

# PENINGKATAN KINERJA *WI-FI* 802.11n MENGGUNAKAN MIMO DEKODER BERBASIS MLD (*MAXIMUM LIKELIHOOD DETECTION*) PADA KONFIGURASI ANTENA 4x4

Amelia Syarfina Qisthi<sup>\*)</sup>, Wahyul Amien Syafei, and Imam Santoso

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang  
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

<sup>\*)</sup>*E-mail: ameliasyarfina.qisthi@gmail.com*

## Abstrak

IEEE 802.11n merupakan standar baru Wi-Fi yang menghasilkan high throughput. Standar ini memanfaatkan kombinasi MIMO dan OFDM untuk mencapai kinerja dan throughput yang tinggi. Kinerja MIMO dekoder yang tinggi sangat dibutuhkan untuk memperoleh informasi yang dikirimkan. MIMO dekoder 802.11n yang ada saat ini menggunakan metode linier, yaitu Zero Forcing (ZF) dan Minimum Mean Square Error (MMSE). Kedua metode ini sederhana tetapi memiliki kinerja yang rendah. Penelitian ini mengembangkan sebuah MIMO dekoder berkinerja tinggi dengan metode Maximum Likelihood Detection (MLD) untuk sistem Wi-Fi 802.11n dengan bandwidth 40MHz. Simulasi ini dilakukan pada model kanal B dari IEEE 802.11n yang mewakili cakupan suatu area kantor kecil. Teknik MIMO yang digunakan adalah Spatial Division Multiplexing pada konfigurasi MIMO 4x4 dengan modulasi 64 QAM dan laju pengkodean (2/3, 3/4, 5/6). Hasil simulasi dibandingkan dengan ZF dan MMSE berdasarkan analisa kinerja dan kompleksitasnya. Pada BER  $10^{-4}$ , MLD memberikan peningkatan kinerja rata-rata 14,2 dB dibandingkan metode ZF dan 12,3 dB terhadap MMSE. MLD memiliki kompleksitas  $8 \times 10^5$  kali lipat dibandingkan dengan metode ZF dan MMSE.

*Kata kunci: Wi-Fi 802.11n, OFDM, MIMO, Maximum Likelihood Detection*

## Abstract

The 802.11n as the newest IEEE Wi-Fi standard can provide high throughput. It exploits a combination of MIMO and OFDM to gain high throughput and performance wireless communications. Since it involves many interference signals in the channel, high performance decoder MIMO is highly demanded to obtain the transmitted information. The recent Wi-Fi 802.11n system implements linear method, i.e. ZF and MMSE to cancel the interferences. Both methods are simple but low in performance. This research developing and implementing high performance decoder MIMO based on MLD for Wi-Fi 802.11n system with bandwidth 40 MHz. Simulations was performed on TGN channel model B which represented coverage of a small office area. MIMO technique used is Spatial Division Multiplexing in 4 x 4 MIMO configuration using 64 QAM modulation and coding rate (2/3, 3/4, 5/6). Simulation results compared with the linear detection, ZF and MMSE which based on the comparison of Bit Error Rate (BER) to Signal to Noise Ratio (SNR) and complexity. For BER  $10^{-4}$ , MLD has contributed an average increase of 14.17 dB to the ZF decoder and 12.3 dB to the MMSE decoder. However, MLD has a high complexity  $8 \times 10^5$  compared to ZF and MMSE.

*Keywords: Wi-Fi 802.11n, OFDM, MIMO, Maximum Likelihood Detection*

## 1. Pendahuluan

IEEE sebagai grup yang membuat standar *Wi-Fi* mengembangkan standar IEEE 802.11n yang mengkombinasikan teknik OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) dan MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) sehingga mencapai *high throughput*[1]. *Throughput* yang dihasilkan sangat bergantung pada kinerja dari dekoder. Dalam sistem *Wi-*

*Fi* 802.11n, dekoder terletak pada sisi penerima yang fungsinya adalah mengawasandakan sinyal asli yang diterima untuk mendapatkan kembali informasi yang dikirim. Teknik deteksi linier yang biasa digunakan adalah *Zero Forcing* (ZF) dan *Minimum Mean Square Error* (MMSE), sedangkan untuk teknik yang dikenal memiliki kinerja optimal pada *soft-decision detector* adalah *Maximum Likelihood Detection* (MLD). Pada teknik MLD akan dihitung jarak sinyal yang diterima terhadap seluruh kemungkinan kandidat simbol, semakin

kecil (minimum) perbedaan sinyal yang diterima dengan suatu kandidat simbol, maka semakin besar (maksimum) kemungkinan bahwa kandidat simbol tersebut adalah informasi yang dikirim oleh pemancar.

Penelitian sebelumnya mengenai peningkatan kinerja *Wi-Fi* 802.11n telah dilakukan dengan beberapa teknik, antara lain penggunaan *Low Density Parity Check* (LDPC) sebagai *channel coder* pengganti *Binary Convolutional Code* (BCC), dan desain *Register Transfer Level* (RTL)-nya [2]. Penelitian lainnya yaitu desain *Application Specific Integrated Circuit* (ASIC) untuk LDPC dekoder [3,4]. Hasilnya, simulasi dengan menggunakan LDPC memberikan peningkatan performa 6 dB dibandingkan BCC. Teknik lain yang dilakukan adalah pengaturan *antenna spacing* pada nilai  $2 \lambda$  menghasilkan perbaikan sebesar 5 dB dibandingkan dengan menggunakan *antenna spacing* sebesar  $1/2 \lambda$  [5]. Implementasi MLD pada konfigurasi antena MIMO 2x2 memberikan peningkatan 15,33 dB terhadap ZF dan 13,33 dB terhadap MMSE[6].

Pada tugas akhir ini, untuk meningkatkan kinerja *Wi-Fi* 802.11n digunakan konfigurasi MIMO 4x4 dengan mengimplementasikan teknik MLD pada MIMO dekoder. Simulasi dilakukan pada model kanal B dari IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11 yang mewakili cakupan area suatu kantor kecil. Kinerja dan kompleksitasnya kemudian dibandingkan dengan teknik ZF dan MMSE dengan parameter yang diamatinya adalah perbandingan *Bit Error Rate* (BER) terhadap *Signal to Noise Ratio* (SNR).

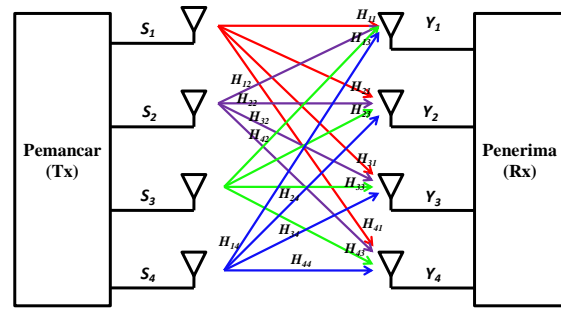
## 2. Metode

### 2.1. MIMO

*Nomenklatur* : Huruf yang dicetak tebal menandakan suatu matriks sedangkan yang dicetak biasa menandakan nilai skalar;  $(\cdot)^*$  menandakan matriks *hermitian* (*conjugate transpose*);  $(\cdot)^{-1}$  menandakan matriks invers;  $I$  menandakan matriks identitas;  $\|\cdot\|$  menandakan norma *Euclidean*

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) merupakan salah satu teknik diversitas, yaitu *spatial diversity* di mana penggunaan teknik diversitas dapat mengurangi *fading* dan interferensi dari user lain serta meningkatkan laju data tanpa mengorbankan *bandwidth* maupun daya pancarnya[7].

Konfigurasi sistem MIMO dengan 4 antena pemancar dan 4 antena penerima dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Skema MIMO 4x4

Adapun persamaan dari sistem MIMO diberikan pada persamaan 1 :

$$Y = HS + N \quad (1)$$

dengan  $Y$  adalah simbol yang diterima,  $H$  adalah respon frekuensi kanal,  $S$  adalah simbol yang ditransmisikan,  $N$  adalah *noise*,  $M$  adalah jumlah antena pemancar dan  $\rho$  adalah jumlah rata-rata *signal to noise ratio* (SNR)

Sebagai contoh sistem dengan empat antena pemancar dan empat antena penerima dapat dituliskan secara matematis dalam notasi vektor, dengan persamaan (2) :

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.2 MIMO Dekoder

Pada sisi penerima setiap antena penerima akan mendapatkan seluruh sinyal dari semua antena pemancar, sehingga sinyal yang diterima pada antena penerima 1 adalah  $Y_1 = \sum_{i=1}^N H_{1i}S_i + N_1$  dan seterusnya hingga antena penerima  $Y_M$ .

Karena semua informasi tercampur pada setiap antena penerima, maka dibutuhkan MIMO dekoder untuk mendapatkan informasi asli pada setiap antena. Teknik yang biasa digunakan pada MIMO dekoder adalah *Zero Forcing* (ZF) dan *Minimum Mean Square Error* (MMSE), sedangkan untuk teknik yang dikenal memiliki kinerja optimal pada *soft-decision detector* adalah *Maximum Likelihood Detection* (MLD).

#### A. Metode Linier

Metode linier merupakan metode yang sederhana tetapi memiliki kinerja yang rendah. Jenis dari metode ini adalah *Zero Forcing* (ZF) dan *Minimum Mean Square Error* (MMSE).

##### A.1 Zero Forcing (ZF)<sup>[8]</sup>

Metode ZF merupakan metode untuk menghilangkan pengaruh kanal dengan cara mengkalikan sinyal yang diterima dengan *invers* matriks kanalnya.

ZF mengimplementasikan matriks *invers* (mengabaikan masalah penguatan derau). Pesan yang diterima  $\hat{S}$  diberikan oleh persamaan :

$$\hat{S} = WY \tag{3}$$

dengan  $W$  adalah bobot equalizer dan  $H$  adalah respon frekuensi kanal. Persamaan Zero Forcing (ZF) untuk memenuhi  $WH = 1$  diberikan sebagai berikut :

$$W = (H^*H)^{-1}H^* \tag{4}$$

Matriks ini merupakan matriks umum M x N. Untuk  $N_r = N_t = 4$  adalah :

$$H^*H = \begin{bmatrix} H_{1,1}^* & H_{2,1}^* & H_{3,1}^* & H_{4,1}^* \\ H_{1,2}^* & H_{2,2}^* & H_{3,2}^* & H_{4,2}^* \\ H_{1,3}^* & H_{2,3}^* & H_{3,3}^* & H_{4,3}^* \\ H_{1,4}^* & H_{2,4}^* & H_{3,4}^* & H_{4,4}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} & H_{1,4} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} & H_{2,4} \\ H_{3,1} & H_{3,2} & H_{3,3} & H_{3,4} \\ H_{4,1} & H_{4,2} & H_{4,3} & H_{4,4} \end{bmatrix} \tag{5}$$

Maka untuk mencari nilai estimasi  $\hat{S}$  adalah :

$$\begin{aligned} \hat{S} &= WY \\ \hat{S} &= W(HS + N) \\ \hat{S} &= S + WN \end{aligned} \tag{6}$$

Kompleksitas metode ZF diberikan pada persamaan :

$$K = N_t^2 + N_t \tag{7}$$

dengan  $N_t$  adalah jumlah antenna pemancar. Jadi jika menggunakan empat antenna pemancar, maka kompleksitasnya adalah 20.

### A.2 Minimum Mean Square Error (MMSE)<sup>[9]</sup>

Metode *Minimum Mean Square Error* (MMSE) mempertimbangkan *noise* dalam bobot equalizernya, persamaannya :

$$W = [H^*H + NI]^{-1}H^* \tag{8}$$

Jika dibandingkan, faktor *noise NI* dari persamaan ZF dan MMSE sebanding. Ketika faktor *noise* adalah nol, MMSE akan sama dengan persamaan ZF.

Kompleksitas metode MMSE sama dengan kompleksitas metode ZF, yaitu pada persamaan (7).

## B. Metode Non-Linier

Salah satu metode non-linear adalah *Maximum Likelihood Detection* (MLD). MLD merupakan metode dengan kinerja optimal sebagai detektor MIMO.

### B.1 Maximum Likelihood Detector (MLD)

*Maximum Likelihood Detection* merupakan metode yang membandingkan sinyal yang diterima *receiver* dengan

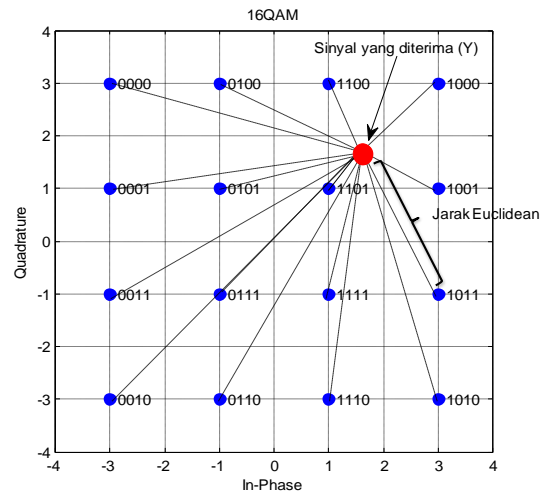
semua kemungkinan informasi yang dikirim atau kandidat simbol, persamaannya diberikan sebagai berikut:

$$\hat{S}_{ML} = \arg \min \|Y - H\hat{S}\|^2 \tag{9}$$

dengan  $\hat{S}_{ML}$  adalah simbol yang dideteksi,  $Y$  adalah simbol yang diterima,  $H$  adalah respon frekuensi kanal dan  $\hat{S}$  adalah kandidat simbol.

$\hat{S}_{ML}$  didapat dengan mencari jarak *Euclidean* antara sinyal yang diterima dan hasil perkalian respon frekuensi kanal dengan kandidat simbol sinyal yang ditransmisikan.

MLD memilih pesan  $\hat{S}$  yang menghasilkan jarak terkecil antara vektor penerimaan,  $Y$ , dan perkiraan pesan,  $H\hat{S}$  yang diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi *Maximum Likelihood Detection*.

Pada Gambar 2 terdapat gambar konstelasi 16QAM. Sumbu y menunjukkan sisi *quadrature* (imajiner) dan sumbu x menunjukkan sisi *inphase* (real). Kemudian terlihat vektor sinyal yang diterima *receiver* ( $Y$ ) jatuh pada titik X, untuk dapat mengenali X maka dicari jarak minimal terhadap enam belas kandidat simbol.

Semakin kecil perbedaan sinyal yang diterima  $H\hat{S}$ , maka semakin besar kemungkinan bahwa kandidat simbol tersebut adalah informasi yang dikirim oleh pemancar.

Permasalahan MLD adalah kompleksitasnya yang tinggi bergantung jumlah poin konstelasi dan jumlah antenna.

Sebagai contoh modulasi BPSK dengan 4 antenna pemancar, maka kita harus mencari jarak minimum dari  $2^4 = 16$  kombinasi [13]. Jika menggunakan modulasi 64QAM dengan parameter yang sama akan didapatkan kombinasi sebanyak  $64^4 = 16777216$  dan seterusnya jika menggunakan modulasi lain. Sesuai dengan persamaan :

$$K = M^{N_t} \tag{10}$$

dengan  $K$  adalah kompleksitas,  $M$  adalah jumlah poin konstelasi dan  $N_t$  adalah jumlah antenna pemancar.

Dari persamaan di atas, kita dapat mengambil contoh bila menggunakan modulasi BPSK dengan dengan  $N_t=N_r=4$ , maka terdapat  $2^4=16$  persamaan. Persamaan matriksnya diberikan sebagai berikut :

$$\hat{S}_{ML} = \left\| \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} & H_{1,4} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} & H_{2,4} \\ H_{3,1} & H_{3,2} & H_{3,3} & H_{3,4} \\ H_{4,1} & H_{4,2} & H_{4,3} & H_{4,4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (11)$$

Jika menggunakan modulasi BPSK, nilai dari  $S_1, S_2, S_3, S_4$  yaitu +1 atau -1. Jadi untuk mencari solusi dari *Maximum Likelihood Detection*, kita harus mencari nilai minimal dari semua 16 kombinasi  $\hat{S}_1, \hat{S}_2, \hat{S}_3, \hat{S}_4, \dots, \hat{S}_{16}$ .

$$\hat{S}_1 = \hat{S}_{+1,+1,+1,+1} = \left\| \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} & H_{1,4} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} & H_{2,4} \\ H_{3,1} & H_{3,2} & H_{3,3} & H_{3,4} \\ H_{4,1} & H_{4,2} & H_{4,3} & H_{4,4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +1 \\ +1 \\ +1 \\ +1 \end{bmatrix} \right\|^2$$

$$\hat{S}_2 = \hat{S}_{+1,+1,+1,-1} = \left\| \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} & H_{1,4} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} & H_{2,4} \\ H_{3,1} & H_{3,2} & H_{3,3} & H_{3,4} \\ H_{4,1} & H_{4,2} & H_{4,3} & H_{4,4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +1 \\ +1 \\ +1 \\ -1 \end{bmatrix} \right\|^2$$

$$\hat{S}_3 = \hat{S}_{+1,+1,-1,+1} = \left\| \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} & H_{1,4} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} & H_{2,4} \\ H_{3,1} & H_{3,2} & H_{3,3} & H_{3,4} \\ H_{4,1} & H_{4,2} & H_{4,3} & H_{4,4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +1 \\ +1 \\ -1 \\ +1 \end{bmatrix} \right\|^2$$

$$\vdots$$

$$\hat{S}_{16} = \hat{S}_{+1,-1,-1,-1} = \left\| \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} & H_{1,4} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} & H_{2,4} \\ H_{3,1} & H_{3,2} & H_{3,3} & H_{3,4} \\ H_{4,1} & H_{4,2} & H_{4,3} & H_{4,4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (12)$$

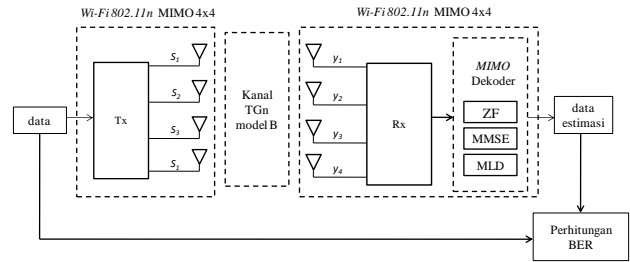
Estimasi dari simbol yang dikirimkan dipilih berdasarkan nilai minimum dari keenam belas nilai di atas:

- Jika nilai minimum adalah  $\hat{S}_1 = \hat{S}_{+1,+1,+1,+1}$  maka simbolnya adalah [1,1,1,1]
- Jika nilai minimum adalah  $\hat{S}_2 = \hat{S}_{+1,+1,+1,-1}$  maka simbolnya adalah [1,1,1,0]
- Jika nilai minimum adalah  $\hat{S}_3 = \hat{S}_{+1,+1,-1,+1}$  maka simbolnya adalah [1,1,0,1]
- Jika nilai minimum adalah  $\hat{S}_{16} = \hat{S}_{-1,-1,-1,-1}$  maka simbolnya adalah [0,0,0,0].

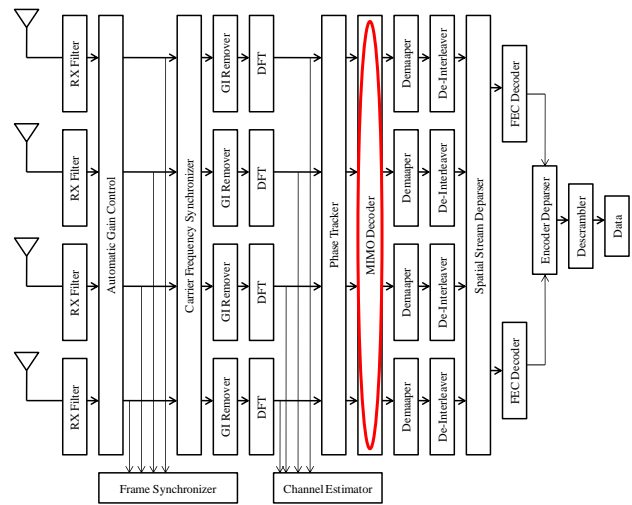
### 2.3 Perancangan Dekoder MIMO Wi-Fi 802.11n Menggunakan Antena 4x4

Perancangan dimulai dengan perancangan algoritma *Maximum Likelihood Detection* (MLD) yang kemudian disimulasikan sehingga diperoleh grafik BER (*Bit Error Rate*) vs SNR (*Signal to Noise Ratio*). Grafik ini menunjukkan kinerja sistem algoritma *Maximum Likelihood Detection* (MLD) pada dekoder MIMO Wi-Fi 802.11n, dan selanjutnya akan dibandingkan dengan algoritma deteksi *Zero Forcing* (ZF) dan *Minimum Mean*

*Square Error* (MMSE). Diagram blok perancangan sistem dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram blok perancangan sistem



Gambar 4. Blok diagram penerima Wi-Fi 802.11n dengan 4 antena

Diagram blok sisi penerima pada *Wi-Fi* 802.11n dapat dilihat pada Gambar 4. Bagian MIMO dekoder berada di penerima *Wi-Fi* 802.11n yang terletak setelah proses *Phase Tracker* dan sebelum proses *Demapper*. Langkah-langkah membuat algoritma MLD adalah sebagai berikut:

1. Inisialisasi Kandidat Simbol  
Inisialisasi kandidat simbol adalah menetapkan parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi. Sistem ini menggunakan empat antena pemancar ( $N_t$ ) dan empat antena penerima ( $N_r$ ) serta menggunakan modulasi 64 QAM, maka jumlah kandidat simbolnya adalah 16777216 kombinasi.
2. Menghitung  $H\hat{S}$   
 $H\hat{S}$  merupakan perkalian antara respon frekuensi kanal ( $H$ ) dengan semua kandidat simbol ( $\hat{S}$ ).
3. Menghitung *Euclidean Distance*  
Setelah menghitung nilai  $H\hat{S}$ , selanjutnya adalah mencari jarak *Euclidean* antara sinyal yang diterima ( $Y$ ) dengan kandidat simbol yang telah dikalikan nilai dari respon frekuensi kanal ( $H\hat{S}$ ). Nilai  $Y$  sendiri merupakan hasil perkalian antara respon frekuensi kanal ( $H$ ) dengan simbol yang dipancarkan ( $S$ ) serta telah ditambahkan derau ( $N$ ).

$$Y = HS + N$$

$$Y - H\hat{S} = (HS + N) - (H\hat{S}) \quad (13)$$

4. Mencari Nilai Minimum

Setelah semua kandidat simbol dihitung jarak *Euclidean*-nya, maka langkah selanjutnya adalah mencari nilai *minimum* dari jarak *Euclidean* dari simbol tersebut. Sebagaimana rumus dari MLD pada persamaan (9). Sesuai dengan prinsip MLD, semakin kecil (*minimum*) perbedaan sinyal yang diterima (*Y*) dengan suatu kandidat simbol, maka semakin besar (*maksimum*) kemungkinan bahwa kandidat simbol tersebut adalah informasi yang dikirim oleh pemancar.

5. Pengambilan Keputusan (*Decision*)

Setelah didapat nilai *minimum*-nya maka langkah selanjutnya adalah pengambilan keputusan untuk menggolongkan nilai *minimum* dari simbol tersebut termasuk ke dalam salah satu kandidat simbol matriks 64 QAM.

### 3. Hasil dan Analisis

Pada bab ini akan dilakukan analisis hasil kinerja *Maximum Likelihood Detection* pada *Wi-Fi* 802.11n. Analisis meliputi pembahasan hasil simulasi *Maximum Likelihood Detection* (MLD) dengan membandingkan kinerjanya berdasarkan nilai BER vs SNR dengan metode dekoder lainnya yang sudah ada pada *Wi-Fi* 802.11n yaitu *Zero Forcing* (ZF) dan *Minimum Mean Square Error* (MMSE). Selanjutnya akan dibandingkan kinerja sistem antara antenna MIMO 4x4 dan antenna MIMO 2x2, serta akan dibandingkan jumlah kompleksitas dari ke tiga dekoder di atas.

Sistem *Wi-Fi* 802.11n diujikan berdasarkan parameter yang telah ditentukan pada tabel 1. Pemilihan parameter ini akan mempengaruhi kinerja sistem. Parameter ini terdiri dari jumlah antenna pemancar dan penerima, jumlah iterasi, MCS yang digunakan, kanal yang digunakan, dan yang lainnya. Parameter sistem ini mengikuti standar 802.11n dengan *bandwidth* kanal 40 MHz.

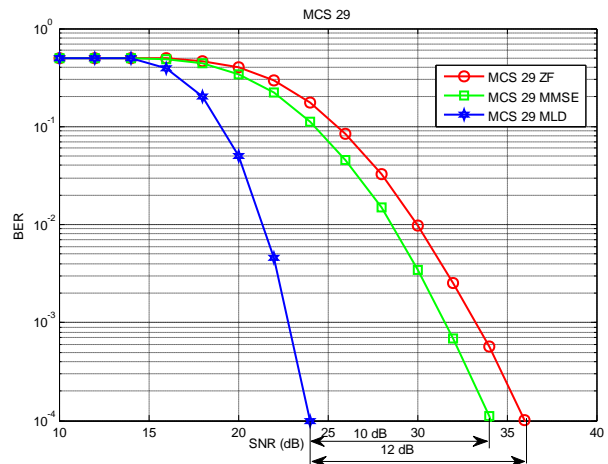
#### 3.1 Pengujian MCS 29

Pada Gambar 5, detektor ZF, MMSE, dan MLD mencapai BER yang relatif sama sampai SNR 14 dB. Namun perubahan selisih BER mulai nampak pada SNR 16 dB ke atas. Pada BER  $10^{-4}$ , ZF dapat mencapainya pada SNR 36 dB, dan MMSE pada SNR 34 dB. Sedangkan MLD mencapai BER  $10^{-4}$  pada SNR 24 dB. Hal ini menunjukkan peningkatan kinerja metode optimal MLD terhadap detektor ZF dan MMSE yaitu sebesar 12 dB dan 10 dB.

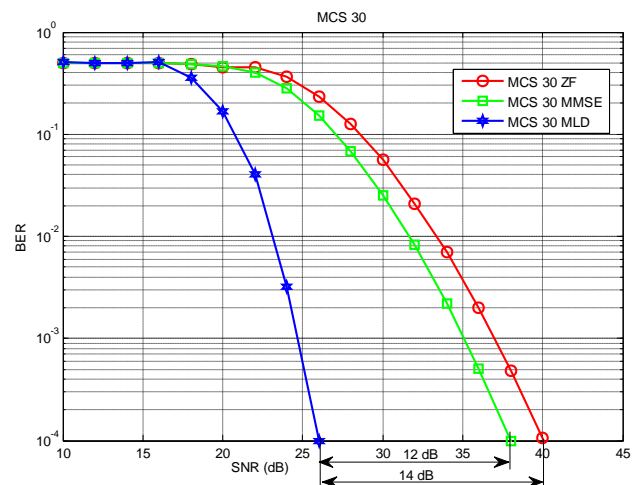
Tabel 1. Parameter pengujian

Parameter	Nilai
Jumlah paket	1000
Modulation and Coding Scheme (MCS)	29,30,31

Jumlah antenna pemancar dan penerima	4
Modulasi subcarrier	64 QAM
Laju pengkodean	2/3, 3/4, 5/6
Throughput	432, 486, 540 Mbps
MIMO dekoder	ZF, MMSE, dan MLD
Jumlah data per paket	1000 octet
Model kanal	TGn channel B
Channel code	Convolutional coding
Lebar pita	40 MHz
Guard Interval	Normal (800ns)



Gambar 5. Grafik hasil pengujian MCS 29



Gambar 6. Grafik hasil pengujian MCS 30.

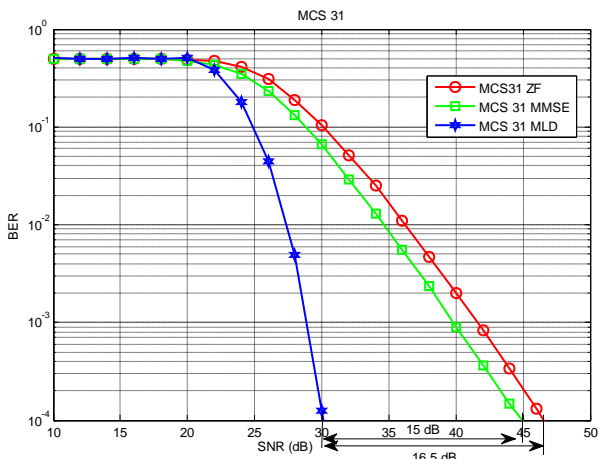
#### 3.2 Pengujian MCS 30

Pada Gambar 6, detektor ZF, MMSE, dan MLD mencapai BER yang relatif sama sampai SNR 16 dB. Namun perubahan selisih BER mulai nampak pada SNR 18 dB ke atas. Pada BER  $10^{-4}$ , ZF dapat mencapainya pada SNR 40 dB, dan MMSE pada SNR 38 dB. Sedangkan MLD mencapai BER  $10^{-4}$  pada SNR 26 dB. Hal ini menunjukkan peningkatan kinerja metode optimal MLD terhadap detektor ZF dan MMSE yaitu sebesar 14 dB dan 12 dB.

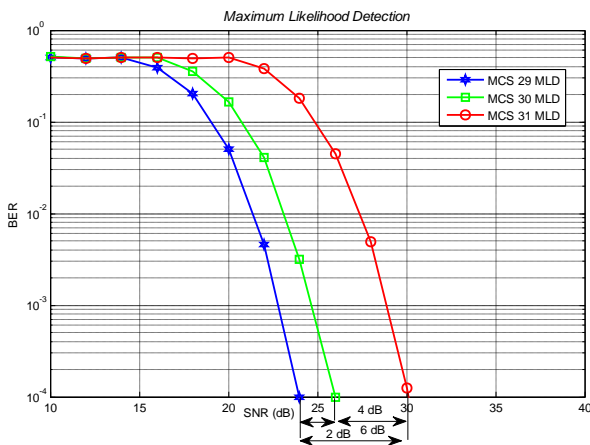


### 3.3 Pengujian MCS 31

Pada Gambar 7, detektor ZF, MMSE, dan MLD mencapai BER yang relatif sama sampai SNR 22 dB. Namun perubahan selisih BER mulai nampak pada SNR 24 dB ke atas. Pada BER  $10^{-4}$ , ZF dapat mencapainya pada SNR 46,5 dB, dan MMSE pada SNR 45 dB. Sedangkan MLD mencapai BER  $10^{-4}$  pada SNR 30 dB. Hal ini menunjukkan peningkatan kinerja metode optimal MLD terhadap detektor ZF dan MMSE yaitu sebesar 16,5 dB dan 15 dB.



Gambar 7. Grafik hasil pengujian MCS 31



Gambar 8. Grafik pengujian MLD pada MCS 29, 30 dan 31

### 3.4 Perbandingan MLD pada MCS 29, 30 dan 31

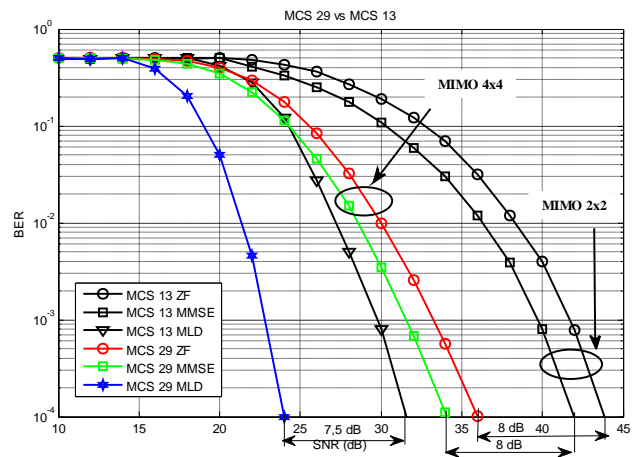
Dari pengujian MLD pada MCS 29 yang menggunakan laju pengkodean 2/3, MCS 30 dengan laju pengkodean 3/4 dan MCS 31 yang menggunakan laju pengkodean 5/6, didapatkan hasil grafik seperti pada Gambar 8.

Pada Gambar 8, detektor MLD pada MCS 29, 30 dan 31 mencapai BER yang relatif sama sampai SNR 14 dB. Namun perubahan selisih BER mulai nampak pada SNR 16 dB ke atas. Pada BER  $10^{-4}$ , MLD pada MCS 29 dapat mencapainya pada SNR 24 dB, dan MLD pada MCS 30

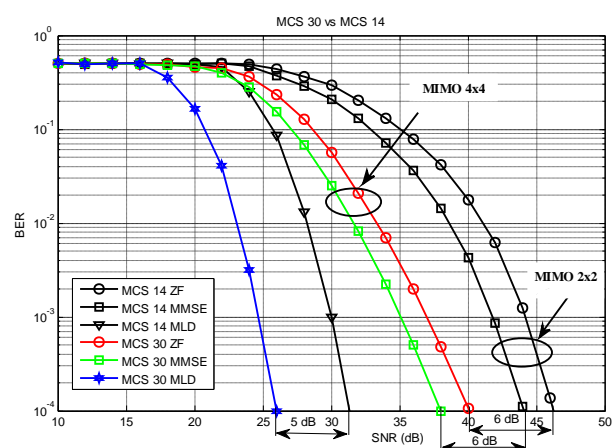
dapat mencapainya pada SNR 26 dB. Sedangkan MLD pada MCS 31 mencapai BER  $10^{-4}$  pada SNR 30 dB. Hal ini menunjukkan peningkatan kinerja metode optimal MLD pada MCS 29 dibandingkan dengan MLD pada MCS 30 dan 31, yaitu sebesar 2 dB dan 6 dB. Hal ini telah sesuai dengan teori bahwa semakin rendah laju datanya maka kinerjanya akan semakin baik.

### 3.5 Perbandingan Antena MIMO 2x2 dan 4x4

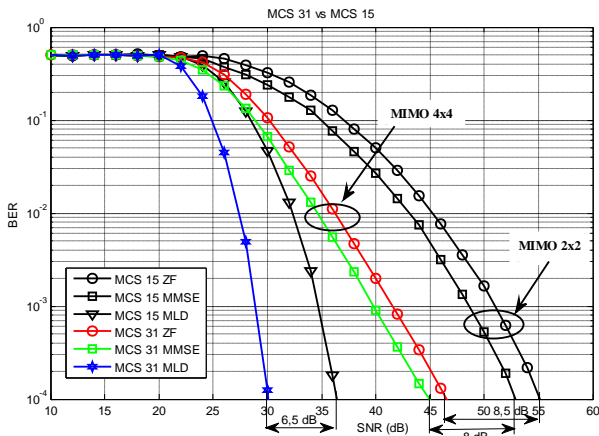
Perbandingan kinerja pada laju pengkodean 2/3 (MCS 29 dan MCS 13) dapat dilihat pada Gambar 9. Penggunaan antena MIMO 4x4 menunjukkan peningkatan kinerja terhadap antena MIMO 2x2 yaitu sebesar 8 dB untuk metode ZF, 8 dB untuk metode MMSE dan 7,5 dB untuk metode MLD.



Gambar 9. Perbandingan grafik MCS 13 dan MCS 29



Gambar 10. Perbandingan grafik MCS 14 dan MCS 30



Gambar 11. Perbandingan grafik MCS 15 dan MCS 31

Perbandingan kinerja pada laju pengkodean 3/4 (MCS 30 dan MCS 14) dapat dilihat pada Gambar 10. Penggunaan antenna MIMO 4x4 menunjukkan peningkatan kinerja terhadap antenna MIMO 2x2 yaitu sebesar 6 dB untuk metode ZF, 6 dB untuk metode MMSE dan 5 dB untuk metode MLD.

Perbandingan kinerja pada laju pengkodean 5/6 (MCS 31 dan MCS 15) dapat dilihat pada Gambar 11. Penggunaan antenna MIMO 4x4 menunjukkan peningkatan kinerja terhadap antenna MIMO 2x2 yaitu sebesar 8,5 dB untuk metode ZF, 8 dB untuk metode MMSE dan 6,5 dB untuk metode MLD.

3.6 Analisis Kompleksitas Dekoder MIMO

Pada metode ZF dan MMSE sinyal yang diterima akan dikalikan dengan *invers* matriks kanal, kompleksitasnya diberikan pada persamaan (7). Jadi jika menggunakan empat antenna pemancar, maka kompleksitasnya adalah  $4^2 + 4 = 20$ .

Metode Maximum Likelihood memiliki kinerja yang lebih optimal namun kompleksitasnya pun lebih tinggi. Ditinjau dari banyaknya jumlah *Euclidean Distance*, jumlah perhitungan *Euclidean Distance* pada MLD diberikan seperti pada persamaan (10).

Dari persamaan (10) maka dapat ditentukan jumlah kompleksitas dari MLD yaitu jumlah kombinasi dari kandidat simbolnya. Dengan menggunakan empat antenna pemancar ( $N_T=4$ ) dan modulasi 64 QAM ( $M=64$ ), maka kompleksitasnya adalah 16777216. Dari dua contoh perhitungan tersebut maka dapat dibuat tabel perbandingan kompleksitas antara ZF, MMSE, dan MLD seperti yang dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan kompleksitas ZF, MMSE, dan MLD.

Antena Pemancar	Modulasi	Kompleksitas		
		ZF	MMSE	MLD

1	64 QAM	2	2	64
2	64 QAM	6	6	64 <sup>2</sup>
3	64 QAM	12	12	64 <sup>3</sup>
4	64 QAM	20	20	64 <sup>4</sup>

4. Kesimpulan

Pada BER  $10^{-4}$ , MLD memberikan peningkatan kinerja rata-rata 14,2 dB dibandingkan metode ZF dan 12,3 dB terhadap MMSE.

Pada BER  $10^{-4}$ , konfigurasi antenna 4x4 memberikan peningkatan kinerja rata-rata 7,5 (metode ZF), 7,3 (metode MMSE) dan 6,3 (metode MLD) dibandingkan dengan konfigurasi antenna 2x2

Rasio kompleksitas MLD dibandingkan dengan ZF dan MMSE pada antenna MIMO 4x4 adalah 20 : 64<sup>4</sup>.

Untuk mengurangi kompleksitas maka diperlukan suatu metode untuk menyederhanakan prosesnya namun memiliki hasil optimal yang mendekati kinerja *Maximum Likelihood Detection* seperti *Trellis*, *Sphere*, dan *K-Best*.

Referensi

- [1] Draft STANDARD for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements, IEEE P802.11n/D9.0, March 2009.
- [2] Syaifei, W.A., Y. Nagao, R. Imashioya, M. Kurosaki, and H. Ochi. 2008. *Performance Evaluation of Low Density Parity Check CODEC for IEEE802.11n and Its RTL Design*. Smart Info-Media System in Bangkok (SISB 2008). Bangkok, Thailand.
- [3] Syaifei, W.A., Y. Nagao, R. Yohena, H. Shimajiri, T. Yoshida, M. Kurosaki, B. Sai, and H. Ochi. 2008. *Performance Evaluation of Low Density Parity Check Codes for IEEE 802.11n and Its ASIC Design*. International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2008), No. D3-AM, Don Chan Palace, Vientiane, Lao PDR.
- [4] Syaifei, W.A., Y. Nagao, R. Yohena, H. Shimajiri, T. Yoshida, M. Kurosaki, B. Sai, and H. Ochi. 2009. *Performance Evaluation and ASIC Design of LDPC Decoder for IEEE802.11n*. 6th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (IEEE CCNC 2009), No. 1569141488, Las Vegas, Nevada, USA.
- [5] Syaifei, W.A., dan H. Pratista. 2011. *Performance Evaluation of Wireless LAN IEEE802.11n by Antenna Spacing*. International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) 2011, Jogjakarta, Indonesia.
- [6] Prayogo, Reza Heri. *Implementasi Dekoder MIMO Berbasis Deteksi Maximum Likelihood pada WLAN 802.11n*. Laporan Tugas Akhir S1 Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia.
- [7] Perahia, Eldad and Stacey, Robert. 2008. *Next Generation Wireless LANs- Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n*. Cambridge University Press.

- [8] Sankar, Krishna. 2008. *MIMO with Zero Forcing equalizer*. Article at <http://www.dsplog.com/2008/10/24/mimo-zero-forcing/>
- [9] Sankar, Krishna. 2008. *MIMO with ML Equalization*. Article at <http://www.dsplog.com/2008/11/02/mimo-mmse-equalizer/>.
- [10] Jalden, Joakim. 2004. *Maximum Likelihood Detection for the Linear MIMO Channel*. Sweden.
- [11] Zelst, Allert van. 2010. *Space Division Multiplexing Algorithms*. Paper for IEEE, Eindhoven University of Technologies, Eindhoven.
- [12] Sankar, Krishna. 2008. *MIMO with ML equalization*. Article at <http://www.dsplog.com/2008/12/14/mimo-ml-equalization/>
- [13] *TGn Channel Models*, IEEE P802.11 Wireless LANs, Mei 2004.