

**ANALISIS PENGARUH JUMLAH ANTENA DAN NILAI SNR
DALAM PENTRANSMISIAN DATA MENGGUNAKAN ANTENA
MIMO DENGAN TEKNIK *SINGULAR VALUE DECOMPOSITION*
(SVD)**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK TELEKOMUNIKASI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



MADE AYU SEKARRINI

NIM. 165060301111065

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2020



LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH JUMLAH ANTENA DAN NILAI SNR
DALAM PENTRANSMISIAN DATA MENGGUNAKAN ANTENA
MIMO DENGAN TEKNIK *SINGULAR VALUE DECOMPOSITION*
(SVD)

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK TELEKOMUNIKASI

Ditujukan untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



MADE AYU SEKARRINI

NIM.165060301111065

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 24 Juli 2020

Dosen Pembimbing 1

M. Fauzan Edy Purnomo.,ST.,M.T.,Ph.D.
NIP. 19710609 200003 1 005

Dosen Pembimbing 2

Rusmi Ambarwati, ST., MT.
NIP. 19720204 200003 2 002

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro



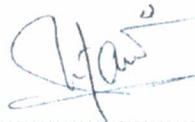
Prof. Ir. Hadi Satrio, S.T., M.T., Ph.D., IPU.
NIP. 1973052019900801 013

JUDUL SKRIPSI:

ANALISIS PENGARUH JUMLAH ANTENA DAN NILAI SNR DALAM
PENTRANSMISIAN DATA MENGGUNAKAN ANTENA MIMO DENGAN TEKNIK
SINGULAR VALUE DECOMPOSITION (SVD)

Nama Mahasiswa : Made Ayu Sekarrini
NIM : 165060301111065
Program Studi : Teknik Elektro
Konsentrasi : Teknik Telekomunikasi

KOMISI PEMBIMBING:

Ketua : M. Fauzan Edy Purnomo, S.T., M.T., Ph.D


Anggota : Rusmi Ambarwati, S.T., M.T


TIM DOSEN PENGUJI:

Dosen Penguji I : Rudy Yuwono, S.T., M.Sc. disetujui tanggal 24 Juli 2020 

Dosen Penguji II : Dwi Fadila Kurniawan, S.T., M.T. disetujui tanggal 24 Juli 2020 

Tanggal Ujian : 02 Juli 2020

SK Penguji : 1163 Tahun 2020

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 24 Juli 2020

Mahasiswa,

Made Ayu Sekarrini

NIM. 165060301111065



RINGKASAN

Made Ayu Sekarrini, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2020, **Analisis Pengaruh Jumlah Antena dan Nilai SNR dalam Pentransmisi Data menggunakan Antena MIMO dengan Teknik Singular Value Decomposition (SVD)**, Dosen Pembimbing: M. Fauzan Edy Purnomo dan Rusmi Ambarwati.

Skripsi ini meneliti mengenai pengaruh jumlah antena dan nilai SNR dalam pentransmisi data menggunakan antena MIMO dengan teknik *singular value decomposition* (SVD) menggunakan aplikasi MATLAB R2020. Set antena yang digunakan merupakan set antena yang tidak persegi, atau jumlah antena penerima tidak sama dengan jumlah antena pengirim.

Dalam skripsi ini akan disimulasikan pengiriman data menggunakan teknik SVD. Dimulai dari membangkitkan random data QPSK dan membangkitkan random kanal yang terdistribusi Rayleigh menggunakan aplikasi Matlab. Data tersebut akan dikirimkan secara paralel melalui set antena 1x1, 4x4, 4x6, 4x8, dan 4x10. Dalam pengiriman tersebut, akan digunakan variasi nilai besaran SNR yang berbeda-beda, yaitu 0 dB, 3 dB, 6 dB, 9 dB, dan 12 dB.

Teknik SVD dievaluasi dengan memperhatikan nilai BER (*Bit Error Rate*) dari masing-masing pengiriman. Hasil dari simulasi tersebut adalah semakin besar set antena yang digunakan, nilai BER akan semakin kecil, berarti kualitas pengiriman tersebut semakin baik. Serta semakin besar nilai SNR, maka nilai BER akan semakin kecil, dan pengiriman tersebut dapat dikatakan semakin baik.

Kata kunci: MIMO, *Singular Value Decomposition*, jumlah antena, *Signal-to-noise ratio*, *bit error rate*.

SUMMARY

Made Ayu Sekarrini, Electrical Engineering, Faculty of Engineering Brawijaya University, July 2020, Analysis of The Effect of The Number of Antennas and SNR Values in Data Transmission using MIMO Antena with Singular Value Decomposition (SVD) Techniques, supervisor: M. Fauzan Edy Purnomo and Rusmi Ambarwati.

This thesis examines the influence of the number of antennas and SNR values in transmitting data using MIMO antenas with the singular value decomposition (SVD) technique using the MATLAB R2020 application. The antenna set used is a square set and a non-square set of antennas, or the number of receiving antennas is not the same as the number of transmitting antennas.

This thesis will simulate data transmission in MIMO antennas using the SVD technique. Starting from generating random QPSK data and generating random channels distributed by Rayleigh using the Matlab application. The data will be sent in parallel through the 1x1, 4x4, 4x6, 4x8 and 4x10 antenna sets. In the transmission, various SNR value variations will be used, namely 0 dB, 3 dB, 6 dB, 9 dB, and 12 dB. The SVD technique is evaluated by taking into account the value of the BER (Bit Error Rate) of each transmission.

The results of the simulation are that the larger the set of antennas used, the BER value will be smaller, meaning the quality of the transmission is getting better. And the greater the SNR value, the BER value will be smaller, and the transmission can be said to be better.

Keywords: *MIMO, Singular Value Decomposition, number of antennas, Signal-to-noise ratio, bit error rate.*

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....i

RINGKASAN.....ii

SUMMARY.....iii

DAFTAR ISI.....iv

DAFTAR GAMBAR.....vi

DAFTAR TABEL.....vii

BAB I.....1

 1.1 Latar Belakang.....1

 1.2 Rumusan Masalah.....2

 1.3 Batasan Masalah.....2

 1.4 Tujuan.....3

 1.5 Sistematika Penulisan.....3

BAB II.....4

 2.1 Teknologi Komunikasi *Wireless* (Nirkabel).....4

 2.2 Antena.....5

 2.3 MIMO.....5

 2.4 *Spatial Multiplexing*.....8

 2.5 *Singular Value Decomposition*.....8

 2.6 Teknik Modulasi Digital QPSK.....11

 2.7 SNR (*Signal to Noise Ratio*).....12

 2.8 *Bit Error Rate* (BER).....13

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....14

 3.1 Desain Model Sistem.....14

 3.2 Perancangan Parameter Simulasi.....15

 3.3 Parameter Transmisi Data.....15

 3.4 Parameter Kanal.....15

 3.5 Perancangan Sistem.....15

 3.6 Pemodelan Kanal MIMO SVD.....17

 3.7 Menghitung Nilai BER.....18

 3.8 Hasil Simulasi.....19

 3.9 Pengambilan Kesimpulan dan Saran.....19

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....20

 4.1 Umum.....20

 4.2 Langkah-langkah Simulasi.....20

 4.3 Hasil Simulasi.....28

4.4 Pembahasan.....	35
BAB V PENUTUP.....	41
5.1 Kesimpulan.....	41
5.2 Saran.....	41
DAFTAR PUSTAKA.....	42



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi Pemodelan MIMO 6

Gambar 2.2 Skema *Spatial Multiplexing* 7

Gambar 2.3 Pemodelan sistem *Singular Value Decomposition (SVD)* 8

Gambar 2.4 Diagram Konstelasi QPSK 11

Gambar 3.1 Pemodelan Sistem MIMO dengan Teknik SVD 14

Gambar 3.2 Diagram Alir Pemrograman 16

Gambar 3.3 Pemodelan Kanal MIMO 17

Gambar 4.1 Diagram konstelasi data kirim dan data terima set antenna 1x1 25

Gambar 4.2 Diagram konstelasi data kirim dan data terima set antenna 4x6 28

Gambar 4.1 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 1x1 29

Gambar 4.2 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x4 30

Gambar 4.3 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x6 31

Gambar 4.4 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x8 32

Gambar 4.5 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x10 33

Gambar 4.6 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 1x1, 4x4, 4x6, 4x8, dan 4x10 34



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 *Mapping* QPSK 12

Tabel 4.1 Perbandingan data dikirim dan data diterima pada set 1x1 25

Tabel 4.2 Perbandingan data dikirim dan data diterima pada set 4x6 28

Tabel 4.3 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 1x1 29

Tabel 4.4 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x4 30

Tabel 4.5 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x6 31

Tabel 4.6 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x8 32

Tabel 4.7 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x10 33

Tabel 4.8 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 1x1, 4x4, 4x6, 4x8, dan 4x10 34

Tabel 4.9 Besaran penurunan nilai BER pada set antena 1x1 36

Tabel 4.10 Besaran penurunan nilai BER pada set antena 4x4 36

Tabel 4.11 Besaran penurunan nilai BER pada set antena 4x6 37

Tabel 4.12 Besaran penurunan nilai BER pada set antena 4x8 37

Tabel 4.13 Besaran penurunan nilai BER pada set antena 4x10 37



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi komunikasi *wireless* (nirkabel) pada masa ini telah menjadi sebuah hal yang sangat penting dan wajib untuk terus dikembangkan. Hal ini dikarenakan adanya permintaan atau kebutuhan masyarakat akan koneksi informasi yang cepat, memiliki kapasitas yang besar, dan dapat diandalkan. Untuk itulah, berbagai penelitian terus dilakukan untuk dapat menyediakan layanan koneksi informasi tersebut demi kesejahteraan hidup manusia.

Salah satu komponen pendukung tersedianya layanan yang andal tersebut ialah antena. Antena sebagai pengirim dan penerima informasi menjadi komponen yang penting dalam pengiriman data. Sejumlah studi dan penelitian mengenai antena telah dilakukan untuk dapat menyediakan sistem yang andal untuk pengiriman data dengan cepat dan tepat sehingga dapat terus mendukung perkembangan teknologi.

Antena MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) adalah salah satu perkembangan teknologi antena yang andal dalam pengiriman informasi. Penggunaan multi-antena atau *antenna arrays* pada sisi pengirim dan penerima telah terbukti menjadi sebuah teknik yang dapat mencapai *throughput* dan keandalan yang lebih baik dibandingkan penggunaan *single antenna* (Telatar, 1995). Hal ini dapat tercapai dikarenakan antena MIMO memiliki teknologi *spatial multiplexing* untuk berkomunikasi secara independen dan paralel antar susunan antena, sehingga pengiriman informasi dapat dilakukan dengan cepat dan andal.

Dalam *spatial multiplexing*, terdapat beberapa cara agar sebuah antena bisa berkomunikasi secara independen dan paralel dengan antena lainnya, salah satunya adalah *Singular Value Decomposition* (SVD). SVD pada matriks kanal MIMO digunakan untuk memberikan informasi yang dibutuhkan kepada antena pengirim dan penerima sehingga kedua pihak dapat berkomunikasi melalui kanal yang tersedia secara independen dan paralel (Andersen, 2000). Informasi mengenai kanal tersebut akan digunakan oleh antena pengirim dan penerima untuk dapat bertukar informasi melalui kanal yang telah ditentukan tersebut.

Salah satu kelebihan dalam teknologi *Singular Value Decomposition* (SVD) tersebut adalah teknik tersebut dapat menghitung informasi kanal yang digunakan dalam komunikasi antar antena dengan jumlah antena pengirim dan penerima yang tidak sama. Hal ini dapat mengatasi teknik MIMO konvensional dimana jumlah antena pengirim dan penerima harus sama. Kelebihan tersebut dapat digunakan contohnya pada teknologi komunikasi 5G, dimana jumlah antena penerima lebih banyak dari jumlah antena pengirim.

Kanal yang digunakan dalam komunikasi nirkabel adalah kanal berupa udara bebas yang memiliki gangguan-gangguan dalam pentransmisiannya. Gangguan tersebut dapat dikarenakan faktor alam, gelombang lain yang menginterferensi, atau benda-benda yang menghalangi rambat gelombang sinyal. Gangguan ini akan mengakibatkan adanya perbedaan antara informasi yang dikirimkan dengan informasi yang diterima.

Perbandingan antara sinyal yang diterima dengan banyaknya gangguan disebut dengan SNR (*Signal to Noise Ratio*), yang akan berakibat pada nilai BER (*Bit Error Rate*). BER adalah presentase perbandingan jumlah bit yang error terhadap bit yang diterima. Nilai BER dapat menggambarkan kualitas sinyal yang diterima, semakin kecil nilai BER, maka semakin baik kualitas sinyalnya.

Pada skripsi ini akan dilakukan simulasi suatu sistem komunikasi antar antenna MIMO menggunakan *spatial multiplexing* teknik *Singular Value Decomposition* (SVD) dengan mengevaluasi pengaruh banyak antenna dan besaran SNR terhadap kualitas sinyal dengan parameter nilai BER menggunakan program MATLAB.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan masalah yang telah diuraikan dalam latar belakang, adapun rumusan masalah yang diajukan sebagai berikut:

1. Bagaimana sistem komunikasi antar antenna MIMO menggunakan teknik *Singular Value Decomposition* (SVD)?
2. Bagaimana pengaruh banyaknya antenna pengirim dan penerima terhadap nilai BER dari sinyal yang diterima?
3. Bagaimana pengaruh besaran SNR terhadap nilai BER dari sinyal yang diterima?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan di atas, adapun batasan masalah yang diajukan sebagai berikut :

1. Teknik modulasi yang digunakan adalah teknik modulasi QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*).
2. Nilai AWGN saat simulasi terdistribusi $CN(0, N_0)$.
3. Nilai koefisien kanal saat simulasi terdistribusi $CN(0, 1)$.
4. Tidak membahas frekuensi kerja sinyal.
5. Nilai kanal hasil SVD dibuat secara acak oleh fungsi MATLAB.
6. Tidak membahas penyebab gangguan pada nilai SNR.
7. Tidak membahas karakteristik antenna dan jarak antar antenna.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Menganalisis sistem komunikasi antar susunan antenna MIMO menggunakan teknik *Singular Value Decomposition* (SVD).
2. Menganalisis pengaruh jumlah antenna yang digunakan terhadap kualitas sinyal yang diterima dengan parameter BER dalam pengiriman antenna MIMO menggunakan simulasi aplikasi MATLAB.
3. Menganalisis pengaruh nilai SNR terhadap kualitas sinyal yang diterima dengan parameter BER dalam pengiriman antenna MIMO menggunakan simulasi aplikasi MATLAB.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika pembahasan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Membahas dasar teori yang digunakan sebagai landasan teori dalam penelitian yang dilakukan.

BAB III METODE PENELITIAN

Membahas tentang metode yang digunakan meliputi studi literatur, pengambilan data, perhitungan, prosedur simulasi, dan analisis.

BAB IV PEMBAHASAN

Bab ini membahas serta menganalisis simulasi program berupa perbandingan pengaruh jumlah antenna dan nilai SNR terhadap nilai BER sinyal yang diterima menggunakan aplikasi MATLAB.

BAB V PENUTUP

Berisi kesimpulan hasil penelitian dan saran untuk perkembangan penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknologi Komunikasi *Wireless* (Nirkabel)

Teknologi *wireless* adalah teknologi komunikasi tanpa menggunakan kabel sebagai perantaranya. Dalam teknologi ini, hubungan telekomunikasi sudah tidak memakai kabel, melainkan memakai gelombang sinyal elektromagnetik. Teknologi *wireless* memerlukan alat penerima yang biasa disebut *access point* (titik akses) untuk memancarkan dan menerima sinyal dari dan ke piranti penerima.

Beberapa contoh teknologi wireless yaitu :

1. *Portable wireless*

Perangkat nirkabel bertenaga baterai atau sistem di luar kantor, rumah, atau kendaraan, seperti ponsel genggam.

2. *IR wireless*

Penggunaan perangkat yang menyampaikan data melalui radiasi IR (inframerah), digunakan dalam komunikasi terbatas jarak tertentu dan sistem kontrol.

3. *Mobile wireless*

Penggunaan perangkat nirkabel atau sistem mobile, contohnya PCS (*Personal Communication Service*).

4. *Fixed wireless*

Pengoperasian perangkat nirkabel atau sistem di rumah dan kantor, dan khususnya peralatan yang terhubung ke internet melalui modem khusus.

Teknologi *wireless* memiliki beberapa keuntungan, diantaranya adalah mengurangi penggunaan kabel yang terlihat kurang pantas saat dipandang, mengurangi kerumitan pada saat instalasi jika akan menghubungkan lebih dari satu perangkat bersamaan, dan juga dapat digunakan oleh semua pengguna untuk berkomunikasi dimana saja dan kapan saja apabila masih dalam radius jangkauan atau jarak jangkauan. Terlepas dari semua kelebihanannya, teknologi *wireless* pun tak luput dari kekurangan, seperti kemungkinan terjadinya interferensi terhadap sesama hubungan nirkabel pada perangkat lain.

2.2 Antena

Antena merupakan sebuah perangkat konduktor elektrik yang digunakan untuk meradiasikan energi elektromagnetik atau mengumpulkan energi elektromagnetik (Stalling, 2007). Pada antena yang berfungsi sebagai pemancar, energi listrik akan dikonversi menjadi

gelombang elektromagnetik lalu dipancarkan ke udara. Pada antenna yang berfungsi sebagai penerima, gelombang elektromagnetik akan dikonversi menjadi energi listrik.

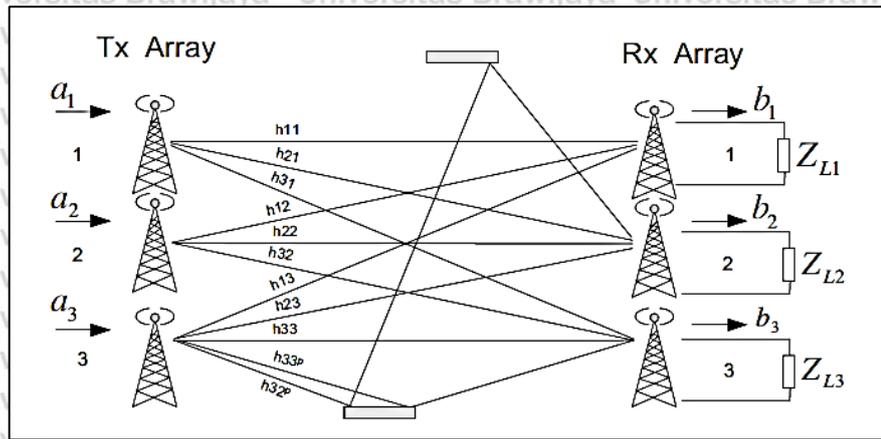
Dalam telekomunikasi, antenna memiliki 3 fungsi pokok, yaitu:

1. Antenna dengan fungsi sebagai konverter. Antenna dapat mengubah bentuk sinyal, yaitu dari sinyal listrik menjadi sinyal elektromagnetik pada sisi pemancar, dan sinyal elektromagnetik menjadi sinyal listrik pada sisi penerima.
2. Antenna dengan fungsi sebagai radiator. Antenna dapat meradiasikan atau memancarkan gelombang elektromagnetik ke udara bebas. Pada sisi yang sebaliknya, yaitu ketika antenna menerima atau menangkap energi radiasi gelombang elektromagnetik dari udara bebas, antenna dikatakan memiliki fungsi re-radiator.
3. Antenna berfungsi sebagai *impedance matching* (penyesuaian impedansi) yang berarti antenna akan selalu menyesuaikan impedansi sistem pada saluran transmisi.

2.3 MIMO

Sistem antenna MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) adalah sebuah sistem pengiriman data menggunakan antenna dengan jumlah banyak pada sisi pengirim maupun sisi penerima. Hal ini dapat menguntungkan dari sisi *spatial diversity* yang diperoleh dari beberapa antenna yang terpisah dengan jarak tertentu pada lingkungan *multipath* dan *scattering*. Sistem MIMO diimplementasikan dengan beberapa cara agar dapat mendapatkan *gain diversity* untuk melawan sinyal fading ataupun untuk mendapatkan kapasitas *gain*.

Secara umum ada dua kategori pada teknik MIMO. Tujuan pertama adalah untuk meningkatkan efisiensi *power* dengan memaksimalkan *spatial diversity*. Yang termasuk metode tersebut adalah *delay diversity*, *space-time block code* (STBC), dan *space-time trellis code* (STTC). Tujuan yang kedua menggunakan pendekatan *layered* untuk meningkatkan kapasitas, contohnya *Spatial Multiplexing*.



Gambar 2.1 Ilustrasi pemodelan MIMO

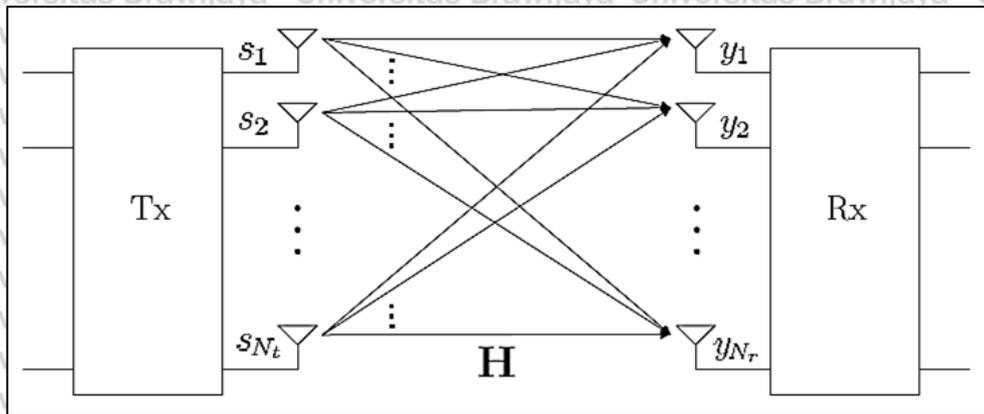
Sumber: DeFlaviis (2008)

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1, MIMO adalah sebuah sistem transmisi (pengirim-penerima) dimana yang terdiri dari beberapa antenna (m untuk antenna pengirim dan n untuk antenna penerima). Proses sebelum sinyal dikirim adalah pengkodean, modulasi, *mapping*, yang bisa dilakukan terpisah ataupun tergabung pada lengan antenna.

Persamaan matriks kanal pada sistem MIMO (m -antenna transmit dan n -antenna receive) secara umum ditunjukkan pada persamaan 2.1 (DeFlaviis, 2008):

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1m} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \dots & h_{nm} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (2.1)$$

dimana $h_{m,n}$ menyatakan respon kanal dari antenna *transmitter* ke- n ke antenna *receiver* ke- m . Matriks H adalah matriks kanal dengan ukuran sejumlah antenna pengirim x jumlah antenna penerima. Masing-masing h dalam matriks H merepresentasikan nilai gelombang elektromagnetik dari antenna pengirim ke antenna penerima. Contohnya pada h_{11} , adalah nilai gelombang elektromagnetik (bilangan riil+bilangan imajiner) dari antenna penerima 1 ke antenna penerima 2.



Gambar 2.2 Model channel system MIMO

Sumber: Peter Hong, Wan Jen Huang, Jay Kuo (2010)

Pada sebuah sistem antenna MIMO dengan jumlah antenna *transmitter* sebanyak N_t dan jumlah antenna *receiver* sebanyak N_r , persamaan sinyal yang diterima dapat ditunjukkan pada persamaan:

$$\begin{aligned}
 y_1[n] &= \sqrt{P} (h_{1,1}s_1[n] + h_{2,1}s_2[n] + \dots + h_{N_t,1}s_{N_t}[n] + w_1[n], \\
 y_2[n] &= \sqrt{P} (h_{1,2}s_1[n] + h_{2,2}s_2[n] + \dots + h_{N_t,2}s_{N_t}[n] + w_2[n] \\
 &\vdots \\
 y_{N_r}[n] &= \sqrt{P} (h_{1,N_r}s_1[n] + h_{2,N_r}s_2[n] + \dots + h_{N_t,N_r}s_{N_t}[n] + w_{N_r}[n] \dots \dots (2.2)
 \end{aligned}$$

Dimana P adalah total *transmit power*, $h_{i,j}$ adalah koefisien kanal antara antenna pengirim i dan antenna penerima j , dan $w[n] \sim CN(0, \sigma_w^2)$ adalah *white gaussian noise* yang terjadi selama proses pengiriman.

Apabila $s[n] = [s_1[n], s_2[n], \dots, s_{N_t}[n]]^T$ adalah input vektor yang dikirimkan dari antenna *transmitter* dan $y[n] = [y_1[n], y_2[n], \dots, y_{N_r}[n]]^T$ adalah output vektor yang diterima dari antenna receiver, maka persamaan vektor sinyal output-nya adalah:

$$y[n] = \sqrt{P}Hs[n] + w[n] \dots \dots (2.3)$$

H adalah matriks kanal $N_r \times N_t$ dengan masing-masing element-nya berupa $h_{i,j}$ dan $w[n] = [w_1[n], w_2[n], \dots, w_{N_r}[n]]^T$ adalah *additive gaussian noise* dengan rata-rata 0 dan kovarians matriks nya $\sigma_w^2 I_{N_r \times N_r}$.

Apabila dimodelkan, maka persamaan (2.3) dapat disederhanakan menjadi:

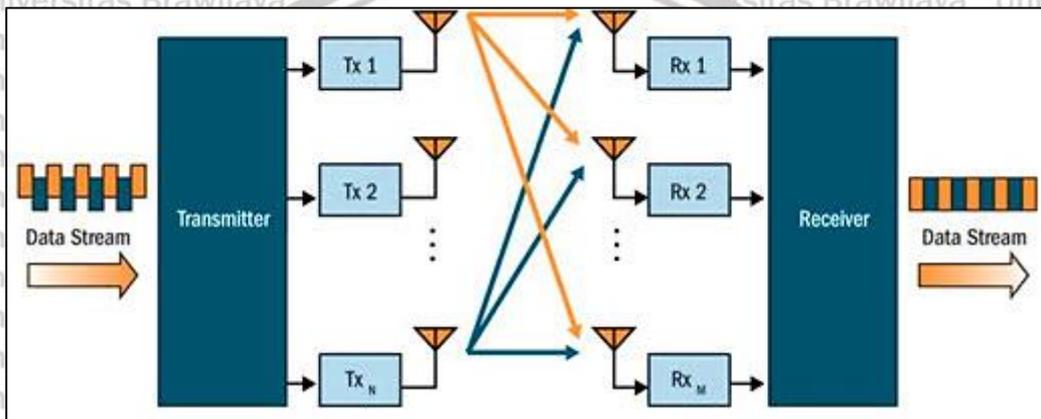
$$y = Hx + w \dots \dots (2.4)$$

y adalah vektor sinyal yang diterima, H adalah matriks kanal $N_r \times N_t$, x adalah vektor sinyal yang ditransmisikan, dan w adalah vektor *noise*.



2.4 Spatial Multiplexing

Spatial Multiplexing merupakan metode yang digunakan oleh MIMO untuk pengiriman data yang berbeda secara paralel pada setiap antenna transmisi. Pada skema *spatial multiplexing*, aliran data yang berlaju tinggi dipecah menjadi sejumlah aliran paralel yang sesuai dengan jumlah antenna pada sisi *transmitter*. Pada masing-masing aliran paralel, laju pada aliran tersebut menjadi lebih rendah dibanding aliran aslinya. Dengan demikian, kapasitas kanal yang besar dapat tercapai. *Spatial Multiplexing* dapat menambah efisiensi spektrum yang akan menambah kecepatan transmisi data.



Gambar 2.3 Skema *Spatial Multiplexing*

Sumber: Bolcskei (2002)

Pada teknik ini, sisi *transmitter* dan sisi *receiver* harus saling mengetahui kanal yang digunakan untuk bertukar informasi. Informasi mengenai kanal tersebut didapatkan menggunakan teknik *Singular Value Decomposition* (SVD).

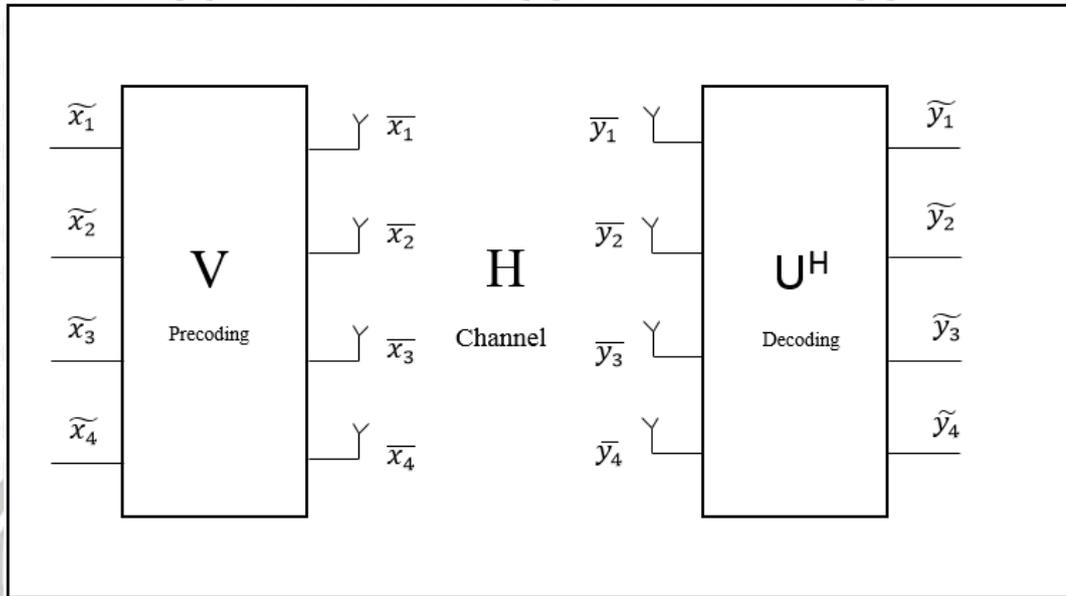
2.5 Singular Value Decomposition

Singular Value Decomposition (SVD) adalah salah satu metode dalam *spatial multiplexing* yang bertujuan untuk mendapatkan informasi mengenai kanal yang digunakan untuk mengirim data secara paralel.

SVD adalah salah satu alat komputasi dalam linear aljabar. SVD biasa digunakan untuk menyelesaikan permasalahan linear kuadrat yang tak terbatas, mencari estimasi rank matriks, dan menganalisis korelasi kanonik.

Salah satu keunggulan dari teknik *Singular Value Decomposition* adalah teknik ini dapat digunakan dalam sistem dengan jumlah antenna pengirim yang tidak sama dengan antenna penerima. Berbeda dengan teknik MIMO konvensional, dimana dalam matematis persamaan sinyal yang diterima adalah matriks kanal invers dikalikan dengan data yang dikirim. Hal ini membuat operasi invers dalam matriks yang tidak persegi menjadi tidak

dapat dilakukan. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan teknik *Singular Value Decomposition (SVD)*.



Gambar 2.4 Pemodelan sistem *Singular Value Decomposition SVD*

Sumber: Perancangan

SVD mendefinisikan bahwa dalam sebuah kanal H dengan dimensi $m \times n$, terdapat matriks orthogonal U dan V , serta matriks diagonal Σ sehingga didapatkan persamaan sebuah kanal SVD adalah :

$$H = U \Sigma V^* \dots\dots\dots(2.5)$$

Pada persamaan tersebut, H adalah matriks respon kanal dari antenna pengirim ke antenna penerima. Matriks tersebut berisikan nilai gelombang elektromagnetik dari antenna pengirim ke antenna penerima. Dimensi dari matriks H akan bergantung sesuai dengan jumlah antenna pengirim dan antenna penerima.

Σ adalah matriks diagonal yang berdimensi sama dengan dimensi pada matriks H . Isi pada matriks Σ ini adalah matriks diagonal dari *non-negative* singular value pada matriks H .

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \sigma_t \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.6)$$

$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_r$ adalah bilangan riil positif dan M menyatakan rank dari matriks. Kanal dengan jumlah antenna penerima \times antenna pengirim yang lebih besar akan menghasilkan matriks yang lebih besar, sehingga matriks diagonal Σ juga menjadi lebih besar. Matriks

diagonal Σ memiliki nilai *rank* (M) yang lebih besar. Matriks \mathbf{U} dan \mathbf{V} adalah matriks orthogonal dari matriks \mathbf{H} dengan $\mathbf{U}^* \mathbf{U} = \mathbf{I}$ dan $\mathbf{V}^* \mathbf{V} = \mathbf{I}$.

Dengan menggabungkan persamaan (2.4) dan (2.5), maka dapat disimpulkan bahwa:

$$\bar{\mathbf{y}} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^* \bar{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{w}} \dots \dots \dots (2.7)$$

- dimana:
- $\bar{\mathbf{y}}$ = data yang diterima pada *receiver*
 - \mathbf{U} = matriks orthogonal *channel*
 - \mathbf{V}^* = matriks orthogonal *channel hermitian*
 - $\bar{\mathbf{x}}$ = informasi yang telah melalui proses *precoding*
 - $\bar{\mathbf{w}}$ = *noise* (matriks)
 - Σ = matriks diagonal dari *non-negative singular value*

Pada sisi penerima / *receiver*, persamaan (2.7) dikalikan dengan matriks \mathbf{U}^* untuk menormalisasikan vektor \mathbf{U} :

$$\mathbf{U}^* \cdot \bar{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^* (\mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^* \bar{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{w}}) \dots \dots \dots (2.8)$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^* \cdot \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^* \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{U}^* \bar{\mathbf{w}} \dots \dots \dots (2.9)$$

$$\mathbf{U}^* \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I}$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{I} \Sigma \mathbf{V}^* \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{U}^* \bar{\mathbf{w}} \dots \dots \dots (2.10)$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \Sigma \mathbf{V}^* \bar{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{w}} \dots \dots \dots (2.11)$$

- Dimana:
- $\tilde{\mathbf{y}}$ = informasi yang telah melalui proses *decoding*
 - $\tilde{\mathbf{w}}$ = *noise* (vektor)

Pada sisi pengirim / *transmitter*, sesuai pada gambar (2.4), dapat disimpulkan bahwa

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{V} \tilde{\mathbf{x}} \dots \dots \dots (2.12)$$

- dimana :
- $\bar{\mathbf{x}}$ = informasi yang telah melalui proses *precoding*
 - \mathbf{V} = matriks orthogonal *channel*
 - $\tilde{\mathbf{x}}$ = informasi awal yang dikirimkan

Dengan persamaan (2.12), maka dapat dimasukkan ke persamaan (2.11), sehingga:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \Sigma \mathbf{V}^* \cdot \mathbf{V} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{w}} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$\mathbf{V}^* \cdot \mathbf{V} = \mathbf{I}$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \Sigma \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{w}} \dots \dots \dots (2.14)$$

$\tilde{\mathbf{y}}$ adalah matriks (t x 1), Σ adalah matriks (t x t) singular, $\tilde{\mathbf{x}}$ adalah matriks (t x 1), dan $\tilde{\mathbf{w}}$ adalah matriks (t x 1). Sehingga bentuk persamaan matriksnya menjadi:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \Sigma \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{w}}$$



$$\begin{pmatrix} \tilde{y}_1 \\ \vdots \\ \tilde{y}_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \vdots \\ \tilde{x}_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tilde{w}_1 \\ \vdots \\ \tilde{w}_t \end{pmatrix}$$

Dari persamaan matriks tersebut didapatkan:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 &= \sigma_1 \tilde{x}_1 + \tilde{w}_1 \\ \tilde{y}_2 &= \sigma_2 \tilde{x}_2 + \tilde{w}_2 \\ &\dots \\ \tilde{y}_t &= \sigma_t \tilde{x}_t + \tilde{w}_t \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (2.15)$$

Sehingga dapat kita simpulkan bahwa data yang diterima setelah melalui proses *decoder* adalah informasi awal yang dikirimkan dalam bentuk paralel.

2.6 Teknik Modulasi Digital QPSK

Modulasi digital merupakan proses penumpangan sinyal digital (*bit stream*) ke dalam sinyal carrier. Teknik modulasi yang digunakan dalam skripsi ini adalah QPSK, dimana penjelasannya adalah sebagai berikut:

Phase Shift Keying (PSK) merupakan modulasi dengan fasa sinyal carrier yang berubah sesuai dengan perubahan data sinyal informasi. Dalam PSK, titik konstelasi yang terpilih biasanya diposisikan dengan jarak sudut seragam di sekitar lingkaran. Hal ini memberikan pemisahan fasa antara titik yang berdekatan dan kebal terhadap kerusakan. Titik-titik ini diposisikan dalam lingkaran sehingga mereka dapat ditransmisikan dengan energi yang sama.

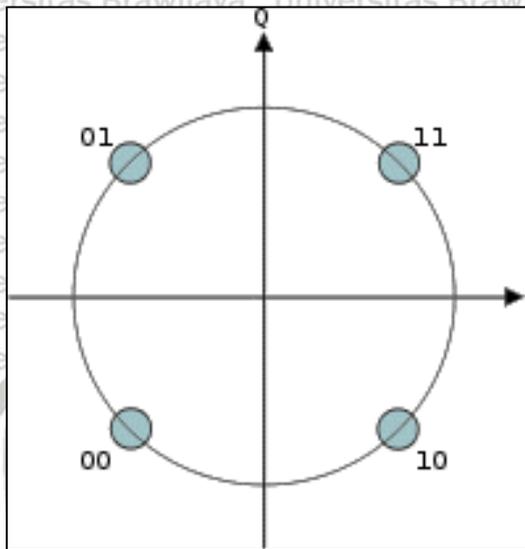
Modulasi QPSK biasa disebut pula *quarternary* atau *quadriphase* PSK atau 4-PSK. QPSK menggunakan empat titik pada diagram konstelasi, terletak di sekitar suatu lingkaran. Dengan empat tahap, QPSK dapat mendekode dua bit per simbol. Walaupun QPSK dapat dipandang sebagai sebagai suatu modulasi *quaternary*, lebih mudah untuk melihatnya sebagai dua *quadrature carriers* yang termodulasi tersendiri. Dengan penafsiran ini, maka bit yang digunakan untuk mengatur komponen fasa pada sinyal carrier ketika digunakan untuk mengatur komponen *quadrature-phase* dari sinyal carrier tersebut.

Pada PSK, sinyal keluaran modulator dapat dituliskan dalam bentuk matematis seperti ditunjukkan pada persamaan:

$$\begin{aligned} \phi_0(t) &= A \sin(\omega_0 t + \theta_0) \\ \phi_1(t) &= A \sin(\omega_1 t + \theta_1) \quad 0 < t \leq T_s \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (2.16)$$



Dimana θ_0 dan θ_1 adalah pergeseran phase yang konstan, sedangkan amplitude dan frekuensi mempunyai nilai yang tetap. Pada QPSK masing-masing simbol direpresentasikan dengan 2 bit sehingga kombinasi 2 bit yang mungkin adalah $2^2 = 4$ (M array = 4), input untuk diproses di modulator dalam bentuk desimal sehingga input bit simbol dikonversikan ke desimal.



Gambar 2.5 Diagram Konstelasi QPSK

Sumber: auburn.edu (1997)

Tabel 2.1 Mapping QPSK

Bit	Input QPSK	Output QPSK
00	0	-1-j
01	1	-1+j
10	2	1-j
11	3	1+j

Sumber: Perancangan

2.7 SNR (Signal to Noise Ratio)

SNR adalah perbandingan antara daya sinyal yang diinginkan dengan daya sinyal yang tidak diinginkan (*noise*) pada suatu titik ukur. SNR menyatakan kualitas sinyal informasi yang diterima pada sistem transmisi. SNR juga merupakan batas ambang sinyal analog yang masih dapat diterima. Semakin besar nilai SNR maka kualitas sinyal semakin bagus, hal tersebut menunjukkan daya pada sinyal lebih kuat dibandingkan daya pada *noise*.

SNR dapat dinyatakan dengan rumus:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \quad (2.17)$$

Di mana P adalah daya rata-rata. Kedua sinyal dan *noise* listrik harus diukur pada titik-titik yang sama atau setara dalam suatu sistem, dan dalam sistem dengan *bandwidth* yang sama.

SNR memiliki satuan, yaitu desibel (dB). Untuk menghitung SNR dalam satuan dB dapat dihitung menggunakan:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} (\text{SNR}) \quad (2.18)$$

2.8 Bit Error Rate (BER)

BER merupakan persentasi dari total bit *error* berbanding dengan total bit yang diterima dalam transmisi. Biasanya ditunjukkan dengan 10 berbanding ke sebuah negatif power. Misal sebuah transmisi data mengandung BER 10^{-5} artinya dalam 100000 bit yg ditransmisikan satu diantaranya *error*. BER adalah indikasi dari seberapa sering sebuah paket harus diretransmisikan karena mengandung *error*.

$$\text{BER} = \frac{\text{jumlah error}}{\text{total bit yang dikirimkan}} \quad (2.19)$$

BER dalam sistem antena MIMO dipengaruhi oleh banyak hal. Salah satunya adalah besaran nilai SNR dan jumlah antena. Berikut adalah persamaan hubungan antara BER dan SNR dalam kanal terdistribusi Rayleigh (Duman & Ghrayeb, 2017):

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\text{SNR}}{1+\text{SNR}}} \right) \quad (2.20)$$

Hubungan antara BER dengan jumlah antena dapat dilihat dari persamaan berikut (Hong, Huang, dan Kuo, 2010)

$$\text{BER} = \frac{1}{(NtNr)!} \left(\frac{M \text{SNR}}{\text{SNR}} \right)^{NtNr} \quad (2.21)$$

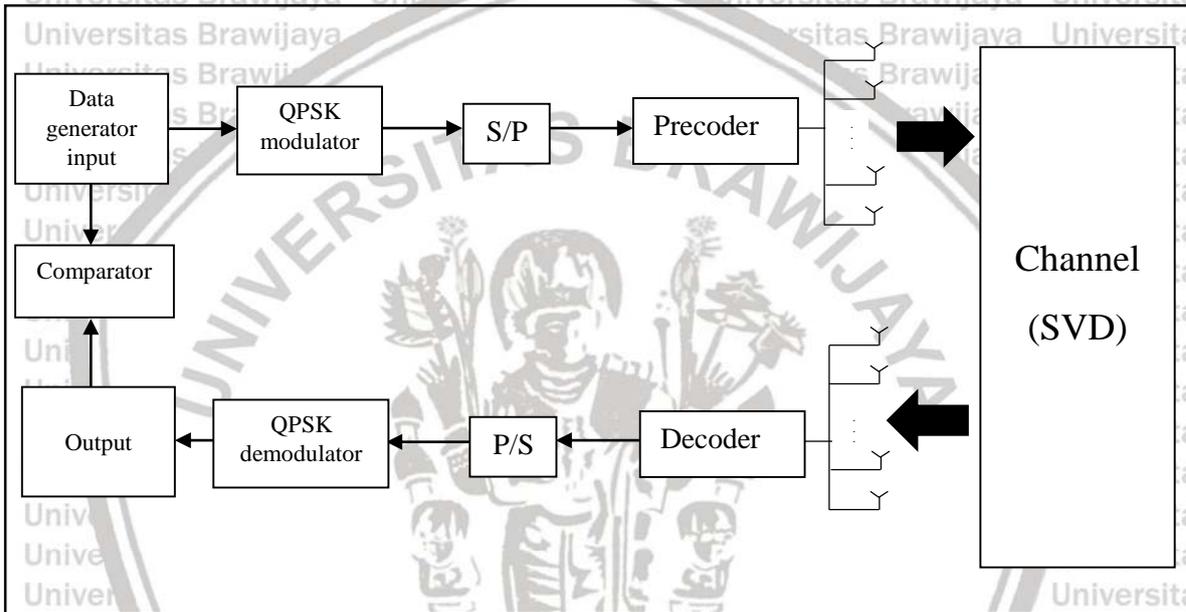
Dari persamaan tersebut, dapat dilihat bahwa BER dipengaruhi oleh Nt yaitu jumlah antena pengirim, Nr adalah jumlah antena penerima, dan M adalah *rank* dari matriks kanal.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Desain Model Sistem

Dalam skripsi ini akan dilakukan simulasi sistem MIMO dengan teknik *Singular Value Decomposition* (SVD). Simulasi sistem dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab sebagai alat bantu untuk menguji parameter sistem.



Gambar 3.1 Pemodelan sistem MIMO dengan teknik *singular value decomposition*

Sumber: Perancangan

Gambar 3.1 merupakan blok diagram dari sistem MIMO secara keseluruhan yang akan dibahas dalam skripsi ini. Bagian yang akan disimulasikan adalah bagian *precoding* dan *decoding* dalam sistem pengiriman dengan teknik SVD. Gambar 3.2 menunjukkan diagram alir pemrograman simulasi, dan Gambar 3.3 menunjukkan pemodelan sistem SVD yang akan disimulasikan.

3.2 Perancangan Parameter Simulasi

Pada simulasi skripsi ini akan dilakukan percobaan-percobaan untuk melihat performansi sistem MIMO dengan teknik *Singular Value Decomposition*, yaitu:

- Pengaruh perubahan besaran SNR terhadap MIMO dengan teknik SVD
- Pengaruh perubahan jumlah antenna terhadap MIMO dengan teknik SVD

3.3 Parameter Transmisi Data

Parameter yang digunakan dalam transmisi data menggunakan MIMO dengan teknik SVD adalah sebagai berikut:

- Jumlah antenna (*transmitter*, *receiver*) = (1,1), (4,4), (4,6), (4,8), (4,10)
- Nilai SNR (dB) = 0, 3, 6, 9, 12
- Noise power (dBm) = -30
- Jumlah percobaan = 50.000 kali
- Jumlah data yang ditransmisikan = 4 bit / transmisi
- Modulasi yang digunakan = QPSK

3.4 Parameter Kanal

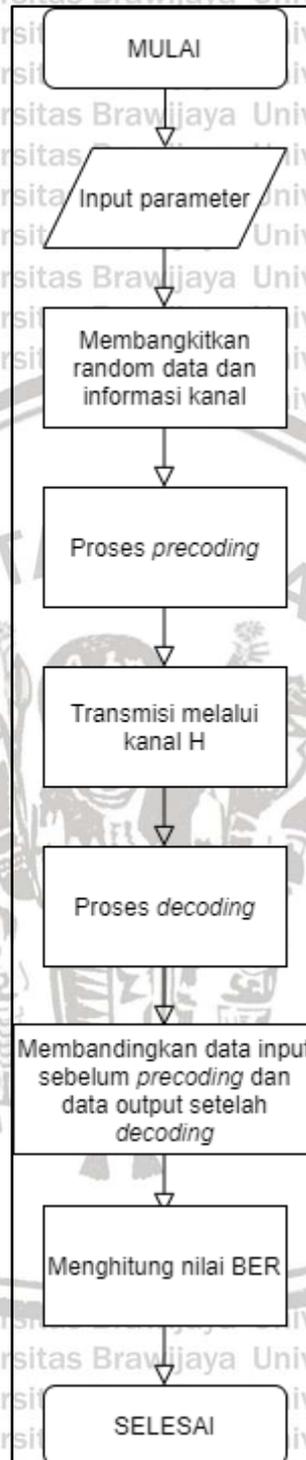
Dalam simulasi ini, parameter pada kanal adalah sebagai berikut:

- AWGN terdistribusi $CN(0, N_0)$, yaitu AWGN terdistribusi dengan rata-rata sebesar 0 dan nilai variansi sebesar N_0
- Koefisien kanal terdistribusi $CN(0,1)$, yaitu koefisien kanal terdistribusi Rayleigh dengan rata-rata sebesar 0 dan nilai variansi sebesar 1
- Matriks SVD kanal $H = U\Sigma V^*$ dibangkitkan secara *random* oleh MATLAB

3.5 Perancangan Sistem

Pada Gambar 3.1 telah digambarkan blok diagram perancangan sistem yang dilakukan dalam skripsi ini. Akan tetapi, bagian yang akan disimulasikan dalam program secara khusus adalah proses *precoding*, transmisi pada kanal H, dan *decoding*.

Berikut Gambar 3.2 adalah diagram alir pemrograman simulasi pengiriman data melalui antenna MIMO dengan teknik *Singular Value Decomposition* (SVD).



Gambar 3.2 Diagram alir pemrograman

Sumber: perancangan

Pada diagram alir pemrograman simulasi dimulai dengan memberikan parameter-parameter yang akan digunakan. Diantaranya adalah bit informasi QPSK, *channel H*, *noise power*, variasi jumlah set antenna pengirim dan penerima, serta variasi besaran SNR. Bit informasi QPSK dan *channel H* dibangkitkan secara random menggunakan fungsi

MATLAB. Kemudian MATLAB akan mendekomposisi *channel* H menjadi matriks U, Σ , dan V^* . Mengacu pada tinjauan pustaka yang ada pada Bab II subbab 2.4.1 mengenai teknik *singular value decomposition*, pada proses *precoding*, matriks data \tilde{x} akan dikalikan dengan matriks V menjadi matriks \tilde{x} . Kemudian pada pentransmisian *channel* H, matriks \tilde{x} akan dikalikan dengan matriks Σ menjadi matriks \tilde{y} . Setelah itu, pada sisi penerima, matriks sinyal \tilde{y} yang diterima akan dikalikan dengan matriks U^* menjadi matriks \tilde{y} . Matriks \tilde{y} merupakan data informasi awal yang dikirimkan ditambah gangguan pada pentransmisian.

3.6 Pemodelan kanal MIMO SVD

Persamaan kanal pada sistem MIMO secara umum dapat dilihat pada persamaan (2.1), sehingga berikut adalah pemodelan kanal untuk masing-masing set antena:

a. Pemodelan kanal antena 1x1

$$H_1^1 = [h_{11}]$$

b. Pemodelan kanal antena 4x4

$$H_4^4 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix}$$

c. Pemodelan kanal antena 4x6

$$H_4^6 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & h_{15} & h_{16} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} & h_{25} & h_{26} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} & h_{35} & h_{36} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} & h_{45} & h_{46} \end{bmatrix}$$

d. Pemodelan kanal antena 4x8

$$H_4^8 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & h_{15} & h_{16} & h_{17} & h_{18} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} & h_{25} & h_{26} & h_{27} & h_{28} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} & h_{35} & h_{36} & h_{37} & h_{38} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} & h_{45} & h_{46} & h_{47} & h_{48} \end{bmatrix}$$

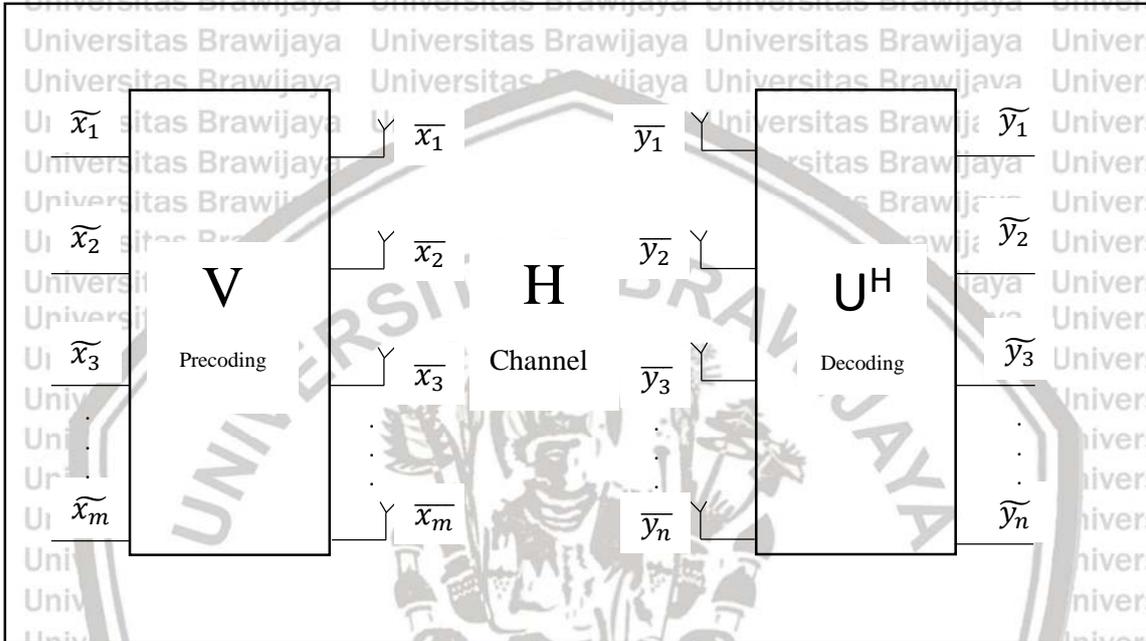
e. Pemodelan kanal antena 4x10

$$H_4^{10} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & h_{15} & h_{16} & h_{17} & h_{18} & h_{19} & h_{1,10} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} & h_{25} & h_{26} & h_{27} & h_{28} & h_{29} & h_{2,10} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} & h_{35} & h_{36} & h_{37} & h_{38} & h_{39} & h_{3,10} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} & h_{45} & h_{46} & h_{47} & h_{48} & h_{49} & h_{4,10} \end{bmatrix}$$

Dimana H adalah matriks kanal dengan diagonal sebesar (jumlah antena pengirim x jumlah antena penerima). Masing-masing *h* dalam matriks H merepresentasikan nilai

gelombang elektromagnetik dari antenna pengirim ke antenna penerima. Contohnya pada h_{11} , adalah nilai gelombang elektromagnetik (bilangan riil+bilangan imajiner) dari antenna penerima 1 ke antenna penerima 2.

Berikut adalah pemodelan sistem SVD menggunakan kanal H:



Gambar 3.3 Pemodelan sistem SVD

Sumber: Perancangan

3.7 Menghitung Nilai BER

Data di penerima yang dikeluarkan dari demulasi modulator akan dibandingkan dengan data pada pengirim yang dikeluarkan oleh data generator untuk mengetahui jumlah bit yang salah dibagi dengan total bit yang dikirimkan menggunakan persamaan rumus (2.16).

3.8 Hasil Simulasi

Dalam skripsi ini penulis mensimulasikan sistem pengiriman antenna MIMO menggunakan teknik *Singular Value Decomposition* (SVD), yang akan penulis sajikan dengan bentuk dokumentasi berupa grafik perbandingan nilai BER terhadap jumlah antenna dan nilai SNR serta tabel nilainya. Hasil simulasi tersebut akan dilakukan olah data lebih lanjut dengan cara:

1. Membandingkan hasil simulasi pengaruh variasi besaran SNR pada nilai BER dalam pengiriman data dengan teknik SVD.



2. Membandingkan hasil simulasi pengaruh variasi jumlah antena pada nilai BER dalam pengiriman data dengan teknik SVD.

Simulasi tersebut dilakukan menggunakan program *software* MATLAB R2020.

3.9 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Pada tahapan ini akan dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan dari analisis bab hasil dan pembahasan. Lalu tahap selanjutnya penulis akan memberikan saran bagi pembaca yang akan melakukan studi pengembangan dari penelitian ini ataupun bahan pendukung penelitian selanjutnya.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Penelitian ini akan menggunakan data QPSK yang dikirimkan secara paralel melewati kanal yang terdistribusi secara Rayleigh. Kanal tersebut merupakan representasi *fading* (redaman) yang nilainya dinyatakan dalam distribusi Rayleigh. Dalam penelitian ini, nilai kanal H merupakan bilangan kompleks yang nilainya dibangkitkan acak. Analisis yang akan dilakukan adalah analisis performansi dari simulasi pengiriman data dengan teknik *Singular Value Decomposition* (SVD) pada antena MIMO dengan variasi jumlah antena pengirim dan penerima serta variasi besaran nilai SNR.

Simulasi dilakukan dalam 5 set antena pengirim dan penerima yang berbeda, yaitu set antena pengirim dan penerima 1x1, 4x4, 4x6, 4x8, dan 4x10. Simulasi dari masing-masing set antena akan dilakukan berulang dengan besaran nilai SNR 0 dB, 3 dB, 6 dB, 9 dB, dan 12 dB.

Simulasi ini dilakukan menggunakan *software* MATLAB R2020 dengan membagi program menjadi dua bagian, yang pertama adalah program fungsi dan definisi dari masing-masing parameter, dan yang kedua adalah program simulasi itu sendiri.

4.2 Langkah-langkah Simulasi

4.2.1 Menyimpan fungsi dan mendefinisikan parameter

1. Mendefinisikan data yang akan dikirimkan merupakan data dengan teknik modulasi QPSK. Masing-masing bit didefinisikan dalam bentuk digital dan analog mengacu pada tabel *mapping* QPSK tabel (2.1).

```
dataSetQpsk:
analog = [-1-j; -1+1j; 1+1j; 1-1j];
digital = [0 0; 0 1; 1 1; 1 0];
```

2. Mendefinisikan kanal H yang terdistribusi secara Gauss-Independent dan merupakan matriks sebanyak jumlah antena penerima \times jumlah antena pengirim. Masing-masing jalur merupakan persamaan gelombang elektromagnetik sesuai dengan persamaan kanal H pada persamaan (2.1). Kanal dikalikan dengan $\sqrt{2}$ karna parameter koefisien kanal yang

terdistribusi Rayleigh (Kumbhani, Singh, 2017) dan memiliki variansi sebesar 1.

```
H = generateGaussIndp(Nr, Nt, variance)

realPart = randn([Nr, Nt]).*(2^-0.5);
imagPart = randn([Nr, Nt]).*(2^-0.5);
H = (realPart + 1j*imagPart)*variance^0.5;
```

3. Memunculkan nilai QPSK secara random dan menyimpan nilai digital dan analognya.

```
dataAnalog = dataAnalog*(2^-0.5)*(power^0.5);
```

4. Mendefinisikan fungsi `.dBmToLinear` untuk mengubah dBm ke besaran linear.

```
powerLin = dBmToLinear(powerdBm)
powerLin = 10^(0.1*powerdBm-3)
```

5. Mendefinisikan fungsi `.getPowerLin` untuk mendapatkan nilai linear *power transmit*. Merujuk pada rumus (2.17), daya sinyal yang dipancarkan atau *power transmit* merupakan perkalian dari SNR skala dB dengan daya *noise*-nya.

```
scaleLin = 10^(0.1*scaledB);
powerLin = scaleLin * noisePowerLin;
```

4.2.2 Simulasi

1. Memasukkan parameter-parameter sesuai dengan subbab 3.3.

```
noisePowerdBm = -30;
noisePowerLin = BerMimoSvd.dBmToLinear(noisePowerdBm);
AntenaSet = {[4, 4], [6, 4], [8, 4], [10, 4]};
snrSetdB = [0, 3, 6, 9, 12];
trialNum = 50000;
numOfDataTransmit = 4;
```

2. Simulasi diulang untuk set antena (4,4), (6x4), (8x4), (10x4), dengan masing-masing diulang sebanyak SNR 0, 3, 6, 9, 12 dan *trial number* sebanyak 50.000 kali.

3. Mendapatkan nilai *transmit power* sesuai dengan perhitungan pada fungsi `.getPowerLin` pada program sebelumnya.
4. Membuat matriks kanal H dengan fungsi `.generateGaussIndp` pada program sebelumnya yang berdimensi $N_r \times N_t$ dengan variansi sebesar 1.

```
H = BerMimoSvd.generateGaussIndp(Nr, Nt, 1);
```

5. Mendekomposisi matriks H menjadi 3 matriks yaitu U , Σ , dan V^* merujuk pada rumus (2.4) menggunakan fungsi `svd` dari Matlab.

```
[U, S, V] = svd(H);
```

6. Membangkitkan data digital dan data analog yang akan ditransmisikan menggunakan fungsi `.generateRndQpsk`.
7. Melakukan proses *precoding*, yaitu data informasi yg akan dikirimkan dikalikan dengan matriks V , sehingga menghasilkan *svect*, merujuk pada persamaan (2.12).

```
sVect = V*dataTransAnalog;
```

8. Membangkitkan matriks *noise* menggunakan fungsi `.generateGaussIndp`.

```
receiveNoise = BerMimoSvd.generateGaussIndp(Nr, 1, noisePowerLin);
```

9. Pada sisi penerima, persamaan (2.7) menjelaskan mengenai persamaan sinyal yang diterima, yaitu vektor sinyal yang ditransmisikan atau *svect* dikalikan dengan matriks kanal H ditambah w atau *noise* yang diterima.

```
yVect = H*sVect + receiveNoise
```

10. Melakukan proses *decoding*, dimana sinyal yang telah diterima atau *yvect* dikalikan dengan U^* sesuai dengan persamaan (2.8).

```
dataReceiveAnalog = U'*yVect;
```

11. Mengolah data analog yang telah diterima menjadi data digital.

```
dataReceiveDig =
real(dataReceiveAnalog)>=0
imag(dataReceiveAnalog)>=0];
if size(dataReceiveDig, 1)>=5
dataReceiveDig(5:end,:)=[];
```

12. Data yang diterima dibandingkan dengan data yang dikirim. Apabila data tersebut tidak sama, maka akan dianggap sebagai bit yang *error*. Jumlah dari bit yang *error* tersebut dinamakan *number bit error*.

```
nbrBitError = sum((dataReceiveDig~=dataTransDig));
```

13. Menghitung presentase *number bit error* dan mencari rata-rata *error* dari seluruh percobaan, merujuk pada persamaan (2.19).

```
percentBitError = nbrBitError / numel(dataTransDig);
errorAvg = errorAvg + percentBitError;
errorAvg = errorAvg / trialNum;
```

14. Setelah didapatkan nilai BER dari masing-masing pengiriman data, dilakukan penggambaran grafik *bit of error* / BER. Nilai BER dikalikan dengan log10 untuk menyederhanakan penggambaran grafik. Sumbu-x merupakan besaran BER dan sumbu-y merupakan besaran SNR-nya.

4.2.3 Contoh hasil *running* simulasi

Dalam subbab ini akan dijabarkan hasil *running* simulasi pada set antenna pengirim dan penerima 1x1 dan 4x6 dengan SNR yang sama yaitu 3 dB dan *noise power* sebesar -30 dBm untuk melihat lebih jelas proses dekomposisi pada teknik *Singular Value Decomposition*.

a. Hasil *running* simulasi pada set antenna 1x1

```
1. Kanal H: -0.0878 + 1.0534i
   Dekomposisi kanal
   U: -0.0830 + 0.9965i
   Σ: 1.0570
   V: 1
```

```
2. Data analog transmitter: 10-3 * [ 0.9988 - 0.9988i;
   0.9988 - 0.9988i;
   0.9988 + 0.9988i;
   -0.9988 - 0.9988i;
   Data digital transmitter: [ 1 0;
   1 0;
   1 1;
   0 0]
```

3. Noise: $0.0005 + 0.0012i$

4. Proses *Singular Value Decomposition*

Pada sisi transmitter (S):

Data Analog x matriks V

$$10^{-3} * \begin{bmatrix} 0.9988 & -0.9988i \\ 0.9988 & -0.9988i \\ 0.9988 & +0.9988i \\ -0.9988 & -0.9988i \end{bmatrix} * 1 = 10^{-3} * \begin{bmatrix} 0.9988 & -0.9988i \\ 0.9988 & -0.9988i \\ 0.9988 & +0.9988i \\ -0.9988 & -0.9988i \end{bmatrix}$$

Pada sisi kanal (Y):

(H x S) + noise

$$\begin{bmatrix} -0.0878 + 1.0534i \\ -0.0878 + 1.0534i \\ -0.0006 + 0.0021i \\ 0.0016 + 0.0002i \end{bmatrix} * 10^{-3} * \begin{bmatrix} 0.9988 & -0.9988i \\ 0.9988 & -0.9988i \\ 0.9988 & +0.9988i \\ -0.9988 & -0.9988i \end{bmatrix} + 0.0005 + 0.0012i = \begin{bmatrix} 0.0015 + 0.0232i \\ 0.0015 + 0.0023i \\ -0.0006 + 0.0021i \\ 0.0016 + 0.0002i \end{bmatrix}$$

Pada sisi penerima (Z):

Matriks Y x Matriks U

$$\begin{bmatrix} 0.0015 + 0.0232i \\ 0.0015 + 0.0023i \\ -0.0006 + 0.0021i \\ 0.0016 + 0.0002i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -0.0830 + 0.9965i \\ -0.0830 + 0.9965i \\ 0.0022 + 0.0005i \\ 0.0001 - 0.0017i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0022 - 0.0017i \\ 0.0022 - 0.0017i \\ 0.0022 + 0.0005i \\ 0.0001 - 0.0017i \end{bmatrix}$$

Mengolah sinyal ke bentuk data informasi:

Data analog yang diterima

Matriks Z x Matriks Σ

$$\begin{bmatrix} 0.0022 - 0.0017i \\ 0.0022 - 0.0017i \\ 0.0022 + 0.0005i \\ 0.0001 - 0.0017i \end{bmatrix} * 0.2334 = \begin{bmatrix} 0.0011 - 0.0011i \\ 0.0011 - 0.0011i \\ 0.0011 + 0.0011i \\ 0.0011 - 0.0011i \end{bmatrix}$$

Data digital:

1 0
1 0
1 1
1 0

Bit Error = 1

5. Perbandingan data yang dikirimkan dengan data yang diterima:

Tabel 4.1 Perbandingan data dikirim dan data diterima pada set 1x1

	Pengirim	Penerima
Data analog	$10^{-3} * \begin{matrix} 0.9988 - 0.9988i \\ 0.9988 - 0.9988i \\ 0.9988 + 0.9988i \\ -0.9988 - 0.9988i \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0.0011 - 0.0011i \\ 0.0011 - 0.0011i \\ 0.0011 + 0.0011i \\ 0.0011 - 0.0011i \end{matrix}$
Data digital	$\begin{matrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{matrix}$
Diagram Konstelasi		
Bit error	1	
Bit Error Rate	0.125	

Gambar 4.1 Diagram konstelasi data kirim dan data terima set antenna 1x1

b. Hasil running simulasi pada set antenna 4x6

1. Kanal	$-0.4838 + 0.5224i$	$-0.3769 + 0.1226i$	$-0.6063 + 0.5399i$	$-0.1379 - 0.0243i$
H:	$0.8316 + 1.6677i$	$-0.2728 + 1.1097i$	$0.0787 - 0.8865i$	$-0.4374 - 0.4545i$
	$0.0951 - 0.6355i$	$-0.0812 + 0.0790i$	$0.4361 - 0.5210i$	$-0.7765 - 0.6310i$
	$-0.2667 + 0.7302i$	$0.7493 - 1.8539i$	$1.0061 + 0.5382i$	$-0.2835 - 0.8512i$
	$0.0702 - 0.2032i$	$0.0958 - 0.0708i$	$-0.1410 - 0.4498i$	$1.1689 - 0.4691i$
	$0.9962 + 0.2228i$	$0.0973 + 0.7331i$	$-1.3159 - 0.1580i$	$0.2037 - 0.7555i$



Dekomposisi kanal H:

$$U: \begin{matrix} -0.0053 + 0.0262i & -0.1627 + 0.1271i & 0.4488 - 0.1884i & -0.3248 - 0.2698i & 0.3022 + 0.5250i & -0.3123 + 0.2774i \\ 0.3943 + 0.4652i & 0.2297 + 0.4259i & 0.0394 - 0.3294i & 0.3161 + 0.0910i & -0.0077 + 0.0635i & -0.2560 - 0.3257i \\ -0.0067 + 0.0454i & 0.3249 - 0.1646i & 0.1949 + 0.2832i & 0.4267 + 0.4796i & 0.1833 + 0.4273i & 0.1772 + 0.2957i \\ -0.6103 - 0.0249i & 0.4818 + 0.3901i & -0.1612 - 0.0077i & 0.1366 - 0.4104i & 0.0463 + 0.1063i & 0.1267 + 0.0017i \\ 0.0464 - 0.0172i & -0.2114 + 0.2062i & -0.3379 + 0.5388i & -0.0167 + 0.0197i & 0.6141 + 0.557i & -0.1936 - 0.2958i \\ 0.4948 - 0.0701i & 0.1145 + 0.3256i & 0.1606 + 0.2801i & -0.2473 - 0.229i & -0.0936 + 0.1020i & 0.6268 - 0.0332i \end{matrix}$$

$$\Sigma: \begin{matrix} 3.3050 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.4078 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.8169 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.3093 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$$V: \begin{matrix} 0.5202 + 0.0000i & 0.6097 + 0.0000i & -0.4772 + 0.0000i & -0.3605 + 0.0000i \\ 0.0028 - 0.6338i & 0.1247 + 0.3018i & -0.2852 - 0.1891i & 0.5923 - 0.1538i \\ -0.5013 + 0.2683i & 0.1930 - 0.232i & -0.4172 - 0.2125i & 0.1553 + 0.6290i \\ 0.0009 - 0.0662i & -0.6056 + 0.3421i & -0.5665 + 0.3394i & -0.2732 + 0.0338i \end{matrix}$$

2. Data analog transmitter: $10^{-3} * \begin{matrix} 0.9988 - 0.9988i \\ 0.9988 - 0.9988i \\ 0.9988 - 0.9988i \\ 0.9988 - 0.9988i \end{matrix}$

Data digital transmitter: $\begin{matrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{matrix}$

3. Noise: $\begin{matrix} -0.0005 + 0.0001i \\ -0.0012 - 0.0002i \\ 0.0002 - 0.0001i \\ 0.0004 + 0.0002i \\ -0.0004 - 0.003i \\ 0.0005 + 0.0003i \end{matrix}$

4. Proses *Singular Value Decomposition*

Pada sisi transmitter (S):

Data Analog x matriks V $\begin{matrix} 0.0003 - 0.0003i \\ -0.0002 - 0.0011i \\ 0.0001 + 0.0012i \\ -0.0008 + 0.0021i \end{matrix}$



Pada sisi kanal (Y):

$$(H \times S) + \text{noise}$$

$$-0.0009 - 0.0004i$$

$$0.0033 - 0.0005i$$

$$0.0028 - 0.0009i$$

$$-0.0003 + 0.0021i$$

$$0.0000 + 0.0021i$$

$$0.0031 - 0.0008i$$

Pada sisi penerima (Z):

Matriks Y x Matriks U

$$0.0027 - 0.0028i$$

$$0.0027 - 0.0019i$$

$$0.0017 - 0.0022i$$

$$0.0009 - 0.0013i$$

$$-0.0005 - 0.0001i$$

$$0.0010 - 0.0001i$$

Mengolah sinyal ke bentuk data informasi:

Data analog yang diterima:

Matriks Z x Matriks Σ

$$0.0033 - 0.0033i$$

$$0.0024 - 0.0024i$$

$$0.0018 - 0.0018i$$

$$0.0013 - 0.0013i$$

$$0.0000 - 0.0000i$$

$$0.0000 - 0.0000i$$

Data digital:

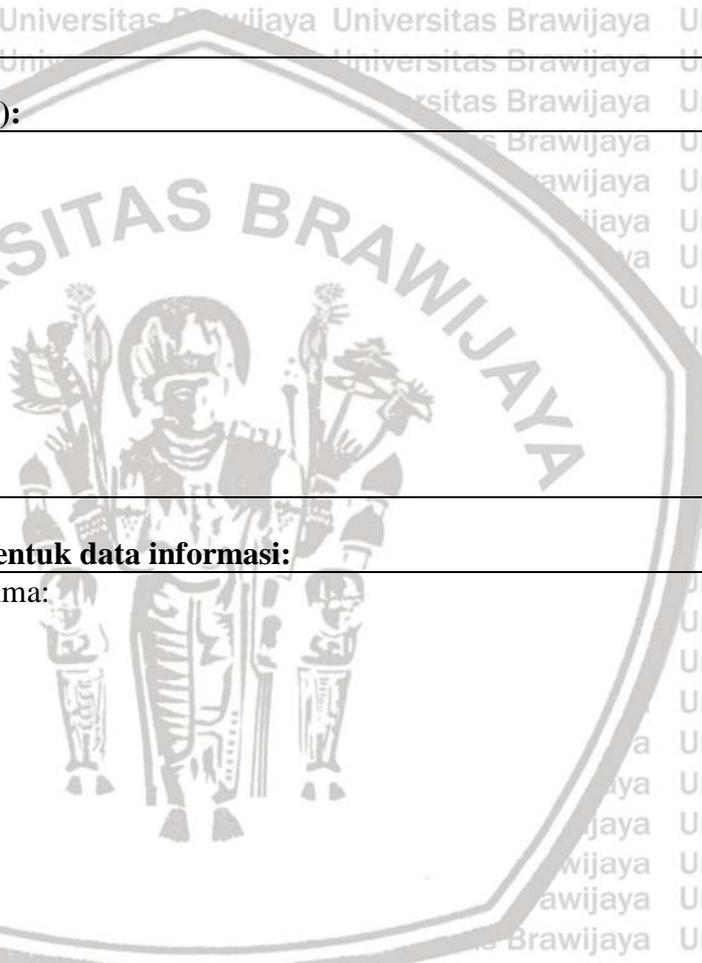
$$1 \quad 0$$

$$1 \quad 0$$

$$1 \quad 0$$

$$1 \quad 0$$

$$\text{Bit Error} = 0$$



5. Perbandingan data yang dikirimkan dengan data yang diterima:

Tabel 4.2 Perbandingan data dikirim dengan data diterima pada set 4x6

	Pengirim		Penerima	
Data analog	10-3 * 0.9988 – 0.9988i 0.9988 – 0.9988i 0.9988 – 0.9988i 0.9988 – 0.9988i		0.0033 – 0.0033i 0.0024 – 0.0024i 0.0018 – 0.0018i 0.0013 – 0.0013i 0.0000 – 0.0000i 0.0000 – 0.0000i	
Data digital	1	0	1	0
	1	0	1	0
	1	0	1	0
	1	0	1	0
Diagram Konstelasi				
Bit error	0			
Bit Error Rate	0			

Gambar 4.2 Diagram konstelasi data kirim dan data terima set antenna 4x6

4.3 Hasil simulasi

BER (*Bit Error Rate*) merupakan sebuah nilai yang diukur dari sisi penerima, dimana nilai tersebut merupakan perbandingan antara banyaknya bit yang salah dengan bit yang ditransmisikan. Pada sebuah pentransmision data, nilai BER yang dijadikan batas bawah atau spesifikasi minimum dalam sebuah pentransmision data adalah 10^{-3} (Freeman, 2019). Hal ini menunjukkan bahwa pada sebuah pentransmision yang ideal, hanya ada satu bit yang salah dari seribu bit yang diterima. Semakin kecil nilai BER, maka semakin bagus kualitas pentransmision data tersebut.

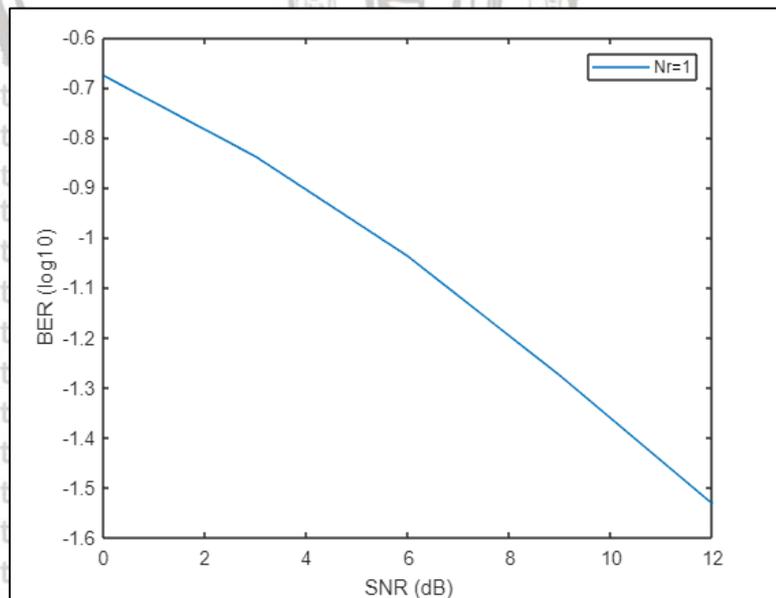


Gambar (4.3) dan Tabel (4.3) menunjukkan nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 1x1, Gambar (4.4) dan Tabel (4.4) untuk set antena pengirim dan penerima 4x4, Gambar (4.5) dan Tabel (4.5) untuk set antena pengirim dan penerima 4x6, Gambar (4.6) dan Tabel (4.6) untuk set antena pengirim dan penerima 4x8, Gambar (4.7) dan Tabel (4.7) untuk set antena pengirim dan penerima 4x10, serta Tabel (4.8) dan Gambar (4.8) merupakan grafik perbandingan nilai BER untuk set antena pengirim dan penerima 1x1, 4x4, 4x6, 4x8, dan 4x10.

4.3.1 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 1x1

Tabel 4.3 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 1x1

SNR (dB)	Rata-rata <i>Bit Error Rate</i>
0	0.21191
3	0.14583
6	0.09177
9	0.052355
12	0.028985



Gambar 4.3 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 1x1

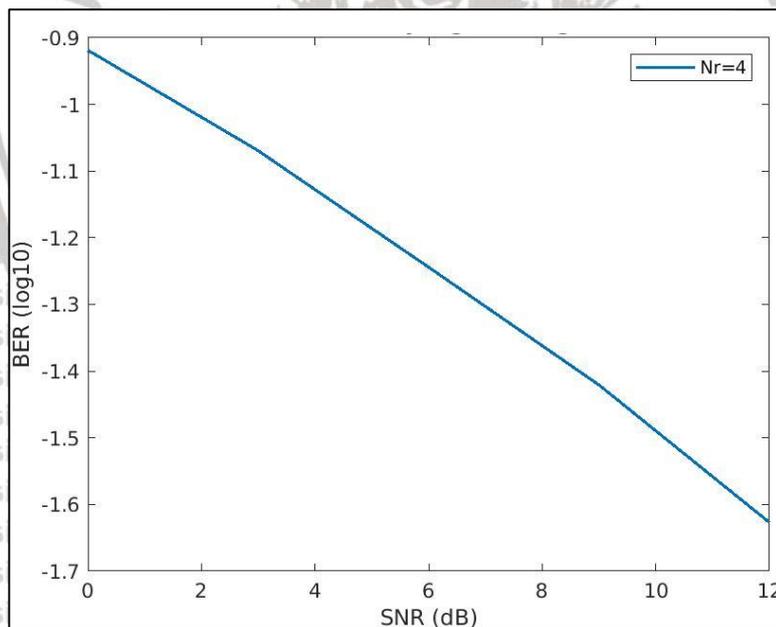
Tabel 4.3 dan Gambar 4.3 menunjukkan pengaruh besarnya nilai SNR terhadap nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 1x1. Pada nilai SNR 0 dB, nilai

rata-rata BER bernilai 0.21191. Kemudian nilai BER bertambah seiring dengan bertambahnya nilai SNR, sehingga pada nilai SNR 12 dB, nilai rata-rata BER menjadi 0.028985.

4.3.2 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x4

Tabel 4.4 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x4

SNR (dB)	Rata-rata <i>Bit Error Rate</i>
0	0.12057
3	0.085212
6	0.056995
9	0.037948
12	0.02361



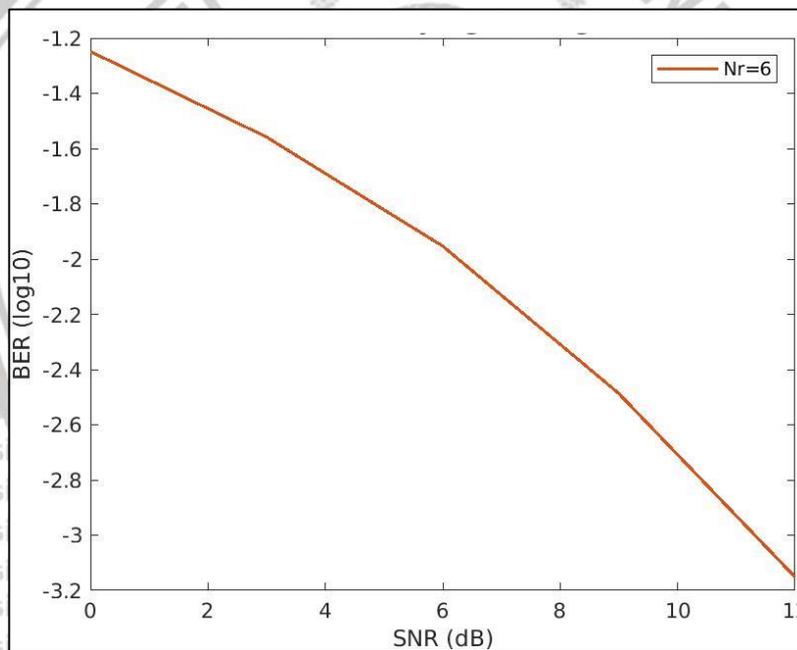
Gambar 4.4 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x4

Tabel 4.4 dan Gambar 4.4 menunjukkan pengaruh besarnya nilai SNR terhadap nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x4. Pada nilai SNR 0 dB, nilai rata-rata BER bernilai 0.12057. Kemudian nilai BER bertambah seiring dengan bertambahnya nilai SNR, sehingga pada nilai SNR 12 dB, nilai rata-rata BER menjadi 0.02361.

4.3.3 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x6

Tabel 4.5 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x6

SNR (dB)	Rata-rata <i>Bit Error Rate</i>
0	0.055475
3	0.028047
6	0.010725
9	0.0033175
12	0.0007875



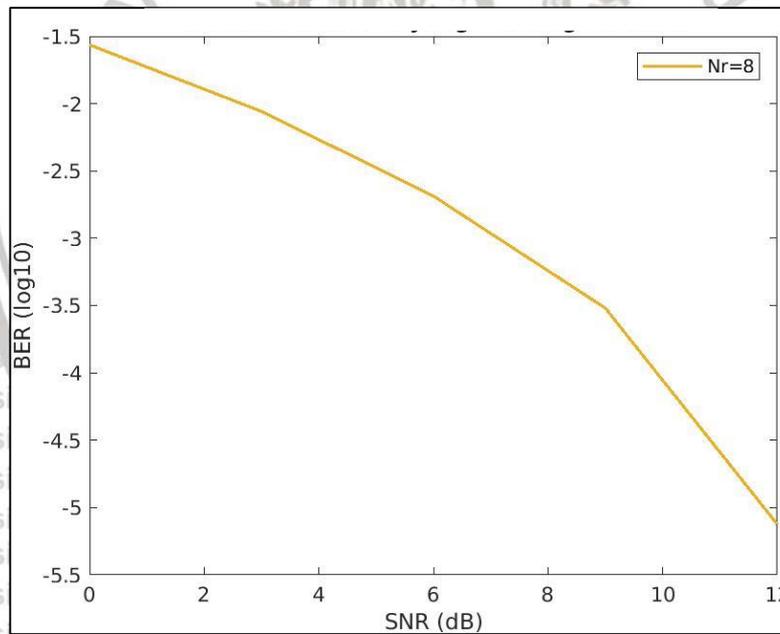
Gambar 4.5 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x6

Tabel 4.5 dan Gambar 4.5 menunjukkan pengaruh besarnya nilai SNR terhadap nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x6. Pada nilai SNR 0 dB, nilai rata-rata BER bernilai 0.055475. Kemudian nilai BER bertambah seiring dengan bertambahnya nilai SNR, sehingga pada nilai SNR 12 dB, nilai rata-rata BER menjadi 0.0007875.

4.3.4 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x8

Tabel 4.6 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x8

SNR (dB)	Rata-rata <i>Bit Error Rate</i>
0	0.027285
3	0.0087475
6	0.0020575
9	0.0003025
12	0.0000075



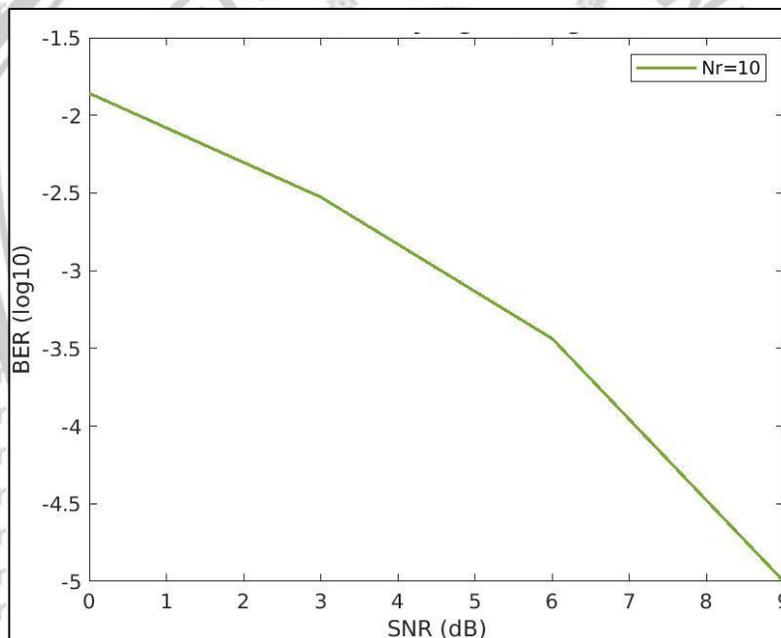
Gambar 4.6 Nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x8

Tabel 4.6 dan Gambar 4.6 menunjukkan pengaruh besarnya nilai SNR terhadap nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x8. Pada nilai SNR 0 dB, nilai rata-rata BER bernilai 0.027285. Kemudian nilai BER bertambah seiring dengan bertambahnya nilai SNR, sehingga pada nilai SNR 12 dB, nilai rata-rata BER menjadi 0.0000075.

4.3.5 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x10

Tabel 4.7 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x10

SNR (dB)	Rata-rata <i>Bit Error Rate</i>
0	0.013872
3	0.0029775
6	0.000365
9	0.00001
12	0.0000001



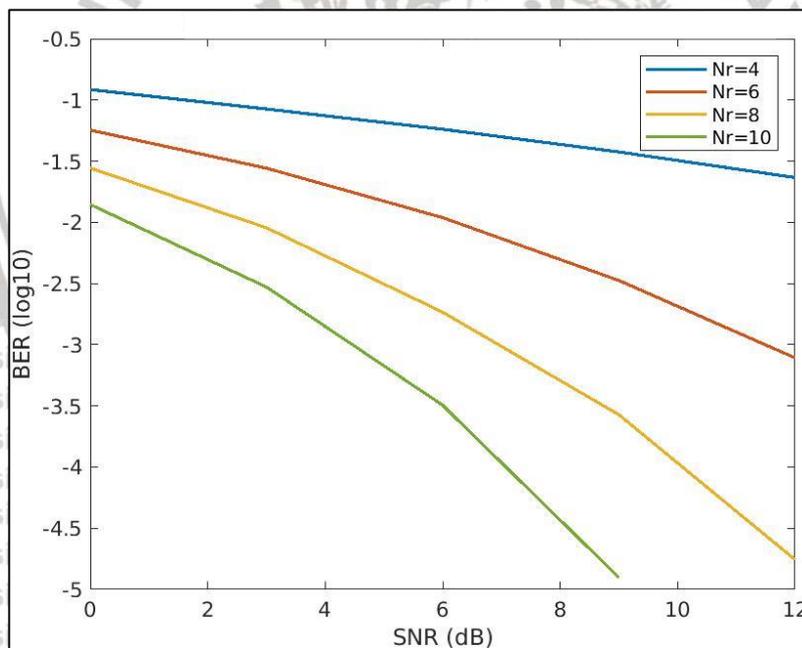
Gambar 4.7 Nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x10

Tabel 4.7 dan Gambar 4.7 menunjukkan pengaruh besarnya nilai SNR terhadap nilai BER pada set antena pengirim dan penerima 4x10. Pada nilai SNR 0 dB, nilai rata-rata BER saat 50.000 kali pentransmisian bernilai 0.013872. Kemudian nilai BER bertambah seiring dengan bertambahnya nilai SNR, sehingga pada nilai SNR 12 dB, nilai rata-rata BER menjadi 0.0000001.

4.3.6 Perbandingan nilai BER pada set antenna pengirim dan penerima 4x4, 4x6, 4x8, dan 4x10

Tabel 4.8 Perbandingan nilai BER pada set antenna 1x1, 4x4, 4x6, 4x8, dan 4x10

SNR (dB)	Rata-rata nilai BER				
	1x1	4x4	4x6	4x8	4x10
0	0,21191	0,12149	0,05665	0,02776	0,01397
3	0,14583	0,084303	0,02769	0,0090225	0,002955
6	0,09177	0,057605	0,010918	0,0018425	0,00032
9	0,052355	0,03756	0,003345	0,0002675	0,0000125
12	0,028985	0,023217	0,00078	0,0000175	0,0000001



Gambar 4.8 Perbandingan nilai BER pada set antenna 4x4, 4x6, 4x8, dan 4x10

Tabel 4.8 dan Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan nilai BER pada antenna 1x1, 4x4, 4x6, 4x8, dan 4x10 pada nilai SNR 0, 3, 6, 9, dan 12 dB. Nilai BER terbesar didapatkan pada set antenna 1x1 dengan SNR 0 dB sebesar 0,21191 sedangkan nilai BER terkecil didapatkan pada set antenna 4x10 dengan SNR 12 dB sebesar 0,0000001.

4.4 Pembahasan

4.4.1 Pengaruh besaran nilai SNR terhadap nilai BER

Pada Tabel 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, dan 4.5, dapat diamati pengaruh nilai SNR terhadap nilai BER. Pada set antena yang sama, nilai BER menjadi lebih kecil seiring dengan bertambahnya nilai SNR.

Hal ini dikarenakan pada nilai SNR yang tinggi (merujuk pada persamaan (2.17) mengenai perbandingan daya sinyal terhadap daya *noise*) dapat dikatakan daya sinyal jauh lebih besar dibanding daya *noise*. Karna *noise* relatif lebih kecil dibanding daya sinyal, maka *error* atau kesalahan dalam pengiriman terjadi lebih sedikit, sehingga membuat nilai BER menjadi lebih kecil.

Hasil simulasi tersebut juga mendukung persamaan (2.20) mengenai hubungan antara BER dan SNR, yaitu:

$$BER = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{SNR}{1+SNR}} \right)$$

Dalam persamaan tersebut ditunjukkan bahwa semakin besar nilai SNR, maka nilai BER nya akan semakin kecil. Hal ini dapat dibuktikan dengan hasil simulasi pengiriman data yang telah dilakukan.

4.4.2 Pengaruh jumlah antena terhadap nilai BER

Hasil simulasi pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.5 menunjukkan pengaruh jumlah antena terhadap nilai BER. Dalam satu nilai SNR yang sama, semakin banyak jumlah antena penerima, maka nilai BER nya akan semakin kecil. Hal ini dapat dilihat dari set antena 4x10 yang memiliki jumlah antena yang paling banyak dan nilai BER yang paling kecil.

Merujuk pada persamaan (2.21) mengenai hubungan antara jumlah antena terhadap nilai BER, yaitu:

$$BER = \frac{1}{(N_t N_r)!} \left(\frac{M SNR}{SNR} \right)^{N_t N_r}$$

Dari persamaan tersebut, dapat kita lihat bahwa BER memiliki hubungan dengan jumlah antena pengirim dan jumlah antena penerima atau $N_t N_r$. Dapat disimpulkan bahwa semakin besar jumlah antena yang digunakan, maka nilai BER nya akan semakin kecil. Hal ini sesuai dengan hasil simulasi yang telah dilaksanakan.

Pada sebuah sistem MIMO dengan kanal antara antena pengirim dan penerima terdistribusi independen, maka *diversity order* dari sistem tersebut adalah $N_t N_r$ (Hong, Huang, Kuo, 2010). *Diversity order* merupakan pilihan jalur yang dapat digunakan

dalam menghindari kesalahan pengiriman data yang disebabkan oleh gangguan pada jalur. Pada set antenna yang lebih besar, maka matriks kanal $N_t N_r$ nya menjadi semakin besar (merujuk pada subbab (3.6) mengenai pemodelan matriks kanal). Sehingga, *diversity order* dari sistem MIMO tersebut semakin besar. Hal ini membuat *noise* pada jalur dapat dihindari sehingga nilai *error* menjadi lebih kecil.

Untuk melihat set antenna mana yang mengalami penurunan paling curam dan paling landai seiring dengan perubahan nilai SNR, dilakukan penghitungan perubahan nilai BER pada masing-masing set antenna sebagai berikut:

Tabel 4.9 Besaran penurunan nilai BER pada set antenna 1x1

SNR (dB)	Bit Error Rate	Perubahan (%)
0	0,21191	
3	0,14583	-31%
6	0,09177	-37%
9	0,052355	-42%
12	0,028985	-44%
Rata-rata perubahan nilai BER		-38%

Tabel 4.10 Besaran penurunan nilai BER pada set antenna 4x4

SNR (dB)	Bit Error Rate	Perubahan (%)
0	0,12149	
3	0,084303	-31%
6	0,057605	-32%
9	0,03756	-35%
12	0,023217	-38%
Rata-rata perubahan nilai BER		-34%



Tabel 4.11 Besaran penurunan nilai BER pada set antenna 4x6

SNR (dB)	Bit Error Rate	Perubahan (%)
0	0,05665	
3	0,02769	-51%
6	0,010918	-61%
9	0,003345	-69%
12	0,00078	-77%
Rata-rata perubahan nilai BER		-64%

Tabel 4.12 Besaran penurunan nilai BER pada set antenna 4x8

SNR (dB)	Bit Error Rate	Perubahan (%)
0	0,02776	
3	0,0090225	-67%
6	0,0018425	-80%
9	0,0002675	-85%
12	0,0000175	-93%
Rata-rata perubahan nilai BER		-82%

Tabel 4.13 Besaran penurunan nilai BER pada set antenna 4x10

SNR (dB)	Bit Error Rate	Perubahan (%)
0	0,01397	
3	0,002955	-79%
6	0,00032	-89%
9	0,0000125	-96%
12	0,0000001	-99%
Rata-rata perubahan nilai BER		-91%

Dari tabel diatas, dapat dilihat bahwa rata-rata penurunan yang paling kecil (paling landai) terjadi pada set antenna 4x4 dengan penurunan sebesar 34%, sedangkan

rata-rata penurunan yang paling besar (paling curam) terjadi pada set antenna 4x10 dengan penurunan sebesar 91%.

Besar atau kecilnya perubahan nilai BER memiliki keuntungan dan kerugiannya masing-masing. Pada set antenna yang lebih besar, perubahan nilai BER juga semakin besar atau curam. Ketika nilai SNR berubah-ubah, maka nilai BER juga akan berubah secara drastis.

Hal tersebut berbeda dengan set antenna yang lebih kecil. Dengan perubahan nilai BER yang semakin kecil atau landai, maka apabila nilai SNR berubah-ubah, perubahan nilai BER-nya relatif lebih stabil, walaupun nilai BER-nya cenderung lebih kecil dibandingkan dengan pengiriman menggunakan set antenna yang lebih besar.

Akan tetapi, pengiriman data yang baik dapat ditandai dengan nilai BER yang kecil. Maka dari itu, walaupun set antenna yang lebih besar memiliki nilai BER yang cenderung lebih mudah berubah-ubah seiring dengan perubahan SNR, namun keseluruhan BER-nya lebih baik dibanding dengan set antenna yang lebih kecil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan set antenna yang lebih besar menghasilkan kualitas pengiriman yang lebih baik dibandingkan dengan penggunaan set antenna yang lebih kecil.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi pengiriman data pada antenna MIMO yang telah dilakukan menggunakan *software* MATLAB R2020 dengan menggunakan teknik *Singular Value Decomposition* (SVD), dapat disimpulkan bahwa:

1. Penggunaan teknik *Singular Value Decomposition* (SVD) pada bagian *precoding* sebuah sistem antenna MIMO dapat digunakan pada sistem antenna yang tidak persegi atau jumlah antenna pengirim tidak sama dengan jumlah antenna penerima. Hal ini dikarenakan pada teknik SVD, matriks informasi kanal mengalami dekomposisi menjadi 3 matriks yang berbeda (U, Σ, V^*) sehingga ukuran matriks tidak harus persegi.
2. Besaran nilai SNR memberikan pengaruh pada performansi pengiriman data dengan teknik SVD. Semakin besar nilai SNR, maka performansi pengiriman data akan semakin baik. Hal ini dapat dilihat pada hasil simulasi di satu set antenna yang sama, dimana nilai BER paling kecil didapatkan dari besaran nilai SNR yang paling besar.
3. Jumlah antenna memberikan pengaruh pada performansi pengiriman data dengan teknik SVD. Semakin banyak antenna penerima, maka performansi pengiriman data akan semakin baik. Hal ini dapat dilihat pada hasil simulasi, dimana nilai BER paling kecil didapatkan dari set antenna dengan jumlah penerima paling banyak.

5.2 Saran

Saran yang dapat diambil dari skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya, dilakukan penelitian mengenai *beamforming* pada sistem antenna MIMO.
2. Pada penelitian selanjutnya, dilakukan penelitian mengenai *adaptive precoding* pada sistem antenna MIMO.
3. Pada penelitian selanjutnya, dilakukan penelitian mengenai pengaruh penggunaan teknik modulasi yang lain pada sistem antenna MIMO dengan teknik SVD.





DAFTAR PUSTAKA

- David W. Browne, Michael W. Browne, Michael P. Fitz. 2006. *Singular Value Decomposition of Correlated MIMO Channels*. Tersedia <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/2440357>. Diakses pada tanggal 04 Oktober 2019
- Wael Abu Shehab & Zouhair Al-qudah. 2017. *Singular Value Decomposition: Principles and Applications in Multiple Input Multiple Output Communication System*, tersedia pada *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)* Vol.9, No.1.
- Biglieri, Ezio. 2007. *MIM Wireless Communications Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technology*. New York: Cambridge University Press.
- Freeman, Roger L. 1999. *Fundamentals of Telecommunication*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Franco De Flaviis, Lluís Jofre, Jordi Romeu & Alfred Grau. 2008. *Multiantena Systems for MIMO Communications*. Arizona: Morgan & Claypool Publishers.
- Tolga M. Duman & Ali Ghrayeb. 2007. *Coding for MIMO Communication Systems*. USA: John Wiley & Sons, Ltd.
- Dtmobile. 2019. *TD-LTE Principles and Key Technologies*. Shanghai: Datang Mobile Communication Equipment Co., Ltd.
- Y.-W. Peter Hong, Wan-Jen Huang, C.-C. Jay Kuo. 2010. *Cooperative Communications and Networking*. London: Springer Science+Business Media, LLC.