properti dari wavelet *Daubechies* dan wavelet *Symlet* adalah serupa. Sehingga pengaruh kenaikan orde pada wavelet *Symlet* dan wavelet *Daubechies* dapat dikatakan sama yaitu semakin kecil nilai orde N semakin besar reduksi PAPR pada OFDM. Hasilnya pengurangan nilai PAPR yang terkecil pada *Symlet_11* (*sym11*) sebesar 6,6 dB dan pengurangan terbesar terjadi pada penggunaan wavelet *Symlet_7* (*sym7*) yaitu sebesar 7,7 dB.



Gambar 4.3. Perbandingan PAPR W-OFDM Menggunakan Keluarga *Coiflet* Terhadap OFDM Konvensional.

Analisa ketiga dengan menggunakan keluarga wavelet orthogonal yaitu *Coiflet*. Nilai reduksi PAPR *Coiflet_2* (*coif2*), *Coiflet_3* (*coif3*), *Coiflet_4* (*coif4*), dan *Coif_5* (*coif5*) dibandingkan dengan OFDM konvensional. Seiring dengan menurunnya nilai orde N pada wavelet jenis *Coiflet* dihasilkan reduksi yang lebih baik dibandingkan dengan wavelet *Daubechies* dan *Symlet*, hal ini disebabkan

jumlah *Vanishing moment* yang lebih panjang pada wavelet *Coiflet*. Penggunaan wavelet jenis *Coiflet* orde 2 dan *Coiflet* orde 3 pada pengurangan nilai PAPR tidak jauh berbeda, dapat dilihat dari Gambar 4.3 reduksi PAPR *Coiflet* orde 2 dan *Coiflet* orde 3 adalah 7,6 dB dan 7,7 dB. Sama seperti dua jenis wavelet sebelumnya nilai orde N mempengaruhi nilai reduksi PAPR, dengan semakin kecil orde N semakin baik pula reduksi PAPR. Hasilnya pengurangan nilai PAPR yang terkecil pada *Coiflet_5 (Coif5)* sebesar 6,6 dB dan pengurangan terbesar terjadi pada penggunaan wavelet *Coiflet_2 (Coif2)* yaitu sebesar 7,6 dB.



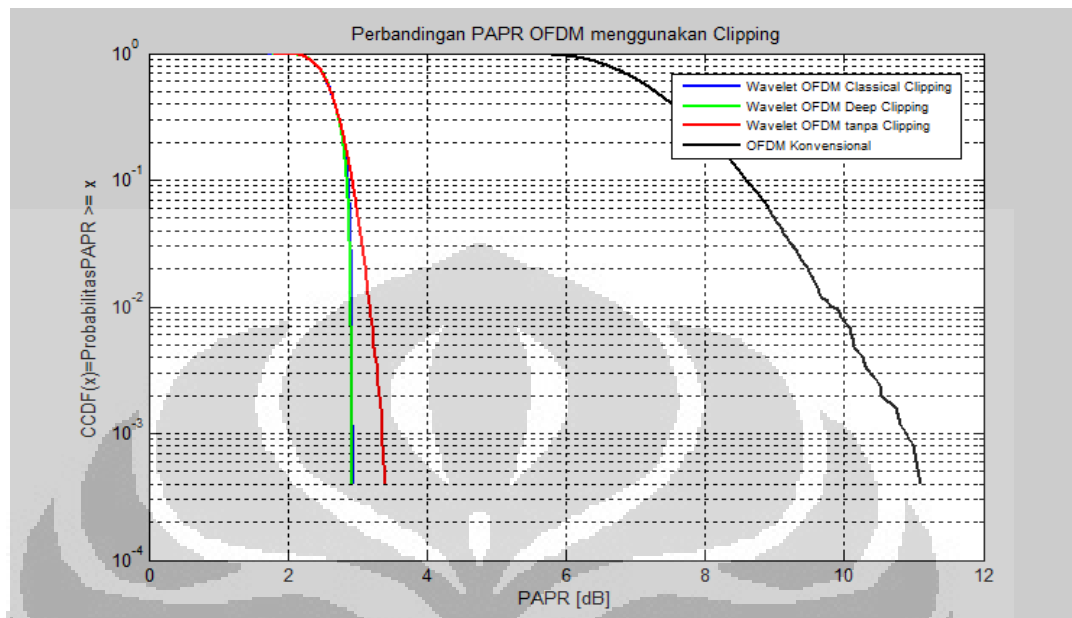
Gambar 4.4. Perbandingan PAPR W-OFDM Menggunakan Keluarga Wavelet *Biorthogonal* Terhadap OFDM Konvensional.

Pada Wavelet biorthogonal terdapat 2 fungsi skala yang orthogonal satu sama lain. Penamaan orde N ($Nr.Nd$) pada jenis wavelet ini menunjuk proses rekonstruksi dan dekomposisi, dimana Nr untuk rekonstruksi dan Nd untuk dekomposisi. Analisa keempat dilakukan perbandingan PAPR OFDM keluarga Wavelet terhadap OFDM konvensional dengan menggunakan keluarga wavelet biorthogonal yaitu *BiorSplines* dan *ReverseBior*. *BiorSplines_5.5 (bior5.5)*, *BiorSplines_6.8 (bior6.8)*, *ReverseBior_3.7 (rbio3.7)*, *ReverseBior_3.9 (rbio3.9)*, *ReverseBior_4.4 (rbio4.4)*, *ReverseBior_5.5 (rbio5.5)*, dan *ReverseBior_6.8*

(*rbio6.8*) dibandingkan dengan OFDM konvensional. Dari grafik pada Gambar 4.4 keluarga wavelet biorthogonal memiliki nilai reduksi PAPR yang masing-masing sangat berdekatan, *range* dari nilai terbesar hingga terkecil hanya sekitar 0,5 dB. Tidak seperti pada jenis wavelet sebelumnya (orthogonal), pada wavelet biorthogonal kenaikan reduksi PAPR tidak bergantung pada kenaikan orde N hal ini mungkin disebabkan oleh pemilihan kombinasi orde N_r dan N_d dilakukan untuk reduksi PAPR yang paling baik. Pengurangan nilai PAPR yang terkecil terjadi pada *ReverseBior_4.4*(*rbio4.4*) sebesar 6,9 dB dan pengurangan terbesar terjadi pada penggunaan wavelet *ReverseBior_3.7* (*rbio3.7*) yaitu sebesar 7,8 dB.

Dari perbandingan beberapa keluarga wavelet (*Daubechies*, *Coiflet*, *Symlet*, *BiorSplines*, dan *ReverseBior*) pada analisa diatas dapat dilihat bahwa dengan menggunakan transformasi wavelet dapat mereduksi PAPR pada sistem OFDM. Wavelet *ReverseBior_3.7* (*rbio3.7*) merupakan jenis wavelet yang paling baik untuk mereduksi PAPR pada sistem OFDM dengan nilai reduksi sebesar 7,8 dB. Oleh karena itu Wavelet *ReverseBior_3.7* (*rbio3.7*) digunakan untuk analisa sistem OFDM menggunakan transformasi wavelet dan teknik *Clipping* pada subbab selanjutnya.

4.2. Analisa PAPR sistem OFDM dengan Menggunakan Transformasi Wavelet dan Teknik *Clipping*



Gambar 4.5. Perbandingan PAPR *Wavelet* OFDM dengan Teknik *Clipping* Terhadap OFDM Konvensional.

Jenis wavelet yang digunakan pada analisa perbandingan PAPR *Wavelet* OFDM dengan Teknik *Clipping* Terhadap OFDM Konvensional adalah *ReverseBior_3.7* (*rbior3.7*), dan teknik *Clipping* yang digunakan adalah *Classical Clipping* dan *Deep Clipping*. Dari Gambar 4.5 dapat disimpulkan bahwa sistem OFDM dengan menggunakan transformasi wavelet saja dapat mereduksi PAPR sebesar 7,8 dB. Pada penggunaan kedua teknik *Clipping* (*Classical Clipping* dan *Deep Clipping*) menghasilkan nilai reduksi yang tidak terlalu berbeda, dapat dilihat dari hasilnya jika ditambahkan dengan teknik *Clipping* maka sistem OFDM dapat tereduksi PAPR sebesar 8,2 dB untuk *Deep Clipping* dan 8,1 dB untuk *Classical Clipping*.

Secara keseluruhan hasil simulasi, Penggunaan kombinasi transformasi wavelet dengan teknik *clipping* dapat mereduksi PAPR secara optimal. Hasil reduksi PAPR yang paling baik adalah menggunakan jenis wavelet *ReverseBior_3.7* (*rbior3.7*) dan teknik *Deep Clipping*.

BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa penggunaan jenis wavelet yang paling baik dibandingkan jenis wavelet lainnya untuk mereduksi PAPR pada sistem OFDM adalah wavelet *ReverseBior_3.7* (*rbior3.7*) yang menghasilkan pengurangan nilai PAPR sebesar 8,2 dB. Sistem OFDM yang telah menggunakan transformasi wavelet disebut juga dengan W-OFDM (*Wavelet-OFDM*).

Penggunaan teknik *Clipping* dapat menambah performansi sistem W-OFDM dalam mereduksi PAPR. Deep Clipping mereduksi PAPR sistem W-OFDM hingga 8,1 dB sedangkan *Classical Clipping* mereduksi sistem w-OFDM hingga 8,2 dB. Kombinasi transformasi wavelet dan teknik *Clipping* dapat mereduksi PAPR dalam sistem OFDM secara optimal.

DAFTAR REFERENSI

- [1]. Triprasetyo, Yudhi, "*Analisa dan perbandingn teknik Clipping untuk reduksi PAPR dan kode koreksi error untuk performansi BER pada OFDM*", Tesis: Teknik Elektro Universitas Indonesia, 2011.
- [2]. "*LTE Frequently Asked Questions, What is LTE?*", diakses dari "<http://www.lte-world.org/faq>", pada tanggal 22 juni 2012.
- [3]. Wannstrom, Jeanette (2012), "*LTE Advence for 3GPP*", diakses dari "<http://www.3gpp.org/LTE-Advence>", pada tanggal 22 juni 2012
- [4]. Sunarto, Wahyu Eko, "*Reduksi PAPR dan peningkatan performansi BER pada sistem OFDM menggunakan teknik Hybrid DCT-Wavelet transform dan Companding $\mu - Law$ Transform*", Tesis: Teknik Elektro Universitas Indonesia, 2012.
- [5] Yuan Jiang, "*New Companding Transform for PAPR Reduction in OFDM*", IEEE Communication Letters, vol. 14, no. 4, April 2010.
- [6] Han, S, H and Lee, J, H, "*An Overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission*", IEEE Wireless Communication, vol. 12, pp. 56-65, Apr. 2005.
- [7] Khalid, Seema and Shah, Syed Ismail, "*PAPR Reduction by Using Discrete Wavelet Transform*", IEEE International Conference on Emerging Technologies. 2006.
- [8] Abdullah, Khaizuran and M. Hussain, Zahir, "*Studies on DWT-OFDM and FFT-OFDM Systems*", IEEE International Conference On Communicationn Computer and Power, 2009.
- [9] Guel.D. & Palicot.J, "*Analysis and comparison of Clipping techniques for OFDM Peak-to-Average Power Ratio Reduction*", Digital Signal Processing 16th International Conference, 2009.
- [10] Molisch, Andreas F, "*Wireless Communications 2nd Edition*", John Wiley & Sons, UK, 2011.

- [11]. Juwono.Filbert Hilman & Gunawan, Dadang, "*Prinsip-Prinsip OFDM*", Indonesia: Penerbit ANDI, 2010.
- [12]. Yong Soo Cho, Jeakwon Kim, Won Young Yang and Chung-Gu Kang, "*MIMO-OFDM Wireless Communication with MATLAB*", John Wiley & Sons, Singapore, 2010.
- [13]. Anggoro, Unggul. "*Analisa OFDM dengan menggunakan transformasi Wavelet diskrit dan membandingkannya dengan transformasi fourier cepat*", Tesis: Teknik Elektro Universitas Indonesia, 2010.

