

KAPASITAS KANAL DAN BIT ERROR RATE SISTEM D-MIMO DALAM VARIASI SPASIAL DAERAH CAKUPAN

Nyoman Gunantara
Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro-FT, Universitas Udayana
Email : gnr252@yahoo.co.id

Abstrak

Kemajuan teknologi komunikasi, dikembangkan sistem D-MIMO (Distributed MIMO) yang sebelumnya telah digunakan sistem C-MIMO (Conventional co-located MIMO). Sistem C-MIMO menyebabkan penggunaan spektrum menjadi efisien, daya pancar berkurang, dan kapasitas kanal meningkat.

Dengan sistem D-MIMO jarak antara pemancar dan penerima dapat diperpendek, macrodiversity dan adanya daerah cakupan layanan. Pada tulisan ini akan diteliti tentang kapasitas kanal dan Bit Error Rate (BER) pada variasi spasial daerah cakupan. Penelitian tersebut dilakukan pada kapasitas kanal teoritis dan BER dengan teknik waterfilling.

Kapasitas kanal dan kinerja BER pada sistem D-MIMO pada variasi spasial daerah cakupan tergantung dari konfigurasi sistem D-MIMO. Lokasi penerima yang dekat port antena pemancar mempunyai kapasitas kanal yang lebih besar tetapi memiliki kinerja BER yang lebih buruk.

Kata kunci : C-MIMO, D-MIMO, waterfilling

1. PENDAHULUAN

Sebelum dikembangkannya teknologi sistem D-MIMO, maka penelitian dilakukan pada sistem C-MIMO. Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa penggunaan dari spektrum (*bandwidth*) menjadi efisien, dan kebutuhan daya pancar pada sisi pemancar menjadi berkurang. Selain itu kapasitas kanal yang dapat dikirimkan dari sistem C-MIMO menjadi bertambah.

Penelitian terus dikembangkan sehingga memunculkan teknologi D-MIMO yaitu sistem multi antena dimana antara antena pemancar dan penerima letaknya secara terdistribusi. Dengan demikian pada sistem D-MIMO maka jarak akses antara pemancar dan penerima dapat dibuat lebih dekat serta menimbulkan adanya *macrodiversity*. Melalui sistem D-MIMO ini akan menimbulkan daerah cakupan layanan, dimana pada setiap wilayah cakupan layanan akan dapat diketahui kapasitas kanal dan kinerja BER dari sistem tersebut.

Berikut ini dijelaskan tentang penelitian-penelitian yang mendukung pada tulisan ini. Dalam penelitian[2] menyebutkan bahwa perhitungan kapasitas pada *Distributed MIMO* berdasarkan pendekatan model kanal rugi-rugi lintasan, log normal *shadowing* fading dan Rayleigh fading.

2. DASAR TEORI

2.1. Sistem D-MIMO

Sistem D-MIMO merupakan sistem MIMO terdistribusi dengan M jumlah antena penerima yang dikelilingi oleh banyaknya K port dengan N jumlah antena pemancar. Dapat ditulis sebagai D-MIMO

(M,N,K). Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 1.

Gambar 1. *Distributed MIMO* (M,N,K)^[2]

Dalam pentransmisiian sinyal informasi dari pemancar ke penerima pada sistem D-MIMO akan mengalami fading. Fading didefinisikan sebagai fenomena fluktuasi acak pada 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^[4]. 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. Sejak

variasi akibat *shadowing* terjadi relatif dalam jarak yang jauh dan fluktuasi level sinyal yang lambat, variasi ini disebut dengan fading skala besar.

Sedangkan fading skala kecil digunakan untuk menjelaskan perubahan fluktuasi amplitudo sinyal radio pada periode waktu dan jarak yang pendek.

Hasil dari fading tersebut maka kanal D-MIMO dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{H}_d \sim \sqrt{d^{-n} \cdot 10^{\%10}} \cdot \mathbf{h} \tag{1}$$

dengan :

- H_d = kanal D-MIMO
- d = jarak pemancar dan penerima
- n = pangkat dari jarak
- σ = standar deviasi dari *shadowing*
- h = kanal berdistribusi Rayleigh

Perhitungan kapasitas kanal dengan alokasi daya yang sama menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$C = \log_2 \det \left[I_M + \frac{P}{(N \cdot K)} \mathbf{H}_d \cdot \mathbf{H}_d^* \right] \tag{2}$$

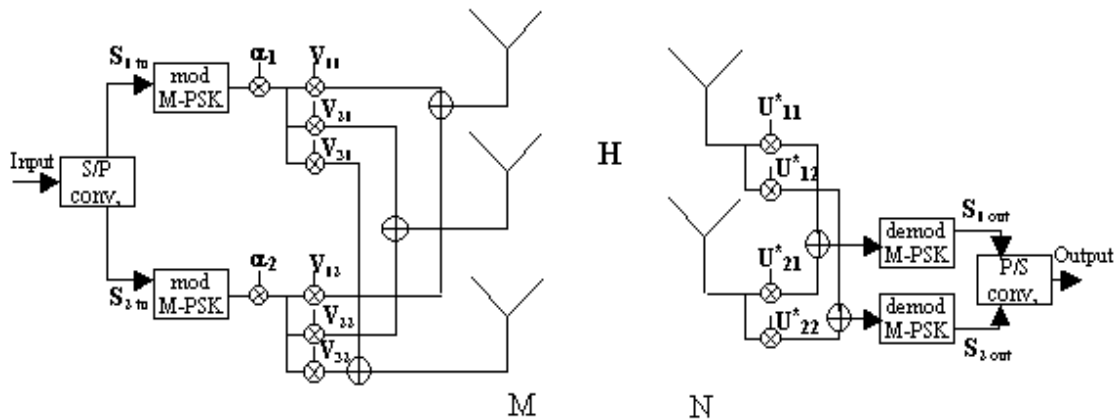
dengan :

- γ = yaitu SNR
- H_d = Respon kanal
- H_d^* = Respon kanal konjugat

Letak antenna pemancar terdistribusi dengan antenna penerima maka perlu diperhitungkan jarak dari antenna pemancar dan antenna penerima. Pada penelitian ini akan diperhitungkan jarak dalam perhitungan kapasitas kanal dengan alokasi daya yang sama.

2.2. Waterfilling

Waterfilling merupakan metode pembagian daya pada sub-sub kanal untuk meningkatkan kapasitas. Teknik waterfilling erat hubungannya dengan teknik dekomposisi nilai singular seperti pada Gambar 2. Bila tiap-tiap subkanal sistem memiliki gain λ_i yang merupakan nilai eigen / kuadrat dari komponen-komponen diagonal matriks \mathbf{S} , maka subkanal dengan gain terbesar akan mendapat porsi daya besar pula seperti pada Gambar 3.[7]



Gambar 2. Sistem MIMO dengan teknik SVD dan Waterfilling [6]

Gambar 3. Pembagian Daya Secara Waterfilling [7]

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

$$P_i = (\mu - \lambda_i^{-1}) \tag{3}$$

waterlevel μ dapat ditulis sebagai berikut :

$$\mu = \frac{1}{S_k} \left[P_t + \sum_{i=1}^{S_k} \frac{1}{\lambda_i} \right] \tag{4}$$

Pembagian level daya ini digunakan modulasi BPSK, QPSK, dan 8-PSK dengan probabilitas kesalahan pada kanal AWGN adalah :

BPSK :

$$P_s = Q \left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}} \right) \tag{5}$$

QPSK :

$$P_s = 2Q \left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}} \right) \left[1 - \frac{1}{2} Q \left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}} \right) \right] \tag{6}$$

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

$$P_s = 2Q \left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0} \sin \frac{\pi}{M_{ary}}} \right) \tag{7}$$

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 :

$$(SNR)_i = (SNR) + 10 \log_{10} P_w + 10 \log_{10} \lambda_i \tag{8}$$

dengan :

$$P_w = \text{daya waterfilling}$$

3. METODOLOGI

3.1. Konfigurasi Sistem D-MIMO

Konfigurasi sistem D-MIMO yang digunakan pada penelitian ini adalah model D-MIMO dimana penerima berada di setiap titik daerah cakupan (variasi spasial). Daerah cakupan sistem D-MIMO dianggap berbentuk bujursangkar $10 \times 10 \text{ km}^2$.

3.2. 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), dan (4,4,1) Berikut ini akan dijelaskan berupa gambar untuk model D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), dan (4,4,1). Untuk model D-MIMO (4,1,4) dapat dilihat pada Gambar 4.

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

Model D-MIMO (4,2,2) dimana penerima berada di setiap titik daerah layanan dengan jumlah antena setiap port pemancar berjumlah 2 buah. Model ini dapat dilihat pada Gambar 5.

Gambar 5. Model D-MIMO (4,2,2)

Model D-MIMO (4,4,1) yaitu penerima menggunakan antena sebanyak 4 buah. Model ini dapat dilihat pada Gambar 6.

Gambar 6. Model D-MIMO (4,4,1)

3.3. 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), dan (4,4,1). Model D-MIMO (4,1,4), (4,2,2) dan (4,4,1) secara berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 4, 5, dan 6.
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 persamaan 1.
3. Menentukan SNR sebesar 15 dB.
4. Menghitung kapasitas teoritis dengan persamaan (2). 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. Perhitungan BER D-MIMO dengan teknik Waterfilling

Langkah-langkah yang dilakukan yaitu :

1. Pemodelan sistem D-MIMO.
Model D-MIMO yang digunakan yaitu D-MIMO (4,1,4), (4,2,2), dan (4,4,1). Model D-MIMO (4,1,4), (4,2,2) dan (4,4,1) secara berturut-turut seperti Gambar 4, 5, dan 6.
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 seperti per. 1.
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 (5), (6), dan (7). Pada perhitungannya hanya diambil seperempat dari cakupan D-MIMO tersebut karena bagian yang lainnya merupakan cermin dari seperempat cakupan tadi.

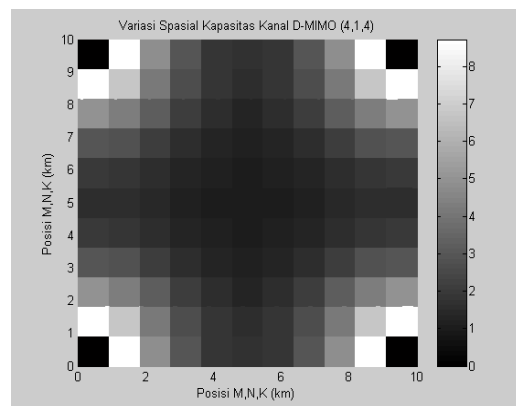
5. Simulasi dilakukan sebanyak 1000 sampel. Dan hasil yang digunakan adalah nilai rata-ratanya.
6. Memplot hasil simulasi dalam bentuk tiga dimensi.

4. HASIL SIMULASI

4.1. Kapasitas Kanal D-MIMO Pada Variasi Spasial Daerah Cakupan

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

Kotak hitam pada titik (0,0), (10,0), (0,10), dan (10,10) yang terlihat pada Gambar 7 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 7. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,4)

Nilai-nilai kapasitas kanal pada variasi spasial daerah cakupan seperti Tabel 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 1. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,1,4)

1	↑	8.7	4.8	2.9	1.8	1.6	1.8	2.9	4.8	8.7	↑
0		2	1	2	7	4	7	2	1	2	

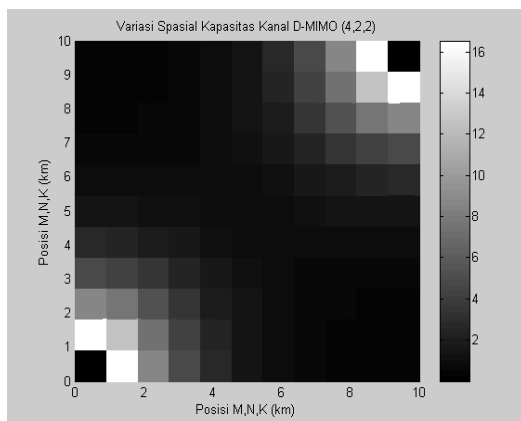
9	8.7 2	6.7 5	4.2 2	2.6 6	1.8 4	1.5 5	1.8 4	2.6 6	4.2 2	6.7 5	8.72
8	4.9 2	4.2 6	3.1 5	2.1 4	1.6 0	1.3 6	1.6 0	2.1 4	3.1 5	4.2 6	4.92
7	2.9 0	2.7 4	2.1 6	1.6 2	1.3 3	1.2 2	1.3 3	1.6 2	2.1 6	2.7 5	2.90
6	1.9 2	1.7 9	1.5 8	1.3 2	1.1 1	1.0 3	1.1 3	1.3 2	1.5 8	1.7 9	1.92
5	1.6 3	1.5 5	1.4 4	1.1 9	1.0 4	1.0 0	1.0 4	1.1 9	1.4 4	1.5 5	1.63
4	1.9 2	1.7 9	1.5 8	1.3 2	1.1 1	1.0 3	1.1 3	1.3 2	1.5 8	1.7 9	1.92
3	2.9 0	2.7 4	2.1 6	1.6 2	1.3 3	1.2 2	1.3 3	1.6 2	2.1 6	2.7 4	2.90
2	4.9 2	4.2 6	3.1 5	2.1 4	1.6 0	1.3 4	1.6 0	2.1 4	3.1 5	4.2 6	4.92
1	8.7 2	6.7 5	4.2 2	2.6 6	1.8 4	1.5 5	1.8 4	2.6 6	4.2 2	6.7 5	8.72
0	↑	8.7 2	4.8 1	2.9 2	1.8 7	1.6 4	1.8 7	2.9 2	4.8 1	8.7 2	↑
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

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

Gambar 8. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,2,2)

Kotak hitam pada titik (0,0) dan (10,10) yang terlihat pada Gambar 8 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.

Nilai-nilai kapasitas kanal pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 2. Tanda ↑ 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 16,54 bps/Hz dan pada posisi (0,10) memiliki kapasitas kanal sebesar 0,27 bps/Hz.



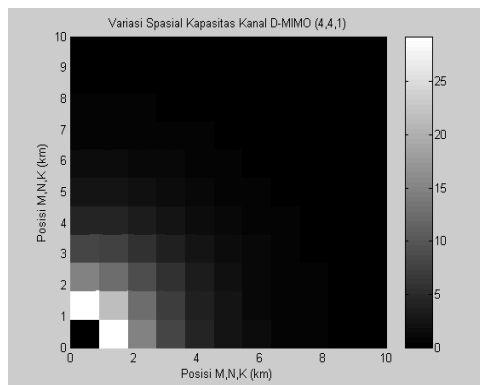
4.1.3. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,4,1)

Hasil simulasi kapasitas kanal D-MIMO (4,4,1) pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Gambar 9. Dari Gambar 9 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.

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

10	0.27	0.34	0.4 2	0.6 0	0.9 1	1.5 1	2.6 5	4.7 6	8.6 6	16.4 6	↑
9	0.33	0.38	0.4 7	0.6 4	0.9 1	1.4 5	2.4 5	4.2 9	7.4 9	12.4 1	16.54
8	0.44	0.48	0.5 5	0.6 7	0.9 3	1.3 4	2.0 3	3.3 8	5.3 4	7.52	8.73
7	0.59	0.62	0.6 7	0.7 2	0.8 4	1.1 1	1.5 9	2.3 3	3.4 2	4.25	4.71
6	0.91	0.93	0.8 9	0.8 5	0.8 5	0.9 8	1.2 0	1.5 7	2.0 6	2.46	2.68
5	1.52	1.44	1.2 9	1.1 3	0.9 8	0.9 6	0.9 8	1.0 8	1.3 0	1.42	1.51
4	2.68	2.46	2.0 6	1.5 7	1.2 0	0.9 8	0.8 5	0.8 5	0.8 9	0.93	0.91

3	4.71	4.25	3.4 2	2.3 3	1.5 9	1.1 1	0.8 4	0.7 2	0.6 7	0.62	0.59
2	8.73	7.52	5.3 4	3.3 8	2.0 3	1.3 4	0.9 3	0.6 7	0.5 5	0.48	0.44
1	16.5 4	12.4 1	7.4 9	4.2 9	2.4 5	1.4 5	0.9 1	0.6 4	0.4 7	0.38	0.33
0	↑	16.4 6	8.6 6	4.7 6	2.6 5	1.5 1	0.9 1	0.6 0	0.4 2	0.34	0.27
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10



Gambar 9. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,4,1)

Nilai-nilai kapasitas kanal pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 3. Tanda ↑ 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.

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.

Tabel 3. Variasi Spasial Kapasitas Kanal D-MIMO (4,4,1)

1	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

Tabel 4. 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
(4,4,1)	29,23	0,06	65

Dari Tabel 4. dapat diketahui bahwa untuk konfigurasi D-MIMO dengan jumlah antenna penerima dan jumlah antenna 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 %.

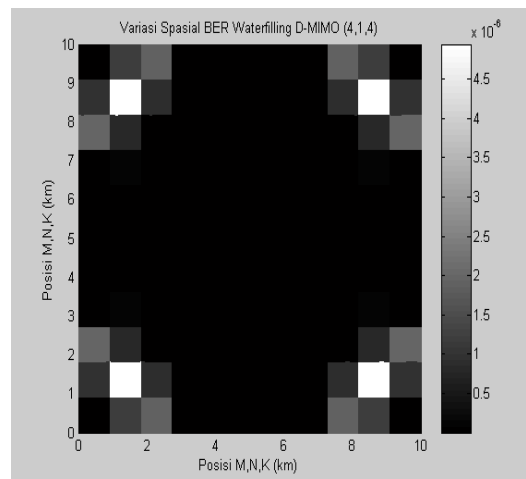
4.2. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO

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

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

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

Nilai-nilai BER pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 5. 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. 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.



Gambar 10. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,1,4)

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

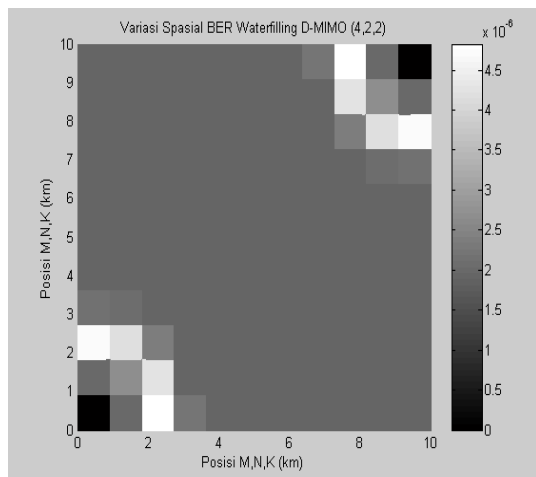
Hasil simulasi variasi spasial BER waterfilling D-MIMO (4,2,2) dapat dilihat pada Gambar 11. Kotak hitam pada titik (0,0) dan (10,10) yang terlihat pada Gambar 11 merupakan port antenna pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya menunjukkan nilai BER. Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan nilai BERnya bertambah besar.

Tabel 5. 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



Gambar 11. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,2,2)

Nilai-nilai BER pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 6. 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 $2,01 \times 10^{-6}$ dan pada posisi (0,10) memiliki BER sebesar $1,89 \times 10^{-6}$.

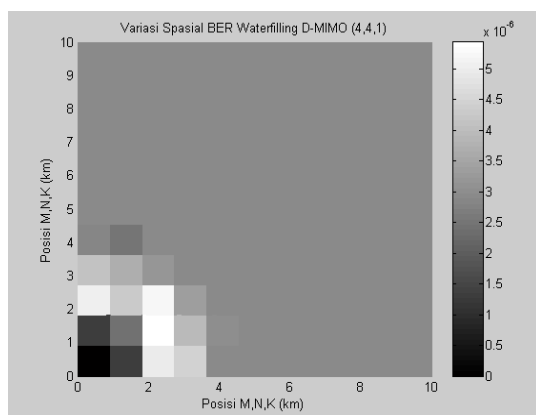
4.2.3. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,4,1)

Hasil simulasi variasi spasial BER waterfilling D-MIMO (4,4,1) dapat dilihat pada Gambar 12. Kotak hitam pada titik (0,0) yang terlihat pada Gambar 12 merupakan port antenna pemancar. Sedangkan kotak yang lainnya menunjukkan nilai BER. Urutan warnanya dari hitam ke putih mengartikan nilai BERnya bertambah besar.

Tabel 6. 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	1,89	2,24	4,82	1,97	↑
9	1,89	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	1,89	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	1,89	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	1,89	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	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	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	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	1,89
1	2,01	2,68	4,29	1,94	1,89	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	1,89
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	



Gambar 12. Variasi Spasial BER Waterfilling D-MIMO (4,4,1)

Nilai-nilai BER pada variasi spasial daerah cakupan dapat dilihat pada Tabel 7. 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 (0,2) memiliki BER sebesar $5,08 \times 10^{-6}$ dan pada posisi (0,10) memiliki BER sebesar $2,90 \times 10^{-6}$.

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 8 sebagai berikut :

Tabel 7. 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

Tabel 8. 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
(4,4,1)	5,43x10 ⁻⁶	100	100	0

Dari Tabel 8. 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 4,95x10⁻⁶ 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 4,82x10⁻⁶ serta probabilitas BER > 10⁻⁶ dan BER >10⁻⁷ sebesar 100 %.

5. KESIMPULAN

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

- 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).
- 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 cenderung lebih besar dibandingkan yang jauh pada port antena pemancar tetapi untuk antena pemancar yang terdistribusi dengan satu antena maka pada daerah tertentu kinerja BER mendekati 0 yang terlihat pada model D-MIMO (4,1,4). Sedangkan

penambahan jumlah antena pada port pemancar akan meningkatkan kinerja BER untuk semua daerah cakupan seperti terlihat pada model D-MIMO (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.

- 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.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] Andersen, J.B., “*Array Gain and Capacity for Known Random Channels with Multiple Element Arrays at Both Ends*”, *IEEE Journal*, Vol. 18, No. 11, November 2000.

[2] Alamgir, M., *Different Multiple Input Multiple Output Systems*. Master Thesis, Victoria University of Technology, Melbourne, May 2003.

[3] Glover, I.A., and P. M. Grant, *Digital Communications*. Pearson Education

- Limited. England, 2004.
- [4] Goldsmith, A., *Wireless Communications*. Stanford University Press, 2005
 - [5] Palomar, D.P., “*Practical Algorithms for a Family of Waterfilling Solutions*”, *IEEE Transaction on Signal Processing*, Vol. 53, No. 2, February 2005.
 - [6] Proakis, J.G., and M. Salehi, *Contemporary Communication Systems Using Matlab*. Brooks/Cole, USA, 2000.
 - [7] Proakis, J.G., *Digital Communications*. McGraw-Hill, Singapore, 2001.
 - [8] Rappaport, T.S., *Wireless Communication Principles and Practice*. Prentice Hall, USA, 2002.
 - [9] Sklar, B., *Digital Communications Fundamentals and Applications*. Prentice Hall PTR. USA, 2001
 - [3] Tse, D., and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communications*. Cambridge University Press, September 10, 2004.
 - [10] Zhang, H., and Dai, H., “*On The Capacity of Distributed MIMO Systems*”, Conference on Information Sciences and Systems, Princeton University, March 17-19, 2004.