

28291/H/06



KAPASITAS DAN BIT ERROR RATE SISTEM D-MIMO

NYOMAN GUNANTARA
2204 203 006

RTE
621.384
Gun
K-1
2006



PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	2-8-06
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	721388

PROGRAM STUDI MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TELEKOMUNIKASI MULTIMEDIA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2006

KAPASITAS DAN BIT ERROR RATE SISTEM D-MIMO

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
Di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :
NYOMAN GUNANTARA
NRP. 2204 203 006

Tanggal Ujian : 14 Juli 2006
Periode Wisuda : September 2006

Disetujui oleh Tim Penguji Tesis :

1. Dr. Ir. Gamantyo Hendranto, M.Eng (Pembimbing I)
NIP. 132 048 147 *Gunantyo 31/7/06*
2. Ir. Puji Handayani, MT (Pembimbing II)
NIP. 131 996 154
3. Dr. Ir. Wirawan, DEA (Penguji)
NIP. 131 842 501
4. Dr. Ir. Achmad Affandi, DEA (Penguji)
NIP. 131 879 394
5. Ir. Suwadi, MT (Penguji)
NIP. 132 053 513
6. Ir. Nur Adi Siswandari, MT (Penguji)
NIP. 132 093 220

Direktur Program Pascasarjana

Happy Ratna S
Prof. Ir. Happy Ratna S, MSc.,PhD.
NIP. 130 541 829

KAPASITAS DAN BIT ERROR RATE SISTEM D-MIMO

Nama Mahasiswa : Nyoman Gunantara
NRP : 2204 203 006
Pembimbing I : Dr. Ir. Gamantyo H., M.Eng
Pembimbing II : Ir. Puji Handayani, MT.

ABSTRAK

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi komunikasi, pengiriman informasi dari pemancar ke penerima menggunakan multi antena pada peralatan pemancar dan penerima. Dewasa ini, antara pemancar dan penerima yang menggunakan multi antena letaknya tidak dalam satu lokasi melainkan secara terdistribusi (D-MIMO) menggantikan multi antena dalam satu lokasi (C-MIMO). Dengan letak pemancar yang terdistribusi maka fading yang berpengaruh adalah fading skala kecil dan fading skala besar berbeda dengan pemancar yang dalam satu lokasi akan dipengaruhi oleh fading skala kecil saja. Di samping itu pada sistem D-MIMO dapat dianalogikan dengan sistem selular yaitu mempunyai daerah cakupan.

Konfigurasi D-MIMO yang digunakan untuk simulasi kapasitas kanal dan kinerja BER di mana penerima berada di titik pusat daerah cakupan adalah D-MIMO (4,2,4), (4,4,2) dan (4,8,1). Sedangkan untuk variasi spasial daerah cakupan maka konfigurasi yang digunakan adalah D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), (4,1,2), (4,4,1), dan (4,2,1). Dalam perhitungan kapasitas kanal dan kinerja BER tersebut digunakan teknik waterfilling dan pengkodean STBC orthogonal G_2 , G_3 , dan G_4 metode Tarokh. Perhitungan BER tersebut dilakukan dengan dua metode yaitu metode Quasi Analytic dan Monte Carlo.

Kapasitas kanal teroritis dan kapasitas dengan teknik waterfilling pada konfigurasi D-MIMO (4,2,4) mempunyai kapasitas yang terbesar dibandingkan D-MIMO (4,4,2) dan (4,8,1). Sedangkan pada variasi spasial, kapasitas kanal yang terbesar terjadi pada model D-MIMO (4,1,4). Hal ini disebabkan oleh adanya penguatan kanal akibat *macrodiversity*. Kinerja BER pada variasi spasial dengan konfigurasi D-MIMO (4,2,2) mempunyai kinerja BER yang paling baik. Kenyataan ini disebabkan oleh SNR yang dihasilkan paling besar. Penerapan teknik waterfilling pada D-MIMO maka kinerja BER yang paling baik terjadi pada konfigurasi D-MIMO (4,2,4). Serta penerapan pengkodean STBC pada D-MIMO maka kinerja BER berturut-turut dari yang paling buruk ke paling baik adalah terjadi pada STBC G_2 , G_3 , dan G_4 pada konfigurasi D-MIMO (4,1,4) dengan E_b/N_0 dibawah 6 dB.

Kata kunci : D-MIMO, fading skala besar, waterfilling, dan STBC.

CAPACITY AND BIT ERROR RATE D-MIMO SYSTEM

Name : Nyoman Gunantara
NRP : 2204 203 006
Supervisor : Dr. Ir. Gamantyo H., M.Eng
Co-Supervisor : Ir. Puji Handayani, MT.

ABSTRACT

Progress in science and telecommunication technology, sending information from transmitter to receiver using multiple antennas at transmitter and receiver. Recently, transmitter and receiver using multiple antennas that are not collocated, instead it is distributed (D-MIMO) changing collocated multiple antennas (C-MIMO). Because transmitter location are distributed, the effect of fading are small scale fading and large scale fading differ from transmitter with one location only effect by small scale fading. D-MIMO can be analogy by cellular system with coverage area.

D-MIMO configuration for channel capacity simulation and BER performance, where the receiver at central point of coverage area are D-MIMO (4,2,4), (4,4,2), and (4,8,1). Instead for coverage area spatial variation so the configuration that used are D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), (4,1,2), (4,4,1), and (4,2,1). Waterfilling technic and STBC G_2 , G_3 , and G_4 coding from Tarokh method are used for calculation BER performance. BER calculation are done using 2 methods are Quasi Analytic and Monte Carlo Simulation.

Theoretically channel capacity and capacity using waterfilling technic, so D-MIMO (4,2,4) configuration have the larger capacity than D-MIMO (4,4,2) and (4,8,1). Instead for spatial variation, the larger channel capacity are D-MIMO (4,1,4) model. This matter because of existence of channel gain of effect macrodiversity. BER performance for spatial variation so D-MIMO (4,2,2) having the best BER performance. This fact because SNR results biggest. The application of waterfilling technic so the best BER performance occure at D-MIMO (4,2,4) configuration. And the apply STBC encoding for D-MIMO so BER performance for worst to the best occur at STBC G_2 , G_3 , and G_4 at D-MIMO (4,1,4) configuration by E_b/N_0 of below 6 dB.

Key words : D-MIMO, large scale fading, waterfilling, and STBC

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan karunia Nya kepada penulis sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan lancar.

Buku tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan akademik Program Pasca Sarjana, Program Studi Teknik Elektro, Bidang Keahlian Telekomunikasi Multimedia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS).

Pada kesempatan ini saya sampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Gamantyo Hendrantoro, MEng dan Ibu Ir. Puji Handayani, MT selaku dosen pembimbing yang banyak memberikan pengarahan selama kegiatan penyusunan tesis ini.
2. Bapak Dr. Ir. Wirawan, DEA selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Bidang Keahlian Telekomunikasi Multimedia Pasca Sarjana ITS.
3. Bapak dan Ibu Dosen S2 yang telah banyak membantu baik secara langsung maupun tidak langsung selama kegiatan penyusunan tesis ini.
4. Teman-teman kuliah S2 Angkatan 2004, keluarga di Bali dan Surabaya, serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, yang telah memberikan dukungannya sampai penyusunan tesis ini selesai.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna, untuk itu demi perbaikan dan pengembangan tesis ini, maka kritik dan saran sangat diharapkan.

Surabaya, Juli 2006

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	3
1.4. Manfaat	3
1.5. Ruang Lingkup	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Fading	5
2.1.1. Fading Skala Kecil	5
2.1.2. Fading Skala Besar	6
2.1.2.1. Pengaruh Jarak	6
2.1.2.2. Pengaruh Shadowing	7
2.2. Diversity	10
2.3. Sistem D-MIMO	10
2.4. <i>Singular Value Decomposition (SVD)</i>	12
2.5. Waterfilling	13
2.6. Modulasi M-ary PSK	15
2.6.1. SNR Pada Subkanal	18
2.6.2. Penentuan Batas Daerah Tingkat Modulasi	19
2.7. STBC (<i>Space Time Block Coding</i>)	20

2.7.1.	Pengkodean Dan Pendekodean STBC	20
2.8.	Estimasi BER	32
2.8.1.	Simulasi Monte Carlo	32
2.8.2.	Simulasi Quasi Analytic	32
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1.	Konfigurasi Sistem D-MIMO	33
3.1.1.	Penerima Terletak Di Tengah-Tengah Daerah Cakupan	33
3.1.2.	Variasi Spasial Pada Daerah Cakupan	37
3.2.	Model Kanal D-MIMO	39
3.3.	Metodologi Perhitungan Kapasitas D-MIMO	41
3.3.1.	Perhitungan Kapasitas Teoritis D-MIMO	41
3.3.2.	Perhitungan Kapasitas Teoritis Pada Variasi Spasial Daerah Cakupan	41
3.3.3.	Perhitungan Kapasitas Dengan Teknik Waterfilling	42
3.4.	Metodologi Perhitungan Bit Error Rate Pada D-MIMO	43
3.4.1.	Perhitungan BER D-MIMO Dengan Teknik Waterfilling Pada Variasi Spasial Daerah Cakupan	43
3.4.2.	Perhitungan BER Pada D-MIMO Dengan Teknik Waterfilling	44
3.5.	Metodologi Perhitungan BER D-MIMO Dengan Pengkodean STBC	46
BAB IV	ANALISA DAN HASIL SIMULASI	48
4.1.	Kapasitas Kanal Pada D-MIMO	48
4.1.1.	Kapasitas Kanal Teoritis D-MIMO	48
4.1.2.	Kapasitas Kanal Teoritis D-MIMO Pada Variasi Spasial Daerah Cakupan	49
4.1.2.1.	Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,4)	50
4.1.2.2.	Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,2,2)	51

4.1.2.3.	Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,2)	53
4.1.2.4.	Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,4,1)	55
4.1.2.5.	Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,2,1)	57
4.1.3.	Kapasitas Kanal Dengan Teknik Waterfilling	61
4.2.	Kinerja BER D-MIMO Dengan Teknik Waterfilling	62
4.2.1.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO ...	62
4.2.1.1.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,4)	62
4.2.1.2.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,2)	64
4.2.1.3.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,2)	66
4.2.1.4.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,4,1)	68
4.2.1.5.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,1)	70
4.2.2.	BER D-MIMO Dengan Teknik Waterfilling	74
4.3.	BER D-MIMO Dengan Pengkodean STBC	75
4.4.	Diskusi	78
BAB V	PENUTUP	80
5.1.	Kesimpulan	80
5.2.	Saran	83
DAFTAR PUSTAKA	84
LAMPIRAN		
RIWAYAT HIDUP		



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1. Sistem C-MIMO (M,N)	1
Gambar 2.1. Konfigurasi D-MIMO (M,N,K)	11
Gambar 2.2. Sistem MIMO Dengan Teknik SVD Dan Waterfilling	13
Gambar 2.3. Pembagian Daya Secara Waterfilling	14
Gambar 2.4. Konstelasi M-ary PSK	16
Gambar 2.5. Kode STBC Pada D-MIMO	21
Gambar 3.1. Model D-MIMO (4,1,4)	34
Gambar 3.2. Model D-MIMO (3,1,3)	35
Gambar 3.3. Model D-MIMO (4,1,2)	36
Gambar 3.4. Model D-MIMO (4,2,1)	36
Gambar 3.5. Model D-MIMO (4,1,4)	37
Gambar 3.6. Model D-MIMO (4,1,2)	38
Gambar 3.7. Model D-MIMO (4,2,1)	38
Gambar 3.8. Diagram Alir Pemodelan Kanal D-MIMO	40
Gambar 4.1. Kapasitas Kanal Teoritis D-MIMO	49
Gambar 4.2. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,4)	50
Gambar 4.3. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,2,2)	52
Gambar 4.4. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,2)	54
Gambar 4.5. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,4,1)	56
Gambar 4.6. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,2,1)	58
Gambar 4.7. Kapasitas Kanal Dengan Teknik Waterfilling	61

Gambar 4.8.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,4)	63
Gambar 4.9.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,2)	65
Gambar 4.10.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,2)	67
Gambar 4.11.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,4,1)	69
Gambar 4.12.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,1)	71
Gambar 4.13.	BER D-MIMO Dengan Teknik Waterfilling	74
Gambar 4.14.	Kinerja BER D-MIMO Pada STBC G_2 , G_3 , dan G_4	75
Gambar 4.15.	Kinerja BER D-MIMO Pada STBC G_2 , G_3 , dan G_4 Dengan Antena Penerima Satu Buah	76
Gambar 4.16.	Kinerja BER D-MIMO Pada STBC G_2 , G_3 , dan G_4 Dengan Port Pemancar Satu Buah	77

DAFTAR TABEL

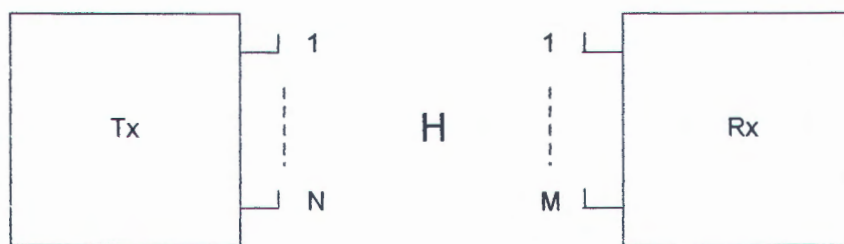
		Halaman
Tabel 2.1.	Pangkat Dari Jarak	8
Tabel 2.2.	Pengukuran Standar Deviasi Dari Shadowing Pada Beberapa Bangunan	9
Tabel 2.3.	Batas Daerah SNR Untuk Modulasi M-ary PSK	19
Tabel 2.4.	Urutan Pentransmisian Kode G_2 Pada D-MIMO (2,1,2)	22
Tabel 2.5.	Urutan Pentransmisian Kode G_3 Pada D-MIMO (3,1,3)	24
Tabel 2.6.	Urutan Pentransmisian Kode G_4 Pada D-MIMO (4,1,4)	28
Tabel 4.1.	Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,4)	51
Tabel 4.2.	Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,2,2)	53
Tabel 4.3.	Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,2)	55
Tabel 4.4.	Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,4,1)	57
Tabel 4.5.	Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,2,1)	59
Tabel 4.6.	Kapasitas Dan Probabilitas Kapasitas Pada Konfigurasi D-MIMO	60
Tabel 4.7.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,4)	64
Tabel 4.8.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,2)	66
Tabel 4.9.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,2)	68
Tabel 4.10.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,4,1)	70
Tabel 4.11.	Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,1)	72
Tabel 4.12.	BER Maksimum Dan Probabilitas BER Pada Konfigurasi D-MIMO	73

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Awal ditemukannya teknologi komunikasi nirkabel, pengiriman informasi dari pemancar ke penerima menggunakan antena tunggal pada peralatan pemancar dan penerima. Informasi yang akan dikirim dilakukan proses modulasi selanjutnya dilewatkan pada antena untuk kemudian dipancarkan. Pada penerima, informasi diterima oleh antena kemudian dilakukan proses demodulasi untuk mendapatkan sinyal informasi yang dikirim. Sistem ini disebut SISO (*Single Input Single Output*).

Dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi komunikasi, pengiriman informasi dari pemancar ke penerima menggunakan multi antena pada peralatan pemancar dan penerima. Teknik ini disebut C-MIMO (*Conventional Collocated Multi Input Multi Output*) dapat dilihat pada Gambar 1.1 [1].



Gambar 1.1. Sistem C-MIMO (M,N)

Banyak keuntungan yang didapatkan dengan menerapkan teknik C-MIMO. Pertama, efisiensi spektrum dimana terbatasnya spektrum frekuensi untuk

komunikasi nirkabel. Kedua, daya pancar yang digunakan untuk mengirimkan informasi menjadi berkurang dengan menerapkan diversity pada pemancar. Ketiga, informasi yang dapat dikirimkan menjadi bertambah karena kapasitas kanal meningkat [2].

Dewasa ini, antara pemancar dan penerima yang menggunakan multi antena letaknya tidak dalam satu lokasi melainkan secara terdistribusi yang disebut D-MIMO (*Distributed MIMO*) dapat dilihat pada Gambar 2.1. Sistem D-MIMO dianalogikan dengan sistem selular, port-port pemancar sebagai BTS sedangkan peralatan penerima sebagai stasiun bergerak. Sehingga sistem D-MIMO mempunyai daerah cakupan. Kelebihan D-MIMO dibandingkan C-MIMO adalah mudah dalam perencanaan sel dan memperpendek jarak akses pemancar dan penerima, dan *macrodiversity*.

Pada D-MIMO port pemancar letaknya terdistribusi mengakibatkan sinyal terima akan mengalami fading yang berbeda dengan C-MIMO. C-MIMO hanya dipengaruhi oleh fading skala kecil, sedangkan D-MIMO selain dipengaruhi fading skala kecil juga dipengaruhi fading skala besar.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan di atas, maka dapat di buat suatu perumusan masalah yaitu :

- Bagaimana karakteristik kapasitas kanal dan kinerja sistem D-MIMO jika penerima berada pada posisi di tengah-tengah daerah cakupan ?
- Bagaimana karakteristik spasial kapasitas kanal dan kinerja BER sistem D-MIMO pada daerah cakupan ?

- ☑ Bagaimana kinerja BER dari pengkodean blok dalam ruang dan waktu (STBC) pada sistem D-MIMO ?

1.3. Tujuan

Dari penulisan tesis ini diharapkan dapat diketahui beberapa hal sebagai berikut :

- ✎ Kapasitas kanal dan kinerja BER sistem D-MIMO untuk penerima yang berada pada posisi di tengah-tengah daerah cakupan.
- ✎ Variasi spasial kapasitas kanal dan kinerja BER sistem D-MIMO pada daerah cakupan.
- ✎ Kinerja BER dari pengkodean blok dalam ruang dan waktu (STBC) pada sistem D-MIMO.

1.4. Manfaat

Dari hasil penelitian ini diharapkan diperoleh informasi mengenai sistem D-MIMO dalam hal kapasitas kanal dan kinerja BER serta penerapan pengkodean blok dalam ruang dan waktu dan kinerja pengkodean pada sistem D-MIMO. Hasil penelitian ini juga memberikan pertimbangan dalam pemilihan konfigurasi pada perencanaan sistem D-MIMO. Dalam perencanaan sistem D-MIMO itu apakah sisi kapasitas kanal yang akan diutamakan atau sisi kinerjanya yang ditonjolkan bahkan diambil kedua-duanya.

1.5. Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penulisan tesis ini adalah sebagai berikut :

- ↳ Pada sistem D-MIMO ini diterapkan multipleks spasial pada port-port pemancar.
- ↳ Daerah cakupan D-MIMO berbentuk bujur sangkar ukuran $10 \times 10 \text{ km}^2$.
- ↳ Noise yang digunakan adalah *Additive White Gaussian Noise* (AWGN).
- ↳ Dalam simulasi kapasitas kanal dan kinerja sistem D-MIMO digunakan teknik Waterfilling.
- ↳ Simulasi kinerja BER D-MIMO pada pengkodean STBC dilakukan pada kode G_2 , G_3 , dan G_4 .
- ↳ Modulasi yang digunakan pada simulasi ini adalah MPSK variabel yaitu modulasi BPSK, QPSK, dan 8-PSK.
- ↳ Pada simulasi kinerja sistem D-MIMO digunakan dua simulasi yaitu Quasi Analytic dan Monte Carlo.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas tentang pustaka-pustaka yang berkaitan dengan pembahasan yaitu fading, diversity, sistem D-MIMO, teknik SVD, teknik Waterfilling, modulasi M-ary PSK, dan pengkodean STBC.

2.1. Fading

Kanal nirkabel memiliki banyak tantangan sebagai media untuk komunikasi data yang cepat dan handal. Transmisi sinyal informasi dari pemancar ke penerima pada sistem D-MIMO akan mengalami fading. Fading didefinisikan sebagai fenomena fluktuasi acak level sinyal yang diterima, yang disebabkan oleh banyaknya lintasan pada transmisi sinyal.

Fading dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu fading skala besar dan fading skala kecil [3].

2.1.1. Fading Skala Kecil

Fading skala kecil digunakan untuk menjelaskan perubahan fluktuasi amplitudo sinyal radio pada periode waktu dan jarak yang pendek. Fading disebabkan oleh interferensi antara dua atau lebih variasi sinyal yang ditransmisikan yang datang di penerima dengan perbedaan waktu yang kecil, yang biasanya disebut dengan gelombang lintasan jamak (*multipath*).

Tipe fading skala kecil dapat dibedakan berdasarkan parameter kanal seperti penyebaran waktu tunda (*time delay spread*) dan *doppler spread* serta parameter

sinyal seperti lebarpita (*bandwidth*) dan periode simbol. Ada 2 (dua) macam fading yang ditimbulkan yaitu fading rata (*flat fading*) dan fading frekuensi selektif (*frequency selective fading*).

Pada umumnya distribusi amplitudo pada fading rata akibat lintasan jamak mengikuti distribusi Rayleigh. Sedangkan entri-entri kanal dari fading rata dianggap berdistribusi sama dan saling bebas (*independent and identically distributed, i.i.d*) dengan variabel acak Gaussian kompleks dengan rata-rata 0 dan varians 1. Sehingga pemodelan kanalnya dapat ditulis sebagai berikut :

$$\mathbf{h} = \mathbf{a} + j\mathbf{b} \quad (2-1)$$

di mana $\mathbf{a}, \mathbf{b} \sim N(0, \frac{1}{\sqrt{2}})$

2.1.2. Fading Skala Besar

Fading skala besar berhubungan dengan rugi-rugi lintasan sinyal sebagai fungsi jarak dan *shadowing* yang disebabkan oleh obyek yang besar seperti bangunan dan perbukitan. Ini terjadi seperti peralatan *mobile* berpindah melalui jarak pada daerah cakupan MIMO terdistribusi.

2.1.2.1. Pengaruh Jarak

Suatu sinyal dengan daya pancar P_t dikirim melalui kanal nirkabel maka pada jarak sejauh d pada kondisi ruang bebas akan diterima daya terima P_r sebesar yaitu [4] :

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2 \quad (2-2)$$

di mana :

G_t = gain pada antenna pemancar (dB)

G_r = gain pada antenna penerima (dB)

d = jarak antara pemancar dan penerima (m)

λ = panjang gelombang sinyal (m)

Rugi-rugi lintasan L pada kanal adalah perbandingan daya pancar terhadap daya terima. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$L = \frac{P_t}{P_r} = \frac{1}{G_t G_r} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2-3)$$

Pada kondisi ruang bebas maka rugi-rugi lintasan sebanding dengan kuadrat dari jarak lintasan. Sehingga secara umum maka rugi-rugi lintasan dapat ditulis menjadi $L \sim d^n$. Oleh karena itu persamaan (2-2) dapat ditulis menjadi berikut :

$$P_r \sim P_t G_t G_r d^{-n} \quad (2-4)$$

Pangkat n dari persamaan (2-4) merupakan pangkat dari jarak lintasan yang ditentukan oleh kondisi daerah dimana lintasan sinyal berada. Berikut ini beberapa nilai dari pangkat jarak lintasan sinyal dapat dilihat pada Tabel 2.1 [5]. Sebagai contoh untuk daerah urban bershadowing n bernilai 3 sampai 5. Pada tesis ini nilai n ditentukan sebesar 4.



2.1.2.2. Pengaruh *Shadowing*

Sinyal yang dikirim melalui nirkabel apabila melewati suatu obyek penghalang maka sinyal tersebut akan mengalami hamburan dan pemantulan. Variasi acak sinyal yang diterima karena pengaruh tersebut dimodelkan. Model yang umum

digunakan adalah log-normal shadowing. Model ini sangat cocok digunakan untuk lingkungan luar gedung maupun dalam gedung.

Tabel 2.1. Pangkat Dari Jarak [5]

Lingkungan	Pangkat Dari Jarak (n)
Ruang Bebas	2
Urban	2,7 – 3,5
Urban dengan shadowing	3 - 5
LOS dalam Gedung	1,6 – 1,8
Penghalang dalam Gedung	4 - 6
Penghalang dalam Pabrik	2 - 3

Distribusi log-normal shadowing secara umum didefinisikan oleh dua parameter yaitu rata-rata dan standar deviasi. Beberapa nilai standar deviasi pada beberapa bangunan dapat dilihat pada Tabel 2.2. Pada tesis ini digunakan rata-rata 0 dan standar deviasi 8 dB untuk model kanal akibat pengaruh shadowing.

Apabila shadowing ikut berpengaruh pada lintasan sinyal disamping pengaruh jarak maka daya terima P_r pada persamaan (2-4) dapat ditulis sebagai berikut [5]:

$$P_r \sim P_t G_t G_r d^{-n} \cdot 10^{\frac{\sigma}{10}} \quad (2-5)$$

di mana :

$$\sigma = \text{standar deviasi (dB)}$$

Tabel 2.2. Pengukuran Standar Deviasi dari Shadowing pada
Beberapa Bangunan [5]

Bangunan	Frekuensi (MHz)	σ (dB)
Toko Eceran	914	8,7
Toko Grosir	914	5,2
Kantor, Partisi Keras	1500	7,0
Kantor, Partisi Lunak	900	9,6
Kantor, Partisi Lunak	1900	14,1
Pabrik LOS		
Tekstil / Kimia	1300	3,0
Tekstil / Kimia	4000	7,0
Kertas	1300	6,0
Kerajinan Besi	1300	5,8
Rumah Sub Urban		
Lorong Jalan	900	7,0
Pabrik Ada Halangan		
Tekstil / Kimia	4000	9,7
Kerajinan Besi	1300	6,8

Pada sistem MIMO konvensional, fading yang berpengaruh adalah hanya fading skala kecil. Sedangkan pada sistem MIMO terdistribusi selain dipengaruhi fading skala kecil juga dipengaruhi fading skala besar. Sehingga pemodelan kanalnya menjadi berbeda pula. Model kanal pada sistem MIMO yang terdistribusi dapat ditulis menjadi berikut :

$$\mathbf{H}_d \sim \sqrt{P_t G_t G_r d^{-n} \cdot 10^{\frac{\sigma}{10}}} \cdot \mathbf{h} \quad (2-6)$$

Jika P_t , G_t , G_r bernilai konstan maka kanal D-MIMO dapat ditulis menjadi berikut :

$$\mathbf{H}_d \sim \sqrt{d^{-n} \cdot 10^{\frac{\sigma}{10}}} \cdot \mathbf{h} \quad (2-7)$$

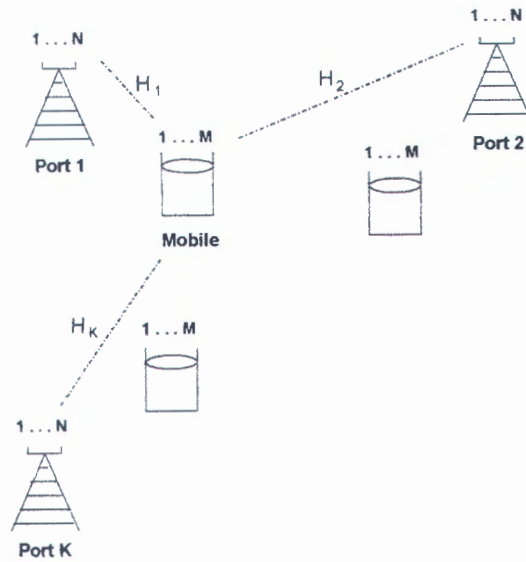
2.2. Diversity

Diversity adalah teknik yang digunakan untuk mengurangi fading akibat adanya lintasan jamak dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja dari propagasi nirkabel. Secara nyata, diversity adalah mengkombinasikan beberapa sinyal untuk mengurangi adanya fading. Ada beberapa macam diversity yaitu antara lain diversity waktu, diversity frekuensi, diversity polarisasi, diversity ruang maupun lainnya [5].

Diversity yang paling sederhana adalah diversity ruang atau yang biasa disebut diversity antenna. Diversity ruang bisa diterapkan pada pemancar maupun pada penerima. Apabila diversity ruang diterapkan pada pemancar maka disebut diversity pemancar sedangkan diversity ruang diterapkan pada penerima disebut diversity penerima. Diversity penerima merupakan penerimaan sinyal yang sama secara bersama melalui kanal nirkabel menggunakan dua atau lebih antenna penerima. MIMO adalah penerapan teknik diversity ruang pada pemancar dan penerima.

2.3. Sistem D-MIMO

Sistem D-MIMO merupakan sistem MIMO terdistribusi dengan M jumlah antenna penerima yang dikelilingi oleh banyaknya K port dengan N jumlah antenna pemancar. Dapat ditulis sebagai D-MIMO (M,N,K) [2]. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Konfigurasi D-MIMO (M,N,K) [2]

Berbeda dengan sistem MIMO konvensional, pada sistem MIMO terdistribusi terjadi adanya daerah cakupan akibat port pemancar letaknya tersebar. Luas daerah cakupan tergantung dari posisi masing-masing port pemancar. Sehingga respon kanal yang dihasilkan dari kedua jenis MIMO ini juga berbeda. Model kanal pada sistem MIMO terdistribusi dapat ditulis seperti pada persamaan (2-7).

Untuk D-MIMO (M,N,K) pada sistem komunikasi pita sempit maka matriks kanalnya dapat ditulis sebagai berikut :

$$\mathbf{H}_d = \begin{bmatrix} h_{d111} & h_{d121} & h_{d112} & h_{d1N2} & \dots & h_{d11K} \\ h_{d211} & h_{d221} & h_{d212} & h_{d2N2} & \dots & h_{d21K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{dM11} & h_{dM21} & h_{dM12} & h_{dMN2} & \dots & h_{dMNK} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

Dari matriks kanal yang diperoleh maka kapasitas dari sistem D-MIMO dapat ditentukan melalui persamaan Shannon berikut [2] :

$$C = \log_2 \det \left[I_M + \frac{\rho}{(N.K)} \mathbf{H}_d \cdot \mathbf{H}_d^* \right] \quad (2-9)$$

di mana :

$$\rho = \text{SNR}$$

$$\mathbf{H}_d = \text{matriks kanal ; } * = \text{konjugat transpose (Hermitian)}$$

$$M = \text{jumlah antena penerima}$$

$$NK = \text{jumlah antena pemancar}$$

Pada sistem D-MIMO ini diaplikasikan teknik dekomposisi nilai singular (*Singular Value Decomposition* atau SVD) dan teknik Waterfilling. Adapun kedua teknik tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2.

2.4. *Singular Value Decomposition* (SVD)

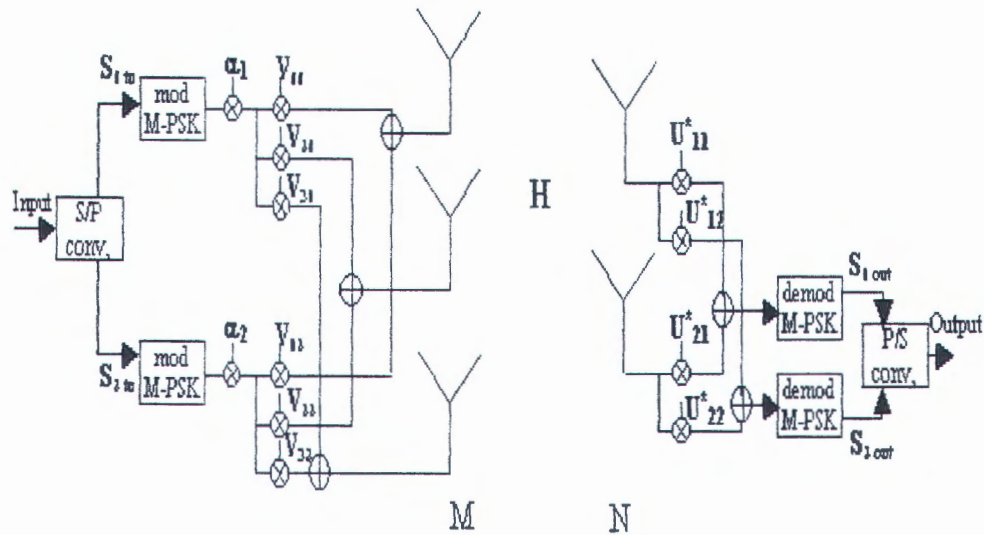
Singular Value Decomposition adalah dekomposisi nilai singular pada matriks respon kanal. Pada proses ini akan dihasilkan dua matriks unitary yaitu \mathbf{U} dan \mathbf{V} yang merupakan matriks multipleks dan demultipleks yang digunakan pada pemancar dan penerima. Matriks unitary dari proses itu dapat dilihat pada persamaan berikut [6] :

$$\mathbf{H}_d = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}' \quad (2-10)$$

$$\text{Dimana } \mathbf{H}_d \in \mathbb{C}^{M \times NK}, \mathbf{U} \in \mathbb{C}^{M \times M}, \mathbf{V} \in \mathbb{C}^{NK \times NK} \text{ dan } \mathbf{S} \in \mathbb{R}^{M \times NK}$$

Matriks \mathbf{S} adalah matriks diagonal non-negatif. Nilai-nilai matriks diagonal \mathbf{S} adalah akar nonnegatif dari nilai eigen $\mathbf{H}_d \mathbf{H}_d'$.

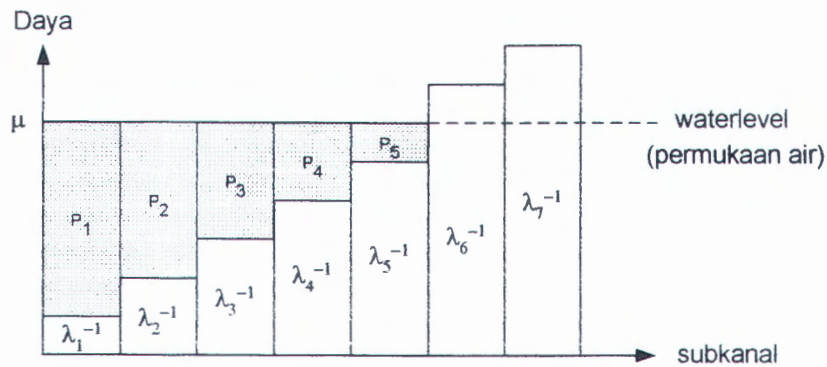
Matriks multipleks dan demultipleks yang akan digunakan pada pemancar dan penerima tergantung dari jumlah minimal dari banyaknya antena pemancar (N, K) dan penerima M yaitu $\min(M, N, K)$.



Gambar 2.2. Sistem MIMO dengan teknik SVD dan Waterfilling [6]

2.5. Waterfilling

Waterfilling merupakan metode pembagian daya pada sub-sub kanal untuk meningkatkan kapasitas. Teknik waterfilling erat hubungannya dengan teknik dekomposisi nilai singular. Bila tiap tiap subkanal pada sistem memiliki gain λ_i yang merupakan nilai eigen yaitu kuadrat dari komponen-komponen diagonal matriks S , maka subkanal dengan gain terbesar akan mendapat porsi daya yang besar pula seperti terlihat pada Gambar 2.3.[7]



Gambar 2.3. Pembagian Daya Secara Waterfilling [7]

Notasi P_i menjelaskan daya yang diberikan untuk tiap subkanal, jumlah variabel i adalah $1 \leq i \leq S_k$ dimana S_k adalah jumlah subkanal, yang adalah $\min(M, N, K)$. Besarnya daya tiap subkanal P_i adalah sebagai berikut :

$$P_i = (\mu - \lambda_i^{-1}) \quad (2-11)$$

Pada metoda *waterfilling* bila ada subkanal yang memiliki gain sangat kecil, ditandai λ_i^{-1} berada di atas *waterlevel* μ , maka kanal tersebut tidak digunakan dan alokasi dayanya adalah nol. Pencarian *waterlevel* seperti pada Gambar 2.3 dapat dilakukan secara mudah dengan menjumlahkan P_i dengan semua λ_i^{-1} , kemudian hasilnya dibagi dengan jumlah subkanal. P_i ditetapkan yaitu $\min\{M, N, K\}$. Sehingga persamaan *waterlevel* μ dapat ditulis sebagai berikut :

$$\mu = \frac{1}{S_k} \left[P_t + \sum_{i=1}^{S_k} \frac{1}{\lambda_i} \right] \quad (2.12)$$

Perhitungan P_i pada persamaan (2-11) dilakukan sampai semua P_i didapati bernilai positif. Nilai-nilai P_i yang didapat digunakan untuk menentukan faktor pembobot *waterfilling* α_i , besarnya adalah $\sqrt{P_i}$. Faktor pembobot ini akan diletakkan pada bagian input sistem setelah proses multipleksing data, seperti yang terlihat pada Gambar 2.2.

2.6. Modulasi M-ary PSK

Dalam sistem modulasi *phase shift keying* (PSK), bit-bit informasi diubah dalam bentuk gelombang pembawa dengan fasa tertentu. Bentuk umum dari sinyal yang telah dimodulasi M-ary PSK adalah sebagai berikut :

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_c t + \theta_i), \quad i = 1, 2, \dots, M_{ary}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (2-13)$$

di mana :

$$\theta_i = \frac{2\pi(i-1)}{M_{ary}}, \quad i = 1, 2, \dots, M_{ary}$$

$$E = \int_0^T s_i^2(t) dt$$

E adalah energi sinyal yang besarnya sama untuk semua sinyal dan M_{ary} adalah level modulasi. Persamaan (2-13) dapat ditulis ulang dalam bentuk yang sedikit berbeda yaitu :

$$\begin{aligned} s_i(t) &= \sqrt{E} \left[\cos(\theta_i) \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t) - \sin(\theta_i) \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(2\pi f_c t) \right] \\ &= \sqrt{E} [\cos(\theta_i) \phi_1(t) - \sin(\theta_i) \phi_2(t)] \end{aligned} \quad (2-14)$$

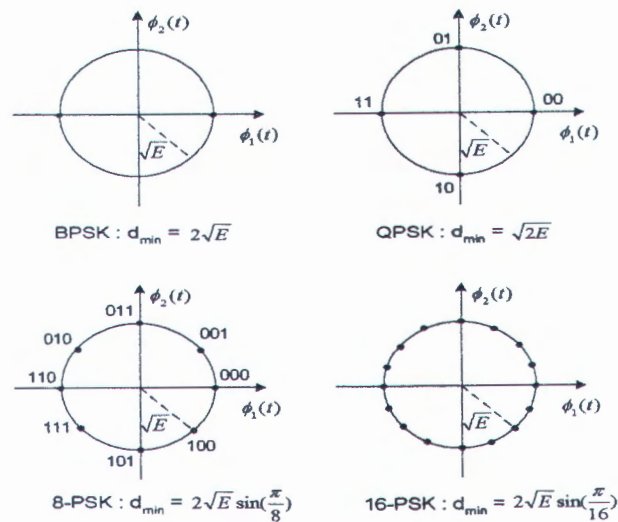
di mana :

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t)$$

$$\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(2\pi f_c t)$$

$\phi_1(t)$ dan $\phi_2(t)$ dapat mudah dikenali sebagai ortonormal.

Pada M-ary PSK pemisahan antara pembawa yang fasanya bersebelahan adalah sebesar $2\pi/M_{\text{ary}}$. Untuk BPSK pemisahannya sebesar π , untuk 4-PSK pemisahannya $\pi/2$ sedangkan untuk 8-PSK sebesar $\pi/4$. Untuk lebih jelasnya sinyal M-ary PSK dapat digambarkan dalam diagram phasor seperti pada Gambar 2.4. Ambang batas untuk daerah keputusan (*decision region*) pada M-ary PSK terletak di tengah besaran sudut pemisah θ_i , sehingga keputusan yang benar dapat dibuat apabila fasa sinyal yang diterima diantara $\pm \pi/M_{\text{ary}}$ dari fase sinyal yang dikirimkan.



Gambar 2.4. Konstelasi M-ary PSK

Dalam kanal dengan *additive white noise gaussian (AWGN)* probabilitas kesalahan BPSK, QPSK, dan 8-PSK dapat dinyatakan sebagai berikut [8] :

BPSK :

$$P_s = Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right) \quad (2-15)$$

QPSK :

$$P_s = 2Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right)\left[1 - \frac{1}{2}Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right)\right] \quad (2-16)$$

M-ary PSK, untuk $M_{ary} > 4$:

$$P_s = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0} \sin \frac{\pi}{M_{ary}}}\right) \quad (2-17)$$

dimana P_s adalah probabilitas kesalahan simbol, $E_s = E_b (\log_2 M_{ary})$ adalah energi tiap simbol. Persamaan (2-15), (2-16), dan (2-17) nantinya akan digunakan sebagai pembatas untuk menentukan jenis modulasi yang akan digunakan pada tiap subkanal MIMO dengan alokasi daya waterfilling.

Setelah ditemukan P_s , maka dapat dihitung P_b dari persamaan berikut :

$$P_b \cong \frac{P_s}{\log_2(M_{ary})} \quad (2-18)$$

Persamaan (2-18) valid jika diterapkan Gray coding. Sedangkan fungsi Q dapat dihitung dari persamaan berikut :

$$Q(x) = 0.5 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (2-19)$$

2.6.1. SNR Pada Subkanal

Mengingat tiap subkanal yang berbeda, pada sistem berskema *SVD*, memiliki gain yang berbeda, maka penggunaan modulasi dengan tingkat modulasi yang berbeda menjadi cara yang baik untuk memperoleh kapasitas yang lebih tinggi. Simulasi ini memerlukan perhitungan SNR dari tiap subkanal untuk dapat mengimplementasikan tingkat modulasi yang berbeda di tiap subkanal. Daya terima pada matriks kanal dapat ditulis sebagai berikut [9] :

$$E\{|\tilde{y}_i|^2\} = \lambda_i^2 E\{|x_i|^2\} + E\{|\tilde{n}_i|^2\} \quad (2-20)$$

di mana :

y_i = sinyal yang diterima

x_i = sinyal yang dikirim

n_i = noise

Pada persamaan (2-20) λ_i adalah kuadrat dari komponen-komponen matriks *S* pada persamaan (2-10). Pada persamaan (2-20) kita menggunakan asumsi bahwa x_i dan \tilde{n}_i bersifat independen secara statistik. Dari persamaan di atas daya sinyal yang diterima adalah $\lambda_i^2 E\{|x_i|^2\}$ dan daya noise $E\{|\tilde{n}_i|^2\} = \sigma^2$. Maka SNR untuk tiap subkanal adalah :

$$\rho_i = \frac{\lambda_i^2 E\{|x_i|^2\}}{\sigma^2} \quad (2-21)$$

Daya simbol yang dipancarkan $E\{|x_i|^2\}$ tergantung pada strategi alokasi daya yang diterapkan, dalam hal ini metoda waterfilling. Nilai SNR tiap subkanal inilah yang digunakan untuk menentukan tingkat modulasi yang dipakai untuk subkanal tersebut.

2.6.2. Penentuan Batas Daerah Tingkat Modulasi

Teknik waterfilling mensyaratkan penggunaan tingkat modulasi yang bervariasi untuk tiap subkanalnya, guna meningkatkan kapasitas sistem secara signifikan. Pada tesis ini digunakan tiga tingkat modulasi M-ary PSK, yaitu: BPSK, QPSK, dan 8-PSK. Sistem memerlukan batas daerah yang jelas guna memudahkan penentuan jenis modulasi yang digunakan tiap subkanal. Penentuan batas daerah didasarkan pada rumus probabilitas kesalahan pada persamaan (2-15), (2-16), dan (2-17).

Penentuan batas daerah tiap tingkat modulasi dilakukan pada nilai P_e (*Probability of error*) sebesar 10^{-4} . Penggunaan nilai acuan ini berdasarkan jumlah bit yang dibangkitkan yaitu sebesar 100.000 bit. Batas daerah SNR untuk tiap modulasi dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Batas Daerah SNR Untuk Modulasi M-ary PSK

Tidak ada transmisi data	$\text{SNR} < 8.40 \text{ dB}$
BPSK	$8.40. \text{ dB} \leq \text{SNR} < 11.41 \text{ dB}$
QPSK	$11.41 \text{ dB} \leq \text{SNR} < 16.50 \text{ dB}$
8-PSK	$\text{SNR} \geq 16.50 \text{ dB}$

SNR yang digunakan dalam batas daerah ini adalah SNR tiap subkanal. Apabila ada subkanal dengan SNR dibawah 8.4 dB (batas bawah BPSK), maka tidak ada transmisi data pada subkanal yang bersangkutan dan semua aliran data dialihkan pada subkanal yang memenuhi syarat batas daerah pada Tabel 2.3.

Besarnya nilai SNR setelah melalui teknik waterfilling pada tiap subkanal adalah penjumlahan SNR awal dengan daya waterfilling dan nilai eigen λ_i . Secara matematis dapat ditulis pada persamaan berikut :

$$(SNR)_j = (SNR) + 10 \log_{10} P_w + 10 \log_{10} \lambda_i \quad (2-22)$$

di mana :

$$P_w = P_i / P_t = \text{daya waterfilling}$$

2.7. STBC (*Space Time Block Coding*)

STBC merupakan suatu teknik pengkodean blok dalam ruang dan waktu. Maksudnya adalah pengkodean yang disusun dari beberapa simbol dalam satu ruang yang dikirimkan melalui teknik diversity ruang melalui beberapa periode waktu. Setiap periode pengiriman, akan dikirimkan simbol-simbol yang berbeda. Dalam sistem antena jamak, informasi dapat dikirimkan dengan teknik pemancar diversity loop terbuka [10]. Pada teknik ini semua antena mengirimkan informasi secara bersamaan. Daya tiap-tiap antena pemancar adalah daya total pemancar dibagi dengan jumlah antena pemancar yaitu $P_t / N.K$. Simbol-simbol yang dikirimkan pada antena yang telah dikodekan dalam ruang dan waktu akan memperoleh simbol yang orthogonal.

2.7.1. Pengkodean dan Pendekodean STBC

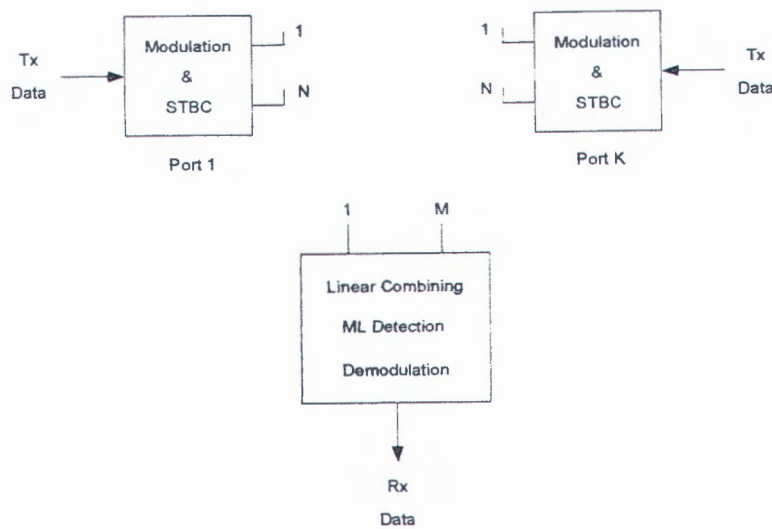
Pada tesis ini, pengkodean blok dalam ruang dan waktu akan dikirimkan melalui MIMO terdistribusi. Setiap port pemancar akan mengirimkan simbol-simbol

hasil pengkodean secara bersamaan. Blok diagram dari sistem STBC pada MIMO terdistribusi dapat dilihat pada Gambar 2.5.

Pengkodean STBC biasanya ditulis dalam bentuk matriks yaitu p baris dan n kolom dari matriks G . Nilai-nilai dari matriks G adalah kombinasi linier dari variabel s_1, s_2, \dots, s_k dan konjugatnya.

Sebagai contoh adalah STBC G_2 :

$$G_2 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (2-23)$$



Gambar 2.5. Kode STBC Pada D-MIMO

Pada kode STBC G_2 , bit data yang dikirim dikodekan menjadi s_1, s_2 , dan konjugatnya. Pada waktu t sinyal r_t^j diterima pada antena ke- j diberikan persamaan berikut :

$$r_t^j = \sum_i^{(NK)} h_{d,j,i} s_t^i + n_t \quad (2-24)$$

di mana :

$$j = 1, 2, \dots, M$$

n_t = noise yang merupakan variabel acak Gaussian kompleks dengan rata-rata nol dan varians $\frac{1}{2SNR}$.

Kode STBC G_2 memiliki *code rate* $R = k/p$ dimana k merupakan sinyal konstelasi dari G_2 dan p merupakan slot waktu $t = 1, 2, \dots, p$. Sehingga STBC G_2 mempunyai *code rate* = 1. Ilustrasi dari kode STBC G_2 dapat dilihat pada Tabel 2.4 yaitu :

Tabel 2.4. Urutan Pentransmision Kode G_2 Pada D-MIMO (2,1,2)

	Antena Port 1	Antena Port 2
Waktu t	s_1	s_2
Waktu t+T	$-s_2^*$	s_1^*

Sehingga pada penerima diterima sinyal berikut :

$$\begin{aligned} r_{11} &= h_{d111} s_1 + h_{d112} s_2 + n_1 \\ r_{21} &= h_{d211} s_1 + h_{d212} s_2 + n_2 \\ r_{12} &= -h_{d111} s_2^* + h_{d112} s_1^* + n_3 \\ r_{22} &= -h_{d211} s_2^* + h_{d212} s_1^* + n_4 \end{aligned} \quad (2-25)$$

Persamaan (2-25) diubah dalam bentuk matriks menjadi seperti persamaan (2-26)

berikut ini :

$$\begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \\ r_{12}^* \\ r_{22}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{d111} & h_{d112} \\ h_{d211} & h_{d212} \\ h_{d112}^* & -h_{d111}^* \\ h_{d212}^* & -h_{d211}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3^* \\ n_4^* \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

Pada penerima, untuk mendapatkan kembali kode-kode yang dikirim digunakan deteksi *Maximum Likelihood* yang diproses melalui operasi linier yaitu mengalikan dengan Moore-Penrose *pseudoinverse*. Hasil dari proses tersebut adalah :

$$\begin{bmatrix} \bar{s}_1 \\ \bar{s}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{d111}^* & h_{d211}^* & h_{d112} & h_{d212} \\ h_{d112}^* & h_{d212}^* & -h_{d111} & -h_{d211} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \\ r_{12}^* \\ r_{22}^* \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

Selain kode STBC G_2 , masih ada kode STBC yang lain yaitu STBC G_3 dan STBC G_4 . Pada tesis ini akan dilakukan simulasi pada ketiga kode STBC tersebut dengan konfigurasi D-MIMO yang berbeda. Kode STBC G_3 dapat dilihat sebagai berikut :

$$G_3 = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \\ -s_2 & s_1 & -s_4 \\ -s_3 & s_4 & s_1 \\ -s_4 & -s_3 & s_2 \\ s_1^* & s_2^* & s_3^* \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* \\ -s_3^* & s_4^* & s_1^* \\ -s_4^* & -s_3^* & s_2^* \end{pmatrix} \quad (2-28)$$

Ilustrasi dari kode STBC G_3 pada D-MIMO (3,1,3) dapat dilihat pada Tabel

2.5 .

Tabel 2.5. Urutan Pentransmisian Kode G_3 Pada D-MIMO (3,1,3)

	Antena Port 1	Antena Port 2	Antena Port 3
Waktu ke-1	s_1	s_2	s_3
Waktu ke-2	$-s_2$	s_1	$-s_4$
Waktu ke-3	$-s_3$	s_4	s_1
Waktu ke-4	$-s_4$	$-s_3$	s_2
Waktu ke-5	s_1	s_2	s_3
Waktu ke-6	$-s_2$	s_1	$-s_4$
Waktu ke-7	$-s_3$	s_4	s_1
Waktu ke-8	$-s_4$	$-s_3$	s_2

Sehingga pada penerima diterima sinyal pada persamaan (2-29). Sinyal terima tersebut diubah dalam bentuk matriks menjadi persamaan (2-30). Pada penerima, untuk mendapatkan kembali kode-kode yang dikirim digunakan deteksi *Maximum Likelihood* yang diproses melalui operasi linier yaitu mengalikan dengan Moore-Penrose *pseudoinverse*. Hasil dari proses tersebut dapat dilihat pada persamaan (2-31).

$$\begin{aligned}
r_{11} &= h_{d111}s_1 + h_{d112}s_2 + h_{d113}s_3 + n_1 \\
r_{21} &= h_{d211}s_1 + h_{d212}s_2 + h_{d213}s_3 + n_2 \\
r_{31} &= h_{d311}s_1 + h_{d312}s_2 + h_{d313}s_3 + n_3 \\
r_{12} &= -h_{d111}s_2 + h_{d112}s_1 - h_{d113}s_4 + n_4 \\
r_{22} &= -h_{d211}s_2 + h_{d212}s_1 - h_{d213}s_4 + n_5 \\
r_{32} &= -h_{d311}s_2 + h_{d312}s_1 - h_{d313}s_4 + n_6 \\
r_{13} &= -h_{d111}s_3 + h_{d112}s_4 + h_{d113}s_1 + n_7 \\
r_{23} &= -h_{d211}s_3 + h_{d212}s_4 + h_{d213}s_1 + n_8 \\
r_{33} &= -h_{d311}s_3 + h_{d312}s_4 + h_{d313}s_1 + n_9 \\
r_{14} &= -h_{d111}s_4 - h_{d112}s_3 + h_{d113}s_2 + n_{10} \\
r_{24} &= -h_{d211}s_4 - h_{d212}s_3 + h_{d213}s_2 + n_{11} \\
r_{34} &= -h_{d311}s_4 - h_{d312}s_3 + h_{d313}s_2 + n_{12} \\
r_{15} &= h_{d111}s_1^* + h_{d112}s_2^* + h_{d113}s_3^* + n_{13} \\
r_{25} &= h_{d211}s_1^* + h_{d212}s_2^* + h_{d213}s_3^* + n_{14} \\
r_{35} &= h_{d311}s_1^* + h_{d312}s_2^* + h_{d313}s_3^* + n_{15} \\
r_{16} &= -h_{d111}s_2^* + h_{d112}s_1^* - h_{d113}s_4^* + n_{16} \\
r_{26} &= -h_{d211}s_2^* + h_{d212}s_1^* - h_{d213}s_4^* + n_{17} \\
r_{36} &= -h_{d311}s_2^* + h_{d312}s_1^* - h_{d313}s_4^* + n_{18} \\
r_{17} &= -h_{d111}s_3^* + h_{d112}s_4^* + h_{d113}s_1^* + n_{19} \\
r_{27} &= -h_{d211}s_3^* + h_{d212}s_4^* + h_{d213}s_1^* + n_{20} \\
r_{37} &= -h_{d311}s_3^* + h_{d312}s_4^* + h_{d313}s_1^* + n_{21} \\
r_{18} &= -h_{d111}s_4^* - h_{d112}s_3^* + h_{d113}s_2^* + n_{22} \\
r_{28} &= -h_{d211}s_4^* - h_{d212}s_3^* + h_{d213}s_2^* + n_{23} \\
r_{38} &= -h_{d311}s_4^* - h_{d312}s_3^* + h_{d313}s_2^* + n_{24}
\end{aligned}
\tag{2-29}$$



$$\begin{array}{c}
r_{11} \\
r_{21} \\
r_{31} \\
r_{12} \\
r_{22} \\
r_{32} \\
r_{13} \\
r_{23} \\
r_{33} \\
r_{14} \\
r_{24} \\
r_{34} \\
r_{15}^* \\
r_{25}^* \\
r_{35}^* \\
r_{16}^* \\
r_{26}^* \\
r_{36}^* \\
r_{17}^* \\
r_{27}^* \\
r_{37}^* \\
r_{18}^* \\
r_{28}^* \\
r_{38}^*
\end{array}
=
\begin{array}{c}
h_{d111} \quad h_{d112} \quad h_{d113} \quad 0 \\
h_{d211} \quad h_{d212} \quad h_{d213} \quad 0 \\
h_{d311} \quad h_{d312} \quad h_{d313} \quad 0 \\
h_{d112} \quad -h_{d111} \quad 0 \quad -h_{d113} \\
h_{d212} \quad -h_{d211} \quad 0 \quad -h_{d213} \\
h_{d312} \quad -h_{d311} \quad 0 \quad -h_{d313} \\
h_{d113} \quad 0 \quad -h_{d111} \quad h_{d112} \\
h_{d213} \quad 0 \quad -h_{d211} \quad h_{d212} \\
h_{d313} \quad 0 \quad -h_{d311} \quad h_{d312} \\
0 \quad h_{d113} \quad -h_{d112} \quad -h_{d111} \\
0 \quad h_{d213} \quad -h_{d212} \quad -h_{d211} \\
0 \quad h_{d313} \quad -h_{d312} \quad -h_{d311} \\
h_{d111}^* \quad h_{d112}^* \quad h_{d113}^* \quad 0 \\
h_{d211}^* \quad h_{d212}^* \quad h_{d213}^* \quad 0 \\
h_{d311}^* \quad h_{d312}^* \quad h_{d313}^* \quad 0 \\
h_{d112}^* \quad -h_{d111}^* \quad 0 \quad -h_{d113}^* \\
h_{d212}^* \quad -h_{d211}^* \quad 0 \quad -h_{d213}^* \\
h_{d312}^* \quad -h_{d311}^* \quad 0 \quad -h_{d313}^* \\
h_{d113}^* \quad 0 \quad -h_{d111}^* \quad h_{d112}^* \\
h_{d213}^* \quad 0 \quad -h_{d211}^* \quad h_{d212}^* \\
h_{d313}^* \quad 0 \quad -h_{d311}^* \quad h_{d312}^* \\
0 \quad h_{d113}^* \quad -h_{d112}^* \quad -h_{d111}^* \\
0 \quad h_{d213}^* \quad -h_{d212}^* \quad -h_{d211}^* \\
0 \quad h_{d313}^* \quad -h_{d312}^* \quad -h_{d311}^*
\end{array}
\begin{array}{c}
n_1 \\
n_2 \\
n_3 \\
n_4 \\
n_5 \\
n_6 \\
n_7 \\
n_8 \\
n_9 \\
n_{10} \\
\begin{array}{c} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{array} \\
n_{11} \\
n_{12} \\
n_{13}^* \\
n_{14}^* \\
n_{15}^* \\
n_{16}^* \\
n_{17}^* \\
n_{18}^* \\
n_{19}^* \\
n_{20}^* \\
n_{21}^* \\
n_{22}^* \\
n_{23}^* \\
n_{24}^*
\end{array}
+
\begin{array}{c}
n_1 \\
n_2 \\
n_3 \\
n_4 \\
n_5 \\
n_6 \\
n_7 \\
n_8 \\
n_9 \\
n_{10} \\
\begin{array}{c} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{array} \\
n_{11} \\
n_{12} \\
n_{13}^* \\
n_{14}^* \\
n_{15}^* \\
n_{16}^* \\
n_{17}^* \\
n_{18}^* \\
n_{19}^* \\
n_{20}^* \\
n_{21}^* \\
n_{22}^* \\
n_{23}^* \\
n_{24}^*
\end{array}$$

(2-30)

$$\begin{bmatrix} \bar{s}_1 \\ \bar{s}_2 \\ \bar{s}_3 \\ \bar{s}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{d111} & h_{d112} & h_{d113} & 0 \\ h_{d211} & h_{d212} & h_{d213} & 0 \\ h_{d311} & h_{d312} & h_{d313} & 0 \\ h_{d112} & -h_{d111} & 0 & -h_{d113} \\ h_{d212} & -h_{d211} & 0 & -h_{d213} \\ h_{d312} & -h_{d311} & 0 & -h_{d313} \\ h_{d113} & 0 & -h_{d111} & h_{d112} \\ h_{d213} & 0 & -h_{d211} & h_{d212} \\ h_{d313} & 0 & -h_{d311} & h_{d312} \\ 0 & h_{d113} & -h_{d112} & -h_{d111} \\ 0 & h_{d213} & -h_{d212} & -h_{d211} \\ 0 & h_{d313} & -h_{d312} & -h_{d311} \\ h_{d111}^* & h_{d112}^* & h_{d113}^* & 0 \\ h_{d211}^* & h_{d212}^* & h_{d213}^* & 0 \\ h_{d311}^* & h_{d312}^* & h_{d313}^* & 0 \\ h_{d112}^* & -h_{d111}^* & 0 & -h_{d113}^* \\ h_{d212}^* & -h_{d211}^* & 0 & -h_{d213}^* \\ h_{d312}^* & -h_{d311}^* & 0 & -h_{d313}^* \\ h_{d113}^* & 0 & -h_{d111}^* & h_{d112}^* \\ h_{d213}^* & 0 & -h_{d211}^* & h_{d212}^* \\ h_{d313}^* & 0 & -h_{d311}^* & h_{d312}^* \\ 0 & h_{d113}^* & -h_{d112}^* & -h_{d111}^* \\ 0 & h_{d213}^* & -h_{d212}^* & -h_{d211}^* \\ 0 & h_{d313}^* & -h_{d313}^* & -h_{d311}^* \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \\ r_{31} \\ r_{12} \\ r_{22} \\ r_{32} \\ r_{13} \\ r_{23} \\ r_{33} \\ r_{14} \\ r_{24} \\ r_{34} \\ r_{15}^* \\ r_{25}^* \\ r_{35}^* \\ r_{16}^* \\ r_{26}^* \\ r_{36}^* \\ r_{17}^* \\ r_{27}^* \\ r_{37}^* \\ r_{18}^* \\ r_{28}^* \\ r_{38}^* \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

Kode STBC G_4 dapat dilihat sebagai berikut :

$$G_4 = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 \\ -s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 \\ -s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 \\ s_1^* & s_2^* & s_3^* & s_4^* \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ -s_3^* & s_4^* & s_1^* & -s_2^* \\ -s_4^* & -s_3^* & s_2^* & s_1^* \end{pmatrix} \quad (2-32)$$

Ilustrasi dari kode STBC G_4 pada D-MIMO (4,1,4) dapat dilihat pada Tabel 2.6 .

Tabel 2.6. Urutan Pentransmisian Kode G_4 Pada D-MIMO (4,1,4)

	Antena Port 1	Antena Port 2	Antena Port 3	Antena Port 4
Waktu ke-1	s_1	s_2	s_3	s_4
Waktu ke-2	$-s_2$	s_1	$-s_4$	s_3
Waktu ke-3	$-s_3$	s_4	s_1	$-s_2$
Waktu ke-4	$-s_4$	$-s_3$	s_2	s_1
Waktu ke-5	s_1^*	s_2^*	s_3^*	s_4^*
Waktu ke-6	$-s_2^*$	s_1^*	$-s_4^*$	$-s_3^*$
Waktu ke-7	$-s_3^*$	s_4^*	s_1^*	$-s_2^*$
Waktu ke-8	$-s_4^*$	$-s_3^*$	s_2^*	s_1^*

Sehingga pada penerima diterima sinyal pada persamaan (2-33).

$$\begin{aligned}
r_{11} &= h_{d111} s_1 + h_{d112} s_2 + h_{d113} s_3 + h_{d114} s_4 + n_1 \\
r_{21} &= h_{d211} s_1 + h_{d212} s_2 + h_{d213} s_3 + h_{d214} s_4 + n_2 \\
r_{31} &= h_{d311} s_1 + h_{d312} s_2 + h_{d313} s_3 + h_{d314} s_4 + n_3 \\
r_{41} &= h_{d411} s_1 + h_{d412} s_2 + h_{d413} s_3 + h_{d414} s_4 + n_4 \\
r_{12} &= -h_{d111} s_2 + h_{d112} s_1 + h_{d113} s_4 + h_{d114} s_3 + n_5 \\
r_{22} &= -h_{d211} s_2 + h_{d212} s_1 + h_{d213} s_4 + h_{d214} s_3 + n_6 \\
r_{32} &= -h_{d311} s_2 + h_{d312} s_1 + h_{d313} s_4 + h_{d314} s_3 + n_7 \\
r_{42} &= -h_{d411} s_2 + h_{d412} s_1 + h_{d413} s_4 + h_{d414} s_3 + n_8 \\
r_{13} &= -h_{d111} s_3 + h_{d112} s_4 + h_{d113} s_1 - h_{d114} s_2 + n_9 \\
r_{23} &= -h_{d211} s_3 + h_{d212} s_4 + h_{d213} s_1 - h_{d214} s_2 + n_{10} \\
r_{33} &= -h_{d311} s_3 + h_{d312} s_4 + h_{d313} s_1 - h_{d314} s_2 + n_{11} \\
r_{43} &= -h_{d411} s_3 + h_{d412} s_4 + h_{d413} s_1 - h_{d414} s_2 + n_{12} \\
r_{14} &= -h_{d111} s_4 - h_{d112} s_3 + h_{d113} s_2 + h_{d114} s_1 + n_{13} \\
r_{24} &= -h_{d211} s_4 - h_{d212} s_3 + h_{d213} s_2 + h_{d214} s_1 + n_{14} \\
r_{34} &= -h_{d311} s_4 - h_{d312} s_3 + h_{d313} s_2 + h_{d314} s_1 + n_{15} \\
r_{44} &= -h_{d411} s_4 - h_{d412} s_3 + h_{d413} s_2 + h_{d414} s_1 + n_{16} \\
r_{15} &= -h_{d111} s_1^* + h_{d112} s_2^* + h_{d113} s_3^* + h_{d114} s_4^* + n_{17} \\
r_{25} &= -h_{d211} s_1^* + h_{d212} s_2^* + h_{d213} s_3^* + h_{d214} s_4^* + n_{18} \\
r_{35} &= -h_{d311} s_1^* + h_{d312} s_2^* + h_{d313} s_3^* + h_{d314} s_4^* + n_{19} \\
r_{45} &= -h_{d411} s_1^* + h_{d412} s_2^* + h_{d413} s_3^* + h_{d414} s_4^* + n_{20} \\
r_{16} &= -h_{d111} s_2^* + h_{d112} s_1^* - h_{d113} s_4^* + h_{d114} s_3^* + n_{21} \\
r_{26} &= -h_{d211} s_2^* + h_{d212} s_1^* - h_{d213} s_4^* + h_{d214} s_3^* + n_{22} \\
r_{36} &= -h_{d311} s_2^* + h_{d312} s_1^* - h_{d313} s_4^* + h_{d314} s_3^* + n_{23} \\
r_{46} &= -h_{d411} s_2^* + h_{d412} s_1^* - h_{d413} s_4^* + h_{d414} s_3^* + n_{24} \\
r_{17} &= -h_{d111} s_3^* + h_{d112} s_4^* + h_{d113} s_1^* - h_{d114} s_2^* + n_{25} \\
r_{27} &= -h_{d211} s_3^* + h_{d212} s_4^* + h_{d213} s_1^* - h_{d214} s_2^* + n_{26} \\
r_{37} &= -h_{d311} s_3^* + h_{d312} s_4^* + h_{d313} s_1^* - h_{d314} s_2^* + n_{27} \\
r_{47} &= -h_{d411} s_3^* + h_{d412} s_4^* + h_{d413} s_1^* - h_{d414} s_2^* + n_{28} \\
r_{18} &= -h_{d111} s_4^* - h_{d112} s_3^* + h_{d113} s_2^* + h_{d114} s_1^* + n_{29} \\
r_{28} &= -h_{d211} s_4^* - h_{d212} s_3^* + h_{d213} s_2^* + h_{d214} s_1^* + n_{30} \\
r_{38} &= -h_{d311} s_4^* - h_{d312} s_3^* + h_{d313} s_2^* + h_{d314} s_1^* + n_{31} \\
r_{48} &= -h_{d411} s_4^* - h_{d412} s_3^* + h_{d413} s_2^* + h_{d414} s_1^* + n_{32}
\end{aligned}$$

(2-33)

Persamaan (2-33) diubah dalam bentuk matriks menjadi persamaan (2-34) berikut :

$$\begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \\ r_{31} \\ r_{41} \\ r_{12} \\ r_{22} \\ r_{32} \\ r_{42} \\ r_{13} \\ r_{23} \\ r_{33} \\ r_{43} \\ r_{14} \\ r_{24} \\ r_{34} \\ r_{44} \\ r_{15}^* \\ r_{25}^* \\ r_{35}^* \\ r_{45}^* \\ r_{16}^* \\ r_{26}^* \\ r_{36}^* \\ r_{46}^* \\ r_{17}^* \\ r_{27}^* \\ r_{37}^* \\ r_{47}^* \\ r_{18}^* \\ r_{28}^* \\ r_{38}^* \\ r_{48}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{d111} & h_{d112} & h_{d113} & h_{d114} \\ h_{d211} & h_{d212} & h_{d213} & h_{d214} \\ h_{d311} & h_{d312} & h_{d313} & h_{d314} \\ h_{d411} & h_{d412} & h_{d413} & h_{d414} \\ h_{d112} & -h_{d111} & h_{d114} & -h_{d113} \\ h_{d212} & -h_{d211} & h_{d214} & -h_{d213} \\ h_{d312} & -h_{d311} & h_{d314} & -h_{d313} \\ h_{d412} & -h_{d411} & h_{d414} & -h_{d413} \\ h_{d113} & -h_{d114} & -h_{d111} & h_{d112} \\ h_{d213} & -h_{d214} & -h_{d211} & h_{d212} \\ h_{d313} & -h_{d314} & -h_{d311} & h_{d312} \\ h_{d413} & -h_{d414} & -h_{d411} & h_{d412} \\ h_{d114} & h_{d113} & -h_{d112} & -h_{d111} \\ h_{d214} & h_{d213} & -h_{d212} & -h_{d211} \\ h_{d314} & h_{d313} & -h_{d312} & -h_{d311} \\ h_{d414} & h_{d413} & -h_{d412} & -h_{d411} \\ h_{d111}^* & h_{d112}^* & h_{d113}^* & h_{d114}^* \\ h_{d211}^* & h_{d212}^* & h_{d213}^* & h_{d214}^* \\ h_{d311}^* & h_{d312}^* & h_{d313}^* & h_{d314}^* \\ h_{d411}^* & h_{d412}^* & h_{d413}^* & h_{d414}^* \\ h_{d112}^* & -h_{d111}^* & h_{d114}^* & -h_{d113}^* \\ h_{d212}^* & -h_{d211}^* & h_{d214}^* & -h_{d213}^* \\ h_{d312}^* & -h_{d311}^* & h_{d314}^* & -h_{d313}^* \\ h_{d412}^* & -h_{d411}^* & h_{d414}^* & -h_{d413}^* \\ h_{d113}^* & -h_{d114}^* & -h_{d111}^* & h_{d112}^* \\ h_{d213}^* & -h_{d214}^* & -h_{d211}^* & h_{d212}^* \\ h_{d313}^* & -h_{d314}^* & -h_{d311}^* & h_{d312}^* \\ h_{d413}^* & -h_{d414}^* & -h_{d411}^* & h_{d412}^* \\ h_{d114}^* & h_{d113}^* & -h_{d112}^* & -h_{d111}^* \\ h_{d214}^* & h_{d213}^* & -h_{d212}^* & -h_{d211}^* \\ h_{d314}^* & h_{d313}^* & -h_{d312}^* & -h_{d311}^* \\ h_{d414}^* & h_{d413}^* & -h_{d412}^* & -h_{d411}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \\ n_8 \\ n_9 \\ n_{10} \\ n_{11} \\ n_{12} \\ n_{13} \\ n_{14} \\ n_{15} \\ n_{16} \\ n_{17}^* \\ n_{18}^* \\ n_{19}^* \\ n_{20}^* \\ n_{21}^* \\ n_{22}^* \\ n_{23}^* \\ n_{24}^* \\ n_{25}^* \\ n_{26}^* \\ n_{27}^* \\ n_{28}^* \\ n_{29}^* \\ n_{30}^* \\ n_{31}^* \\ n_{32}^* \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

Dengan deteksi *Maximum Likelihood* yang diproses melalui operasi linier yaitu mengalikan dengan Moore-Penrose *pseudoinverse* maka didapatkan persamaan (2-35)

$$\begin{bmatrix} \bar{s}_1 \\ \bar{s}_2 \\ \bar{s}_3 \\ \bar{s}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{d111} & h_{d112} & h_{d113} & h_{d114} \\ h_{d211} & h_{d212} & h_{d213} & h_{d214} \\ h_{d311} & h_{d312} & h_{d313} & h_{d314} \\ h_{d411} & h_{d412} & h_{d413} & h_{d414} \\ h_{d112} & -h_{d111} & h_{d114} & -h_{d113} \\ h_{d212} & -h_{d211} & h_{d214} & -h_{d213} \\ h_{d312} & -h_{d311} & h_{d314} & -h_{d313} \\ h_{d412} & -h_{d411} & h_{d414} & -h_{d413} \\ h_{d113} & -h_{d114} & -h_{d111} & h_{d112} \\ h_{d213} & -h_{d214} & -h_{d211} & h_{d212} \\ h_{d313} & -h_{d314} & -h_{d311} & h_{d312} \\ h_{d413} & -h_{d414} & -h_{d411} & h_{d412} \\ h_{d114} & h_{d113} & -h_{d112} & -h_{d111} \\ h_{d214} & h_{d213} & -h_{d212} & -h_{d211} \\ h_{d314} & h_{d313} & -h_{d312} & -h_{d311} \\ h_{d414} & h_{d413} & -h_{d412} & -h_{d411} \\ h_{d111}^* & h_{d112}^* & h_{d113}^* & h_{d114}^* \\ h_{d211}^* & h_{d212}^* & h_{d213}^* & h_{d214}^* \\ h_{d311}^* & h_{d312}^* & h_{d313}^* & h_{d314}^* \\ h_{d411}^* & h_{d412}^* & h_{d413}^* & h_{d414}^* \\ h_{d112}^* & -h_{d111}^* & h_{d114}^* & -h_{d113}^* \\ h_{d212}^* & -h_{d211}^* & h_{d214}^* & -h_{d213}^* \\ h_{d312}^* & -h_{d311}^* & h_{d314}^* & -h_{d313}^* \\ h_{d412}^* & -h_{d411}^* & h_{d414}^* & -h_{d413}^* \\ h_{d113}^* & -h_{d114}^* & -h_{d111}^* & h_{d112}^* \\ h_{d213}^* & -h_{d214}^* & -h_{d211}^* & h_{d212}^* \\ h_{d313}^* & -h_{d314}^* & -h_{d311}^* & h_{d312}^* \\ h_{d413}^* & -h_{d414}^* & -h_{d411}^* & h_{d412}^* \\ h_{d114}^* & h_{d113}^* & -h_{d112}^* & -h_{d111}^* \\ h_{d214}^* & h_{d213}^* & -h_{d212}^* & -h_{d211}^* \\ h_{d314}^* & h_{d313}^* & -h_{d312}^* & -h_{d311}^* \\ h_{d414}^* & h_{d413}^* & -h_{d412}^* & -h_{d411}^* \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \\ r_{31} \\ r_{41} \\ r_{12} \\ r_{22} \\ r_{32} \\ r_{42} \\ r_{13} \\ r_{23} \\ r_{33} \\ r_{43} \\ r_{14} \\ r_{24} \\ r_{34} \\ r_{44} \\ r_{15}^* \\ r_{25}^* \\ r_{35}^* \\ r_{45}^* \\ r_{16}^* \\ r_{26}^* \\ r_{36}^* \\ r_{46}^* \\ r_{17}^* \\ r_{27}^* \\ r_{37}^* \\ r_{47}^* \\ r_{18}^* \\ r_{28}^* \\ r_{38}^* \\ r_{48}^* \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

2.8. Estimasi BER

Ukuran kualitas suatu komunikasi digital adalah menghitung kinerja dari probabilitas kesalahan simbol. Biasanya istilah yang biasa digunakan yaitu *probability of error* (P_e) atau *bit error rate* (BER) Ada dua cara untuk menentukan nilai BER yaitu [11] :

2.8.1. Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo adalah konsep yang paling sederhana dan umum digunakan dalam menentukan probabilitas kesalahan P_e . Urutan simbol yang diterima dibandingkan dengan simbol yang ditransmisikan. Selanjutnya probabilitas kesalahannya dapat dihitung sebagai berikut :

$$P_e = \frac{\text{jumlah kesalahan}}{\text{total simbol yang dikirim}} \quad (2-36)$$

Tingkat kehandalan yang baik dari probabilitas kesalahan pada simulasi Monte Carlo dicapai jika P_e minimum yaitu 10 dibagi jumlah simbol yang dikirimkan. Sebagai contoh yaitu apabila dikirimkan 10 ribu bit maka probabilitas kesalahan yang diijinkan adalah 10^{-3} .

2.8.2. Simulasi *Quasi Analytic*

Simulasi yang dilakukan dalam menentukan probabilitas kesalahan P_e dengan cara tanpa membandingkan jumlah simbol yang salah dengan total simbol yang dikirim. Simulasi ini dilakukan dengan tujuan untuk menghemat waktu dalam proses running. Sebagai contoh yaitu apabila suatu simulasi menggunakan modulasi BPSK maka setelah diketahui nilai SNR dari persamaan (2-22) dapat ditentukan probabilitas kesalahan sesuai persamaan (2-15).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

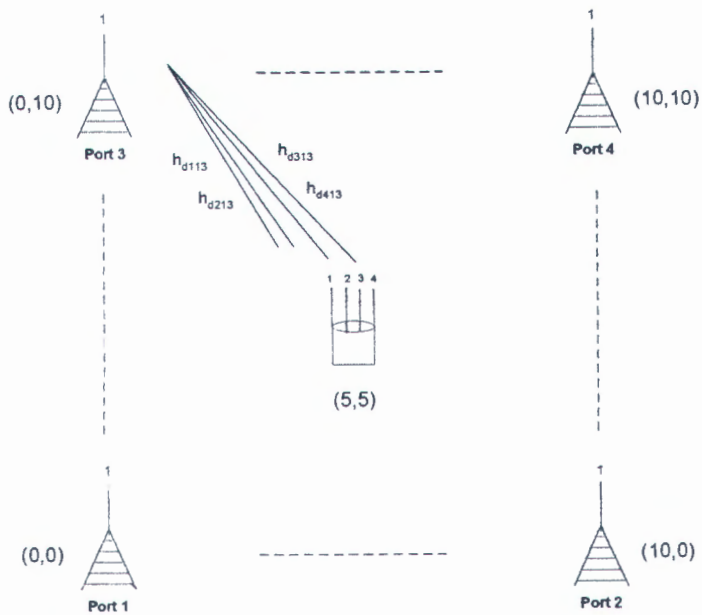
Pada bab ini akan diuraikan tentang metodologi perhitungan kapasitas, *bit error rate*, dan kinerja STBC pada D-MIMO.

3.1. Konfigurasi Sistem D-MIMO

Konfigurasi dari sistem D-MIMO yang digunakan pada tesis ini dapat dibagi menjadi dua yaitu model D-MIMO dimana penerima terletak di tengah-tengah daerah cakupan dan model D-MIMO dimana penerima berada di setiap titik daerah cakupan (variasi spasial). Daerah cakupan dari sistem D-MIMO dianggap berbentuk bujursangkar $10 \times 10 \text{ km}^2$.

3.1.1. Penerima Terletak di Tengah-tengah Daerah Cakupan

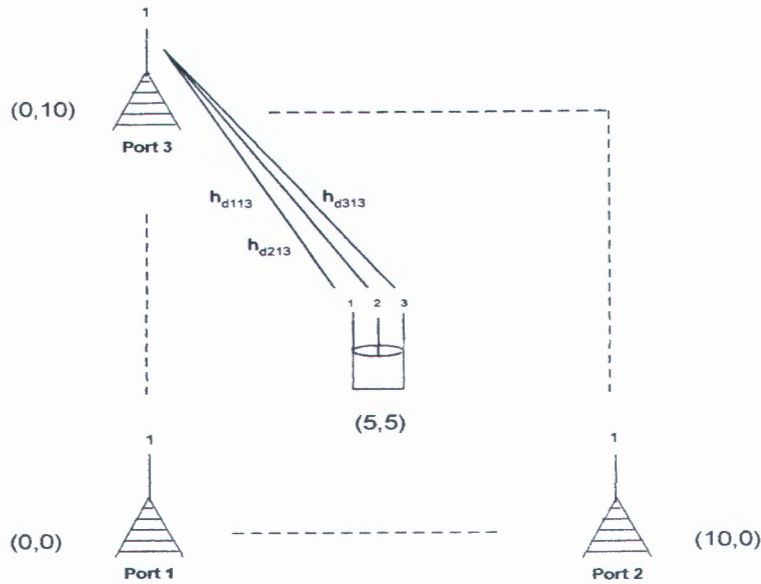
Untuk penerima yang terletak di tengah-tengah daerah cakupan, maka model D-MIMO yang digunakan adalah D-MIMO (4,2,4), (4,4,2), (4,8,1), (4,1,4), (4,2,2), (4,1,2), (3,1,3), (2,1,2), (4,4,1), (3,3,1), dan (4,2,1). Perbedaan dari model D-MIMO ini terletak pada jumlah antena pemancar pada tiap port, jumlah port pemancar, dan penerima dengan jumlah antenanya. Berikut ini akan dijelaskan model D-MIMO tersebut beserta posisi dari setiap port pemancar dan penerima. Sebagai contoh model D-MIMO (4,1,4), dimana posisi tiap-tiap port pemancar berturut-turut adalah (0,0), (10,0), (0,10), dan (10,10) dengan masing-masing menggunakan antena pemancar sebanyak satu buah. Sedangkan penerima terletak pada posisi (5,5) dengan menggunakan 4 buah antena. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Model D-MIMO (4,1,4)

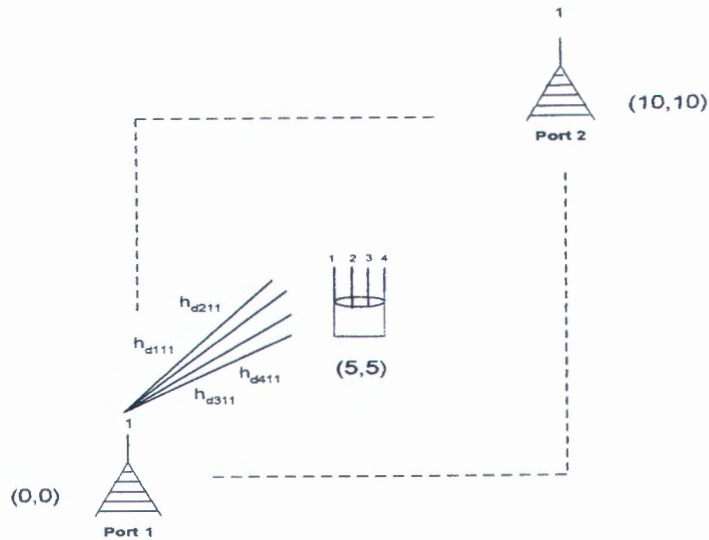
Model D-MIMO (4,2,4) mirip seperti Gambar 3.1 hanya saja jumlah antenna pemancar tiap port sebanyak 2 buah.

Untuk model D-MIMO (3,1,3) terdiri dari tiga buah port pemancar dengan posisi tiap-tiap port pemancar adalah (0,0), (10,0), dan (0,10) dengan menggunakan antenna sebanyak satu buah. Sedangkan posisi penerima dengan jumlah antenna sebanyak 3 buah diletakkan pada posisi (5,5). Model D-MIMO (3,1,3) dapat dilihat pada Gambar 3.2.



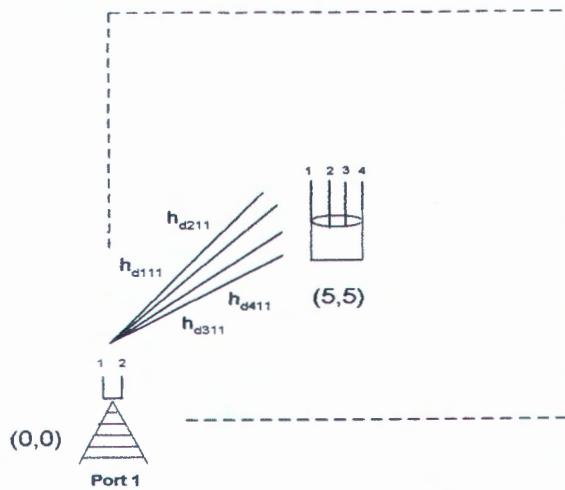
Gambar 3.2. Model D-MIMO (3,1,3)

Model D-MIMO (4,1,2) terdiri dari dua buah port pemancar dengan masing-masing terletak pada posisi (0,0) dan (10,10) dengan menggunakan antenna sebanyak satu buah. Sedangkan penerima terletak pada posisi (5,5) dengan jumlah antenna sebanyak 4 buah seperti terlihat pada Gambar 3.3. Model D-MIMO (4,4,2) dan (4,2,2) hampir sama dengan model D-MIMO (4,1,2) pada Gambar 3.3. Perbedaannya terletak pada jumlah antenna pada tiap port pemancar yaitu berturut-turut sebanyak 4 dan 2 buah. Sedangkan model D-MIMO (2,1,2) dibandingkan model D-MIMO (4,1,2) perbedaannya terletak pada jumlah antenna penerima. Pada D-MIMO (2,1,2) jumlah antenna penerima sebanyak 2 buah.



Gambar 3.3. Model D-MIMO (4,1,2)

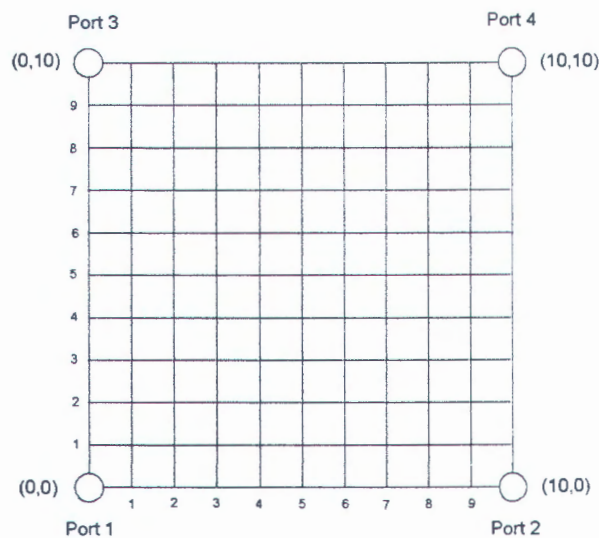
Model D-MIMO (4,2,1) dapat dilihat pada Gambar 3.4. Model ini hanya terdiri dari satu buah port pemancar dengan jumlah antenna 2 buah yang diletakkan pada posisi (0,0). Sedangkan penerima yang menggunakan antenna sebanyak 4 buah diletakkan pada posisi (5,5).



Gambar 3.4. Model D-MIMO (4,2,1)

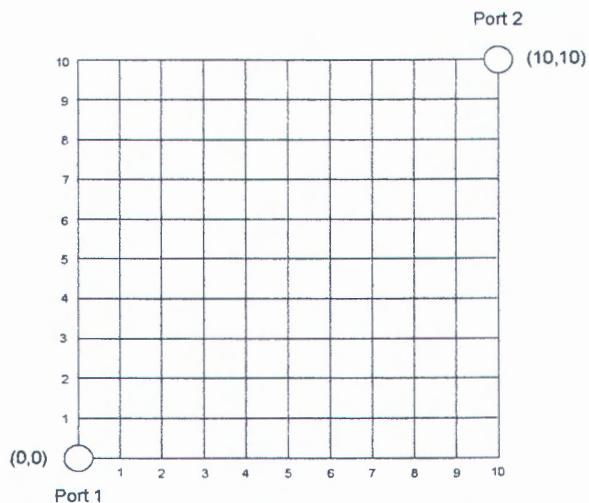
3.1.2. Variasi Spasial pada Daerah Cakupan

Untuk penerima pada variasi spasial daerah cakupan, maka model D-MIMO yang digunakan adalah D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), (4,1,2), (4,4,1), dan (4,2,1). Model D-MIMO ini sama dengan model dimana penerima berada di tengah-tengah daerah layanan. Tetapi pada model D-MIMO ini penerima berada pada setiap titik daerah cakupan. Berikut ini akan dijelaskan berupa gambar untuk model D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), (4,1,2), (4,4,1), dan (4,2,1). Untuk model D-MIMO (4,1,4) dapat dilihat pada Gambar 3.5.



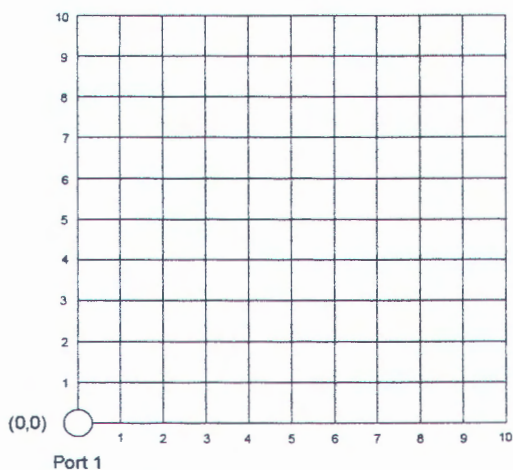
Gambar 3.5. Model D-MIMO (4,1,4)

Model D-MIMO (4,1,2) dimana penerima berada di setiap titik daerah layanan dapat dilihat pada Gambar 3.6. Model ini hampir sama dengan model D-MIMO (4,2,2) hanya saja jumlah antenna setiap port pemancar berjumlah 2 buah.



Gambar 3.6. Model D-MIMO (4,1,2)

Model D-MIMO (4,2,1) dapat dilihat pada Gambar 3.7. Model D-MIMO (4,2,1) mirip dengan model D-MIMO (4,4,1) hanya saja pada penerima menggunakan antena sebanyak 4 buah.



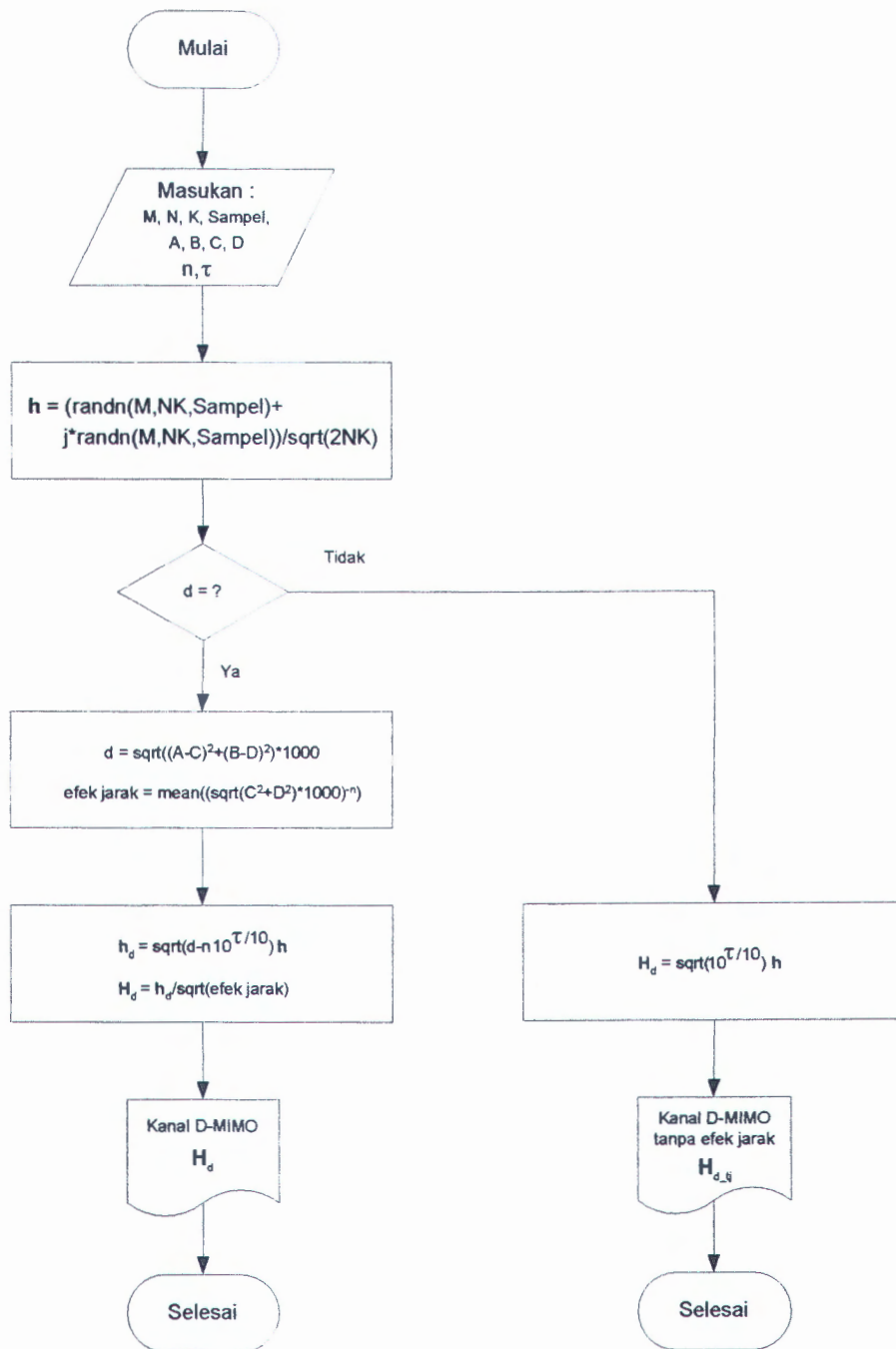
Gambar 3.7. Model D-MIMO (4,2,1)

3.2. Model Kanal D-MIMO

Pemodelan kanal untuk konfigurasi sistem D-MIMO tersebut dimana penerima terletak di tengah-tengah daerah cakupan dan penerima berada pada variasi spasial daerah cakupan maka pemodelan kanalnya akan berbeda. Untuk model D-MIMO dimana penerima berada di tengah-tengah daerah cakupan maka model kanalnya seperti pada persamaan (2-7) dengan menghilangkan pengaruh jarak. Ini disebabkan karena penerima berada di tengah-tengah port pemancar sehingga pengaruh dari jarak akan saling meniadakan. Sehingga model kanalnya disebut model kanal D-MIMO tanpa pengaruh jarak.

Sedangkan pada model D-MIMO dimana penerima berada pada variasi spasial daerah cakupan maka model kanalnya seperti pada persamaan (2-7). Dari model kanal yang didapatkan selanjutnya dinormalisasi dengan pengaruh jarak dari setiap titik penerima. Model ini kemudian disebut dengan model kanal D-MIMO.

Langkah-langkah dari pemodelan kanal tersebut yaitu pemodelan kanal D-MIMO dan pemodelan kanal D-MIMO tanpa pengaruh jarak dapat dilihat pada Gambar 3.8. Model kanal D-MIMO dituliskan dengan H_d sedangkan model kanal D-MIMO tanpa pengaruh jarak ditulis dengan $H_{d_{tj}}$.



Gambar 3.8. Diagram Alir Pemodelan Kanal D-MIMO dan Kanal D-MIMO Tanpa Pengaruh Jarak

3.3. Metodologi Perhitungan Kapasitas D-MIMO

Metodologi perhitungan kapasitas D-MIMO dilakukan dengan tiga cara yaitu perhitungan kapasitas teoritis, perhitungan kapasitas teoritis pada variasi spasial daerah cakupan, dan perhitungan kapasitas dengan teknik *waterfilling*.

3.3.1. Perhitungan Kapasitas Teoritis D-MIMO

Langkah-langkah yang dilakukan yaitu :

1. Pemodelan sistem D-MIMO.

Model D-MIMO yang digunakan yaitu D-MIMO (4,2,4), (4,4,2), dan (4,8,1).

Model D-MIMO tersebut secara berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 3.1, 3.3, dan 3.4 tetapi jumlah antena pemancar yang digunakan tiap port sebanyak 2, 4, dan 8 buah.

2. Pemodelan Kanal D-MIMO.

Model kanal D-MIMO yang digunakan untuk penerima yang berada pada titik tengah daerah cakupan adalah model kanal D-MIMO tanpa pengaruh jarak ($H_{d_{tj}}$).

Proses dari pembentukan kanal tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.8.

3. Menentukan SNR yaitu sebesar 15 dB.

4. Menghitung kapasitas teoritis dengan persamaan (2-9).

5. Simulasi dilakukan sebanyak 1000 sampel.

6. Memplot hasil simulasi dalam bentuk *Cumulative Distribution Function (CDF)*.

3.3.2. Perhitungan Kapasitas Teoritis Pada Variasi Spasial Daerah Cakupan

Langkah-langkah yang dilakukan yaitu :

1. Pemodelan sistem D-MIMO.

Model D-MIMO yang digunakan yaitu D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), (4,1,2), (4,4,1), dan (4,2,1). Model D-MIMO (4,1,4), (4,1,2) dan (4,2,1) secara berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 3.1, 3.3, dan 3.4. Sedangkan untuk model D-MIMO (4,2,2) dan (4,4,1) hampir sama dengan Gambar 3.3 dan 3.4 tetapi jumlah antena pemancar yang digunakan tiap port berturut-turut berjumlah 2 dan 4 buah.

2. Pemodelan Kanal D-MIMO.

Model kanal D-MIMO yang digunakan untuk penerima yang berada pada setiap titik daerah layanan adalah model kanal D-MIMO (H_d). Proses dari pembentukan kanal tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.8.

3. Menentukan SNR sebesar 15 dB.

4. Menghitung kapasitas teoritis dengan persamaan (2-9).

Pada perhitungannya, hanya diambil seperempat dari cakupan D-MIMO tersebut karena bagian yang lainnya merupakan cermin dari seperempat cakupan tadi.

5. Simulasi dilakukan sebanyak 1000 sampel. Dan hasil yang digunakan adalah nilai rata-ratanya.

6. Memplot hasil simulasi dalam bentuk tiga dimensi.

3.3.3. Perhitungan Kapasitas Dengan Teknik Waterfilling

Langkah-langkah yang dilakukan yaitu :

1. Pemodelan sistem D-MIMO.

Model D-MIMO yang digunakan yaitu D-MIMO (4,2,4), (4,4,2), dan (4,8,1).

Model D-MIMO tersebut secara berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 3.1, 3.3, dan 3.4 tetapi jumlah antena pemancar yang digunakan tiap port sebanyak 2, 4, dan 8 buah.

2. Pemodelan Kanal D-MIMO.

Model kanal D-MIMO yang digunakan untuk penerima yang berada pada titik tengah daerah layanan adalah model kanal D-MIMO tanpa pengaruh jarak ($H_{d_{ij}}$).

Proses dari pembentukan kanal tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.8.

3. Menentukan SNR sebesar 0, 4, 8, 12, 16, 20 dB.

4. Proses SVD dan Waterfilling.

Tahapan proses dari teknik SVD dan Waterfilling dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Dari proses SVD dan waterfilling didapatkan nilai SNR untuk tiap subkanal. Nilai SNR tiap subkanal akan menentukan vektor simbol yang dikirim.

5. Simulasi dilakukan sebanyak 1000 sampel. Dan hasil yang digunakan adalah nilai rata-ratanya.

6. Memplot hasil simulasi .

3.4. Metodologi Perhitungan *Bit Error Rate* Pada D-MIMO

Metodologi perhitungan BER pada D-MIMO dilakukan dengan dua perhitungan yaitu menghitung BER pada variasi spasial daerah cakupan menggunakan metode quasi analitik dan menghitung BER dengan teknik waterfilling menggunakan simulasi Monte Carlo.

3.4.1. Perhitungan BER D-MIMO dengan teknik Waterfilling pada Variasi Spasial Daerah Cakupan.

Langkah-langkah yang dilakukan yaitu :

1. Pemodelan sistem D-MIMO.

Model D-MIMO yang digunakan yaitu D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), (4,1,2), (4,4,1), dan (4,2,1). Model D-MIMO (4,1,4), (4,1,2) dan (4,2,1) secara berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 3.1, 3.3, dan 3.4. Sedangkan untuk model D-MIMO (4,2,2) dan (4,4,1) hampir sama dengan Gambar 3.3 dan 3.4 tetapi jumlah antena pemancar yang digunakan tiap port berturut-turut berjumlah 2 dan 4 buah.

2. Pemodelan Kanal D-MIMO.

Model kanal D-MIMO yang digunakan untuk penerima yang berada pada setiap titik daerah layanan adalah model kanal D-MIMO (H_d). Proses dari pembentukan kanal tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.8.

3. Menentukan SNR sebesar 5 dB.

4. Metode Quasi Analytic.

Metode quasi analitik dilakukan dengan teknik SVD dan waterfilling. Setelah nilai SNR tiap subkanal didapatkan maka nilai probabilitas kesalahan bit dapat dihitung dari persamaan P_s , dari jenis modulasi yang digunakan pada persamaan (2-15), (2-16), dan (2-17). Pada perhitungannya hanya diambil seperempat dari cakupan D-MIMO tersebut karena bagian yang lainnya merupakan cermin dari seperempat cakupan tadi..

5. Simulasi dilakukan sebanyak 1000 sampel. Dan hasil yang digunakan adalah nilai rata-ratanya.

6. Memplot hasil simulasi dalam bentuk tiga dimensi.

3.4.2. Perhitungan BER pada D-MIMO dengan Teknik Waterfilling

Langkah-langkah yang dilakukan yaitu :

1. Pemodelan sistem D-MIMO.

Model D-MIMO yang digunakan yaitu D-MIMO (4,2,4), (4,4,2), dan (4,8,1).

Model D-MIMO tersebut secara berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 3.1, 3.3, dan 3.4 tetapi jumlah antena pemancar yang digunakan tiap port sebanyak 2, 4, dan 8 buah.

2. Pemodelan Kanal D-MIMO.

Model kanal D-MIMO yang digunakan untuk penerima yang berada pada titik tengah daerah layanan adalah model kanal D-MIMO tanpa pengaruh jarak ($H_{d_{ij}}$).

Proses dari pembentukan kanal tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.8.

3. Menentukan SNR sebesar 0, 2, 4, 6, 8 dB.

4. Proses SVD dan Waterfilling.

Tahapan proses dari teknik SVD dan Waterfilling dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Dari proses tersebut didapatkan nilai SNR untuk tiap subkanal. Nilai SNR tiap subkanal akan menentukan vektor simbol yang dikirim.

5. Membangkitkan data sebanyak 100.000 bit.

6. Proses modulasi dan demodulasi.

Modulasi yang digunakan yaitu BPSK, QPSK, dan 8-PSK.

8. Membangkitkan noise AWGN.

9. Membandingkan bit kirim dan bit terima.

10. Simulasi dilakukan sebanyak 100 sampel. Dan hasil yang digunakan adalah nilai rata-ratanya.

11. Memplot hasil simulasi.



3.5. Metodologi Perhitungan BER D-MIMO dengan Pengkodean STBC.

Langkah-langkah yang dilakukan yaitu :

1. Menentukan kode STBC yang akan digunakan.

Kode STBC yang digunakan yaitu kode G_2 , G_3 , dan G_4 .

2. Pemodelan sistem D-MIMO.

Untuk STBC G_2 model D-MIMO yang digunakan yaitu D-MIMO (2,1,2) dan (2,2,1). Model D-MIMO (2,1,2) dapat dilihat pada Gambar 3.3 dimana jumlah antena penerima yang digunakan sebanyak 2 buah sedangkan D-MIMO (2,2,1) hampir sama dengan Gambar 3.4 tetapi jumlah antena penerima yang digunakan sebanyak 2 buah. STBC G_3 model D-MIMO yang digunakan yaitu D-MIMO (3,1,3) dan (3,3,1). Model D-MIMO (3,1,3) dapat dilihat pada Gambar 3.2. serta model D-MIMO (3,3,1) dapat dilihat pada Gambar 3.4 tetapi jumlah antena pemancar dan penerima yang digunakan masing-masing sebanyak 3 buah. Dan STBC G_4 model D-MIMO yang digunakan yaitu D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), dan (4,4,1). Model D-MIMO (4,1,4) dapat dilihat pada Gambar 3.1. Model D-MIMO (4,2,2) dapat dilihat pada Gambar 3.3 dimana jumlah antena pemancar tiap port sebanyak 2 buah. Sedangkan model D-MIMO (4,4,1) dapat dilihat pada Gambar 3.4 tetapi jumlah antena pemancar yang digunakan sebanyak 4 buah.

3. Pemodelan Kanal D-MIMO.

Model kanal D-MIMO yang digunakan untuk penerima yang berada pada titik tengah daerah layanan adalah model kanal D-MIMO tanpa pengaruh jarak ($H_{d_{ij}}$).

Proses dari pembentukan kanal tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.8.

4. Menentukan nilai E_b/N_0 sebesar 0, 2, 4, 6 dB.

5. Membangkitkan vektor data termodulasi QPSK sebanyak 100.000 simbol.

6. Demultipleks data.
7. Mengubah data simbol menjadi data bit
8. Membangkitkan noise AWGN sebanyak jumlah ruang dan periode kode.
9. Multipleks data simbol.
10. Mengubah simbol terima menjadi bit terima.
11. Menentukan *error* dan *Pe*.
12. Simulasi dilakukan sebanyak 1000 sampel. Dan hasil yang digunakan adalah nilai rata-ratanya.
13. Memplot hasil simulasi.

BAB IV

ANALISA DAN HASIL SIMULASI

Bab ini berisi tentang analisa hasil simulasi D-MIMO yaitu analisa tentang kapasitas kanal, BER, dan analisa kinerja sistem dengan pengkodean STBC. Pada sistem ini simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab 6.5.1. Dari hasil simulasi dapat diketahui performansi sistem D-MIMO.

4.1. Kapasitas Kanal Pada D-MIMO

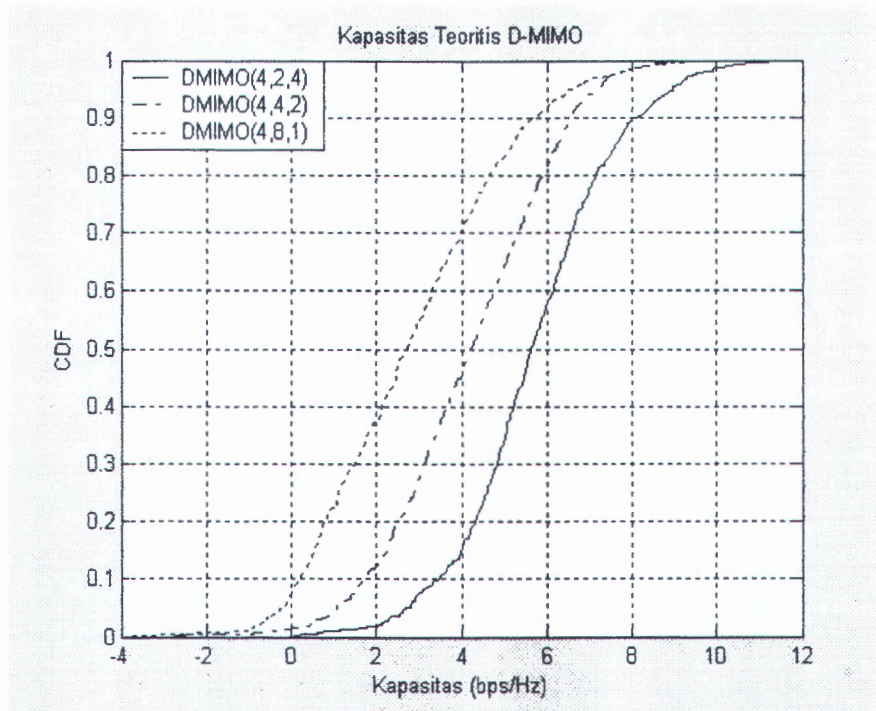
Hasil simulasi kapasitas kanal pada D-MIMO dapat dibagi menjadi tiga yaitu kapasitas kanal teoritis dimana penerima terletak pada titik pusat daerah cakupan, kapasitas kanal pada variasi spasial pada daerah cakupan, dan kapasitas kanal dengan teknik Waterfilling.

4.1.1. Kapasitas Kanal Teoritis D-MIMO

Kapasitas kanal teoritis yang disimulasikan yaitu model D-MIMO (4,2,4), (4,4,2), dan (4,8,1). Masing-masing konfigurasi dilakukan simulasi sebanyak 1000 kali dan hasilnya diplot dalam bentuk CDF sehingga didapatkan hasil pada Gambar 4.1.

Model D-MIMO (4,2,4) mempunyai kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan model (4,4,2) dan (4,8,1). Perbedaan nilai kapasitasnya pada CDF 0,4 untuk D-MIMO (4,8,1) dan (4,2,4) sebesar 3 bps/Hz. Kenyataan ini disebabkan oleh adanya faktor shadowing dan *macrodiversity* pada sistem MIMO yang terdistribusi. Adanya faktor shadowing dan *macrodiversity* tersebut mengakibatkan kanal pada

D-MIMO mengalami penguatan. Dengan penguatan kanal tersebut maka kapasitas kanal menjadi bertambah besar.



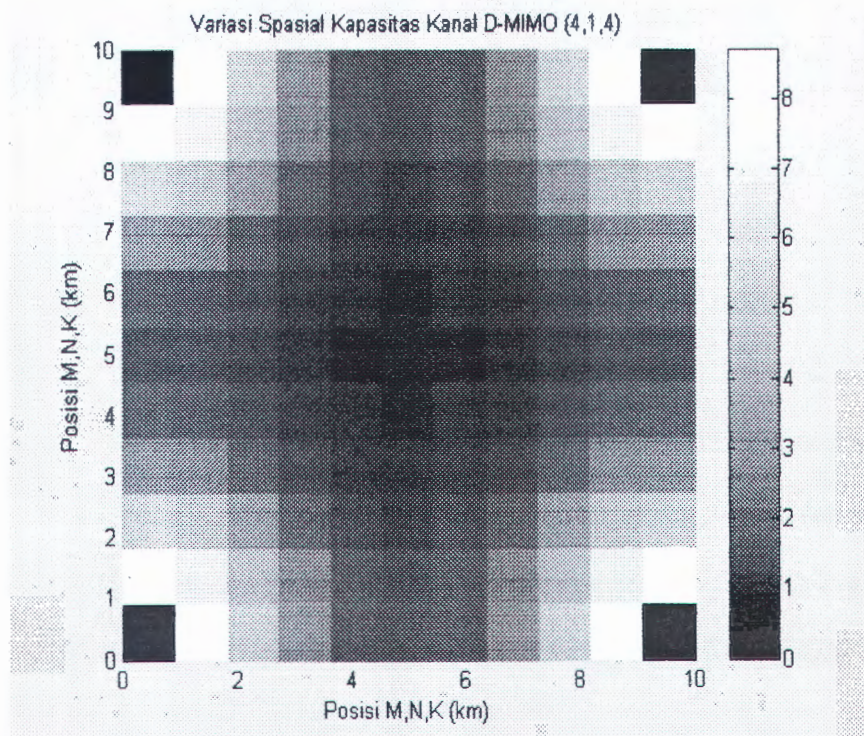
Gambar 4.1. Kapasitas Kanal Teoritis D-MIMO

4.1.2. Kapasitas Kanal Teoritis D-MIMO Pada Variasi Spasial Daerah Cakupan

Kapasitas kanal yang disimulasikan mengambil model D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), (4,1,2), (4,4,1), dan (4,2,1). Model-model D-MIMO ini dilakukan simulasi sebanyak 1000 kali dan hasilnya merupakan nilai rata-ratanya.

4.1.2.1. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,4)

Hasil simulasi kapasitas kanal D-MIMO (4,1,4) pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Gambar 4.2. Kotak hitam pada titik (0,0), (10,0), (0,10), dan (10,10) yang terlihat pada Gambar 4.2 merupakan port antenna pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya menunjukkan nilai kapasitas kanal (bps/Hz). Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan kapasitas kanalnya bertambah besar.



Gambar 4.2. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,4)

Nilai-nilai kapasitas kanal pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 4.1. Tanda \uparrow pada tabel menunjukkan port antenna pemancar. Penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai kapasitas kanal yang lebih besar

dibandingkan penerima yang terletak lebih jauh dari port pemancar. Penerima pada posisi (0,9) memiliki kapasitas kanal sebesar 8,72 bps/Hz dan pada posisi (5,5) memiliki kapasitas kanal sebesar 1 bps/Hz.

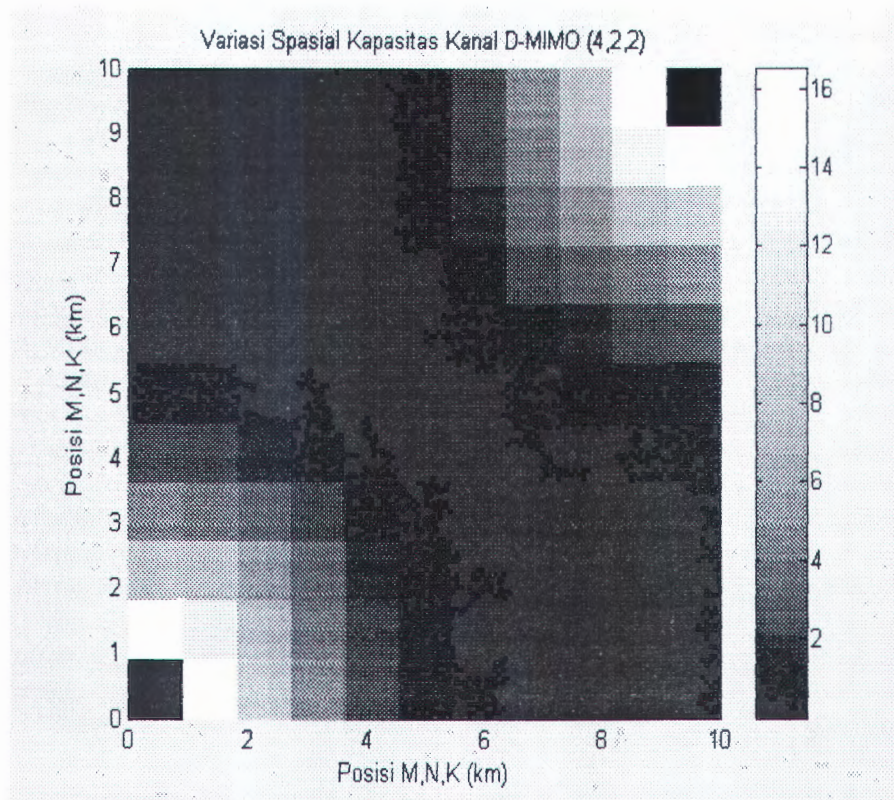
Tabel 4.1. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,4)

10	↑	8.72	4.81	2.92	1.87	1.64	1.87	2.92	4.81	8.72	↑
9	8.72	6.75	4.22	2.66	1.84	1.55	1.84	2.66	4.22	6.75	8.72
8	4.92	4.26	3.15	2.14	1.60	1.36	1.60	2.14	3.15	4.26	4.92
7	2.90	2.74	2.16	1.62	1.33	1.22	1.33	1.62	2.16	2.75	2.90
6	1.92	1.79	1.58	1.32	1.11	1.03	1.11	1.32	1.58	1.79	1.92
5	1.63	1.55	1.44	1.19	1.04	1.00	1.04	1.19	1.44	1.55	1.63
4	1.92	1.79	1.58	1.32	1.11	1.03	1.11	1.32	1.58	1.79	1.92
3	2.90	2.74	2.16	1.62	1.33	1.22	1.33	1.62	2.16	2.74	2.90
2	4.92	4.26	3.15	2.14	1.60	1.34	1.60	2.14	3.15	4.26	4.92
1	8.72	6.75	4.22	2.66	1.84	1.55	1.84	2.66	4.22	6.75	8.72
0	↑	8.72	4.81	2.92	1.87	1.64	1.87	2.92	4.81	8.72	↑
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

4.1.2.2. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,2,2)

Hasil simulasi kapasitas kanal D-MIMO (4,2,2) pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Gambar 4.3. Kotak hitam pada titik (0,0) dan (10,10)

yang terlihat pada Gambar 4.3 merupakan port antenna pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya menunjukkan nilai kapasitas kanal (bps/Hz). Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan kapasitas kanalnya bertambah besar.



Gambar 4.3. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,2,2)

Nilai-nilai kapasitas kanal pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 4.2. Tanda \uparrow pada tabel menunjukkan port antenna pemancar. Penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan penerima yang terletak lebih jauh dari port pemancar. Penerima pada

posisi (0,1) memiliki kapasitas kanal sebesar 16,54 bps/Hz dan pada posisi (0,10) memiliki kapasitas kanal sebesar 0,27 bps/Hz.

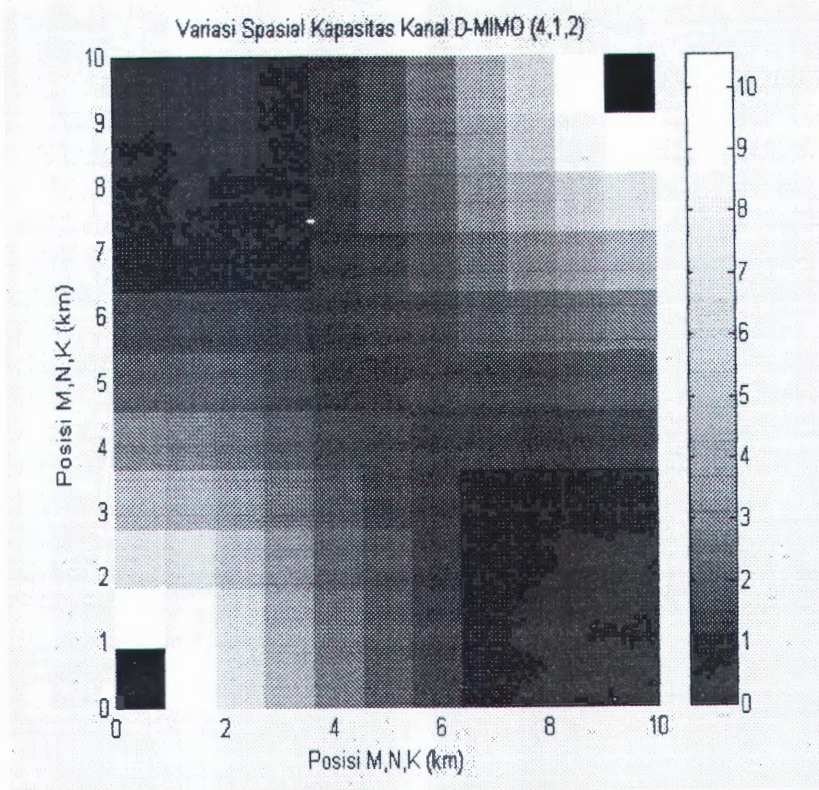
Tabel 4.2. Variasi Spasial Kapasitas D-MIMO (4,2,2)

10	0.27	0.34	0.42	0.60	0.91	1.51	2.65	4.76	8.66	16.46	↑
9	0.33	0.38	0.47	0.64	0.91	1.45	2.45	4.29	7.49	12.41	16.54
8	0.44	0.48	0.55	0.67	0.93	1.34	2.03	3.38	5.34	7.52	8.73
7	0.59	0.62	0.67	0.72	0.84	1.11	1.59	2.33	3.42	4.25	4.71
6	0.91	0.93	0.89	0.85	0.85	0.98	1.20	1.57	2.06	2.46	2.68
5	1.52	1.44	1.29	1.13	0.98	0.96	0.98	1.08	1.30	1.42	1.51
4	2.68	2.46	2.06	1.57	1.20	0.98	0.85	0.85	0.89	0.93	0.91
3	4.71	4.25	3.42	2.33	1.59	1.11	0.84	0.72	0.67	0.62	0.59
2	8.73	7.52	5.34	3.38	2.03	1.34	0.93	0.67	0.55	0.48	0.44
1	16.54	12.41	7.49	4.29	2.45	1.45	0.91	0.64	0.47	0.38	0.33
0	↑	16.46	8.66	4.76	2.65	1.51	0.91	0.60	0.42	0.34	0.27
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

4.1.2.3. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,2)

Hasil simulasi kapasitas kanal D-MIMO (4,1,2) pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Gambar 4.4. Kotak hitam pada titik (0,0) dan (10,10) merupakan port-port antenna pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya menunjukkan

nilai kapasitas kanal (bps/Hz). Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan kapasitas kanalnya bertambah besar.



Gambar 4.4. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,2)

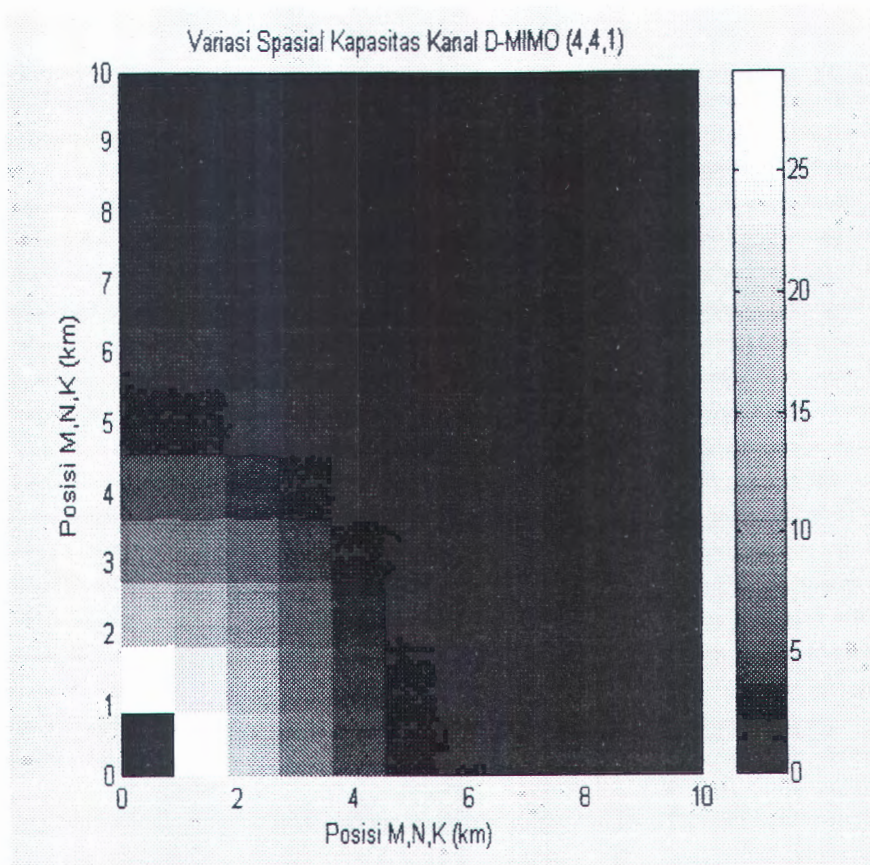
Nilai-nilai kapasitas kanal pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 4.3. Tanda \uparrow pada tabel menunjukkan port antenna pemancar. Penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan penerima yang terletak lebih jauh dari port pemancar. Penerima pada posisi (0,1) memiliki kapasitas kanal sebesar 10,56 bps/Hz dan pada posisi (0,10) memiliki kapasitas kanal sebesar 0,46 bps/Hz.

Tabel 4.3. Variasi Spasial Kapasitas D-MIMO (4,1,2)

10	0.46	0.57	0.73	0.95	1.32	1.92	2.92	4.33	6.51	10.44	↑
9	0.56	0.66	0.81	1.00	1.37	1.95	2.74	4.01	5.87	8.53	10.56
8	0.75	0.79	0.91	1.06	1.33	1.82	2.45	3.41	4.68	5.96	6.51
7	0.99	1.04	1.07	1.14	1.36	1.59	2.06	2.72	3.42	4.11	4.30
6	1.37	1.36	1.35	1.371	1.37	1.51	1.71	2.06	2.52	2.78	2.84
5	1.95	1.94	1.82	1.66	1.47	1.47	1.51	1.64	1.79	1.91	1.96
4	2.84	2.78	2.52	2.06	1.71	1.51	1.37	1.37	1.35	1.36	1.37
3	4.30	4.11	3.42	2.72	2.06	1.59	1.36	1.14	1.07	1.04	0.99
2	6.51	5.96	4.68	3.41	2.45	1.82	1.33	1.06	0.91	0.79	0.75
1	10.56	8.53	5.87	4.01	2.74	1.95	1.37	1.00	0.81	0.66	0.56
0	↑	10.44	6.51	4.33	2.92	1.92	1.32	0.95	0.73	0.57	0.46
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

4.1.2.4. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,4,1)

Hasil simulasi kapasitas kanal D-MIMO (4,4,1) pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Gambar 4.5. Dari Gambar 4.5 tersebut terlihat bahwa kotak hitam pada titik (0,0) merupakan port antenna pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya menunjukkan nilai kapasitas kanal (bps/Hz). Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan kapasitas kanalnya bertambah besar.



Gambar 4.5. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,4,1)

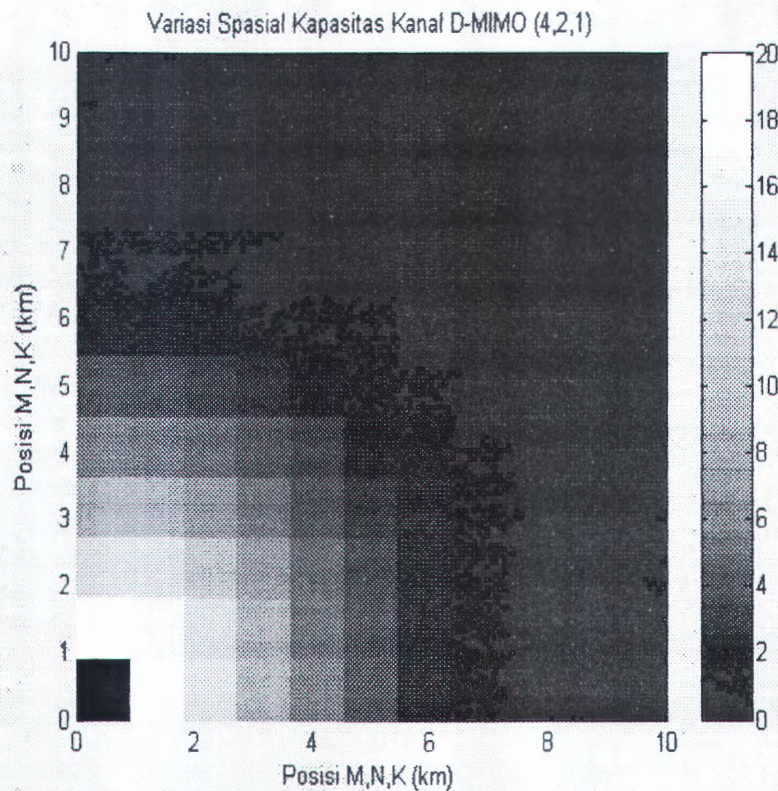
Nilai-nilai kapasitas kanal pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 4.4. Tanda $\hat{\uparrow}$ pada tabel menunjukkan port antenna pemancar. Penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan penerima yang terletak lebih jauh dari port pemancar. Penerima pada posisi (0,1) memiliki kapasitas kanal sebesar 29,23 bps/Hz dan pada posisi (0,10) memiliki kapasitas kanal sebesar 0,24 bps/Hz.

Tabel 4.4. Variasi Spasial Kapasitas D-MIMO (4,4,1)

10	0.24	0.24	0.23	0.21	0.19	0.16	0.14	0.11	0.09	0.08	0.06
9	0.35	0.37	0.33	0.29	0.26	0.22	0.18	0.15	0.12	0.10	0.08
8	0.57	0.54	0.52	0.44	0.38	0.31	0.24	0.19	0.16	0.12	0.10
7	0.89	0.87	0.80	0.66	0.55	0.44	0.34	0.24	0.19	0.15	0.11
6	1.48	1.40	1.21	1.01	0.80	0.61	0.45	0.34	0.25	0.18	0.13
5	2.58	2.35	2.07	1.65	1.23	0.86	0.61	0.41	0.30	0.22	0.16
4	4.48	4.15	3.31	2.48	1.75	1.21	0.79	0.54	0.38	0.27	0.18
3	7.93	7.36	5.62	3.82	2.48	1.55	1.02	0.67	0.44	0.30	0.21
2	14.88	12.68	8.73	5.62	3.28	1.98	1.24	0.77	0.50	0.34	0.23
1	29.23	21.78	12.65	7.20	4.07	2.34	1.35	0.88	0.56	0.35	0.24
0	↑	29.01	14.87	7.90	4.50	2.52	1.46	0.87	0.55	0.36	0.24
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

4.1.2.5. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,2,1)

Hasil simulasi kapasitas kanal D-MIMO (4,2,1) pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Gambar 4.6. Dari Gambar 4.6 tersebut terlihat bahwa kotak hitam pada titik (0,0) merupakan port antena pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya menunjukkan nilai kapasitas kanal (bps/Hz). Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan kapasitas kanalnya bertambah besar.



Gambar 4.6. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,2,1)

Nilai-nilai kapasitas kanal pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 4.1. Tanda \uparrow pada tabel menunjukkan port antena pemancar. Penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan penerima yang terletak lebih jauh dari port pemancar. Penerima pada posisi (0,1) memiliki kapasitas kanal sebesar 20,06 bps/Hz dan pada posisi (0,10) memiliki kapasitas kanal sebesar 0,46 bps/Hz.

Tabel 4.5. Variasi Spasial Kapasitas D-MIMO (4,2,1)

10	0.45	0.43	0.42	0.40	0.34	0.30	0.25	0.22	0.18	0.15	0.13
9	0.64	0.62	0.59	0.51	0.48	0.39	0.34	0.28	0.23	0.19	0.16
8	0.91	0.90	0.90	0.79	0.68	0.57	0.43	0.34	0.29	0.24	0.19
7	1.39	1.36	1.22	1.10	0.92	0.73	0.58	0.47	0.38	0.28	0.23
6	2.16	2.08	1.87	1.53	1.34	1.03	0.76	0.58	0.46	0.35	0.25
5	3.25	3.11	2.80	2.31	1.86	1.32	1.02	0.76	0.55	0.40	0.29
4	5.03	4.73	4.11	3.23	2.52	1.75	1.27	0.95	0.66	0.46	0.33
3	7.81	7.30	5.95	4.60	3.29	2.25	1.59	1.04	0.76	0.54	0.38
2	12.14	11.02	8.50	6.06	4.15	2.75	1.83	1.23	0.81	0.60	0.42
1	20.06	16.25	11.05	7.33	4.71	3.12	2.06	1.37	0.94	0.63	0.44
0	↑	20.11	12.40	7.77	5.07	3.26	2.12	1.37	0.91	0.63	0.46
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Dari berbagai konfigurasi D-MIMO untuk kapasitas kanal pada variasi spasial daerah cakupan maka kapasitas kanal maksimum dan minimum serta probabilitas kapasitas kanal di bawah 1 bps/Hz dapat dilihat pada Tabel 4.6 sebagai berikut :

Tabel 4.6. Kapasitas dan Probabilitas Kapasitas pada Konfigurasi D-MIMO

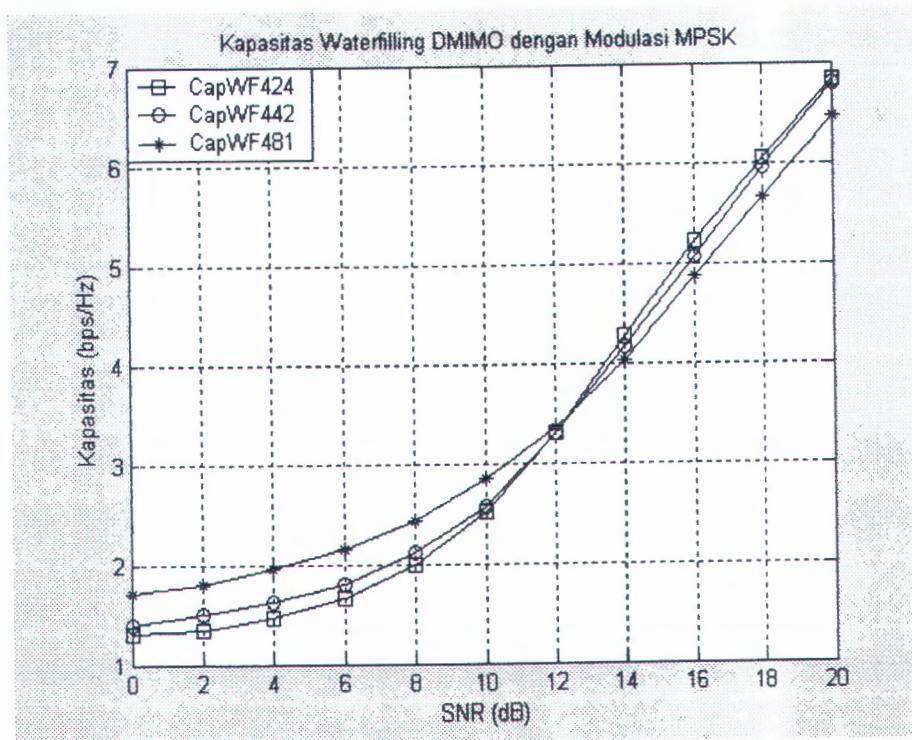
Konfigurasi D-MIMO	C_{max} (bps/Hz)	C_{min} (bps/Hz)	$P(C < 1 \text{ bps/Hz})$ (%)
(4,1,4)	8,72	1	0
(4,2,2)	16,54	0,27	46,22
(4,1,2)	10,56	0,46	18,49
(4,4,1)	29,23	0,06	65
(4,2,1)	20,11	0,13	54,17

Dari Tabel 4.6 tersebut dapat diketahui bahwa untuk konfigurasi D-MIMO di mana jumlah antena penerima dan jumlah antena pemancar sebanyak 4 buah yaitu D-MIMO (4,1,4) dan (4,2,2) adalah kapasitas kanal maksimum untuk D-MIMO (4,1,4) lebih kecil dibanding (4,2,2) tetapi kapasitas kanal minimumnya lebih besar. D-MIMO (4,1,4) mempunyai kapasitas kanal minimum sebesar 1 bps/Hz dan probabilitas $C < 1 \text{ bps/Hz}$ tidak ada sedangkan D-MIMO (4,2,2) mempunyai kapasitas kanal minimum sebesar 0,27 bps/Hz dan probabilitas $C < 1 \text{ bps/Hz}$ sebesar 46,22 %.

Pada konfigurasi D-MIMO yaitu jumlah port yang sama yaitu D-MIMO (4,2,2) dengan (4,1,2) serta (4,4,1) dengan (4,2,1) maka penambahan jumlah antena pemancar pada port akan memberikan kenaikan kapasitas pada variasi spasial yang dekat terhadap port pemancar.

4.1.3. Kapasitas Kanal Dengan Teknik Waterfilling

Kapasitas kanal dengan teknik waterfilling dilakukan pada model D-MIMO (4,2,4), (4,4,2), dan (4,8,1). Simulasi kapasitas kanal model D-MIMO ini dilakukan pada penerima yang letaknya di tengah diantara port-port pemancar. Perhitungan dilakukan sebanyak 1000 kali dengan perubahan SNR 0 sampai 20 dB dengan kenaikan 2 dB. Adapun hasil simulasinya dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Kapasitas Kanal Dengan Teknik Waterfilling

Dari Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa pada SNR 12 dB ke bawah model D-MIMO (4,8,1) mempunyai kapasitas yang lebih besar dibandingkan model D-MIMO (4,2,4) dan (4,4,2). Sebaliknya pada SNR 12 dB ke atas model

D-MIMO (4,8,1) mengalami penurunan tetapi model D-MIMO (4,2,4) mengalami peningkatan kapasitasnya. Untuk SNR 12 dB kapasitas kanal untuk ketiga model D-MIMO mempunyai nilai yang sama sebesar 3,4 bps/Hz.

4.2. Kinerja BER D-MIMO Dengan Teknik Waterfilling

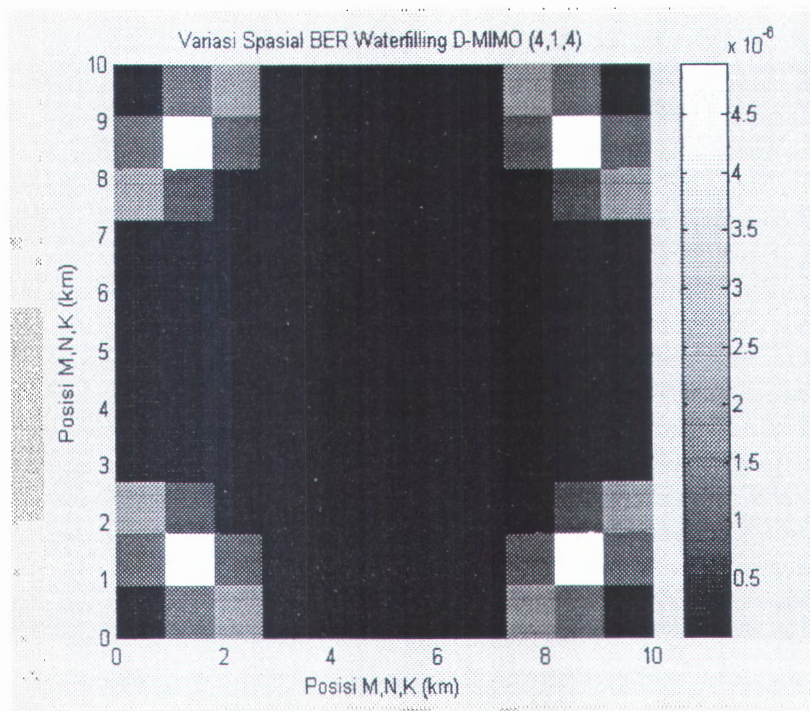
Simulasi untuk menghitung BER D-MIMO dengan teknik waterfilling dilakukan dengan simulasi *Quasi Analytic* untuk menghitung nilai-nilai BER pada variasi spasial daerah cakupan. Pada simulasi ini diasumsikan SNR sebesar 5 dB. Sedangkan untuk menghitung nilai BER pada titik pusat daerah cakupan dilakukan dengan simulasi Monte Carlo dengan membangkitkan 100.000 bit data.

4.2.1. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO

Simulasi *Quasi Analytic* untuk menghitung cakupan BER dengan teknik waterfilling dilakukan pada model D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), (4,1,2), (4,4,1), dan (4,2,1) dengan pengulangan sebanyak 1000 kali.

4.2.1.1. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,4)

Hasil simulasi variasi spasial BER waterfilling D-MIMO (4,1,4) dapat dilihat pada Gambar 4.8. Kotak hitam pada titik (0,0), (10,0), (0,10), dan (10,10) yang terlihat pada Gambar 4.8 merupakan port antenna pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya menunjukkan nilai BER. Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan nilai BERnya bertambah besar.



Gambar 4.8. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,4)

Nilai-nilai BER pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 4.7. Tanda \uparrow pada tabel menunjukkan port antenna pemancar. Penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai nilai BER yang berfluktuasi tetapi relatif lebih besar dibandingkan penerima yang terletak lebih jauh dari port pemancar. Penerima pada posisi (0,9) memiliki BER sebesar $0,95 \times 10^{-6}$ dan pada posisi (5,5) memiliki BER sebesar td karena tidak adanya pengiriman data.

Tabel 4.7. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,4)

$\times 10^{-6}$

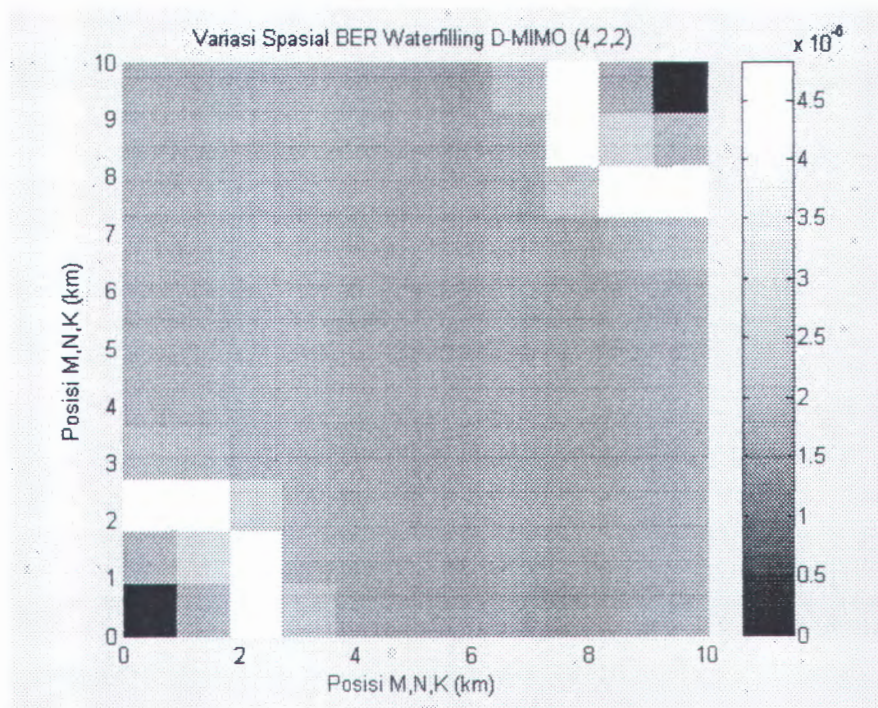
10	↑	1,20	1,87	0,07	td	td	td	0,07	1,87	1,20	↑
9	0,95	4,95	0,89	td	td	td	td	td	0,89	4,95	0,95
8	1,98	0,80	0,03	td	td	td	td	td	0,03	0,80	1,98
7	td	0,08	td	td	td	td	td	td	td	0,08	td
6	td	td	td	td	td	td	td	td	td	td	td
5	td	td	td	td	td	td	td	td	td	td	td
4	td	td	td	td	td	td	td	td	td	td	td
3	td	0,08	td	td	td	td	td	td	td	0,08	td
2	1,98	0,80	0,03	td	td	td	td	td	0,03	0,80	1,98
1	0,95	4,95	0,89	td	td	td	td	td	0,89	4,95	0,95
0	↑	1,20	1,87	0,07	td	td	td	0,07	1,87	1,20	↑
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

td = tidak ada pengiriman data

4.2.1.2. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,2)

Hasil simulasi variasi spasial BER waterfilling D-MIMO (4,2,2) dapat dilihat pada Gambar 4.9. Kotak hitam pada titik (0,0) dan (10,10) yang terlihat pada Gambar 4.9 merupakan port antena pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya menunjukkan

nilai BER. Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan nilai BERnya bertambah besar.



Gambar 4.9. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,2)

Nilai-nilai BER pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 4.8. Tanda \uparrow pada tabel menunjukkan port antena pemancar. Penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai nilai BER yang berfluktuasi tetapi relatif lebih besar dibandingkan penerima yang terletak lebih jauh dari port pemancar yaitu lebih stabil. Penerima pada posisi (0,1) memiliki BER sebesar $2,01 \times 10^{-6}$ dan pada posisi (0,10) memiliki BER sebesar $1,89 \times 10^{-6}$.

Tabel 4.8. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,2)

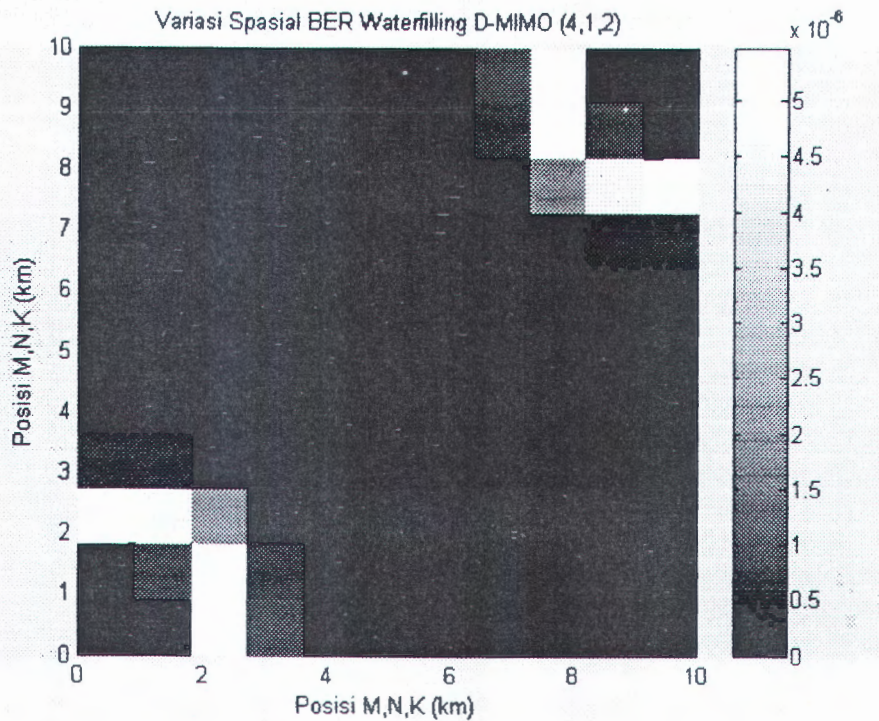
$\times 10^{-6}$

10	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	2,24	4,82	1,97	↑
9	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,94	4,29	2,68	2,01
8	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,90	2,35	4,17	4,67
7	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,94	2,07	2,17
6	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,95
5	1,94	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
4	1,95	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
3	2,17	2,07	1,94	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
2	4,67	4,17	2,35	1,90	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
1	2,01	2,68	4,29	1,94	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
0	↑	1,97	4,82	2,24	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

4.2.1.3. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,2)

Hasil simulasi variasi spasial BER waterfilling D-MIMO (4,1,2) dapat dilihat pada Gambar 4.10. Kotak hitam pada titik (0,0) dan (10,10) yang terlihat pada Gambar 4.10 merupakan port antena pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya

menunjukkan nilai BER. Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan nilai BERnya bertambah besar.



Gambar 4.10. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,2)

Nilai-nilai BER pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 4.9. Tanda ↑ pada tabel menunjukkan port antenna pemancar. Penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai nilai BER yang berfluktuasi tetapi relatif lebih besar dibandingkan penerima yang terletak lebih jauh dari port pemancar yaitu lebih stabil. Penerima pada posisi (0,1) memiliki BER sebesar $0,06 \times 10^{-6}$ dan pada posisi (0,10) memiliki BER sebesar td karena tidak ada pengiriman data.

Tabel 4.9. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,2)

$\times 10^{-6}$

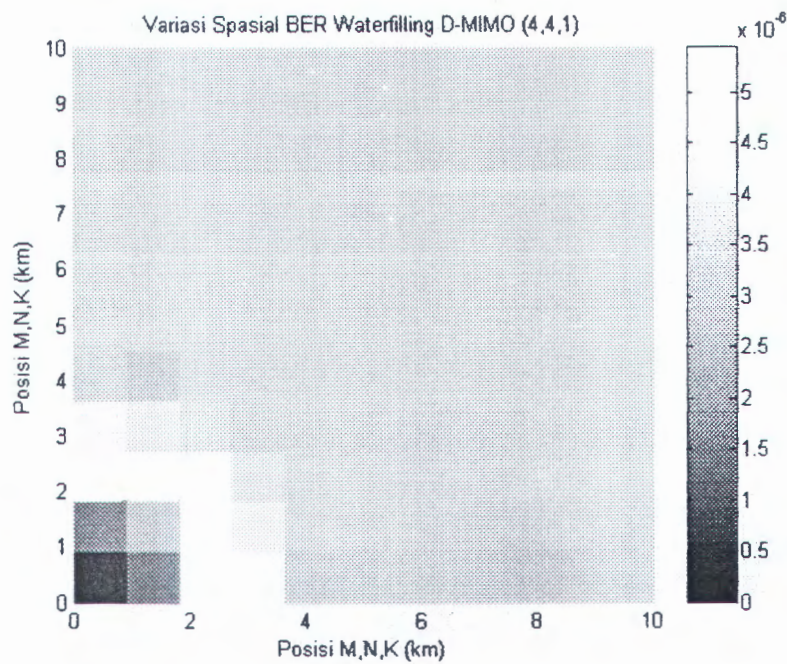
10	td	td	td	td	td	td	td	0,94	5,27	0,11	↑
9	td	td	td	td	td	td	0,08	0,76	5,47	0,81	0,06
8	td	td	td	td	td	td	0,08	0,07	1,89	4,59	5,07
7	td	td	td	td	td	td	td	td	0,01	0,60	0,68
6	td	td	td	td	td	td	td	td	td	td	0,06
5	td	td	td	td	td	td	td	td	td	td	td
4	0,06	td	td	td	td	td	td	td	td	td	td
3	0,68	0,60	0,01	td	td	td	td	td	td	td	td
2	5,07	4,59	1,89	0,07	0,08	td	td	td	td	td	td
1	0,06	0,81	5,47	0,76	0,08	td	td	td	td	td	td
0	↑	0,11	5,27	0,94	td	td	td	td	td	td	td
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

td = tidak ada pengiriman data



4.2.1.4. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,4,1)

Hasil simulasi variasi spasial BER waterfilling D-MIMO (4,4,1) dapat dilihat pada Gambar 4.11. Kotak hitam pada titik (0,0) yang terlihat pada Gambar 4.11 merupakan port antena pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya menunjukkan nilai BER. Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan nilai BERnya bertambah besar.



Gambar 4.11. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,4,1)

Nilai-nilai BER pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 4.10. Tanda \uparrow pada tabel menunjukkan port antenna pemancar. Penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai nilai BER yang berfluktuasi tetapi relatif lebih besar dibandingkan penerima yang terletak lebih jauh dari port pemancar yaitu lebih stabil. Penerima pada posisi (0,2) memiliki BER sebesar $5,08 \times 10^{-6}$ dan pada posisi (0,10) memiliki BER sebesar $2,90 \times 10^{-6}$.

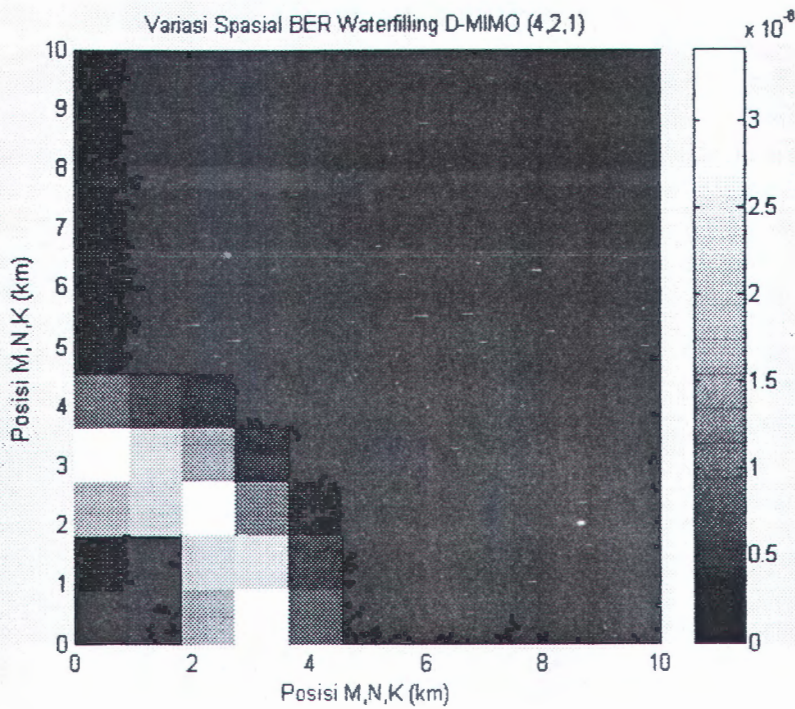
Tabel 4.10. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,4,1)

$\times 10^{-6}$

10	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
9	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
8	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
7	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
6	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
5	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
4	2,83	2,47	2,96	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
3	4,15	3,72	3,20	2,96	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
2	5,08	4,28	5,18	3,31	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
1	1,30	2,42	5,43	3,92	3,02	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
0	↑	1,34	4,95	4,48	2,93	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

4.2.1.4. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,1)

Hasil simulasi variasi spasial BER waterfilling D-MIMO (4,2,1) dapat dilihat pada Gambar 4.12. Kotak hitam pada titik (0,0) yang terlihat pada Gambar 4.12 merupakan port antenna pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya menunjukkan nilai BER. Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan nilai BERnya bertambah besar.



Gambar 4.12. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,1)

Nilai-nilai BER pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 4.11. Tanda \uparrow pada tabel menunjukkan port antenna pemancar. Penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai nilai BER yang berfluktuasi tetapi relatif lebih besar dibandingkan penerima yang terletak lebih jauh dari port pemancar yaitu lebih stabil. Penerima pada posisi (0,2) memiliki BER sebesar $1,46 \times 10^{-6}$ dan pada posisi (0,10) memiliki BER sebesar $0,22 \times 10^{-6}$.

Tabel 4.11. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,1)

$\times 10^{-6}$

10	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
9	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
8	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
7	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
6	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
5	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
4	0,83	0,50	0,42	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
3	3,41	2,06	1,28	0,42	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
2	1,46	1,82	3,01	0,86	0,32	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
1	0,33	0,25	1,87	2,09	0,45	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
0	↑	0,22	1,37	3,03	0,68	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Dari berbagai konfigurasi D-MIMO pada variasi spasial BER waterfilling maka nilai BER maksimum dan probabilitas BER lebih besar dari 10^{-6} dan 10^{-7} dapat dilihat pada Tabel 4.12 sebagai berikut :

Tabel 4.12. BER Maksimum dan Probabilitas BER pada Konfigurasi D-MIMO

Konfigurasi D-MIMO	BER Maksimum	P(BER>10 ⁻⁶) (%)	P(BER>10 ⁻⁷) (%)	P(D-MIMO Tak Berfungsi) (%)
(4,1,4)	4,95x10 ⁻⁶	13,68	23,93	65,81
(4,2,2)	4,82x10 ⁻⁶	100	100	0
(4,1,2)	5,47x10 ⁻⁶	8,40	18,49	71,43
(4,4,1)	5,43x10 ⁻⁶	100	100	0
(4,2,1)	3,41x10 ⁻⁶	8,33	100	0

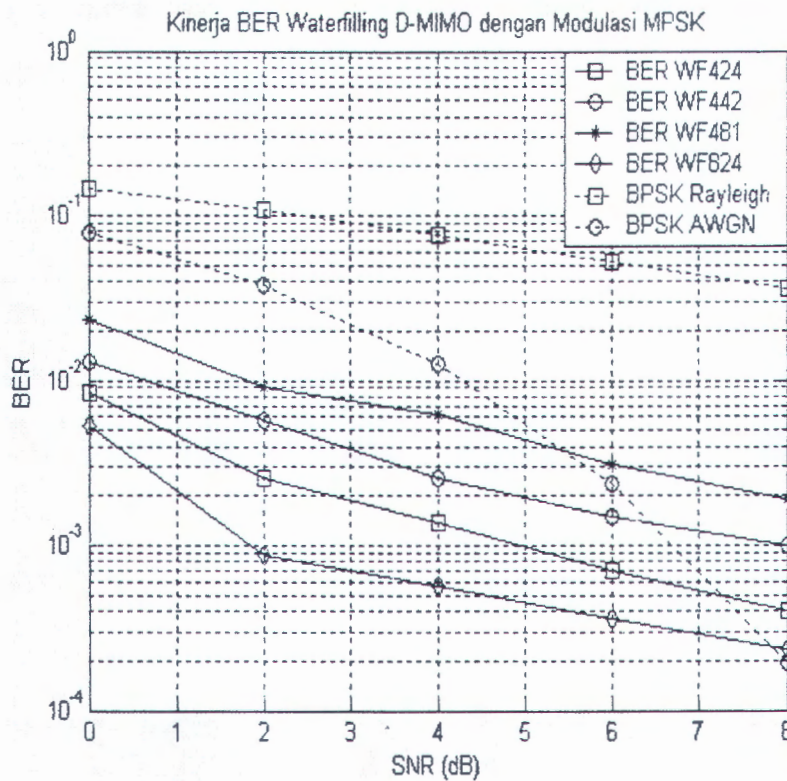
Dari Tabel 4.12 tersebut diketahui bahwa untuk konfigurasi D-MIMO dimana jumlah antena penerima dan jumlah antena pemancar sama dengan 4 buah yaitu D-MIMO (4,1,4) dan (4,2,2) adalah kinerja BER pada D-MIMO (4,1,4) memiliki nilai BER lebih besar yaitu $4,95 \times 10^{-6}$ serta probabilitas BER > 10^{-6} dan BER > 10^{-7} sebesar 13,68 % dan 23,93 %. Sedangkan pada D-MIMO (4,2,2) memiliki nilai BER yang lebih kecil yaitu $4,82 \times 10^{-6}$ serta probabilitas BER > 10^{-6} dan BER > 10^{-7} sebesar 100 %.

Pada konfigurasi D-MIMO di mana port pemancar lebih dari satu maka penambahan jumlah antena pemancar akan memperbaiki kinerja BER. Ini dapat dilihat pada konfigurasi D-MIMO (4,1,2) dan (4,2,2). Dan pada konfigurasi D-MIMO di mana jumlah port pemancar sama dengan satu (C-MIMO) maka penambahan jumlah antena pemancar akan menurunkan kinerja sistem D-MIMO

tetapi pada penerima yang jauh maka nilai BERnya stabil. Ini dapat dilihat pada konfigurasi D-MIMO (4,4,1) dan (4,2,1).

4.2.2. BER pada D-MIMO dengan Teknik Waterfilling

Menghitung BER dengan teknik Waterfilling pada model D-MIMO (4,2,4), (4,4,2), (4,8,1), dan (8,2,4) dengan menggunakan simulasi Monte Carlo. Hasil simulasi ini dibandingkan dengan BER pada modulasi BPSK pada kanal AWGN dan Rayleigh. Adapun hasil simulasinya dapat dilihat pada Gambar 4.13.

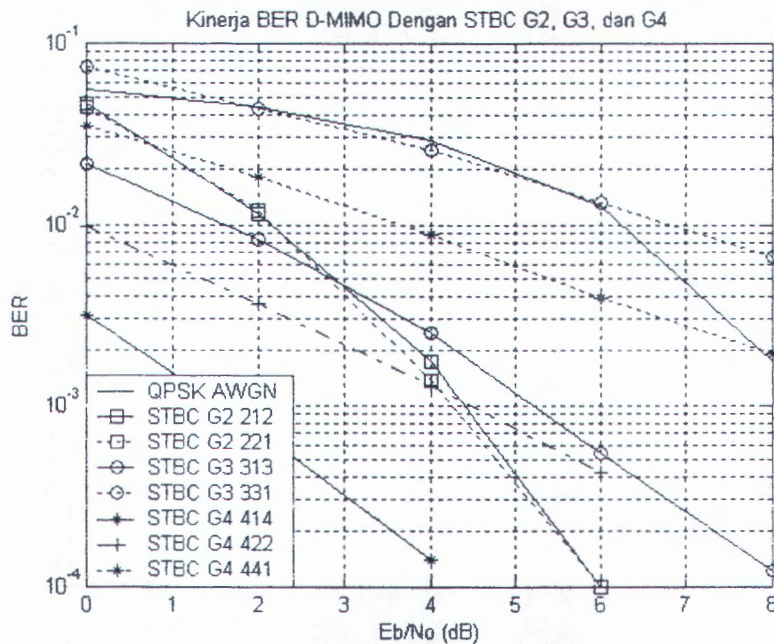


Gambar 4.13. BER D-MIMO dengan Teknik Waterfilling

Dari Gambar 4.13 dapat diketahui bahwa pada modulasi BPSK kanal AWGN untuk menurunkan nilai BER dari 10^{-1} ke 10^{-2} dibutuhkan penambahan SNR sebesar 4 dB sedangkan pada kanal Rayleigh dibutuhkan SNR lebih dari 8 dB. Dengan teknik waterfilling untuk SNR dibawah 5,5 dB maka model D-MIMO yang digunakan menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan apabila menggunakan BPSK pada kanal AWGN. Diantara model D-MIMO yang digunakan model D-MIMO (8,2,4) memiliki kinerja yang terbaik.

4.3. BER D-MIMO dengan Pengkodean STBC

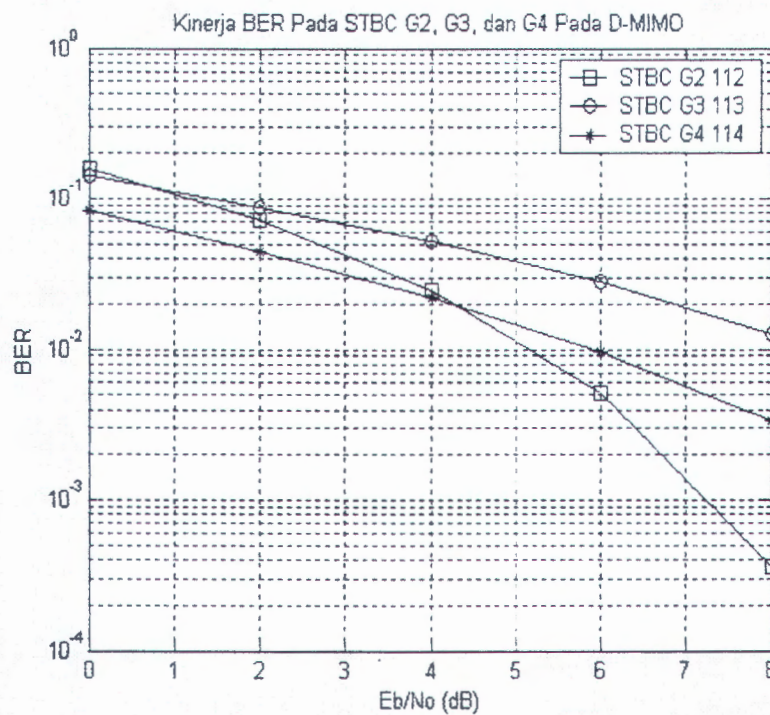
Hasil simulasi untuk kinerja BER D-MIMO dengan pengkodean STBC dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14. Kinerja BER D-MIMO pada STBC G_2 , G_3 , dan G_4

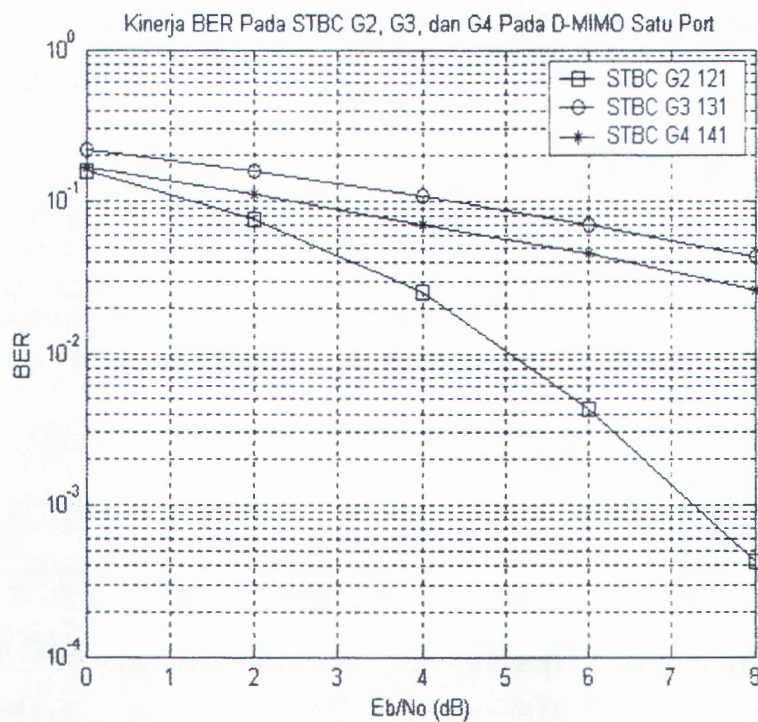
Dari Gambar 4.14 ditunjukkan bahwa kinerja STBC G_2 untuk model D-MIMO (2,1,2) hampir sama dengan model D-MIMO (2,2,1). STBC G_3 untuk model D-MIMO (3,1,3) memiliki nilai BER lebih kecil dibandingkan D-MIMO (3,3,1). Sedangkan STBC G_4 pada model D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), dan (4,4,1) memiliki kinerja BER berturut-turut dari yang terbaik ke yang paling jelek. Urutan nilai BERnya yaitu 1×10^{-4} , $1,3 \times 10^{-3}$, dan $8,8 \times 10^{-3}$ pada E_b/N_0 4 dB.

Sedangkan untuk D-MIMO dengan pengkodean STBC G_2 , G_3 , dan G_4 dengan antenna penerima sebanyak satu buah yaitu pada konfigurasi D-MIMO (1,1,2), (1,1,3), dan (1,1,4) dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15. Kinerja BER D-MIMO pada STBC G_2 , G_3 , dan G_4
Dengan Antena Penerima Satu Buah

Dari Gambar 4.15 tersebut terlihat bahwa untuk E_b/N_0 di atas 4 dB, kinerja BER dengan STBC G_2 pada D-MIMO (1,1,2) memiliki BER yang paling kecil dibandingkan STBC G_3 pada D-MIMO (1,1,3) dan STBC G_4 pada D-MIMO (1,1,4). Sedangkan kinerja BER D-MIMO pada STBC G_2 , G_3 , dan G_4 dengan jumlah port pemancar sebanyak satu buah yaitu D-MIMO (1,2,1), (1,3,1), dan (1,4,1) dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16. Kinerja BER D-MIMO pada STBC G_2 , G_3 , dan G_4
Dengan Port Pemancar Satu Buah

Dari Gambar 4.16 tersebut bahwa untuk E_b/N_0 dari 0 – 8 dB maka kinerja BER D-MIMO dengan jumlah port pemancar satu buah maka kinerja BER dari yang

paling baik ke yang paling jelek berturut-turut adalah STBC G_2 , G_4 , dan G_3 pada konfigurasi D-MIMO (1,2,1), (1,3,1), dan (1,4,1).

Kinerja BER dengan pengkodean STBC pada konfigurasi D-MIMO untuk jumlah antena penerima satu buah dibandingkan konfigurasi D-MIMO dengan jumlah port pemancar satu buah bahwa kode STBC G_2 untuk konfigurasi jumlah port pemancar satu buah memiliki kinerja BER yang paling baik mengungguli STBC G_3 dan G_4 . Tetapi dengan konfigurasi D-MIMO pada jumlah antena penerima satu buah maka kinerja BER untuk kode STBC G_3 dan G_4 mengalami perbaikan. Hal ini disebabkan oleh adanya faktor shadowing yang mengakibatkan terjadinya penguatan kanal pada saat pengiriman simbol. Secara keseluruhan hasil simulasi pada Gambar 4.15 dan 4.16 dikuatkan oleh penelitian yang dilakukan Tarokh [10].

4.4. Diskusi

Kapasitas kanal teoritis D-MIMO untuk penerima berada di titik pusat daerah cakupan yaitu model D-MIMO (4,2,4) memiliki kapasitas kanal yang terbesar dibandingkan model (4,4,2) dan (4,8,1). Hal ini disebabkan oleh adanya faktor shadowing dan *macrodiversity* pada sistem D-MIMO. Pada variasi spasial daerah cakupan kapasitas kanal teoritis D-MIMO adalah untuk penerima yang berada dekat port pemancar memiliki kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan penerima yang berada jauh dari port pemancar. Sedangkan kapasitas kanal dengan teknik waterfilling adalah untuk SNR di bawah 12 dB maka model D-MIMO (4,8,1) memiliki kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan model D-MIMO (4,2,4) dan (4,4,2). Sebaliknya pada SNR 12 dB ke atas model D-MIMO (4,8,1) mengalami

penurunan tetapi model D-MIMO (4,2,4) dan (4,4,2) mengalami peningkatan kapasitas.

Nilai BER D-MIMO dengan teknik waterfilling pada variasi spasial daerah cakupan adalah penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai nilai BER yang berfluktuasi tetapi relatif lebih besar dibandingkan penerima yang terletak jauh dari port pemancar yaitu lebih stabil. Sedangkan kinerja BER D-MIMO dengan teknik waterfilling untuk penerima terletak di titik pusat daerah cakupan maka nilai BER berturut-turut meningkat mengikuti model D-MIMO (4,8,1), (4,4,2), (4,2,4), dan (8,2,4).

Dengan pengkodean STBC maka kinerja BER D-MIMO terlihat bahwa untuk STBC G_4 pada konfigurasi D-MIMO (4,1,4) dengan E_b/N_0 di bawah 6 dB mempunyai kinerja terbaik dibandingkan STBC G_3 dan G_2 . Sedangkan pada STBC G_4 dengan model D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), dan (4,4,1) maka kinerja BER berturut-turut adalah 1×10^{-4} , $1,3 \times 10^{-3}$, dan $8,8 \times 10^{-3}$.

Penerapan D-MIMO untuk meningkatkan kapasitas kanal maka konfigurasi yang sebaiknya digunakan adalah konfigurasi di mana port pemancar yang terdistribusi dengan jumlah antena pemancar berjumlah satu. Ini dapat dilihat pada simulasi konfigurasi D-MIMO (4,1,4). Sedangkan untuk meningkatkan kinerja BER dengan teknik waterfilling maka konfigurasi yang sebaiknya digunakan adalah konfigurasi di mana port pemancar yang terdistribusi tetapi jumlah antena pemancar lebih dari satu. Dalam hal ini dapat dilihat pada simulasi D-MIMO (4,2,2). Apabila diterapkan pengkodean STBC pada D-MIMO maka kode yang paling baik adalah STBC G_4 dengan model D-MIMO (4,1,4) pada E_b/N_0 di bawah 6 dB.

BAB V

PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan mengenai hasil simulasi yang telah dilakukan dan saran penelitian yang bisa dikembangkan serta pemilihan model sistem D-MIMO.

5.1. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan maka dapat dibuat kesimpulan sebagai berikut yaitu :

1. Sistem D-MIMO (4,2,4) memiliki kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan D-MIMO (4,4,2) dan (4,8,1) pada kondisi adanya pengaruh shadowing. Perbedaan kapasitasnya pada CDF 0,4 untuk D-MIMO (4,8,1) dan (4,2,4) sebesar 3 bps/Hz. Hal ini disebabkan oleh adanya *macrodiversity* yang mengurangi pengaruh dari fading dan shadowing yang mengakibatkan penguatan kanal menjadi besar.
2. Variasi spasial kapasitas kanal daerah cakupan pada sistem D-MIMO menunjukkan bahwa lokasi penerima yang dekat dengan port antena pemancar mempunyai kapasitas yang lebih besar dibandingkan yang jauh dari port antena pemancar. Untuk antena pemancar yang terdistribusi maka kapasitas kanalnya menjadi lebih besar yang dapat dilihat pada model D-MIMO (4,1,4) dengan D-MIMO (4,2,2). Penambahan antena pada sisi pemancar hanya berpengaruh pada kapasitas kanal yang dekat port pemancar sedangkan pada penerima yang jauh maka kapasitasnya menurun yang dapat

dilihat pada model D-MIMO (4,1,2) dan D-MIMO (4,2,2). Ini disebabkan oleh adanya pengaruh fading skala besar di mana untuk penerima yang dekat dengan port pemancar mengalami penguatan kanal yang lebih besar dibandingkan penerima yang jauh.

3. Kapasitas kanal pada sistem D-MIMO dengan teknik waterfilling pada SNR sebesar 12 dB memiliki kapasitas yang sama untuk ketiga model. SNR dibawah 12 dB maka kapasitas kanal D-MIMO (4,8,1) memiliki nilai yang paling besar. Sedangkan SNR diatas 12 dB maka kapasitas kanal untuk antena pemancar terdistribusi menunjukkan nilai yang lebih baik yaitu pada model D-MIMO (4,2,4). Kenyataan ini akibat dari adanya macrodiversity pada antena pemancar yang terdistribusi yang menyebabkan berkurangnya pengaruh fading. Dan adanya pengaruh shadowing yang mengakibatkan penguatan kanal menjadi lebih besar.
4. Variasi spasial kinerja BER sistem D-MIMO dengan teknik waterfilling pada simulasi *Quasi Analytic* menunjukkan bahwa kinerja BER yang dekat port antena pemancar mempunyai BER yang berfluktuasi tetapi relatif lebih besar dibandingkan yang jauh pada port antena pemancar tetapi untuk antena pemancar yang terdistribusi dengan satu antena maka pada daerah tertentu tidak terjadi pengiriman data yang terlihat pada model D-MIMO (4,1,4) dan (4,1,2). Sedangkan penambahan jumlah antena pada port pemancar akan meningkatkan kinerja BER untuk semua daerah cakupan seperti terlihat pada model D-MIMO (4,1,2) dan (4,2,2). Hal ini disebabkan oleh penggunaan teknik waterfilling pada D-MIMO di mana untuk penerima yang jauh dari

port pemancar (lebih dari satu antena) menghasilkan SNR yang lebih besar dibandingkan yang dekat port pemancar.

5. Kapasitas kanal dan kinerja BER pada variasi spasial daerah cakupan sistem D-MIMO menunjukkan bahwa penerima yang dekat dengan port pemancar mempunyai kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan dengan yang jauh dari port pemancar. Sebaliknya, kinerja BER pada penerima yang dekat port pemancar menunjukkan penurunan dibandingkan dengan penerima yang jauh dari port pemancar.
6. Kinerja BER sistem D-MIMO dengan teknik waterfilling pada simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa model D-MIMO (4,2,4) memiliki kinerja yang terbaik dibandingkan model D-MIMO (4,4,2) dan (4,8,1). Tetapi penambahan jumlah antena penerima menjadi 8 antena menyebabkan kinerjanya mendekati kinerja BPSK pada kanal AWGN untuk SNR sebesar 8 dB. Hal ini diakibatkan oleh adanya pengaruh macrodiversity yang mengurangi pengaruh fading dan adanya shadowing yang mengakibatkan SNR yang dihasilkan menjadi bertambah besar.
7. Kinerja BER D-MIMO dengan pengkodean STBC untuk E_b/N_0 kurang dari 6 dB maka STBC G_4 pada konfigurasi D-MIMO (4,1,4) memiliki kinerja BER yang paling baik. E_b/N_0 di atas 4 dB maka kinerja BER STBC G_2 melampaui G_4 pada konfigurasi D-MIMO (4,2,2), (4,4,1), dan STBC G_3 . Sedangkan untuk antena penerima satu buah pada konfigurasi D-MIMO (1,1,2), (1,1,3), dan (1,1,4) maka kinerja BER STBC G_3 dan G_4 mengalami perbaikan dibandingkan dengan jumlah port pemancar satu buah pada konfigurasi D-MIMO (1,2,1), (1,3,1), dan (1,4,1). Hal ini disebabkan oleh

adanya faktor shadowing yang mengakibatkan terjadinya penguatan kanal pada saat pengiriman simbol.

8. Konfigurasi dari sistem D-MIMO akan mempengaruhi kapasitas kanal dan kinerja BER. Konfigurasi D-MIMO untuk jumlah port pemancar yang terdistribusi yaitu D-MIMO (4,1,4) mengakibatkan kenaikan kapasitas kanal pada daerah cakupan tetapi kinerja BER berkurang. Untuk memperbaiki kinerja BERnya maka konfigurasi D-MIMO yang digunakan adalah jumlah port yang terdistribusi dengan jumlah antena lebih dari satu yaitu D-MIMO (4,2,2) tetapi kapasitas kanalnya pada daerah cakupan menjadi berkurang.

5.2. Saran

1. Dalam pemilihan konfigurasi sistem D-MIMO harus memperhatikan dua yang berbeda yang ada di muka bumi. Dalam kasus ini yaitu satu sisi kapasitasnya yang diperbaiki tetapi sisi lain kinerja BERnya menurun. Sehingga dalam penerapan sistem D-MIMO harus memperhatikan hal tersebut supaya kedua sisi dapat tercapai dengan baik.
2. Dalam penelitian selanjutnya untuk sistem D-MIMO bisa diterapkan kanal selektif fading dan untuk meningkatkan kinerjanya dapat digunakan teknik yang lain selain waterfilling dan STBC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Stanford University Press, 2005.
- [2] H. Zhang and H. Dai, "On The Capacity of Distributed MIMO Systems", *Conference on Information Sciences and Systems, Princeton University*, March 17-19, 2004.
- [3] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communications*. Cambridge University Press, September 10, 2004.
- [4] B. Sklar, *Digital Communications Fundamentals and Applications*. Prentice Hall PTR. USA, 2001
- [5] T. S. Rappaport, *Wireless Communication Principles and Practice*. Prentice Hall, USA, 2002.
- [6] J. B. Andersen, "Array Gain and Capacity for Known Random Channels with Multiple Element Arrays at Both Ends", *IEEE Journal*, Vol. 18, No. 11, November 2000.
- [7] D. P. Palomar, "Practical Algorithms for a Family of Waterfilling Solutions", *IEEE Transaction on Signal Processing*, Vol. 53, No. 2, February 2005.
- [8] J. G. Proakis, *Digital Communications*. McGraw-Hill, Singapore, 2001.
- [9] M. Alamgir, *Different Multiple Input Multiple Output Systems*. Master Thesis, Victoria University of Technology, Melbourne, May 2003.
- [10] V. Tarokh, H. Jafarkhani, A. Robert C, "Space-Time Block Coding for Wireless Communications: Performance Results", *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, Vol. 17, No. 3, March 1999.
- [11] I. A. Glover and P. M. Grant, *Digital Communications*. Pearson Education Limited. England, 2004.
- [12] J. G. Proakis and M. Salehi, *Contemporary Communication Systems Using Matlab*. Brooks/Cole, USA, 2000.

LAMPIRAN A : DAFTAR SIMBOL

h	=	kanal Rayleigh
<i>Normal</i>	=	Gaussian
P_r	=	daya terima
P_t	=	daya Pancar
G_t	=	gain antena pemancar
G_r	=	gain antena penerima
λ	=	panjang gelombang sinyal
d	=	jarak pemancar - penerima
L	=	rugi-rugi lintasan kanal
n	=	pangkat dari jarak lintasan
σ	=	standar deviasi
H_d	=	kanal D-MIMO
M	=	jumlah antena penerima
N	=	jumlah antena pemancar
K	=	jumlah port pemancar
ρ	=	SNR
U	=	matriks unitary U
V	=	matriks unitary V
S	=	matriks diagonal non negatif
σ^2	=	daya noise
λ_i	=	gain kanal
P_i	=	daya tiap subkanal
S_k	=	jumlah subkanal
μ	=	waterlevel
α_i	=	$\sqrt{P_i}$ = bobot waterfiling
P_t	=	$\min(M, NK)$ = daya total
$S_i(t)$	=	sinyal transmisi
$M_{a,v}$	=	level modulasi
E	=	energi sinyal
θ_i	=	fasa sinyal transmisi
T	=	periode sinyal
f_c	=	frekuensi sinyal pembawa
P_s	=	probabilitas kesalahan simbol
P_b	=	probabilitas kesalahan bit
E_s	=	energi simbol
E_b	=	energi bit
$G_{2,3,4}$	=	kode STBC
s_k	=	entri dari matriks kode STBC
k	=	konstelasi
P	=	banyaknya slot waktu
R	=	code rate STBC
P_e	=	probability of error
BER	=	bit error rate

LAMPIRAN B : LISTING PROGRAM MATLAB

```
% Kanal D-MIMO Tanpa Pengaruh Jarak
% Model D-MIMO (M,N,K)
M = input('Jumlah Antena Penerima (M) = ');
N = input('Jumlah Antena Pemancar (N) = ');
K = input('Jumlah Port (K) = ');
Sampel = 1000;

% Posisi (M,N,K)
% Posisi Port Pemancar
a = [0,10,0,10];
b = [0,0,10,10];
% Posisi Penerima
c = 5;
d = 5;

% Lognormal Shadowing untuk Link dimana SD = 8 dB
x = randn(1,K,Sampel)*sqrt(8);
X = 10.^(x/10);

% Bangkitkan kanal Rayleigh D-MIMO(M,N*K,Sampel)
h = (randn(M,N*K,Sampel)+j*randn(M,N*K,Sampel))/sqrt(2*N*K);
Hd = [];
for e = 1:Sampel
    for ep = 1:K
        Hd = cat(2,Hd,h(:,(ep-1)*N+1:ep*N,e)*X(:,ep,e));
    end
end
for e = 1:Sampel
    Hdd = Hd(:,(8*(e-1)+1):(8*e));
    HD(:,:,e) = Hdd;
end

% SNR = 15 dB
SNR = 15;
P = 10^(SNR/10);

% Kanal D-MIMO

% Model D-MIMO (M,N,K)
M = input('Jumlah Antena Penerima (M) = ');
N = input('Jumlah Antena Pemancar (N) = ');
K = input('Jumlah Port (K) = ');
Sampel = 1000;

% Pangkat dari Jarak
n = 4;

% Posisi (M,N,K)
% Posisi Port Pemancar
a = [0,10,0,10];
b = [0,0,10,10];
% Posisi Penerima
c1 = [1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4
5];
d1 = [0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 5 5 5 5 5
5];

% Efek Jarak
ej = mean((sqrt(c1.^2+d1.^2)*1000).^(-n,2));
```

```

for u = 1:35
    c = cl(u);
    d = dl(u);
u

* Perhitungan Jarak
jarak = sqrt((a-c).^2+(b-d).^2)*1000;

* Lognormal Shadowing untuk Link dimana SD = 8 dB
x = randn(1,K,Sampel)*sqrt(8);
X = 10.^(x/10);

% Large Scale Fading
for e = 1:Sampel
    for ep = 1:K
        Lsf(:,ep,e)=sqrt(X(:,ep,e)*jarak(ep).^(-n));
    end
end

% Bangkitkan kanal Rayleigh D-MIMO(M,N*K,1000)
h = (randn(M,N*K,Sampel)+j*randn(M,N*K,Sampel))/sqrt(2*N*K);
Hd = [];
for e = 1:Sampel
    for ep = 1:K
        Hd = cat(2,Hd,h(:,(ep-1)*N+1:ep*N,e)*Lsf(:,ep,e));
    end
end

for e = 1:Sampel
    Hdd = Hd(:,(4*(e-1)+1):(4*e));
    Hd_d(:,e) = Hdd;
end

% Normalisasi Kanal D-MIMO
HD_norm = Hd_d/sqrt(ej);
HD = HD_norm;

% SNR = 15 dB
SNR = 15;
P = 10^(SNR/10);

% Perhitungan Kapasitas Teoritis D-MIMO
for e = 1:Sampel
    Cap_D(e) = log2 (det (eye(M)+(P*H_HD(e))/N*K));
end

% Plot CDF Kapasitas D-MIMO
plot (Cap_DMIMO,'k');
xlabel('Kapasitas (bps/Hz)');
ylabel('CDF');
legend('D-MIMO(M,N,K)');
title('Kapasitas Teoritis D-MIMO');
grid on

% Perhitungan Variasi Spasial Kapasitas Teoritis D-MIMO

% Kapasitas Teoritis D-MIMO
for e = 1:Sampel
    Cap_D(e) = log2 (det (eye(M)+(P*H_HD(:,e))/N*K));
end

Cap_DM(c+1,d+1) = mean(real(Cap_D));
end

```

```

Cap_ud = [Cap_DM(5,1) Cap_DM(5,2) Cap_DM(5,3) Cap_DM(5,4) Cap_DM(5,5)
          Cap_DM(5,6); Cap_DM(4,1) Cap_DM(4,2) Cap_DM(4,3) Cap_DM(4,4)
          Cap_DM(4,5) Cap_DM(4,6); Cap_DM(3,1) Cap_DM(3,2) Cap_DM(3,3)
          Cap_DM(3,4) Cap_DM(3,5) Cap_DM(3,6); Cap_DM(2,1) Cap_DM(2,2)
          Cap_DM(2,3) Cap_DM(2,4) Cap_DM(2,5) Cap_DM(2,6);
          Cap_DM(1,1) Cap_DM(1,2) Cap_DM(1,3) Cap_DM(1,4) Cap_DM(1,5)
          Cap_DM(1,6)];
Cap_lr = [Cap_DM(6,1) Cap_DM(6,2) Cap_DM(6,3) Cap_DM(6,4) Cap_DM(6,5);
          Cap_DM(5,1) Cap_DM(5,2) Cap_DM(5,3) Cap_DM(5,4) Cap_DM(5,5);
          Cap_DM(4,1) Cap_DM(4,2) Cap_DM(4,3) Cap_DM(4,4) Cap_DM(4,5);
          Cap_DM(3,1) Cap_DM(3,2) Cap_DM(3,3) Cap_DM(3,4) Cap_DM(3,5);
          Cap_DM(2,1) Cap_DM(2,2) Cap_DM(2,3) Cap_DM(2,4) Cap_DM(2,5);
          Cap_DM(1,1) Cap_DM(1,2) Cap_DM(1,3) Cap_DM(1,4) Cap_DM(1,5)];
Cap_udlr = [Cap_DM(5,1) Cap_DM(5,2) Cap_DM(5,3) Cap_DM(5,4) Cap_DM(5,5);
            Cap_DM(4,1) Cap_DM(4,2) Cap_DM(4,3) Cap_DM(4,4) Cap_DM(4,5);
            Cap_DM(3,1) Cap_DM(3,2) Cap_DM(3,3) Cap_DM(3,4) Cap_DM(3,5);
            Cap_DM(2,1) Cap_DM(2,2) Cap_DM(2,3) Cap_DM(2,4) Cap_DM(2,5);
            Cap_DM(1,1) Cap_DM(1,2) Cap_DM(1,3) Cap_DM(1,4) Cap_DM(1,5)];

Cap_DMIMO1 = [flipud(Cap_ud), fliplr(flipud(Cap_udlr)); flipud(Cap_DM),
              fliplr(Cap_lr)];

% Plot Variasi Spasial Kapasitas D-MIMO
mesh(x11,y11,Cap_DMIMO);
view(2);
xlabel('Posisi M,N,K (km)');
ylabel('Posisi M,N,K (km)');
zlabel('Kapasitas (bps/Hz)');
title('Variasi Spasial Kapasitas D-MIMO (4,1,4)');
grid on

% Teknik SVD Dan Waterfilling
% Teknik SVD
[U,S,V] = svd(Hd);

% Menetapkan Daya Total
Pt = min(M,N*K);

% Menentukan Eigenvalue
for e = 1:Pt;
    Eigen(e) = S(e,e)^2;
end

% Menentukan Waterlevel Dari Subkanal
Sk = Pt;
while(1)
    WL = 1/Sk*(Pt + sum(1./Eigen(1:Sk)));
    Pi = WL-1./Eigen(Sk);
    if (Pi < 0)
        Sk = Sk-1;
    else
        break;
    end
end

Pi = WL-1./Eigen(1:Sk);
Pw = Pi./Pt;
Jumknl = Sk;
Ptot = sum(Pi);

% Nilai SNR Untuk Tiap Subkanal
SNRK = 10*log10(Eigen(1:Sk))+10*log10(Pw)+SNR(r);

```

% Penentuan Jumlah Vektor Simbol

```
for jsk = 1:Jumkn1
    if SNRK(jsk) >= (16.5)
        veksym(jsk,1) = 3;
    else
        if SNRK(jsk) >= (11.41) & SNRK(jsk) < (16.5)
            veksym(jsk,1) = 2;
        else
            if SNRK(jsk) >= (8.4) & SNRK(jsk) < (11.41)
                veksym(jsk,1) = 1;
            else
                veksym(jsk,1) = 0;
            end
        end
    end
end
end
jumvek = sum(veksym);

end
CapWF(r) = mean(sumvektor);
end
end
```

% Perhitungan Kapasitas D-MIMO Dengan Teknik Waterfilling

```
plot(SNR,CapWF (1,:), 'k-s');
xlabel('SNR');
ylabel('Kapasitas (bps/Hz)');
legend('CapWF MNK');
title('Kapasitas Waterfilling D-MIMO dengan Modulasi MPSK')
grid on;
```

% Penentuan BER Pada M-ary Modulasi

```
for e = 1:Sampel
    for jsk = 1:jskl
        if SNRK(jsk,e) >= (16.50)
            Pb(jsk,e) = 1/3*(erfc(0.7071*(sqrt(6*(10.^(SNRK(jsk,e)/10))))...
                *sin(pi/8)));
        else
            if SNRK(jsk,e) >= (11.41) & SNRK(jsk,e) < (16.5)
                Pb(jsk,e) = 0.5*erfc(0.7071*(sqrt(2*(10.^(SNRK ...
                    (jsk,e)/10)))))*(1-0.25*erfc(0.7071* ...
                    (sqrt(2*(10.^(SNRK(jsk,e)/10))))));
            else
                if SNRK(jsk,e) >= (8.40) & SNRK(jsk,e) < (11.41)
                    Pb(jsk,e) = 0.5*erfc(0.7071*(sqrt(10.^(SNRK ...
                        (jsk,e)/10)))));
                else
                    Pb(jsk,e) = 0;
                end
            end
        end
    end
end
end
Cak_Be(c+1,d+1) = mean(mean(Pb));
end
```

```
Cak_ud = [Cak_Be(5,1) Cak_Be(5,2) Cak_Be(5,3) Cak_Be(5,4) Cak_Be(5,5)
Cak_Be(5,6); Cak_Be(4,1) Cak_Be(4,2) Cak_Be(4,3) Cak_Be(4,4)
Cak_Be(4,5) Cak_Be(4,6); Cak_Be(3,1) Cak_Be(3,2) Cak_Be(3,3)
Cak_Be(3,4) Cak_Be(3,5) Cak_Be(3,6); Cak_Be(2,1) Cak_Be(2,2)
Cak_Be(2,3) Cak_Be(2,4) Cak_Be(2,5) Cak_Be(2,6);
Cak_Be(1,1) Cak_Be(1,2) Cak_Be(1,3) Cak_Be(1,4) Cak_Be(1,5)
Cak_Be(1,6)];
```

```

Cak_lr = [Cak_Be(6,1) Cak_Be(6,2) Cak_Be(6,3) Cak_Be(6,4) Cak_Be(6,5);
          Cak_Be(5,1) Cak_Be(5,2) Cak_Be(5,3) Cak_Be(5,4) Cak_Be(5,5);
          Cak_Be(4,1) Cak_Be(4,2) Cak_Be(4,3) Cak_Be(4,4) Cak_Be(4,5);
          Cak_Be(3,1) Cak_Be(3,2) Cak_Be(3,3) Cak_Be(3,4) Cak_Be(3,5);
          Cak_Be(2,1) Cak_Be(2,2) Cak_Be(2,3) Cak_Be(2,4) Cak_Be(2,5);
          Cak_Be(1,1) Cak_Be(1,2) Cak_Be(1,3) Cak_Be(1,4) Cak_Be(1,5)];
Cak_udlr = [Cak_Be(5,1) Cak_Be(5,2) Cak_Be(5,3) Cak_Be(5,4) Cak_Be(5,5);
            Cak_Be(4,1) Cak_Be(4,2) Cak_Be(4,3) Cak_Be(4,4) Cak_Be(4,5);
            Cak_Be(3,1) Cak_Be(3,2) Cak_Be(3,3) Cak_Be(3,4) Cak_Be(3,5);
            Cak_Be(2,1) Cak_Be(2,2) Cak_Be(2,3) Cak_Be(2,4) Cak_Be(2,5);
            Cak_Be(1,1) Cak_Be(1,2) Cak_Be(1,3) Cak_Be(1,4) Cak_Be(1,5)];

Cak_Ber414 = [flipud(Cak_ud),  fliplr(flipud(Cak_udlr));  flipud(Cak_Be),
              fliplr(Cak_lr)];

```

```

% Perhitungan Variasi Spasial BER Waterfilling Metode Quasi Analytik
mesh(x11,y11,Cak_BerMNK);
view(2);
xlabel('Posisi (M,N,K)');
ylabel('Posisi (M,N,K)');
zlabel('Variasi Spasial BER Waterfilling');
title('Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO ');
grid on

```

% Perhitungan BER D-MIMO Dengan Teknik Waterfilling

```

% Mapping ulang konstelasi MPSK
map_bpsk = [1 0];
map_qpsk = [0 1 3 2];
map_8psk = [0 1 3 2 7 6 4 5];
demap_bpsk = [1; 0];
demap_qpsk = [0 0; 0 1; 1 1; 1 0];
demap_8psk = [0 0 0; 0 0 1; 0 1 1; 0 1 0; 1 1 0; 1 1 1; 1 0 1; 1 0 0];

```

% Modulasi MPSK

```

% Modulasi MPSK , jumlah kanal terpakai adalah 1
if jumkanal == 1
    if Vektorsim(1) == 1
        map = map_bpsk;
    else
        if Vektorsim(1) == 2
            map = map_qpsk;
        else
            if Vektorsim(1) == 3
                map = map_8psk;
            else
                end
        end
    end
    Adec = bi2de(simgroup,'left-msb');
    A = map(Adec+1)';
    mod1 = dmodce(A,Fd,Fs,method,2^(Vektorsim(1)));
    Symbol = transpose(mod1);
else
end

```

% Modulasi MPSK , jumlah kanal terpakai adalah 2

```

if jumkanal == 2
    * Untuk subkanal 1
    if Vektorsim(1) == 1
        map = map_bpsk;
    else
        if Vektorsim(1) == 2
            map = map_qpsk;

```

```

else
    if Vektorsim(1) == 3
        map = map_8psk;
    else
        end
    end
end

Bdec = bi2de(simgroup(:,1:Vektorsim(1)),'left-msb');
B = map(Bdec+1)';
mod1 = dmodce(B,Fd,Fs,method,2^(Vektorsim(1)));
* Untuk subkanal 2
if Vektorsim(2) == 1
    map = map_bpsk;
else
    if Vektorsim(2) == 2
        map = map_qpsk;
    else
        if Vektorsim(2) == 3
            map = map_8psk;
        else
            end
        end
    end
end
Cdec = bi2de(simgroup(:,(1+Vektorsim(1)):(Vektorsim(1)+
    Vektorsim(2))),'left-msb');
C = map(Cdec+1)';
mod2 = dmodce(C,Fd,Fs,method,2^(Vektorsim(2)));
Symbol = [transpose(mod1); transpose(mod2)];
else
end

* Modulasi MPSK , jumlah kanal terpakai adalah 3
if jumkanal == 3
    * Untuk subkanal 1
    if Vektorsim(1) == 1
        map = map_bpsk;
    else
        if Vektorsim(1) == 2
            map = map_qpsk;
        else
            if Vektorsim(1) == 3
                map = map_8psk;
            else
                end
            end
        end
    end
end

Ddec = bi2de(simgroup(:,1:Vektorsim(1)),'left-msb');
D = map(Ddec+1)';
mod1 = dmodce(D,Fd,Fs,method,2^(Vektorsim(1)));
~ Untuk subkanal 2
if Vektorsim(2) == 1
    map = map_bpsk;
else
    if Vektorsim(2) == 2
        map = map_qpsk;
    else
        if Vektorsim(2) == 3
            map = map_8psk;
        else
            end
        end
    end
end

```



```

        end
    end
end
Edec = bi2de(simgroup(:, (1+Vektorsim(1)):(Vektorsim(1)+
    Vektorsim(2))), 'left-msb');
E = map(Edec+1)';
mod2 = dmodce(E, Fd, Fs, method, 2^(Vektorsim(2)));
* Untuk subkanal 3
if Vektorsim(3) == 1
    map = map_bpsk;
else
    if Vektorsim(3) == 2
        map = map_qpsk;
    else
        if Vektorsim(3) == 3
            map = map_8psk;
        else
            end
        end
    end
end
Fdec = bi2de(simgroup(:, (1+Vektorsim(1)+Vektorsim(2)):(Vektorsim(1)+
    Vektorsim(2)+Vektorsim(3))), 'left-msb');
F = map(Fdec+1)';
mod3 = dmodce(F, Fd, Fs, method, 2^(Vektorsim(3)));
Symbol = [transpose(mod1); transpose(mod2); transpose(mod3)];
else
end

* Modulasi MPSK , jumlah kanal terpakai adalah 4
if jumkanal == 4
    * Untuk subkanal 1
    if Vektorsim(1) == 1
        map = map_bpsk;
    else
        if Vektorsim(1) == 2
            map = map_qpsk;
        else
            if Vektorsim(1) == 3
                map = map_8psk;
            else
                end
            end
        end
    end
end

Gdec = bi2de(simgroup(:, 1:Vektorsim(1)), 'left-msb');
G = map(Gdec+1)';
mod1 = dmodce(G, Fd, Fs, method, 2^(Vektorsim(1)));
* Untuk subkanal 2
if Vektorsim(2) == 1
    map = map_bpsk;
else
    if Vektorsim(2) == 2
        map = map_qpsk;
    else
        if Vektorsim(2) == 3
            map = map_8psk;
        else
            end
        end
    end
end
end
end

```

```

Hdec = bi2de(simgroup(:,(1+Vektorsim(1)):(Vektorsim(1)+ ...
    Vektorsim(2))), 'left-msb');
H = map(Hdec+1)';
mod2 = dmodce(H, Fd, Fs, method, 2^(Vektorsim(2)));
% Untuk subkanal 3
if Vektorsim(3) == 1
    map = map_bpsk;
else
    if Vektorsim(3) == 2
        map = map_qpsk;
    else
        if Vektorsim(3) == 3
            map = map_8psk;
        else
            end
        end
    end
end
Idec = bi2de(simgroup(:,(1+Vektorsim(1)+Vektorsim(2)):(Vektorsim(1)+
    Vektorsim(2)+Vektorsim(3))), 'left-msb');
I = map(Idec+1)';
mod3 = dmodce(I, Fd, Fs, method, 2^(Vektorsim(3)));
% Untuk subkanal 4
if Vektorsim(4) == 1
    map = map_bpsk;
else
    if Vektorsim(4) == 2
        map = map_qpsk;
    else
        if Vektorsim(4) == 3
            map = map_8psk;
        else
            end
        end
    end
end
Jdec = bi2de(simgroup(:,(1+Vektorsim(1)+Vektorsim(2)+Vektorsim(3)):(
    Vektorsim(1)+Vektorsim(2)+Vektorsim(3)+Vektorsim(4))), ...
    'left-msb');
J = map(Jdec+1)';
mod4 = dmodce(J, Fd, Fs, method, 2^(Vektorsim(4)));
Symbol = [transpose(mod1); transpose(mod2); transpose(mod3);
    transpose(mod4)];
else
end

numofmux = jumkanal;

% Pengolahan bit stream di pemancar
for bb = 1:numofmux
    newsym(bb,:) = Bobot(bb)*Symbol(bb,:); % mengalikan bobot dengan
    output MUX
end
Vnew = V(:,1:numofmux); % membatasi komponen matrik V yang dipakai

for yy = 1:N*K
    Outtx(yy,:) = Vnew(yy,:)*newsym; % Output dari antenna pemancar
end

% D-MIMO Channel
Tx = Hd*Outtx;

Sr = AWGN(Tx, SNR(r), 'measured');

```



```

% Pengolahan di penerima
Ucc_new = Ucc(1:M,1:numofmux);% membatasi komponen matrik U yang dipakai
Ucc_transp = transpose(Ucc_new);
for z = 1:numofmux
    Inrx(z,:) = Ucc_transp(z,)*Sr; % Input dari antenna penerima
end

```

% Demodulasi MPSK

```

% Demodulasi MPSK, jumlah kanal terpakai adalah 1
if jumkanal == 1
    dmod1 = ddemodce([transpose(Inrx)],Fd,Fs,method,2^(Vektorsim(1)));
    if Vektorsim(1) == 1
        demap = demap_bpsk;
    else
        if Vektorsim(1) == 2
            demap = demap_qpsk;
        else
            if Vektorsim(1) == 3
                demap = demap_8psk;
            else
                end
            end
        end
    end
    demod1 = demap(dmod1+1,:);
    remap1 = bi2de(demod1,'left-msb');
    Admod1 = de2bi(remap1,'left-msb');
    Outrx = Admod1;
else
end

```

% Demodulasi MPSK, jumlah kanal terpakai adalah 2

```

if jumkanal == 2
    % Untuk subkanal 1
    dmod1 = ddemodce([transpose(Inrx(1,:))],Fd,Fs,method,
        2^(Vektorsim(1)));
    if Vektorsim(1) == 1
        demap = demap_bpsk;
    else
        if Vektorsim(1) == 2
            demap = demap_qpsk;
        else
            if Vektorsim(1) == 3
                demap = demap_8psk;
            else
                end
            end
        end
    end
    demod1 = demap(dmod1+1,:);
    remap1 = bi2de(demod1,'left-msb');
    Admod1 = de2bi(remap1,'left-msb');

    %Untuk subkanal 2
    dmod2 = ddemodce([transpose(Inrx(2,:))],Fd,Fs,method,
        2^(Vektorsim(2)));
    if Vektorsim(2) == 1
        demap = demap_bpsk;
    else
        if Vektorsim(2) == 2
            demap = demap_qpsk;
        else
            if Vektorsim(2) == 3
                demap = demap_8psk;
            else
                end
            end
        end
    end

```

```

        end
    end
    demod2 = demap(dmod2+1,:);
    remap2 = bi2de(demod2,'left-msb');
    Admod2 = de2bi(remap2,'left-msb');
    Outrx = [Admod1 Admod2];
else
end

% Demodulasi MPSK, jumlah kanal terpakai adalah 3
if jumkanal == 3
    % Untuk subkanal 1
    dmod1 = ddemodce([transpose(Inrx(1,:))],Fc,Fs,method,
        2^(Vektorsim(1)));
    if Vektorsim(1) == 1
        demap = demap_bpsk;
    else
        if Vektorsim(1) == 2
            demap = demap_qpsk;
        else
            if Vektorsim(1) == 3
                demap = demap_8psk;
            else
                end
            end
        end
    end
    demod1 = demap(dmod1+1,:);
    remap1 = bi2de(demod1,'left-msb');
    Admod1 = de2bi(remap1,'left-msb');

    % Untuk subkanal 2
    dmod2 = ddemodce([transpose(Inrx(2,:))],Fc,Fs,method,
        2^(Vektorsim(2)));
    if Vektorsim(2) == 1
        demap = demap_bpsk;
    else
        if Vektorsim(2) == 2
            demap = demap_qpsk;
        else
            if Vektorsim(2) == 3
                demap = demap_8psk;
            else
                end
            end
        end
    end
    demod2 = demap(dmod2+1,:);
    remap2 = bi2de(demod2,'left-msb');
    Admod2 = de2bi(remap2,'left-msb');

    % Untuk subkanal 3
    dmod3 = ddemodce([transpose(Inrx(3,:))],Fc,Fs,method,
        2^(Vektorsim(3)));
    if Vektorsim(3) == 1
        demap = demap_bpsk;
    else
        if Vektorsim(3) == 2
            demap = demap_qpsk;
        else
            if Vektorsim(3) == 3
                demap = demap_8psk;
            else
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

demod3 = demap(dmod3+1,:);
remap3 = bi2de(demod3,'left-msb');
Admod3 = de2bi(remap3,'left-msb');
Outrx = [Admod1 Admod2 Admod3];
else
end

* Demodulasi MPSK, jumlah kanal terpakai adalah 4
if jumkanal == 4
    * Untuk subkanal 1
    dmod1 = ddemodce([transpose(Inrx(1,:))],Fd,Fs,method,
        2^(Vektorsim(1)));
    if Vektorsim(1) == 1
        demap = demap_bpsk;
    else
        if Vektorsim(1) == 2
            demap = demap_qpsk;
        else
            if Vektorsim(1) == 3
                demap = demap_8psk;
            else
                end
            end
        end
    demod1 = demap(dmod1+1,:);
    remap1 = bi2de(demod1,'left-msb');
    Admod1 = de2bi(remap1,'left-msb');

    * Untuk subkanal 2
    dmod2 = ddemodce([transpose(Inrx(2,:))],Fd,Fs,method,
        2^(Vektorsim(2)));
    if Vektorsim(2) == 1
        demap = demap_bpsk;
    else
        if Vektorsim(2) == 2
            demap = demap_qpsk;
        else
            if Vektorsim(2) == 3
                demap = demap_8psk;
            else
                end
            end
        end
    demod2 = demap(dmod2+1,:);
    remap2 = bi2de(demod2,'left-msb');
    Admod2 = de2bi(remap2,'left-msb');

    * Untuk subkanal 3
    dmod3 = ddemodce([transpose(Inrx(3,:))],Fd,Fs,method,
        2^(Vektorsim(3)));
    if Vektorsim(3) == 1
        demap = demap_bpsk;
    else
        if Vektorsim(3) == 2
            demap = demap_qpsk;
        else
            if Vektorsim(3) == 3
                demap = demap_8psk;
            else
                end
            end
        end
    demod3 = demap(dmod3+1,:);
    remap3 = bi2de(demod3,'left-msb');

```

```

Admod3 = de2bi(remap3','left-msb');

% Untuk subkanal 4
dmod4 = ddemodce([transpose(Inrx(4,:))],Fd,Fs,method,
  2^(Vektorsim(4)));
if Vektorsim(4) == 1
    demap = demap_bpsk;
else
    if Vektorsim(4) == 2
        demap = demap_qpsk;
    else
        if Vektorsim(4) == 3
            demap = demap_8psk;
        else
            end
        end
    end
demod4 = demap(dmod4+1,:);
remap4 = bi2de(demod4,'left-msb');
Admod4 = de2bi(remap4','left-msb');
Outrx = [Admod1 Admod2 Admod3 Admod4];
else
end

Perhitungan Error
Outbit = Outrx;
[no_sample, no_bit] = size(Outbit);
Outbit = Outrx;
Outbit = Outbit(:,1:1:no_bit);
Outbit = Outbit';
bitterima = Outbit(:)'; *Output sistem

[number,ratio] = biterr(bit kirim(1:length(bitterima)),bitterima);
BER(y) = ratio;
y = y+1;
else
end
end
BER;
Pel(r) = mean(BER);
end

- Plot BER D-MIMO Dengan Teknik Waterfilling
semilogy(SNR,Pe,'k-s');
xlabel('SNR');
ylabel('BER');
legend('BER WF MNK');
title('Kinerja BER Waterfilling D-MIMO dengan Modulasi MPSK')
grid on;

% Pengkodean STBC G2
- Pembangkitan simbol dengan modulasi 4 PSK
jum_data = 2*25000;
data_termodulasi = (sign(randn(1,jum_data))+j*sign(randn(1,jum_data)))
/sqrt(2);

- Demultipleks data
s1 = data_termodulasi(1:2:end);
s2 = data_termodulasi(2:2:end);
cs1 = conj(s1);
cs2 = conj(s2);

- Ubah data simbol menjadi data bit
for i = 1:jum_data

```

```

    if (real(data_termodulasi(i))>0 & imag(data_termodulasi(i))>0)
        out(:,i) = [1;1];
    elseif (real(data_termodulasi(i))<0 & imag(data_termodulasi(i))>0)
        out(:,i) = [-1;1];
    elseif (real(data_termodulasi(i))>0 & imag(data_termodulasi(i))<0)
        out(:,i) = [1;-1];
    elseif (real(data_termodulasi(i))<0 & imag(data_termodulasi(i))<0)
        out(:,i) = [-1;-1];
    end
end
bitkirim = reshape(out,1,[]);

% Pengkodean STBC G3
% Pembangkitan simbol dengan modulasi 4 PSK
jum_data = 4*12500;
data_termodulasi = (sign(randn(1,jum_data))+j*sign(randn(1,jum_data)))
    /sqrt(2);

% Demultipleks data
s1 = data_termodulasi(1:4:end);
s2 = data_termodulasi(2:4:end);
s3 = data_termodulasi(3:4:end);
s4 = data_termodulasi(4:4:end);

cs1 = conj(s1);
cs2 = conj(s2);
cs3 = conj(s3);
cs4 = conj(s4);

% Pengkodean STBC G4
% Pembangkitan simbol dengan modulasi 4 PSK
jum_data = 4*12500;
data_termodulasi = (sign(randn(1,jum_data))+j*sign(randn(1,jum_data)))
    /sqrt(2);

% Demultipleks data
s1 = data_termodulasi(1:4:end);
s2 = data_termodulasi(2:4:end);
s3 = data_termodulasi(3:4:end);
s4 = data_termodulasi(4:4:end);

cs1 = conj(s1);
cs2 = conj(s2);
cs3 = conj(s3);
cs4 = conj(s4);

% Deteksi Maximum Likelihood
% Ubah simbol terima menjadi bit terima
for i = 1:jum_data
    if (real(s_mux(i))>0 & imag(s_mux(i))>0)
        out(:,i) = [1;1];
    elseif (real(s_mux(i))<0 & imag(s_mux(i))>0)
        out(:,i) = [-1;1];
    elseif (real(s_mux(i))>0 & imag(s_mux(i))<0)
        out(:,i) = [1;-1];
    elseif (real(s_mux(i))<0 & imag(s_mux(i))<0)
        out(:,i) = [-1;-1];
    end
end
bitterima = reshape(out,1,[]);

% Nilai Eb/No (0 2 4 6 8 dB)
ebno = [1 1.6 2.5 4 6.3];

```

```
% Menentukan BER
error = sum(abs(bitterima-bitkirim)/2);
Pe = [Pe, error/jum_data];

% Menampilkan Hasil
semilogy(x,y,'k-s');
xlabel('Eb/No (dB)')
ylabel('BER')
legend('STBC')
title('Kinerja BER Pada STBC')
grid on
```

BIO DATA



Nyoman Gunantara, lahir di Les - Bali pada tanggal 27 Agustus 1974. Menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang, lulus tahun 1997 mendapat gelar Sarjana Teknik.

Terdaftar sebagai mahasiswa Program Pasca Sarjana, Program Strata Dua Tahun 2004 pada Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia, di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Setelah lulus pendidikan strata satu, penulis bekerja pada perusahaan telekomunikasi SIEMENS AG Jerman untuk wilayah Indonesia Timur sebagai Team Leader Of Cable Tester berkantor di Denpasar sejak 1997 – 2000. Selanjutnya penulis terdaftar sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Bali sejak tahun 2001 sampai sekarang.