



**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**PENGUKURAN DAN ANALISIS STATISTIK  
KAPASITAS KANAL MIMO 2x2 PADA LINK  
SURABAYA-MERAUKE**

Tony Joshua  
NRP 07111440000122

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.  
Dr. Ir. Achmad Mauludiyanto, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2018



**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**PENGUKURAN DAN ANALISIS STATISTIK  
KAPASITAS KANAL MIMO 2x2 PADA LINK  
SURABAYA-MERAUKE**

Tony Joshua  
NRP 07111440000122

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.  
Dr. Ir. Achmad Mauludiyanto, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2018



**FINAL PROJECT - EE 184801**

**MEASUREMENT AND STATISTICAL ANALYSIS OF  
2x2 MIMO CHANNEL CAPACITY ON SURABAYA-  
MERAUKE LINK**

Tony Joshua

NRP 07111440000122

Supervisors

Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

Dr. Ir. Achmad Mauludiyanto, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ELECTRICAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2018



## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**PENGUKURAN DAN ANALISIS STATISTIK KAPASITAS KANAL MIMO 2x2 PADA LINK SURABAYA-MERAUKE**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2018

Tony Joshua  
07111440000122

*( Halaman ini sengaja dikosongkan )*

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGUKURAN DAN ANALISIS STATISTIK KAPASITAS KANAL MIMO 2x2 PADA LINK SURABAYA-MERAUKE

#### TUGAS AKHIR


Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada

Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

  
Prof. Ir. Gamantyo H., M.Eng. Ph.D  
NIP. 19701111 199303 1002

  
Dr. Ir. Achmad Mauludiyanto, MT.  
NIP. 19610903 198903 1001



*( Halaman ini sengaja dikosongkan )*



# **PENGUKURAN DAN ANALISIS STATISTIK KAPASITAS KANAL MIMO 2x2 PADA LINK SURABAYA-MERAUKE**

Nama : Tony Joshua  
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.  
Dosen Pembimbing 2 : Dr. Ir. Achmad Mauludiyanto, MT.

## **ABSTRAK**

Sistem komunikasi *High Frequency* (HF) adalah sistem komunikasi yang memanfaatkan gelombang *sky wave* sehingga gelombang dipancarkan ke atmosfer kemudian dipantulkan oleh ionosfer. Sistem komunikasi HF menggunakan spektrum frekuensi 3 – 30 MHz dengan panjang gelombang 1 – 10 m dan bisa dipakai untuk berkomunikasi dengan jarak yang jauh yaitu 80 – 600 km. Sistem komunikasi HF memiliki kelebihan, yaitu sistem ini menggunakan peralatan yang relatif murah dan mudah untuk diimplementasikan. Sistem komunikasi HF dipengaruhi oleh kondisi ionosfer seperti ketinggian lapisan ionosfer, letak geografis, aktivitas matahari, cuaca bumi, dan sebagainya. Untuk meningkatkan ketersediaan kanal yang terbatas pada sistem komunikasi HF *Single Input Single Output* (SISO) maka akan diimplementasikan antenna *Multi Input Multi Output* (MIMO) 2x2 dengan memasang 2 buah antenna yang dipasang orthogonal pada masing-masing pemancar dan penerima. Pengukuran dilakukan pada link Surabaya–Merauke, dimana pengukuran ini akan dilakukan dari Surabaya sebagai transmitter lalu Merauke sebagai receiver. Dari hasil pengukuran akan dicari nilai respon kanal yang kemudian akan diolah untuk mencari kapasitas kanal. Dari hasil pengolahan data akan dicari statistik kapasitas kanal HF MIMO 2x2 dan perbandingan dengan kanal SISO antara Surabaya-Merauke.

Kata Kunci : Kapasitas Kanal, Sistem Komunikasi HF, MIMO 2x2

*( Halaman ini sengaja dikosongkan )*

# ***MEASUREMENT AND STATISTICAL ANALYSIS OF 2x2 MIMO CHANNEL CAPACITY ON SURABAYA-MERAUKE LINK***

Nama : Tony Joshua

Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

Dosen Pembimbing 2 : Dr. Ir. Achmad Mauludiyanto, MT.

## **ABSTRACT**

High Frequency (HF) communication system is a communication system that utilizes sky waves so the waves that emitted into the atmosphere are then reflected by the ionosphere. The HF communication system uses a frequency spectrum of 3 – 30 MHz with a wavelength of 1 – 10 m and can be used to communicate over long distances of 80 – 600 km. The HF communication system has advantages, namely this system uses equipment that is relatively cheap and easy to implement. The HF communication system is affected by ionospheric conditions such as the height of the ionosphere, geographical location, solar activity, earth's weather, and so on. To increase the availability of a limited channel for the Single Input Single Output (SISO) HF communication system the 2x2 Multi Input Multi Output (MIMO) antenna will be implemented by installing 2 pieces of orthogonal mounted antennas on each transmitter and receiver. Measurements were done on Surabaya-Merauke link, where this measurement will be carried out from Surabaya as a transmitter and then Merauke as a receiver. From the measurement results, the channel response value will be calculated which will then be processed to find the channel capacity. From the results of data processing, we will calculate 2x2 HF MIMO channel capacity statistics and compare with the SISO channel between Surabaya-Merauke.

Keyword : Canal Capacity, HF Communication System, MIMO 2x2

*( Halaman ini sengaja dikosongkan )*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan bimbingan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul:

### **Pengukuran dan Analisis Statistik Kapasitas Kanal MIMO 2x2 Pada Link Surabaya-Merauke**

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi pada bidang studi Telekomunikasi Multimedia di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung penyusunan buku tugas akhir ini terlebih kepada:

1. Tuhan Yesus Kristus atas rahmat dan berkat-Nya yang tak pernah habis sehingga penulis bisa menyelesaikan buku tugas akhir.
2. Keluarga penulis, Frieda Agustien, Lucas P. Pongoh, dan Florenciano J. Pongoh yang senantiasa memberi semangat, dukungan dan menjadi motivasi untuk penulis dalam menyelesaikan masa pendidikan di Departemen Teknik Elektro ITS.
3. Bapak dan Ibu dosen Teknik Elektro ITS terutama Bapak Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D. dan Bapak Dr. Ir. Achmad Mauludiyanto, MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan waktu, ilmu, dan nasihat kepada penulis selama kuliah dan proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Ibu Muriani, ST., MT dan suami serta bapak Roberto Corputty, ST., MT dari Universitas Musamus yang sudah mendukung kelancaran pengukuran di Merauke.
5. Kalpataru khususnya K-31 yang telah menjadi keluarga kedua dan terus memberi dukungan kepada penulis selama kuliah.
6. Pak Teguh Imam Suharto dan Kurniawan Dwi Arianto sebagai tim pengukuran di Merauke sehingga buku ini bisa selesai.

7. Tim receiver Surabaya Mas agung, Mas Venzo, Mas Irawan, Mba Vina, Sarah, Mas Afrizal, dan Mbak Umai atas bantuannya sehingga pengukuran berjalan lancar
8. Teman-teman bidang studi Telekomunikasi Multimedia yang sudah membantu penulis dalam proses perkuliahan.
9. Pasukan kantin elektro yang selalu menemani penulis di malam hari di kantin elektro.
10. Teman-teman e-54 yang selalu menemani penulis selama masa perkuliahan.

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini penulis menyadari masih banyak kekurangan. Oleh sebab itu penulis menerima saran dan kritik untuk perbaikan tugas akhir ini.

Semoga buku tugas akhir ini bisa memberikan informasi dan manfaat bagi para pembaca.

Surabaya, Desember 2018

Penulis

## Daftar Isi

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
Daftar Isi .....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan .....	3
1.5 Metodologi Penelitian .....	3
1.6 Sistematika .....	5
1.7 Relevansi .....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1 Sistem Komunikasi HF .....	7
2.2 Lapisan Ionosfer .....	8
2.2.1 Lapisan D .....	10
2.2.2 Lapisan E .....	10
2.2.3 Lapisan F .....	10
2.2.4 Diurnal Variation.....	11
2.2.5 Seasonal Variation.....	11
2.2.6 Latitudinal Variation .....	11
2.2.7 Solar Activity .....	11
2.3 Mode Propagasi Gelombang Skywave.....	12

2.4 Teknologi Multiple Input Multiple Output (MIMO).....	13
2.5 Universal Software Radio Peripheral (USRP).....	15
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>18</b>
3.1 Penentuan Parameter Awal .....	19
3.2 Metodologi Penelitian .....	21
3.3 Perangkat Sistem Komunikasi.....	23
3.4 Skema Pengukuran .....	28
3.5 Mencari Nilai Respon Kanal .....	30
3.6 Perhitungan Kapasitas Kanal SISO dan MIMO .....	38
<b>BAB 4 ANALISA HASIL PENGUKURAN .....</b>	<b>39</b>
4.1 Mendapatkan Nilai Respon Kanal.....	39
4.2 Perhitungan Kapasitas HF MIMO Link Surabaya-Merauke	45
4.3 Perbandingan Nilai Kapasitas Konfigurasi MIMO dengan Konfigurasi SISO .....	47
4.4 Sintesis .....	48
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>50</b>
5.1 Kesimpulan .....	51
5.2 Saran.....	51
Daftar Pustaka .....	52
LAMPIRAN .....	55
BIOGRAFI .....	84



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Negara Indonesia merupakan salah satu negara maritim dan kepulauan terbesar di dunia yang terbentang dari Sabang sampai Merauke. Dengan kondisi seperti ini, banyak lokasi-lokasi di Indonesia yang sulit untuk berkomunikasi maupun mengakses informasi. Hal tersebut membuat daerah-daerah menjadi terisolasi dan sulit untuk menjalin hubungan dengan daerah lainnya sehingga dibutuhkan sistem komunikasi yang mampu menunjang kebutuhan di daerah tersebut. Salah satu cara yang mampu mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan sistem komunikasi *high frequency* (HF).

Sistem komunikasi HF adalah sistem komunikasi yang mampu menjangkau jarak yang jauh yang bekerja pada frekuensi 3-30 MHz dan mempunyai panjang gelombang 10 hingga 100 m. Sistem komunikasi HF menggunakan peralatan yang relatif murah dan mudah diimplementasikan pada daerah yang terpencil. Cara kerja sistem komunikasi HF adalah menggunakan gelombang *sky wave* sehingga gelombang dipancarkan ke atmosfer kemudian dipantulkan sebanyak satu kali atau lebih oleh lapisan ionosfer yang terletak pada ketinggian 80-600 km di atas permukaan bumi sehingga bisa mencakup jarak yang jauh. Gelombang radio yang dipancarkan dipengaruhi oleh kondisi lapisan ionosfer, letak geografis, aktivitas matahari, cuaca bumi, dan sebagainya. Negara Indonesia terletak di daerah ekuatorial sehingga terdapat fenomena *Equatorial Spread F* (ESF) yaitu penyebaran lapisan F yang berpotensi menimbulkan *delay spread* dan *time variant* sehingga ketersediaan kanal HF menjadi rendah. Adanya karakteristik lapisan ionosfer yang tidak ideal juga dapat mengganggu sistem komunikasi HF seperti distorsi, efek propagasi yang dinamis, interferensi yang tinggi, dan fading yang menyebabkan adanya redaman.

Untuk meningkatkan kapasitas kanal sehingga bisa mengirimkan informasi yang lebih banyak maka akan menggunakan sistem komunikasi HF *Multi Input Multi Output* (MIMO) 2x2. Sistem komunikasi HF MIMO menggunakan dua antena penerima dan dua

antena pemancar sehingga diharapkan bisa meningkatkan kapasitas kanal dan menaikkan laju data. Implementasi hasil dari rancangan dan simulasi sistem komunikasi MIMO dapat menggunakan purwarupa *Software Define Radio* (SDR). Salah satu SDR yang dapat dipakai untuk sistem komunikasi HF MIMO adalah *Universal Software Radio Peripheral* (USRP). Untuk membuktikan adanya peningkatan kapasitas kanal HF dengan sistem MIMO, maka diperlukan perhitungan kapasitas dengan teori Shannon-Hartley terhadap kanal MIMO dan selanjutnya akan dilakukan analisis statistik terhadap kapasitas kanal sistem komunikasi HF MIMO.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan pengukuran kapasitas kanal sistem komunikasi HF MIMO dengan menggunakan USRP. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Labview* yang menghubungkan perangkat komputer dengan USRP. Pengukuran dilakukan pada *link* komunikasi Surabaya dengan Merauke yang memiliki jarak  $\pm 3.000$  km. Dari hasil pengukuran tersebut akan dilakukan analisis statistik kapasitas kanal sistem komunikasi HF MIMO  $2 \times 2$  dan perbandingan kapasitas kanal HF MIMO  $2 \times 2$  dengan kanal HF SISO antara Surabaya-Merauke sehingga didapatkan jumlah peningkatan kapasitas kanal pada link Surabaya-Merauke.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas dari tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana cara pengukuran kapasitas kanal HF MIMO  $2 \times 2$ ?
2. Bagaimana analisis statistik kapasitas kanal HF MIMO  $2 \times 2$ ?

## **1.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Kanal yang akan dianalisis adalah kanal HF antara Surabaya-Merauke.
2. Antena yang digunakan adalah 2 buah antena pemancar (*transmitter*) dan 2 antena penerima (*receiver*) atau konfigurasi skema MIMO  $2 \times 2$ .

3. Pengukuran kanal HF dilakukan dengan menggunakan perangkat *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) dan perangkat lunak *LabVIEW*.

#### **1.4 Tujuan**

Berikut tujuan tugas akhir ini diantaranya:

1. Untuk mendapatkan data hasil pengukuran pada sistem komunikasi HF antara Surabaya-Merauke sebagai bahan untuk evaluasi propagasi kanal HF di Indonesia.
2. Mendapatkan hasil analisa statistik kapasitas kanal HF MIMO 2x2.

#### **1.5 Metodologi Penelitian**

Penelitian tugas akhir ini dilakukan melalui beberapa tahap antara lain:

- a. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mencari dan mempelajari beberapa buku, paper, dan jurnal baik skala nasional maupun internasional yang sekiranya dapat menunjang tugas akhir ini. Pada tahap ini akan dipelajari dasar-dasar sistem komunikasi HF, perancangan dan simulasi komunikasi, juga bagaimana mengolah data pengukuran yang telah didapatkan.

- b. Perancangan sistem komunikasi

Pada tahap ini dilakukan skema perancangan simulasi komunikasi HF menggunakan perangkat USRP dan computer dengan software labVIEW. Sebelum dilakukan pengukuran, akan diterapkan simulasi terlebih dahulu menggunakan USRP dan software labVIEW skala lab agar penjadwalan pengukuran sesuai dengan waktu yang telah ditentukan.

- c. Pengukuran dan Implementasi

Setelah melakukan simulasi sistem, maka akan dilakukan pengukuran yang terletak pada dua tempat, yakni Surabaya dan Merauke. Pengukuran yang telah dilakukan akan diuji coba dan data yang didapatkan akan diolah nantinya.

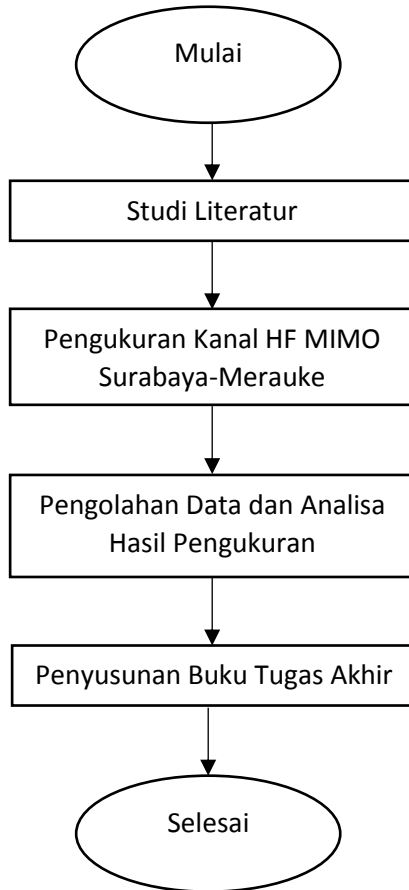
- d. Pengolahan dan Analisis Data

Data yang telah didapatkan akan diolah dengan software Matlab lalu didapatkan hasil yang akan dianalisis statistik dari

kapastisas kanal HF MIMO 2x2. Data kapasitas kanal hasil pengukuran akan dibandingkan dengan kanal HF SISO.

e. Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Semua hasil analisa yang telah dilakukan kemudian akan disusun menjadi sebuah laporan tugas akhir.



Gambar 1.1 Metodologi Penelitian

## **1.6 Sistematika**

Penulisan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

### **BAB I Pendahuluan**

Bab ini berisi penjelasan mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistematika laporan serta relevansi hasil penelitian.

### **BAB II Tinjauan Pustaka**

Bab ini berisi tentang penjelasan teori-teori yang berhubungan dengan tugas akhir seperti sistem komunikasi *high frequency* (HF), mode propagasi gelombang, karakteristik ionosfer, teknologi antena *Multiple Input Multiple Output* (MIMO), dan kapasitas kanal.

### **BAB III Metodologi Penelitian**

Bab ini membahas tentang skema sistem komunikasi HF dan skenario pengukuran.

### **BAB IV Analisis Data**

Bab ini berisi tentang hasil pengukuran dan analisa data hasil pengukuran. Hasil dari pengukuran tersebut berikutnya dianalisa sehingga didapatkan kapasitas kanal dan analisis statistik kapasitas kanal.

### **BAB V Penutup**

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil analisa data penelitian.

## **1.7 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

### **A. Bagi Perusahaan Telekomunikasi**

Sistem ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam implementasi sistem komunikasi HF MIMO untuk meningkatkan kapasitas kanal.

### **B. Bagi masyarakat**

Sebagai komunikasi alternatif untuk daerah-daerah terpencil yang tidak bisa dijangkau oleh alat komunikasi komersil lainnya dan sebagai metode komunikasi yang murah

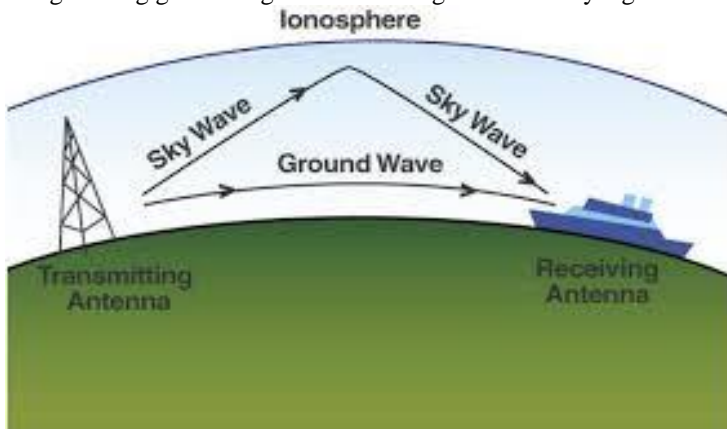
***( Halaman ini sengaja dikosongkan )***

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Dalam sistem komunikasi, pengiriman sinyal informasi dari satu tempat ke tempat yang lain dikelompokkan menjadi dua jenis berdasarkan media transmisinya, yaitu menggunakan kabel (*wire*) dan tanpa kabel (*wireless*). Pada transmisi tanpa kabel, gelombang radio merambat melalui udara dengan spektrum frekuensi 3 KHz-300 GHz dari pemancar hingga ke penerima yang berjarak sampai ratusan kilometer.

Dalam propagasi gelombang radio, gelombang radio merambat melalui tiga jalur rambatan dalam mengirimkan sinyal dari pemancar ke penerima. Tiga jalur tersebut adalah melalui tanah (*ground wave*), melalui pantulan ionosfer (*sky wave*), dan *direct wave* (*Line of Sight*). Masing-masing gelombang merambat dengan frekuensi yang berbeda.



**Gambar 2.1.** Mekanisme Propagasi Gelombang

#### 2.1 Sistem Komunikasi HF

Sistem komunikasi HF adalah sistem komunikasi yang menggunakan frekuensi diantara 3-30 MHz. Komunikasi HF digunakan untuk komunikasi jarak jauh (*long distance*). Hal itu terjadi karena memanfaatkan gelombang *sky wave* yaitu gelombang yang dipancarkan ke atmosfer lalu dipantulkan oleh ionosfer. Karena memanfaatkan ionosfer untuk memantulkan sinyal maka sistem komunikasi ini bisa menempuh jarak transmisi yang jauh tanpa menggunakan *repeater*.

Dengan tidak adanya *repeater* pada sistem komunikasi ini maka peralatan yang digunakan tidak terlalu rumit dan mudah untuk diimplementasikan. Sistem komunikasi HF tergolong sistem komunikasi dengan biaya yang murah dibandingkan dengan sistem komunikasi yang lainnya.

**Tabel 2.1** Pembagian band frekuensi [1]

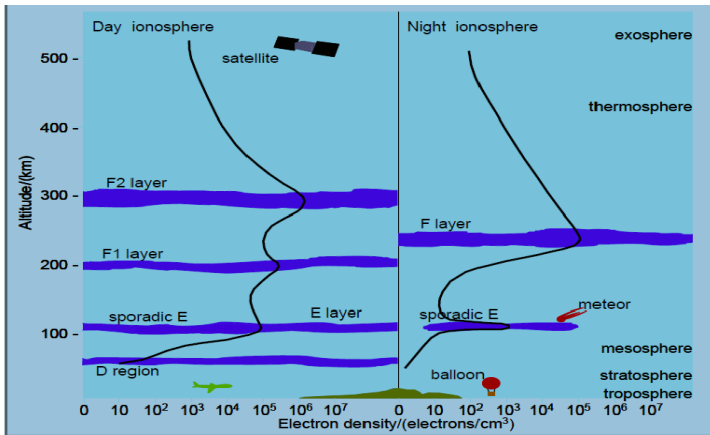
Frequency band	Frequency range
Extremely low frequency (ELF)	< 3 kHz
Very low frequency (VLF)	3 – 30 kHz
Low frequency (LF)	30 – 300 kHz
Medium frequency (MF)	300 kHz – 3 MHz
High frequency (HF)	3 – 30 MHz
Very high frequency (VHF)	30 – 300 MHz
Ultra high frequency (UHF)	300 MHz – 3 GHz
Super high frequency (SHF)	3 – 30 GHz
Extra high frequency (EHF)	30 – 300 GHz

Penggunaan sistem komunikasi HF sudah banyak diimplementasikan oleh pemerintah maupun swasta, masyarakat umum hingga pihak militer, beberapa penyiaran radio juga sudah menggunakan sistem komunikasi ini. Dikarenakan penggunaan alat yang bersifat independen dan murah maka sistem komunikasi HF bisa digunakan sebagai metode komunikasi alternatif saat terjadi bencana alam atau saat infrastruktur telekomunikasi yang umum digunakan sedang mengalami kerusakan sehingga tidak dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama.

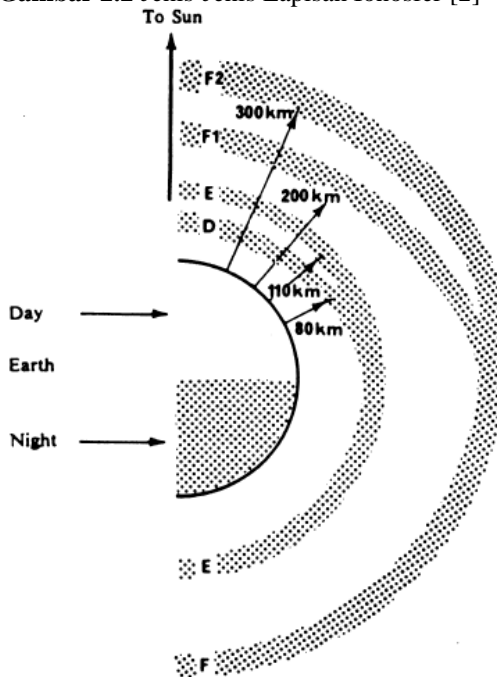
## 2.2 Lapisan Ionosfer

*Ionosfer* merupakan lapisan atmosfer yang terletak pada ketinggian 50-300 km dari permukaan air laut. Ionosfer terbentuk ketika cahaya EUV dari matahari melepaskan elektron dari atom netral di atmosfer bumi. Ionosfer terdiri dari empat lapisan yaitu lapisan D, lapisan E, lapisan F1, lapisan F2.





**Gambar 2.2** Jenis-Jenis Lapisan Ionosfer [2]



**Gambar 2.3** Ilustrasi Kondisi Lapisan Ionosfer di Seluruh Permukaan Bumi [3]

Ionosfer memiliki beberapa lapisan yang masing-masing memiliki karakteristik dan ketinggian yang berbeda. Di bawah ini adalah lapisan-lapisan pada ionosfer:

#### 2.2.1 Lapisan D

Berada di ketinggian 50-90 km diatas permukaan bumi dengan kepadatan elektron 10 per  $cm^3$  [5]. Lapisan D hanya ada pada siang hari dan akan menghilang pada malam hari karena intensitasnya bergantung pada kedudukan matahari. Lapisan D dapat memantulkan gelombang yang memiliki frekuensi sekitar 500 KHz. Propagasi gelombang radio pada frekuensi tinggi (HF) tidak dipantulkan oleh lapisan D tetapi kuat medan HF terganggu atau diperlemah oleh lapisan ini sehingga frekuensi tinggi (HF) lebih kuat diterima pada malam hari.

#### 2.2.2 Lapisan E

Berada di ketinggian 90-110 km diatas permukaan bumi dengan kepadatan elektron  $10^2 - 5 \cdot 10^4$  per  $cm^3$  [5]. Pada lapisan E, sebuah sinyal dapat dibiaskan ataupun diteruskan ke lapisan F (tergantung dari frekuensi gelombang dan ketebalan lapisan E). Kadar ionisasi pada lapisan E lebih padat dibandingkan dengan lapisan D dan dapat memantulkan gelombang radio dengan frekuensi sekitar 20 MHz. Lapisan ini akan lebih tebal pada saat siang hari dan akan menyusut atau menipis bahkan bisa hilang pada saat malam hari sehingga sinyal gelombang radio frekuensi HF dengan kekuatan tertentu dapat melewati lapisan ini dan menuju lapisan di atasnya (lapisan F).

#### 2.2.3 Lapisan F

Lapisan F terbagi menjadi dua, yaitu lapisan F1 dan F2. Pada siang hari terdapat lapisan F1 dan F2. Lapisan F1 berada di ketinggian 110-200 km diatas permukaan bumi dengan kepadatan elektron  $2,5 \cdot 10^5$  per  $cm^3$  dan lapisan F2 di ketinggian 200-300 km diatas permukaan bumi dengan kepadatan electron  $10^6$  per  $cm^3$  [5]. Pada malam hari kedua lapisan ini melebur menjadi satu dengan ketinggian sekitar 275 Km. Pada lapisan ini ionisasi sangat padat dan tebal dan memiliki potensial yang besar untuk memantulkan gelombang radio frekuensi tinggi (HF) dari 3 MHz – 30 MHz. Pemanfaatan lapisan F sebagai pemantul gelombang sangat tergantung oleh lapisan D karena lapisan D ada pada siang hari dan hilang pada malam hari, maka propagasi gelombang radio pada lapisan F akan muncul pada malam hari saja, biasanya dimulai menjelang malam sampai mulai fajar keesokan harinya.

Variasi yang terjadi pada ionosfer tidak hanya disebabkan oleh pergantian siang dan malam saja namun juga ada beberapa faktor yang lain, yaitu:

#### 2.2.4 Diurnal Variation

Merupakan variasi secara keseluruhan hari. Variasi ini dipengaruhi oleh frekuensi kritis karena pengaruh siang dan malam hari dan sudut zenith. Sudut zenith adalah sudut antara garis dari posisi atas pengamat dengan garis dari posisi pengamat melihat matahari.

#### 2.2.5 Seasonal Variation

Merupakan variasi secara keseluruhan hari. Variasi ini dipengaruhi oleh frekuensi kritis karena pengaruh siang dan malam hari dan sudut zenith. Sudut zenith adalah sudut antara garis dari posisi atas pengamat dengan garis dari posisi pengamat melihat matahari.

#### 2.2.6 Latitudinal Variation

Merupakan variasi ionosfer secara garis lintang. Variasi ini dipengaruhi oleh variasi diurnal, sudut zenith, *mid latitudinal seasonal anomaly*, dan letak geografis suatu daerah.

#### 2.2.7 Solar Activity

Aktifitas matahari yang mempengaruhi lapisan ionosfer adalah bintik hitam yang terdapat pada matahari. Bintik hitam pada matahari tersebut diikuti oleh badai matahari dimana badai matahari adalah siklus kegiatan ledakan dahsyat dari masa puncak kegiatan bintik hitam tiap 11 tahun. Semakin banyak bintik hitam yang muncul maka pengaruh terhadap ionosfer semakin besar.

Selain adanya beragam variasi ionosfer, lapisan ionosfer juga mendapat beberapa gangguan, yaitu:

##### Kerapatan Lapisan D

Hal ini terjadi karena aktifitas radiasi dari sinar X matahari dan memiliki sifat menyerap gelombang HF sehingga menyebabkan delay dan biasanya mengganggu navigasi pesawat.

##### E Sporadis

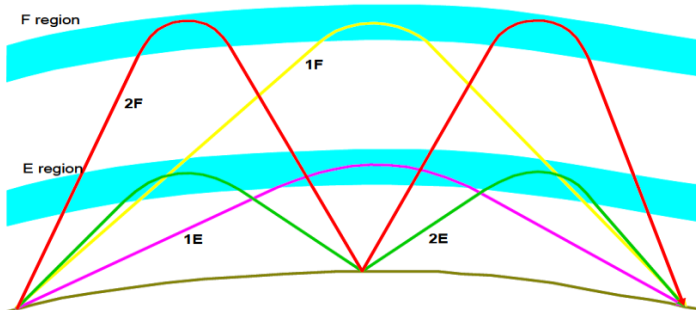
Lapisan ini akan menutupi lapisan F sehingga gelombang radio yang akan dipantulkan menuju lapisan F tidak sampai dan akan langsung dipantulkan oleh lapisan ini.

##### Equatorial Spread F (ESF)

Fenomena ini bisa terjadi dikarenakan adanya penebalan pada lapisan F akibat dari efek *delay spread* sehingga menyebabkan *inter-symbol interference* (ISI) pada penerima digital. Pada daerah ekuator seperti Indonesia, fenomena ini sangat mempengaruhi komunikasi yang menggunakan frekuensi tinggi.

### 2.3 Mode Propagasi Gelombang Skywave

Mode propagasi adalah lintasan yang ditempuh oleh gelombang radio ketika berjalan dari pemancar ke penerima. Lintasan itu sendiri memiliki banyak variasi sehingga perlu dilakukan pengarahan agar energi terbesar dari gelombang radio yang dipancarkan sampai ke sisi penerima dengan tepat. Mode propagasi menjelaskan mengenai jumlah pantulan yang terjadi di ionosfer terhadap gelombang radio. Perambatan gelombang radio yang terjadi mungkin dengan 1 hop (satu kali pantulan di lapisan ionosfer), 2 hop (dua kali pantulan di lapisan ionosfer dimana ada pantulan di permukaan bumi diantara kedua pantulan ionosfer tersebut), dan mungkin lebih dari 2 hop dengan beberapa kali pantulan di ionosfer.[5]



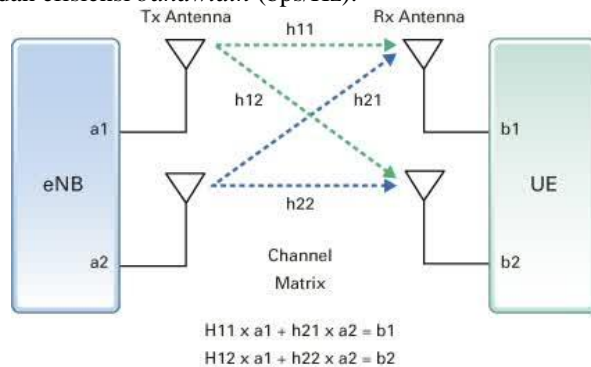
**Gambar 2.4** Propagasi HF

Gambar 2.4 menunjukkan mode propagasi gelombang radio yang terjadi pemantulan di lapisan E dan lapisan F pada ionosfer. Mode 1E berarti terjadinya pemantulan gelombang radio di lapisan E sebanyak satu kali, 1F berarti terjadinya pemantulan di lapisan F sebanyak satu kali dan seterusnya. Semakin banyak pantulan pada mode propagasinya (hop) maka kuat sinyal akan semakin kecil karena setiap pemantulan yang terjadi baik itu di permukaan bumi atau di ionosfer akan selalu terjadi pengurangan energi. Contohnya seperti mode 2F berarti terjadi

pemantulan sebanyak dua kali di lapisan F dan di permukaan bumi sebanyak satu kali. Jika dibandingkan dengan 1F, pengurangan energi pada mode 1F lebih sedikit dari pada 2F atau mode lapisan F orde yang lebih tinggi (3F, 4F, ...). Pengurangan energi pada pemantulan oleh permukaan bumi untuk hop yang panjang (sudut elevasi yang rendah) umumnya sekitar 3 dB untuk permukaan dengan konduktivitas rendah dan 0.5 dB untuk pemantulan di laut. Mode perambatan yang lebih tinggi dibandingkan orde yang lebih rendah juga ditandai dengan MUF yang lebih tinggi dibandingkan orde yang lebih tinggi.

## 2.4 Teknologi Multiple Input Multiple Output (MIMO)

*Multiple Input and Multiple Output* dalam gelombang radio merupakan metode untuk melipat gandakan kapasitas dengan menggunakan antenna jamak untuk mengirim dan menerima data, dan dengan menggunakan *space time diversity*. Sistem MIMO tidak seperti sistem antenna konvensional pada umumnya yang rentan terhadap *multipath* melainkan sistem MIMO bekerja dengan baik pada komponen *multipath*. Komponen *multipath* dieksploitasi guna meningkatkan diversitas dan efisiensi *bandwidth* (bps/Hz).



**Gambar 2.5** Metode MIMO 2x2

Dengan digunakannya sistem MIMO diharapkan mampu meningkatkan ketahanan radio link dengan cara memperbesar *Signal to Noise Ratio* (S/N atau SNR) atau kapasitas jalur data transmisi. Kapasitas sistem (C) MIMO dipengaruhi oleh jumlah antenna pemancar ( $N_T$ ) dan jumlah antenna penerima ( $N_R$ ). Secara umum perhitungan kapasitas MIMO dapat dirumuskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$C = \log_2 \left[ \det \left( I_{NR} + \frac{1}{N_0} H R_{ss} H^H \right) \right] \quad (2.1)$$

Dimana:

C = Kapasitas MIMO 2x2 (bps)

I = matriks identitas 2x2

R<sub>ss</sub> = matriks sinyal kovarian

N<sub>0</sub> = daya noise

H = matriks kanal MIMO 2x2

H<sup>H</sup> = matriks transpose conjugate

Penelitian ini menggunakan konfigurasi MIMO 2x2 dengan daya pancar pada pemancar1 = daya pancar pada pemancar2 sehingga rumus kapasitas MIMO 2x2 seperti pada persamaan 2.2

$$C = \log_2 \left[ \det \left( I + \frac{P_t}{N} H R_{ss} H^H \right) \right] \quad (2.2)$$

Dimana:

P<sub>t</sub> = daya pancar

N = daya noise

R<sub>ss</sub> = matriks sinyal kovarian

Nilai matriks kanal MIMO 2x2 dan *transpose conjugate* dari matriks kanal MIMO 2x2 dapat dilihat melalui persamaan 2.3 dan persamaan 2.4

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Dengan:

h<sub>11</sub> = respon kanal dari TX<sub>1</sub> ke RX<sub>1</sub>

h<sub>12</sub> = respon kanal dari TX<sub>2</sub> ke RX<sub>1</sub>

h<sub>21</sub> = respon kanal dari TX<sub>1</sub> ke RX<sub>2</sub>

h<sub>22</sub> = respon kanal dari TX<sub>2</sub> ke RX<sub>2</sub>

$$H^H = \begin{bmatrix} h_{11}^H & h_{12}^H \\ h_{21}^H & h_{22}^H \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Dimana:

H<sup>H</sup> = matriks *transpose conjugate* dari H

h<sub>11</sub><sup>H</sup> = *conjugate* dari h<sub>11</sub>

h<sub>12</sub><sup>H</sup> = *conjugate* dari h<sub>12</sub>

h<sub>21</sub><sup>H</sup> = *conjugate* dari h<sub>21</sub>

h<sub>22</sub><sup>H</sup> = *conjugate* dari h<sub>22</sub>

Pada penelitian ini, konfigurasi SISO (*Single Input Single Output*) juga dipertimbangkan sebagai acuan hasil kapasitas kanal yang digunakan pada persamaan 2.5

$$C_{siso} = \log_2 \left[ \left( 1 + \frac{P_t}{N} |h_{11}|^2 \right) \right] \quad (2.5)$$

$P_t$  = daya pancar

$N$  = daya noise

## 2.5 Universal Software Radio Peripheral (USRP)

USRP merupakan perangkat dalam arsitektur SDR yang di desain dan dijual oleh Ettus Research yang merupakan anak dari perusahaan National Instrument. USRP biasa digunakan oleh penelitian laboratorium, universitas, dan orang-orang yang mempunyai hobi di bidang radio. Salah satu jenis USRP yang digunakan adalah USRP N210. Pada perangkat USRP N210 terdapat sistem ADC dan DAC di dalamnya sehingga tidak membutuhkan hardware ADC/DAC tambahan. Selain DAC dan ADC terdapat juga RF atau *daughterboard* yang berfungsi sebagai pemancar atau penerima, *chip* FPGA yang berfungsi untuk memproses sebelum pengolahan sinyal input berbasis komputasi, serta koneksi dengan *host* PC menggunakan kabel *Gigabit Ethernet*.

Pada gambar 2.6 adalah USRP jenis N210 yang digunakan dalam proses pengukuran pada sistem receiver maupun akuisisi data yang terdiri dari motherboard N210 dan *daughterboard*.



**Gambar 2.6** USRP N210

Ada beberapa macam *daughterboard* yang bisa digunakan pada USRP tipe N210, yaitu *daughterboard* LFTX/RX dan SBX. Masing-masing jenis *daughterboard* tersebut memiliki frekuensi kerjanya masing-masing. Untuk *daughterboard* LFTX/RX bekerja pada frekuensi 0 – 30 MHz dan *daughterboard* SBX bekerja pada frekuensi 400 – 4400 MHz. Pada penelitian ini menggunakan sistem komunikasi yang bekerja di rentang frekuensi 3 – 30 MHz sehingga menggunakan *daughterboard* LFTX/RX yang bisa mencakup frekuensi 0 – 30 MHz. Gambar 2.7 merupakan contoh dari *daughterboard* LFTX dan LFRX yang nantinya akan diintegrasikan dengan USRP tipe N210.





**Gambar 2.7** *Daughterboard LFTX (kiri) dan LFRX (kanan)*

***( Halaman ini sengaja dikosongkan )***

## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

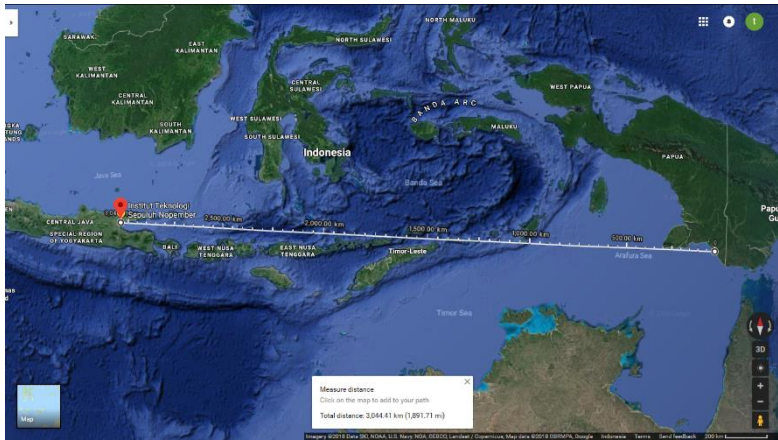
Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hal-hal yang berkaitan dengan proses dan tahapan pengukuran yang digunakan untuk mendapatkan parameter-parameter yang diinginkan (seperti kapasitas kanal pada penelitian ini).

#### **3.1 Penentuan Parameter Awal**

Penentuan parameter diperlukan guna memenuhi kriteria pengukuran yang diinginkan. Metode MIMO 2x2 digunakan yang artinya pada sisi penerima dan pengirim menggunakan dua antenna. Antenna yang digunakan yaitu antenna horizontal dipole dan vertikal monopole baik pada sisi penerima dan pengirim. Karena menggunakan metode MIMO 2x2, maka antenna yang digunakan dipasang saling berdekatan satu dengan lainnya dengan sudut antar antenna satu dengan lainnya berbeda 90° atau saling ortogonal. Ini dilakukan agar pada saat sinyal di kirim, tidak saling menginterferensi antenna satu dengan antenna lainnya. Ini dilakukan pada sisi pemancar maupun sisi penerima.

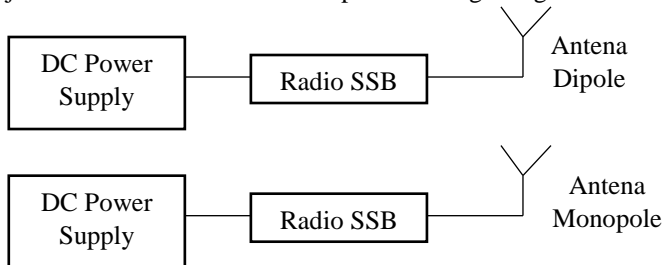
Link Sistem Komunikasi HF diimplementasikan baik di pemancar maupun penerima. Pada sisi pemancar terletak di atas jembatan gedung AJ Departement Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan letak koordinat 7°17'06.3"LS dan 112°47'46.9"BT.

Sedangkan receiver untuk kota Merauke terletak di gedung teknik elektro Universitas Musamus dengan koordinat 8°32'04.7"LS 140°24'55.5"BT yang berjarak 3,044 Km dari teknik elektro ITS. Frekuensi pengukuran yang digunakan adalah frekuensi 9,10, dan 11 Mhz. Daya pancar yang digunakan adalah 50 W.



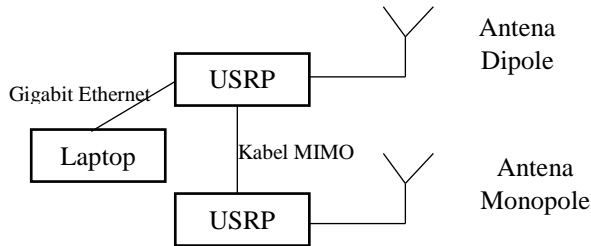
**Gambar 3.1** Ilustrasi Lintasan Link Komunikasi HF Surabaya-Merauke

Pada setiap sistem komunikasi, terdapat subsistem pemancar dan subsistem penerima pada setiap linknya. Pada subsistem pemancar menggunakan 2 radio SSB yang terhubung dengan antena dipole di atas jembatan AJ dan vertikal monopole di atas gedung B teknik elektro ITS.



**Gambar 3.2** Blok diagram pemancar sistem komunikasi HF MIMO

Pada Subsistem penerima, laptop dihubungkan ke salah satu USRP dengan gigabit ethernet agar USRP dapat dikendalikan lewat laptop penerima.



**Gambar 3.3** Blok diagram penerima sistem komunikasi HF MIMO

### 3.2 Metodologi Penelitian

Langkah-langkah pengerjaan tugas akhir ini seperti pada diagram gambar 3.4. Berikut adalah langkah-langkah pengerjaan tugas akhir sebagai berikut:

1. Mencari Data Hasil Pengukuran berupa Respon Kanal Lintasan Surabaya-Merauke.

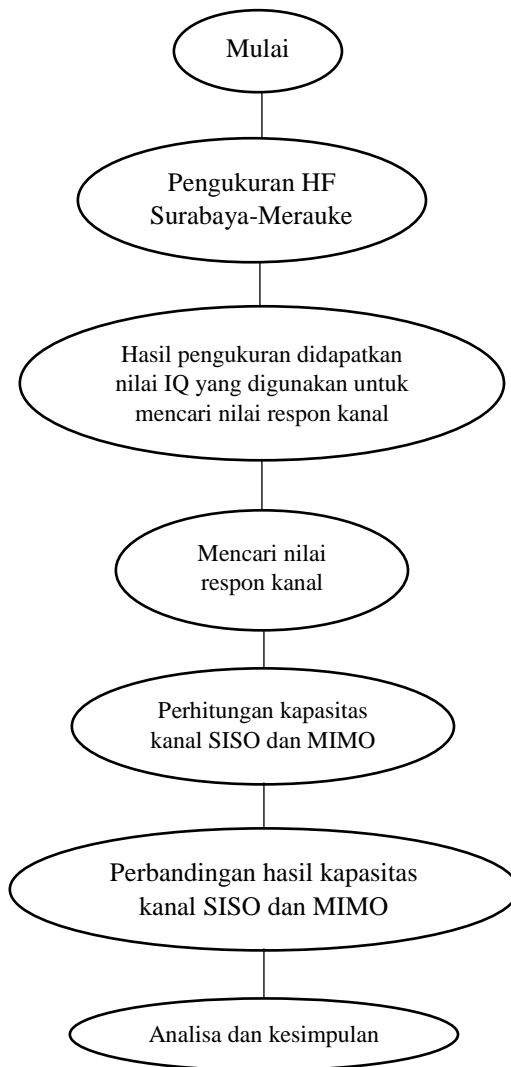
Data hasil pengukuran baik dari link Surabaya-Merauke yang telah dicapture dan mendapatkan nilai IQ yang akan diolah untuk mendapatkan nilai respon kanal  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ , dan  $h_{22}$ . Dari nilai respon kanal tersebut dapat digunakan untuk mencari nilai selanjutnya

2. Perhitungan Kapasitas Kanal SISO dan MIMO

Perhitungan kapasitas kanal SISO dan MIMO dilakukan setelah melakukan konfigurasi antena pada sisi pengirim dan penerima.

3. Perbandingan Hasil Kapasitas Kanal SISO dan MIMO

Setelah mendapatkan nilai kapasitas kanal pada konfigurasi SISO dan MIMO, nilai tersebut akan dibandingkan untuk dianalisa dan diambil kesimpulan.



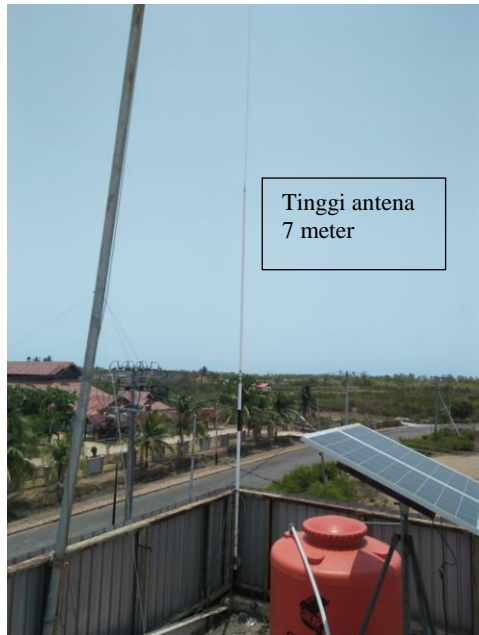
**Gambar 3.4** Metodologi penelitian

### 3.3 Perangkat Sistem Komunikasi

Perangkat keras maupun perangkat lunak pada sistem komunikasi HF MIMO 2x2 memiliki spesifikasi sebagai berikut:

1. Antena

Antena berfungsi untuk mengubah arus listrik frekuensi radio menjadi gelombang elektromagnetik. Antena yang digunakan dalam sistem ini adalah antena *dipole* setengah panjang gelombang ( $\lambda/2$ ) dan antena monopole shakespeare 393 ssb. Antena monopole mempunyai pola radiasi *omnidirectional* (segala arah). Daya input maksimal pada antena ini adalah 1000 Watt. Antena dipole memiliki perbandingan transfer daya 1:1 yang artinya daya input balun sama dengan daya output balun. Antena ini memiliki VSWR  $< 2$  di frekuensi 9 – 11 MHz dan bandwidth antena sebesar  $\pm 200\text{kHz}$ .



**Gambar 3.5** Antena vertical monopole



**Gambar 3.6** Antena horizontal dipole

2. Universal Software Radio Peripheral (USRP)

USRP adalah perangkat keras SDR yang digunakan dalam sistem komunikasi HF MIMO 2x2. Pada pengukuran ini menggunakan produk dari Ettus Research dengan jenis USRP N210. Dalam perangkat USRP N210 terdapat DAC/ADC, *daughterboard*, dan *chip* FPGA.



**Gambar 3.7** USRP N210

Pada pengukuran ini USRP N210 hanya menggunakan *daughterboard* LFRX pada sisi penerima karena hanya



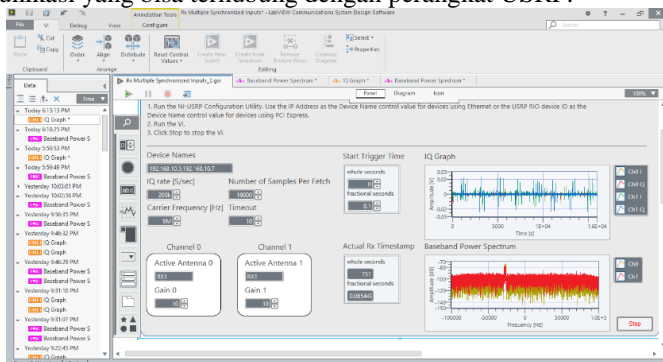
menggunakan USRP di sisi penerima dan *daughterboard* LFRX bekerja pada frekuensi 3 – 30 MHz sehingga cocok dengan frekuensi yang akan digunakan dalam pengukuran ini.



**Gambar 3.8** *Daughterboard* LFRX

### 3. Labview Communication 1.1

Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench Communication 1.1 adalah perangkat lunak dengan bahasa pemrograman berbasis grafis dan blok diagram yang digunakan untuk menjalankan USRP. Di dalam Labview terdapat program suatu sistem komunikasi yang bisa terhubung dengan perangkat USRP.



**Gambar 3.9** Tampilan program Labview Communication

4. Personal Computer

Personal computer atau laptop yang digunakan untuk mengatur USRP dengan aplikasi Labview Communication. Laptop atau PC yang digunakan harus mempunyai port *gigabit ethernet* sehingga bisa terhubung dengan USRP.

5. Gigabit Ethernet

Gigabit ethernet berfungsi sebagai kabel penghubung PC atau laptop dengan USRP.



**Gambar 3.10** Kabel Ethernet

6. Kabel Koaksial

Kabel koaksial adalah kabel yang digunakan untuk menghubungkan antena pemancar dengan sistem pemancar dan antena penerima dengan sistem penerima. Pada sisi pemancar menggunakan kabel koaksial RG8 dan pada sisi penerima menggunakan kabel koaksial RG58.



**Gambar 3.11** Kabel Koaksial

7. Octoclock

Octoclock adalah perangkat keras yang berfungsi sebagai sinkronisasi USRP. Pada pengukuran ini menggunakan dua buah USRP sehingga dibutuhkan sinkronisasi waktu untuk kedua USRP agar waktu penerimaan sinyal kedua USRP sama.



**Gambar 3.12** Octoclock

8. Radio HF Transceiver

Pada pengukuran ini radio HF transceiver berfungsi sebagai pemancar di Surabaya. Radio HF transceiver bekerja di rentang frekuensi 3 – 30 MHz. Transmisi radio berupa tone di kirim dan kemudian diambil datanya pada USRP di sisi penerima.



**Gambar 3.13** Radio HF

### 3.4 Skema Pengukuran

Dalam sub bab ini akan membahas mengenai skema pengukuran yang dilakukan pada link pengukuran yang telah dilakukan pada penelitian ini.

#### 3.4.1 Spesifikasi Pengukuran

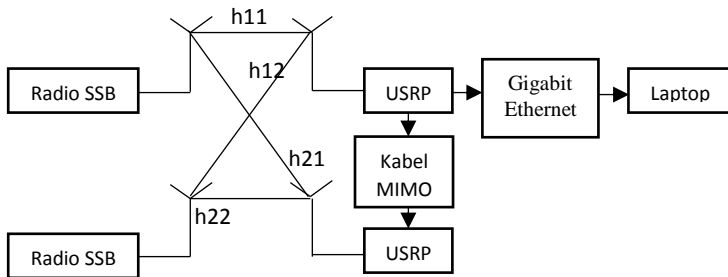
Pengukuran dilakukan dengan mengikuti beberapa spesifikasi yang perlu diikuti pada pengukuran link Surabaya-Merauke. Spesifikasi lengkap untuk pengukuran sistem komunikasi HF MIMO 2x2 bisa dilihat pada tabel 3.1 berikut:

**Tabel 3.1** Spesifikasi Pengukuran Sistem Komunikasi HF MIMO 2x2

NO	Spesifikasi Pengukuran	Simbol	SBY-MKQ	Keterangan
1	Frekuensi	F	9 – 11 MHz	MHz
2	Antenna		Horizontal Dipole & Vertical Monopole	
3	Jarak		3,044	Km
4	Metode		MIMO 2×2	
5	Sinyal yang dikirim		Sinyal Tone	
6	SDR		USRP	

### 3.4.2 Proses Pengukuran

Apabila spesifikasi pengukuran yang diharapkan sudah memenuhi sesuai dengan kriteria sub bab sebelumnya, maka selanjutnya dilakukan proses pengukuran. Dengan mengikuti proses yang ada diharapkan proses pengukuran sistem komunikasi HF dapat berjalan dengan baik. Adapun ilustrasi proses pengukuran sistem komunikasi HF dengan menggunakan MIMO 2x2 adalah sebagai berikut:



**Gambar 3.14** Ilustrasi proses pengukuran

Dari ilustrasi diatas dapat dijelaskan lebih lanjut sebagai berikut:

- Pada lokasi link pengukuran di sisi pengirim digunakan 2 radio dan 2 antenna agar dapat melakukan pengukuran metode MIMO 2x2.
- Pada lokasi link pengukuran di sisi penerima digunakan 2 antenna dan 2 USRP agar dapat melakukan pengukuran metode MIMO 2x2
- Sinyal yang diterima pada sisi penerima, yang nanti pada laptop sisi penerima akan menampilkan grafik yang akan menampilkan respon kanal hasil pengukuran yang dimana apakah sinyal dikirim diterima atau tidak. Apabila sinyal diterima, maka pada sisi penerima merekam hasil pengukuran tersebut yang berupa grafik untuk disimpan dalam bentuk format CSV.
- Dalam setiap pengambilan data, terdapat 10 kali perekaman. Lalu dalam selang waktu tertentu, dilakukan pengambilan data sebanyak 10 kali perekaman. Ulangi langkah 2-3 untuk melakukan pengukuran.

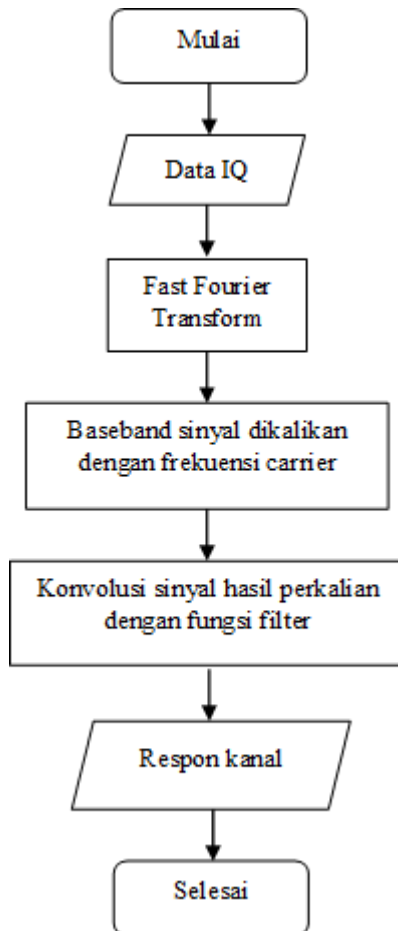
- Pada pengukuran yang telah dilakukan, data yang terekam pada pengukuran link Surabaya-Merauke sebanyak 129 data.
- Setiap hasil pengukuran yang tersimpan dalam bentuk CSV (excel) kemudian akan dioalah datanya untuk mencari respon kanal dengan menggunakan software Matlab. Respon kanal yang didapatkan nantinya berupa respon kanal h11, h12, h21, dan h22.
- Setelah mendapatkan nilai respon kanal pada masing-masing kanal, maka selanjutnya kita dapat gunakan respon kanal tersebut untuk menghitung kapasitas kanal.

### 3.5 Mencari Nilai Respon Kanal

Untuk mendapatkan nilai respon kanal, pertama mengolah data IQ yang sudah disimpan saat pengukuran sebelumnya. Data IQ didapat dengan cara *capture data* pada IQ graph di Labview sisi penerima. Data IQ yang sudah tersimpan akan diolah untuk mencari baseband sinyal terlebih dahulu, dengan cara diproses dengan *fast fourier transform*. Setelah mendapat baseband sinyal, yang selanjutnya dilakukan adalah proses filter terhadap sinyal tersebut untuk mendapatkan nilai respon kanal. Filter yang digunakan adalaah filter yang memanfaatkan teknik windowing dengan memilih window Hamming. Persamaan fungsi filter menggunakan persamaan 3.1

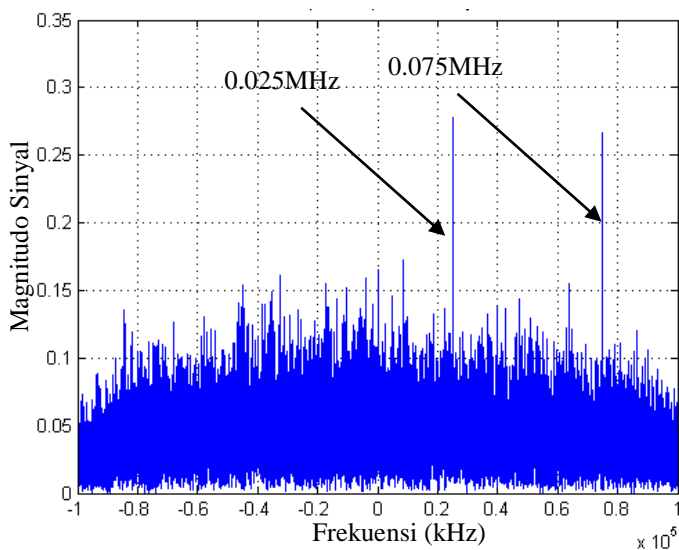
$$w(n) = 0.54 - 0.46 \left( \frac{2\pi n}{N-1} \right) \quad (3.1)$$

Setelah menentukan filter tahap selanjutnya adalah melakukan konvolusi antara fungsi filter dengan fungsi sinyal hasil perkalian. Hasil dari proses konvolusi ini menghaikan nilai respon kanal setiap kanal *transmitter* terhadap setiap kanal *receiver*. Terdapat empat buah respon kanal yang akan dihasilkan dan diberi simbol h11, h12, h21, dan h22.

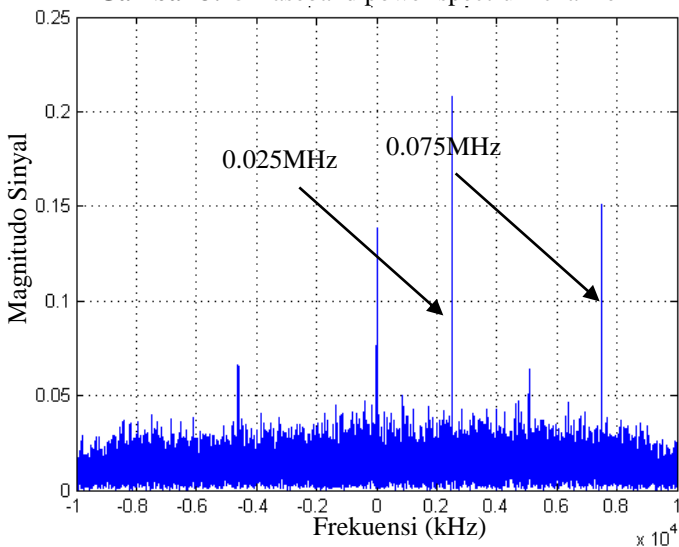


**Gambar 3.14** Proses mencari nilai respon kanal

Pada gambar 3.15 dan 3.16 merupakan salah satu contoh baseband power spectrum di channel 1 dan channel 2 dengan menggunakan frekuensi 11.025MHz dan 11.075 MHz yang terekam pada saat pengukuran.



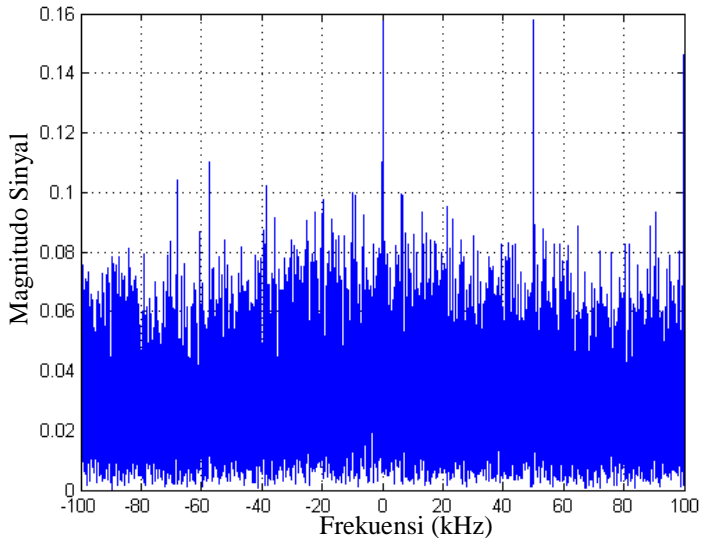
**Gambar 3.15** Baseband power spectrum channel 1



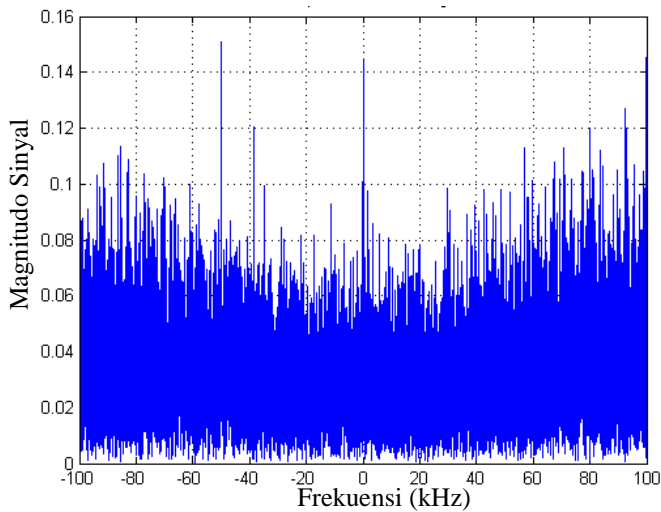
**Gambar 3.16** Baseband power spectrum channel 2



Setelah mendapat baseband power spectrum dari kedua channel pada gambar 3.17 dan 3.18 kita akan mendapat hasil kali spektrum channel 1 dengan frekuensi carrier 1 dan frekuensi carrier untuk mendapatkan sinyal informasi di 0 Hz. Untuk memunculkan sinyal informasi 1 yang berada pada frekuensi 25000 maka akan dikalikan dengan frekuensi 25000 Hz dan untuk sinyal informasi 2, karena berada pada frekuensi 75000 akan dikalikan dengan frekuensi 75000 Hz agar kedua sinyal berada pada 0 Hz di grafik dan kemudian bisa diolah untuk mendapatkan nilai respon kanal.

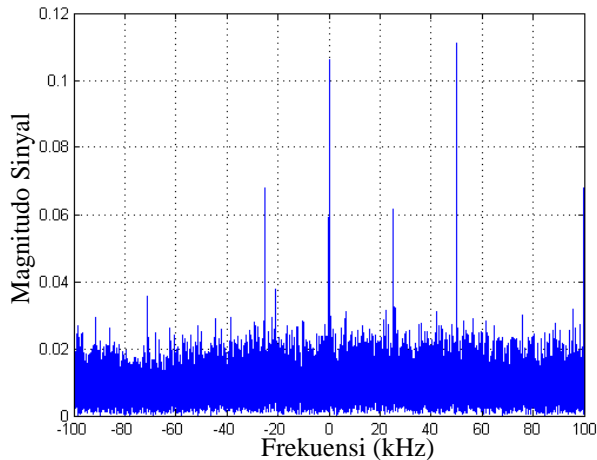


**Gambar 3.17** Hasil kali spektrum channel 1 dengan  $F_{C1}$

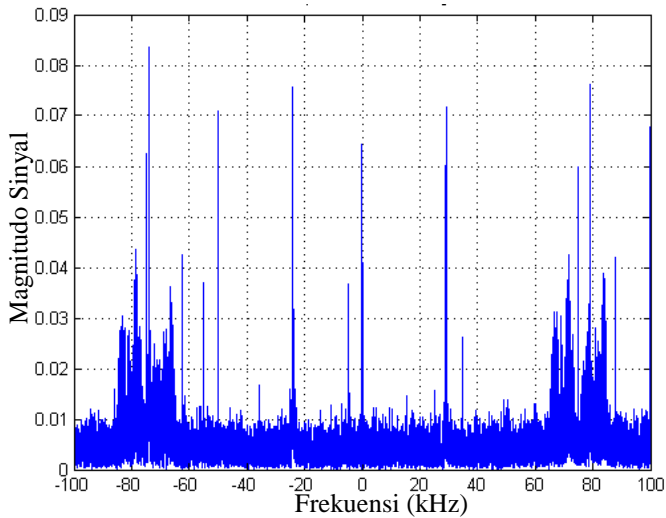


**Gambar 3.18** Hasil kali spektrum channel 1 dengan  $F_{C2}$

Setelah mendapat hasil kali spektrum channel 1 dengan frekuensi carrier 1 dan frekuensi carrier 2 selanjutnya hal yang sama dilakukan pada channel 2, yaitu mencari hasil kali spektrum channel 2 dengan frekuensi carrier 1 dan frekuensi carrier 2 yang hasilnya bisa dilihat pada gambar 3.19 dan 3.20

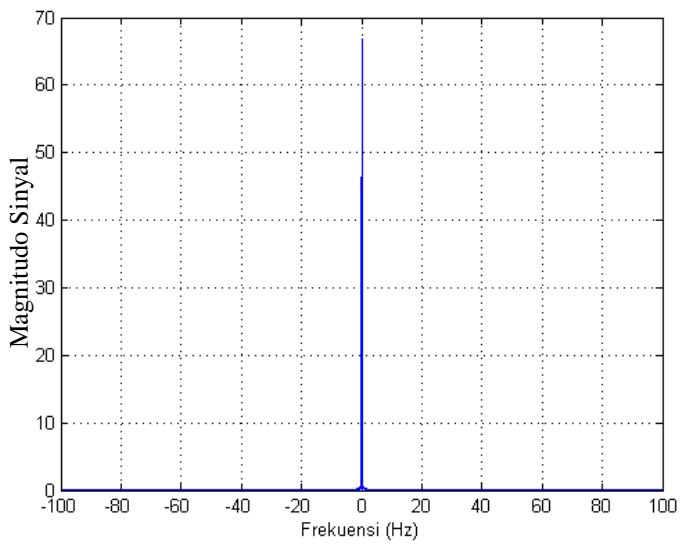


**Gambar 3.19** Hasil kali spektrum channel 2 dengan  $F_{C1}$

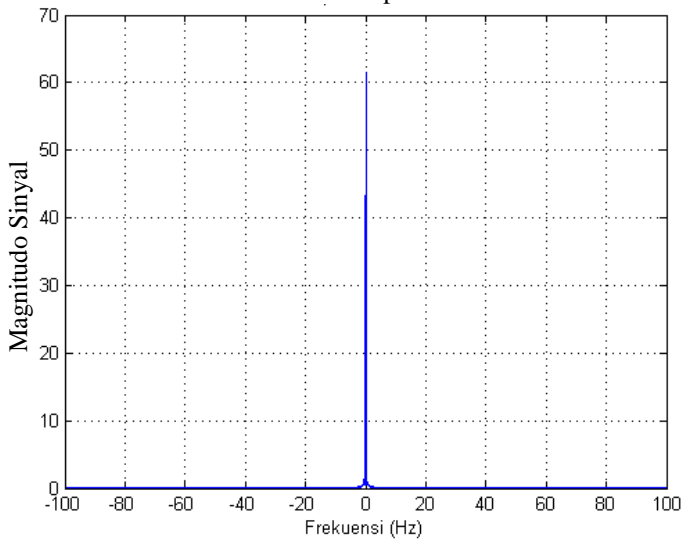


**Gambar 3.20** Hasil kali spektrum channel 2 dengan  $F_{C2}$

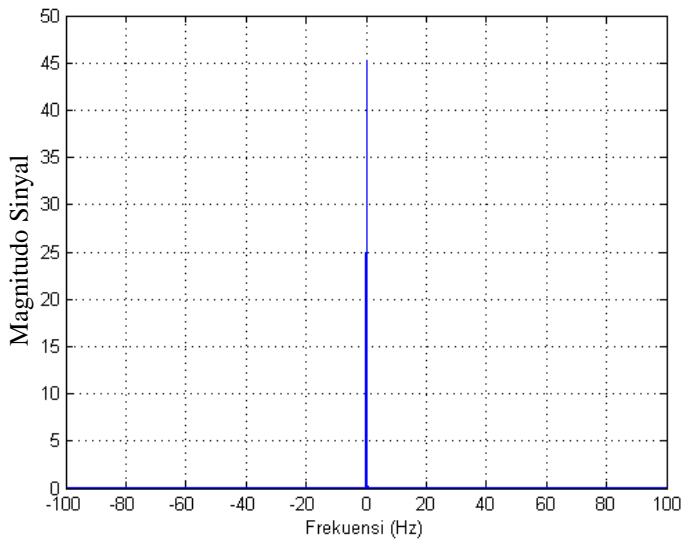
Untuk mendapat respon kanal maka hal yang dilakukan selanjutnya adalah melakukan konvolusi antara fungsi filter dengan fungsi sinyal hasil perkalian. Hasil dari proses konvolusi ini menghasilkan nilai respon kanal setiap kanal *transmitter* terhadap setiap kanal *receiver*. Terdapat empat buah respon kanal yang akan dihasilkan dan diberi simbol  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ , dan  $h_{22}$ . Respon kanal  $h_{11}$  merupakan respon kanal antara kanal 1 *transmitter* dengan kanal 1 *receiver*. Respon kanal  $h_{12}$  merupakan respon kanal antara kanal 1 *transmitter* dengan kanal 2 *receiver*. Respon kanal  $h_{21}$  merupakan respon kanal antara kanal 2 *transmitter* dengan kanal 1 *receiver*. Respon kanal  $h_{22}$  merupakan respon kanal antara kanal 2 *transmitter* dengan kanal 2 *receiver*. Untuk hasil dari respon kanal  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ , dan  $h_{22}$  bisa dilihat di gambar-gambar yang ada di bawah.



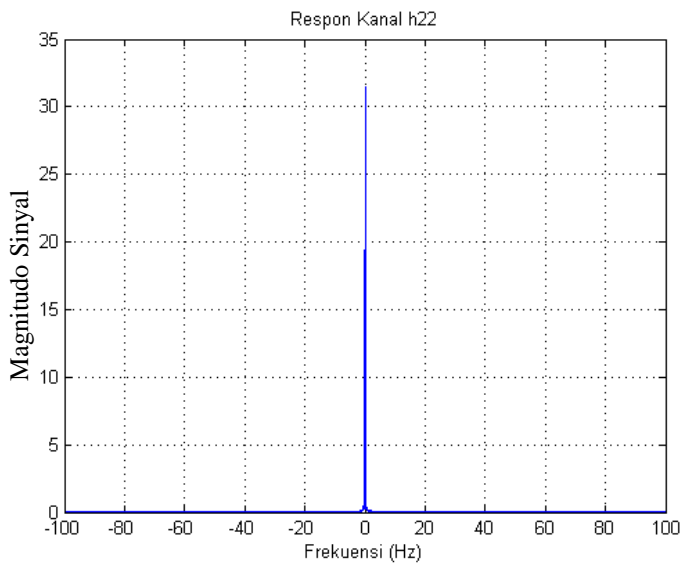
**Gambar 3.21** Respon kanal h11



**Gambar 3.22** Respon kanal h12



**Gambar 3.23** Respon kanal h21



**Gambar 3.24** Respon kanal h22

### 3.6 Perhitungan Kapasitas Kanal SISO dan MIMO

Perhitungan kapasitas kanal ini diperlukan untuk mengetahui seberapa besar kapasitas kanal yang tersedia. Kanal merupakan media yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal dari *transmitter* ke *receiver*. Penelitian ini menggunakan konfigurasi metode MIMO 2x2 dengan daya pancar pada pemancar1 = daya pancar pada pemancar2 sehingga rumus perhitungan kapasitas MIMO 2x2 seperti pada persamaan 2.2

Daya transmitter diperlukan untuk mengetahui nilai matriks MIMO 2x2.  $N_0$  merupakan daya pada noise dimana daya tersebut diambil dari nilai minimum level sinyal pada semua data yang telah di *capture*. Dari semua nilai minimum level sinyal yang diterima diambil rata-rata nya. Daya noise rata-rata yang diterima sebesar  $5.96 \times 10^{-6}$  W/Hz. Dengan asumsi bahwa noise pada penelitian ini adalah *white noise* maka noise pada semua data hasil pengukuran memiliki nilai yang sama.

Setelah mendapatkan nilai respon kanal  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ , dan  $h_{22}$  kemudian akan dimasukkan ke dalam persamaan 2.3 dan 2.4 untuk mencari matriks *transpose conjugate* yang kemudian akan dimasukkan ke persamaan 2.2 untuk menghitung kapasitas MIMO 2x2. Untuk mencari kapasitas kanal SISO, nilai respon kanal  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ , dan  $h_{22}$  dimasukkan ke persamaan 2.5.

Semakin besar nilai respon kanal akan mempengaruhi besar kecilnya kapasitas kanal pada setiap konfigurasi. Namun besarnya nilai kapasitas kanal antar link belum bisa dijadikan acuan bahwa salah satu link lebih baik dibandingkan link lainnya. Perlu diuji secara statistik terhadap masing-masing link untuk mengetahui sistem komunikasi mana yang lebih baik.

## **BAB 4**

### **ANALISA HASIL PENGUKURAN**

Pada bab ini, akan dilakukan analisa hasil pengukuran sesuai dengan langkah-langkah yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Pada bab ini, akan menjelaskan tentang analisa hasil pengukuran dan keterkaitannya dengan teori yang ada, sehingga didapatkan kesimpulan.

#### **4.1 Mendapatkan Nilai Respon Kanal**

Dari data IQ graph yang telah disimpan, dapat diolah untuk mencari data yang diinginkan. Dalam penelitian ini hasil akhir yang diinginkan adalah mencari kapasitas kanal dengan berbagai konfigurasi yang diinginkan pada dua link pengukuran yang telah dilaksanakan.

Data IQ yang telah direkam akan diolah untuk mencari baseband sinyal terlebih dahulu, dengan cara melakukan proses *fast fourier transform*. Setelah mendapatkan baseband sinyal, langkah selanjutnya adalah dengan melakukan proses filter terhadap sinyal tersebut untuk mendapatkan nilai respon kanal. Filter yang digunakan adalah filter yang menggunakan teknik windowing dengan memilih window Hamming. Sebelum melakukan proses filtering yang harus dilakukan terlebih dahulu menentukan orde filternya. Setelah mendapatkan nilai orde filter maka selanjutnya orde filter digunakan untuk mendapatkan fungsi filter.

Setelah berhasil mendesain fungsi filter dengan teknik windowing maka tahap selanjutnya adalah melakukan konvolusi antara fungsi filter dengan fungsi sinyal hasil perkalian. Hasil akhir dari proses konvolusi ini menghasilkan nilai respon kanal setiap channel transmitter terhadap channel receiver. Terdapat empat buah respon kanal yang dihasilkan yang diberi simbol  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ , dan  $h_{22}$ .

Nilai  $h_{11}$  adalah menunjukkan nilai respon kanal antara channel(kanal) 1 pada transmitter terhadap channel 1 pada receiver. Nilai  $h_{12}$  adalah menunjukkan nilai respon kanal antara channel 2 pada transmitter terhadap channel 1 pada receiver. Nilai  $h_{21}$  adalah menunjukkan nilai respon kanal antara channel 1 pada transmitter terhadap channel 2 pada receiver. Nilai  $h_{22}$  adalah menunjukkan nilai respon kanal antara channel 2 pada transmitter terhadap channel 2 pada receiver. Nilai respon kanal bisa dilihat pada tabel 4.1 untuk link Surabaya-Merauke. Hasil nilai respon kanal yang ditampilkan pada bab ini tidak seluruhnya ditampilkan, hanya beberapa sampel sebagai bukti hasil pengolahan.

**Tabel 4.1** Hasil respon kanal link Surabaya-Merauke

h11	h12	h21	h22
- 17.36427309664 8887 - 13.50487685824 6737i	0.883355560704 985 + 6.461467618885 464i	1.540615943150 115 - 10.55924709596 3089i	0.794610195477 894 + 0.434435502141 140i
- 74.82608027276 4020 + 72.20415806273 7800i	10.53266691112 9283 + 31.32560410282 2467i	- 9.776264516467 776 - 15.28603163230 4667i	- 22.30323883597 3957 - 10.72904741026 5107i
- 6.790311807223 935 + 92.34727985436 8030i	24.58386471054 6750 - 33.99264019905 7824i	- 42.11358799845 6985 - 31.90594941665 2213i	7.899345328654 277 + 5.644643372073 881i
- 20.31017986386 8402 + 47.43826882170 1840i	4.153647100420 647 + 56.95096683103 5500i	13.79674396993 6047 - 28.10302598521 8643i	- 14.89471678777 6396 - 18.67252061963 3282i
52.00046727564 0816 - 49.66152105348 6760i	- 19.87827979806 4163 - 29.65574551956 4170i	9.082434549762 601 + 39.50669815722 9934i	15.81016586906 3495 - 23.05864317263 5300i
- 16.58616828861 0150 + 77.47997232312 1600i	- 34.10497536302 7556 + 48.08683265207 1450i	- 43.23251681658 5320 + 17.11130497915 0212i	- 15.00188134398 7968 - 20.55416612088 4270i
16.12040780942 0800 - 49.51243251558 5870i	40.11265911836 1600 + 67.05597572920 9980i	11.29230631801 6967 + 38.80955542717 1700i	- 16.32125194906 6284 + 8.522121295272 088i
- 2.493576156855 726 + 6.967886306161 648i	10.45942798529 9550 - 18.07354472048 0907i	- 1.806417920505 248 + 1.236850448001 529i	5.758540110319 029 + 18.54772309129 4753i



h11	h12	h21	h22
- 10.91685789955 4326 + 9.672356627105 227i	- 20.05800401143 2786 + 5.982782350911 253i	- 3.567423624223 920 + 0.218811581365 035i	- 17.00996053767 7650 - 8.008813285831 748i
10.70060106528 8208 + 16.88437527832 4470i	5.297049428716 298 + 20.98696412089 8918i	- 2.331433929776 022 - 3.921419174292 755i	- 2.603676319028 860 - 22.94684890467 5825i
6.692996573709 832 + 10.12551229611 4880i	- 3.073037048770 515 - 33.37915882109 5270i	- 5.047056743173 219 - 6.359217889425 676i	- 12.55212914972 1218 + 10.80026734300 0260i
- 20.06144772603 8985 - 0.227003643490 030i	10.30292434230 0393 - 52.95671783670 0435i	- 3.971924460916 120 - 8.201207562598 345i	2.475162734185 195 - 1.067065540981 530i
- 11.73934436462 0383 - 10.93294321470 3945i	28.69912694119 0578 - 30.57083202058 9740i	- 2.871765706557 013 - 5.734349427860 680i	- 2.007973735085 324 + 6.119096180521 497i
- 8.998666499904 220 + 29.48857592800 0273i	- 3.821733230638 259 - 8.329762114865 682i	- 5.125877178439 570 + 4.239002536579 264i	- 5.619524443315 664 - 2.922852180452 616i
83.84140160688 7260 + 23.10978611873 0682i	- 61.07666992880 9350 - 13.57248320644 4794i	- 14.66277033482 9230 + 48.31936658193 1654i	26.81207471783 9685 - 7.778589759992 944i

h11	h12	h21	h22
39.25737644249 2210 - 30.42974248209 2020i	17.93904981246 5590 - 14.86969566512 8125i	6.413675068117 483 + 6.281561498346 562i	5.810244553338 984 + 25.32673572609 8190i
- 33.65178832421 0260 - 17.85782876696 1830i	- 11.36253383692 4602 - 6.295904747343 140i	- 9.796745961394 269 - 14.37110713165 8825i	5.329209454330 151 - 8.413355848761 515i
- 81.85150956645 0200 + 13.27104758125 7445i	22.09633237247 1927 - 5.299616146172 925i	11.01628674349 4197 - 33.40238471351 7250i	- 5.964719190357 913 + 2.863425176524 840i
26.08005194832 8283 - 29.67751431956 8637i	12.27900768073 6974 - 8.872615965947 507i	- 24.19414715546 4980 + 11.64210350625 3970i	1.743050893984 071 + 1.280302409053 345i
- 17.29689712006 2933 + 4.030075254771 091i	- 12.52090251252 0378 + 19.66590521444 6540i	- 8.594502920136 058 - 4.562162227303 219i	- 8.188887885008 205 - 13.00711735150 1144i
- 10.85762796547 8894 - 41.08735400556 8330i	0.538546755026 939 - 20.10823124748 9080i	31.44924202274 0783 - 5.844634904398 703i	5.699724705218 852 + 3.150503081678 096i
76.17202727795 7300 + 8.462615463995 357i	23.91389944269 7230 + 35.26543060714 2280i	- 23.01805063904 4894 + 59.95078683557 1286i	- 14.86936897810 8213 + 2.129448801282 521i
79.24293804350 2590 + 26.47052942395 1890i	11.65257104165 8050 - 44.61734335257 9454i	- 53.20350529775 5925 + 12.77239290023 4195i	26.27394329482 5860 + 9.943857407446 028i

h11	h12	h21	h22
- 58.45643483436 4150 - 9.168076250487 555i	- 54.97538307081 5500 - 19.16111566123 8313i	40.83244340790 1366 - 6.794905140929 451i	24.97420834157 1412 + 3.035586167047 739i
- 29.31745585783 1643 + 9.764971337212 874i	48.28593677176 6620 - 51.05021086713 1600i	11.61229403642 6878 - 19.18373268713 6754i	- 12.65956235463 2701 + 55.37207114399 6480i
12.08415338557 4480 + 1.162505971120 315i	- 10.46438224595 2010 - 18.29568493350 8554i	- 3.277264684492 360 + 4.412080013746 562i	- 3.859803691544 895 - 11.74465642765 1195i
- 5.370123108831 466 + 5.161478199516 722i	53.63813030438 3616 + 47.12796521703 1590i	- 12.29732333836 2801 - 12.31459974769 9507i	- 43.88624039328 8400 - 17.79320291740 1160i
- 0.910049562986 252 - 10.38935613230 2776i	24.30012342795 5110 + 12.14165650993 8151i	3.882695855971 690 - 8.275878524244 732i	- 2.699003193534 056 - 0.112261383389 457i
- 6.919942965410 644 - 10.72700008037 2958i	- 34.66579948645 0750 - 20.35533857140 0587i	15.08856058425 4028 - 10.87772750973 4793i	18.98670253608 6625 - 15.08465187863 0535i
- 1.783088875282 433 + 33.28527818782 3990i	- 31.01623301420 4406 - 26.93082128762 2422i	- 15.62008585923 0741 + 0.011755452267 555i	26.36201399044 2335 + 0.092625059503 483i

h11	h12	h21	h22
- 7.612268153908 660 + 3.827057015652 905i	- 2.216877484684 965 - 16.68418934911 6550i	9.822589848966 821 - 13.84588277686 7382i	3.494191437828 630 + 10.64974484891 9354i
- 26.99583791961 0075 + 9.575935224717 488i	- 30.07248161797 6123 - 24.88353181566 1076i	1.962445400034 068 + 5.012757297177 779i	7.395892776030 232 - 14.07288640829 2586i
- 14.65076812331 5800 - 3.824869068778 995i	11.00954761222 8179 - 1.790543477808 241i	- 11.31574598944 0169 - 12.15897079547 5772i	- 12.55732589078 4117 + 5.750456884319 393i
- 18.00965684575 8627 - 30.57398461896 7480i	35.05426799966 2030 + 9.497909964761 394i	39.42867681987 6120 - 19.27203631602 4430i	- 10.99119161573 9600 + 20.58278026226 9146i
24.20964675427 6270 - 74.57746194977 0270i	35.36613035122 3596 + 10.31437940462 6970i	82.68224600518 0500 + 58.67210418828 9800i	- 19.89085359688 2458 + 7.997492554303 570i

Untuk nilai respon kanal link Surabaya-Merauke yang lengkap, bisa dilihat di lampiran.

Tabel 4.1 menunjukkan sampel nilai dari respon impuls kanal pengukuran link Surabaya-Merauke pada hari senin sampai hari kamis tanggal 19-22 November 2018. Nilai respon kanal merupakan bilangan kompleks yang dapat dihitung nilai magnitudo dan fasanya. Dapat dilihat nilai respon kanal yang sudah didapatkan, adanya peningkatan dan

penurunan nilai respon kanal pada setiap pengambilan data. Ini dapat terjadi karena ada pengaruh pada kondisi kanal seperti lapisan ionosfer yang memantulkan propagasi yang terkirim, waktu pengukuran yang dilakukan juga berpengaruh dikarenakan kondisi kepadatan ion pada lapisan ionosfer yang digunakan untuk memantulkan sinyal yang dikirim, dan faktor lainnya. Nilai respon kanal ini nantinya akan dipergunakan kembali untuk mencari kapasitas kanal.

#### 4.2 Perhitungan Kapasitas HF MIMO Link Surabaya-Merauke

Setelah mendapat nilai respon kanal  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ , dan  $h_{22}$  maka langkah selanjutnya adalah menghitung kapasitas kanal HF MIMO untuk link Surabaya-Merauke. Perhitungan kapasitas ini dapat menggunakan persamaan 2.2 hingga 2.5 dengan rincian daya pancar sebesar 50 watt dan kerapatan daya noise sebesar  $5.96 \times 10^{-6}$  W/Hz. Hasil nilai kapasitas kanal bisa dilihat tabel 4.2 untuk link Surabaya-Merauke.

**Tabel 4.2** Kapasitas Kanal Link Surabaya-Merauke

SISO				MIMO
c11	c12	c21	c22	
31.92	28.41	29.83	22.71	47.35
36.40	33.09	31.36	32.25	56.77
36.07	33.78	34.44	29.55	55.90
34.38	34.67	32.93	32.15	54.92
35.34	33.31	33.68	32.61	56.01
35.62	34.76	34.07	32.33	56.90
34.40	35.57	33.67	31.40	57.49
28.77	31.76	25.26	31.55	49.28
30.73	31.77	26.67	31.46	49.99
31.64	31.87	27.37	32.05	51.72
30.20	33.13	29.04	31.09	50.56
31.65	34.50	29.37	25.86	52.26
31.01	33.78	28.36	28.37	51.60
32.89	29.39	28.46	28.32	49.77

SISO				MIMO
C11	C12	C21	C22	
35.88	34.93	34.31	32.60	57.67
34.27	32.08	29.33	32.39	54.98
33.50	30.39	31.24	29.63	51.63
35.75	32.01	33.27	28.45	53.25
33.61	30.84	32.49	25.22	52.44
31.30	32.08	29.56	30.88	51.20
33.82	31.66	32.99	28.40	52.02
35.52	33.82	35.00	30.81	56.04
35.77	34.05	34.54	32.62	56.83
34.77	34.72	33.74	32.30	54.47
32.90	35.26	31.97	34.65	51.51
30.20	31.79	27.91	30.25	50.25
28.79	35.31	31.24	34.13	55.12
29.76	32.52	29.38	25.86	50.82
30.35	33.65	31.43	32.19	52.53
33.12	33.72	30.93	32.44	53.62
29.18	31.14	31.17	29.97	49.95
32.68	33.57	27.85	30.98	53.45
30.84	29.95	31.10	30.57	51.70
33.30	33.36	33.91	32.08	53.94
35.59	33.40	36.32	31.84	57.32
36.48	33.26	32.00	30.84	56.18
34.86	32.57	33.81	35.11	57.96
33.24	34.39	32.37	33.61	45.97
30.34	32.71	28.43	32.32	52.10
30.98	30.54	31.56	27.61	49.81
33.52	31.17	33.52	28.66	53.48

33.51	26.91	32.95	29.02	51.59
35.14	30.74	33.80	28.17	51.01
31.58	29.50	28.24	29.54	50.44
27.96	31.02	31.84	30.43	51.49
30.83	30.41	32.34	30.52	50.38

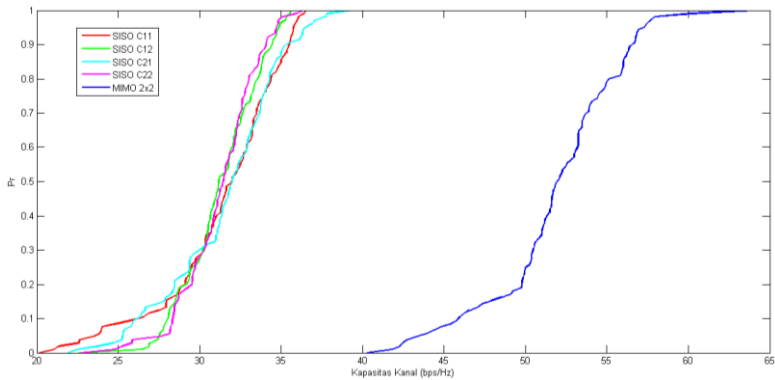
Data nilai kapasitas kanal link Surabaya-Merauke yang lengkap, akan terlampir di lampiran.

Tabel 4.2 menunjukkan hasil kapasitas kanal link Surabaya-Merauke. Dari data yang ada pada tabel di atas menunjukkan bahwa konfigurasi MIMO memiliki nilai rata-rata kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi SISO dengan rata-rata nilai kapasitas 52.8668 bps/Hz. Sedangkan untuk konfigurasi SISO memiliki rata-rata nilai kapasitas sebesar 32.8349 bps/Hz untuk kanal h11, kanal h12 memiliki rata-rata nilai kapasitas sebesar 32.4668 bps/Hz, kanal h21 memiliki rata-rata nilai kapasitas sebesar 31.4188 bps/Hz, dan untuk kanal h22 memiliki rata-rata kapasitas sebesar 30.5661 bps/Hz.

#### **4.3 Analisis Statistik Kapasitas Kanal Konfigurasi MIMO dengan Konfigurasi SISO**

Setelah mencari nilai kapasitas kanal pada semua konfigurasi, perlu mencari kemungkinan (probabilitas) berapa nilai kapasitas kanal yang sering muncul pada beberapa kali pengujian. Hasil akhirnya berupa plot grafik CDF (*Cumulative Distribution Function*). Hasil dari grafik CDF bisa dilihat pada gambar 4.1 untuk link Surabaya-Merauke.

Sumbu X menjelaskan tentang berapa besar kapasitas kanal yang terhitung pada hasil perhitungan. Sedangkan sumbu Y pada grafik merupakan probabilitas Pr, atau probabilitas nilai kapasitas kanal tersebut muncul pada hasil pengukuran. Apabila semakin mendekati nilai satu pada sumbu Y, maka probabilitas nilai kapasitas kanal tersebut muncul akan semakin sedikit. Grafik CDF sangat berguna untuk mempermudah melihat probabilitas suatu nilai muncul pada tiap kejadian yang terjadi, sehingga dapat validasi nilai kapasitas yang terukur pada saat implementasi kedepannya. Pada gambar 4.1 menampilkan analisis statistik kapasitas konfigurasi MIMO 2x2 dengan SISO.



**Gambar 4.1** Grafik CDF MIMO 2x2 dan SISO link SBY-MKQ

Pada konfigurasi SISO, dari keempat konfigurasi yang ada yaitu h11, h12, h21, dan h22 menghasilkan nilai kapasitas kanal yang berbeda-beda namun nilainya berdekatan. Pada MIMO 2x2 ada 20% probabilitas kapasitas kanal lebih kecil dari 50 bps/Hz sedangkan pada SISO dengan probabilitas 20% kapasitas kanal lebih kecil dari 30 bps/Hz. Ini menunjukkan bahwa kapasitas kanal dengan konfigurasi MIMO 2x2 lebih besar daripada konfigurasi SISO.

#### 4.4 Sintesis

Berdasarkan hasil pengolahan data pada subbab sebelumnya, didapatkan hasil bahwa sistem komunikasi *High Frequency* (HF) dengan menggunakan konfigurasi MIMO 2x2 memiliki nilai kapasitas kanal yang paling besar dibandingkan konfigurasi SISO. Artinya dengan menggunakan konfigurasi MIMO 2x2 informasi yang dilewatkan pada suatu kanal akan semakin banyak. Dengan Perbandingan nilai kapasitas yang terendah dengan nilai kapasitas pada konfigurasi MIMO, akan terjadi peningkatan hampir dua kali lipat. Apabila kita melihat dari nilai respon kanal pada pengukuran link Surabaya-Merauke baik pada kanal h11, h12, h21, maupun h22 memiliki nilai yang berbeda satu dengan yang lainnya. Apabila semakin besar nilai suatu respon kanal, maka kemungkinan nilai kapasitas kanal yang terukur akan semakin besar juga.

Dari hasil perhitungan kapasitas, terhitung bahwa kapasitas kanal MIMO Lebih besar dibandingkan konfigurasi lainnya dengan rata-rata kapasitas kanal sebesar 52.8668 bps/Hz pada pengukuran Surabaya-Merauke. Apabila dibandingkan dengan konfigurasi SISO yang umum



digunakan, memiliki rata-rata nilai kapasitas sebesar 32.8349 bps/Hz untuk kanal h11, kanal h12 memiliki rata-rata nilai kapasitas sebesar 32.4668 bps/Hz, kanal h21 memiliki rata-rata nilai kapasitas sebesar 31.4188 bps/Hz, dan untuk kanal h22 memiliki rata-rata kapasitas sebesar 30.5661 bps/Hz. Maka terjadi kenaikan nilai kapasitas sekitar 1.5 hingga 2 kali peningkatan. Perlu diingat bahwa hasil kapasitas yang terhitung merupakan hasil nilai maksimal hasil perhitungan. Apabila diimplementasikan dalam kenyataan (throughput) bisa berbeda.

Pada penelitian ini memang tidak dilakukan uji yang dimana pada kondisi SNR yang berbeda. Karena Fokus dari penelitian ini adalah seberapa besar peningkatan kapasitas kanal MIMO 2x2 jika dibandingkan dengan menggunakan konfigurasi SISO yang umum digunakan.

*( Halaman ini sengaja dikosongkan )*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah melakukan penelitian Tugas Akhir dan mendapat hasil, maka bisa ditarik kesimpulan seperti dibawah ini:

1. Kapasitas kanal konfigurasi MIMO 2x2 lebih besar jika dibandingkan dengan konfigurasi SISO
2. Sistem komunikasi HF link Surabaya-Merauke dengan konfigurasi MIMO 2x2 memiliki nilai rata-rata kapasitas sebesar 52.8668 bps/Hz.
3. Sistem komunikasi HF link Surabaya-Merauke dengan konfigurasi SISO memiliki nilai rata-rata kapasitas sebesar 31.8217 bps/Hz.
4. Sistem komunikasi HF dengan konfigurasi MIMO 2x2 memiliki peningkatan kapasitas kanal maksimal sebesar dua kali lipat.
5. Jumlah informasi yang bisa dikirim dan diterima dengan konfigurasi MIMO 2x2 lebih banyak dibanding dengan konfigurasi SISO karena kapasitas kanal konfigurasi MIMO lebih besar.
6. Untuk komunikasi Surabaya-Merauke baru bisa dilakukan mulai pukul 19:00 WIT dikarenakan kondisi ionosfer yang baru memungkinkan untuk melakukan komunikasi.

#### **5.2 Saran**

Dalam melakukan pengembangan sistem komunikasi HF MIMO 2x2 kedepannya, dapat diperhatikan beberapa hal sebagai berikut:

1. Melakukan pengukuran lebih lanjut dengan jumlah data yang lebih banyak dan dengan kondisi pengambilan data yang relatif sama seperti waktu maupun frekuensi.
2. Mencari dan mengimplementasikan metode peningkatan kapasitas kanal yang dapat digunakan pada sistem komunikasi HF.

*( Halaman ini sengaja dikosongkan )*

## **Daftar Pustaka**

- [1] Rappaport, Theodore S, “Wireless Communication Principles and Practice”. Prential Hall, USA. 2002
- [2] Australian Government. “IPS Radio and Space Service, Introduction to HF Radio Propagation.pdf” Sidney, Australia. 2007.
- [3] Freeman, Roger L , Radio System Design for Telecommunication, USA: John Wiley & Son, 2007.
- [4] Foose, B.“High Frequency Communication – an introductory overview,” HIARC meeting. 2012.
- [5] L.F. McNamara, “The Ionosphere: Communications, Surveillance, Direction Fnding”. Krieger Publishing Company, Florida, 1991
- [6] Davies, Kenneth. “Ionospheric Radio”. Peter Peregrinus Ltd. United Kingdom. 1990.
- [7] Ben A. Witvliet, “ The importance of circular polarization for diversity reception and MIMO in NVIS propagation”, IEEE The 8th European Conference on Antenna and Propagation (EuCAP 2014), 2014.
- [8] Alamouti, S.M. “A simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications”. IEEE Journal on select Area in Communications, Vol. 16, No.8, 1998.
- [9] Isma Choiriyah. “Analisa Korelasi Kanal dan Kapasitas HF MIMO NVIS”. Elektro ITS, Surabaya, 2017
- [10] William Mendenhal, Robert J.Beaver, Barbara M.Beaver. “Introduction to Probability and Statistics”. BROOKS/COLE, USA, 2013
- [11] J. G. Proakis and Masoud Salehi, “Digital Communication 5<sup>th</sup> edition”. Mc Graw Hill, New York, 2008.

*( Halaman ini sengaja dikosongkan )*

## LAMPIRAN

### A. Lembar Pengesahan Proposal

Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Elektro - ITS

EE 184801 TUGAS AKHIR – 6 SKS

05 SEP 2018

Nama Mahasiswa : Tony Joshua  
Nomor Pokok : 07111440000122  
Bidang Studi : Telekomunikasi Multimedia  
Tugas Diberikan : Semester Gasal Th. 2018/2019  
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D  
2. Dr. Ir. Achmad Mauludyanto, MT.

Judul Tugas Akhir : Pengukuran dan analisis statistik kapasitas kanal MIMO 2x2 pada link Surabaya-Merauke (*Measurement and statistical analysis of 2x2 MIMO channel capacity on Surabaya-Merauke link*)

**Uraian Tugas Akhir :**  
Sistem komunikasi *High Frequency* (HF) adalah sistem komunikasi yang memanfaatkan gelombang *sky wave* sehingga gelombang dipancarkan ke atmosfer kemudian dipantulkan oleh ionosfer. Sistem komunikasi HF menggunakan spektrum frekuensi 3-30 MHz dan bisa dipakai untuk berkomunikasi dengan jarak yang jauh yaitu 80-600 km. Sistem komunikasi HF memiliki kelebihan, yaitu sistem ini menggunakan peralatan yang relatif murah dan mudah untuk diimplementasikan. Sistem komunikasi HF dipengaruhi oleh kondisi ionosfer seperti ketinggian lapisan ionosfer, letak geografis, aktivitas matahari, cuaca bumi, dan sebagainya. Untuk meningkatkan ketersediaan kanal yang terbatas pada sistem komunikasi HF *Single Input Single Output* (SISO) maka akan diimplementasikan antena *Multi Input Multi Output* (MIMO) 2x2 dengan memasang 2 buah antenna yang dipasang orthogonal pada masing-masing pemancar dan penerima.

Pengukuran dilakukan dari Surabaya-Merauke, dimana pengukuran ini akan dilakukan dari Surabaya sebagai transmitter lalu Merauke sebagai receiver. Dari hasil pengukuran tersebut akan dicari statistik kapasitas kanal HF MIMO 2x2 dan perbandingan dengan kanal SISO antara Surabaya-Merauke.

Dosen Pembimbing I,  
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.  
NIP. 197011111993031002

Dosen Pembimbing II,  
Dr. Ir. Achmad Mauludyanto, MT.  
NIP. 196109031989031001

Mengetahui,  
Ketua Program Studi S1  
Dedet C. Ritwan ST., M.Eng., Ph.D.  
NIP. 1973111192000031001

Menyetujui,  
Kepala Laboratorium Antena dan Propagasi  
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.  
NIP. 197011111993031002

### B. Script Program Matlab Perhitungan Respon Kanal dan Kapasitas Kanal

%% Data yang akan diolah

```
data_Rx = xlsread('E:\Kuliah\Tugas Akhir\RABU\23.25\IQ  
9MHz diterima.csv');
```

```
r1 = (reshape(data_Rx(1,:)' + 1i*data_Rx(2,:)',1,[]));
```

```

r2 = (reshape(data_Rx(3,:)' + 1i*data_Rx(4,:),1,[]));
figure(1)
plot(linspace(-100000,100000,length(r1)),abs(fftshift(fft(r1))));
grid on
title('Baseband power spectrum sinyal ch 1');

figure(2)
plot(linspace(-100000,100000,length(r2)),
abs(fftshift(fft(r2))));
grid on
title('Baseband power spectrum sinyal ch 2');
%% Perkalian masing2 Rx dengan carrier signal
Fs=100000;
t=(1:16000)/Fs;
fc1 = cos(2*pi*25000*t/2);
fc2 = cos(2*pi*75000*t/2);
rfch_0 = r1(1:16000).*(fc1); %ch1 adalah Rx1;
rfch_02 = r1(1:16000).*(fc2); %ch1 adalah Rx2;
rfch_1 = r2(1:16000).*(fc1); %ch2 adalah Rx1;
rfch_12 = r2(1:16000).*(fc2); %ch2 adalah Rx2;
figure(3);
plot(linspace(-100,100,length(rfch_0)),
abs(fftshift(fft(rfch_0))));
grid on;
title ('Hasil kali spektrum ch 1 dengan fc 1');
figure(4);
plot(linspace(-100,100,length(rfch_02)),
abs(fftshift(fft(rfch_02))));
grid on;
title ('Hasil kali spektrum ch 1 dengan fc 2');
figure(5);
plot(linspace(-100,100,length(rfch_1)),
abs(fftshift(fft(rfch_1))));
title ('Hasil kali spektrum ch 2 dengan fc 1');
grid on
figure(6);
plot(linspace(-100,100,length(rfch_12)),
abs(fftshift(fft(rfch_12))));

```



```

grid on
title ('Hasil kali spektrum ch 2 dengan fc 2');
% Filter %
M = 800;
for n= 1:M;
if (0<=n) && (n<=M);
w(n)=0.54-0.46.*cos(2.*pi.*(n)/M);
else
w(n)=0;
end
end
y11 = conv(rfch_0,w);
y11pt = y11(400:16399);
y11m=fftshift(fft(y11pt));
h11 = mean(y11m([8000 8001]));
figure(8)
plot(linspace(-100,100,length(rfch_0)),abs(y11m));
title('Respon Kanal h11')
xlabel('Frekuensi (Hz)')
ylabel('Signal Magnitude')
grid on
y12 = conv(rfch_02,w);
y12pt = y12(400:16399);
y12m=fftshift(fft(y12pt));
h12 = mean(y12m([8000 8001]));
figure(9)
plot(linspace(-100,100,length(rfch_02)),abs(y12m));
title('Respon Kanal h12')
xlabel('Frekuensi (Hz)')
ylabel('Level Sinyal, X(f)')
grid on

y21 = conv(rfch_1,w);
y21pt = y21(400:16399);
y21m=fftshift(fft(y21pt));
h21 = mean(y21m([8000 8001]));
figure(10)
plot(linspace(-100,100,length(rfch_1)),abs(y21m));
title('Respon Kanal h21')

```

```

xlabel('Frekuensi (Hz)')
ylabel('Level Sinyal, X(f)')
grid on
y22 = conv(rfch_12,w);
y22pt = y22(400:16399);
y22m=fftshift(fft(y22pt));
h22 = mean(y22m([8000 8001]));
figure(11)
plot(linspace(-100,100,length(rfch_12)),abs(y22m));
title('Respon Kanal h22')
xlabel('Frekuensi (Hz)')
ylabel('Level Sinyal, X(f)')
grid on
% Menghitung Kapasitas MIMO
pt = 50 ; % daya pancar
pete = 1/(sqrt(pt)); % satu per akar daya pancar
H = pete.*[h11 h12;h21 h22]; % matriks MIMO 2x2
Hh = H'; % transpose conjugate matriks MIMO 2x2
Rss = eye(2); % matriks identitas 2x2
matriksH = H*Rss*Hh; % perkalian matriks
% penoise=z^2; % daya noise rata-rata
penoise = 0.00000596;
kali = (pt/penoise).*matriksH; % perkalian daya noise dengan
hasil kali matriks
jumlah = eye(2,2) + kali; % penjumlahan matriks identitas dan
matrik kali
detjum = det(jumlah); % determinan dari jumlah
% kapasitas = abs(log(detjum)/log(2));
kapasitas = log2(real(detjum));
% Menghitung Kapasitas SISO
C11 = log2(1+((pt/penoise)*((abs(h11))^2)));
C12 = log2(1+((pt/penoise)*((abs(h12))^2)));
C21 = log2(1+((pt/penoise)*((abs(h21))^2)));
C22 = log2(1+((pt/penoise)*((abs(h22))^2)));

```

## C. Membuat Cumulative Distribution Function

```

CsortSISOh11 =
sort(xlsread('E:\Kuliah\Tugas

```

```

    Akhir\respon dan kapasitas.xlsx', '1',
    'F3:F108')));
CsortSISOh12 =
sort(xlsread('E:\Kuliah\Tugas
    Akhir\respon dan
    kapasitas.xlsx', '1', 'G3:G108')));
CsortSISOh21 =
sort(xlsread('E:\Kuliah\Tugas
    Akhir\respon dan
    kapasitas.xlsx', '1', 'H3:H108')));
CsortSISOh22 =
sort(xlsread('E:\Kuliah\Tugas
    Akhir\respon dan
    kapasitas.xlsx', '1', 'I3:I108')));
CsortMIMO = sort(xlsread('E:\Kuliah\Tugas
    Akhir\respon dan
    kapasitas.xlsx', '1', 'J3:J108')));
datavolume = 106 ;
    cdf = linspace(0,1,datavolume);
plot(CsortSISOh11,cdf);
hold on
plot(CsortSISOh12,cdf);
hold on
plot(CsortSISOh21,cdf);
hold on
plot(CsortSISOh22,cdf);
hold on
plot(CsortMIMO,cdf);
hold on

```

#### D. Nilai Respon Kanal Link Surabaya-Merauke

h11	h12	h21	h22
-	0.8833555607	1.5406159431	0.7946101954
17.364273096	04985 +	50115 -	77894 +
648887 -	6.4614676188	10.559247095	0.4344355021
13.504876858	85464i	963089i	41140i
246737i			
-	10.532666911	-	-
74.826080272	129283 +	9.7762645164	22.303238835

764020 + 72.204158062 737800i	31.325604102 822467i	67776 - 15.286031632 304667i	973957 - 10.729047410 265107i
- 6.7903118072 23935 + 92.347279854 368030i	24.583864710 546750 - 33.992640199 057824i	- 42.113587998 456985 - 31.905949416 652213i	7.8993453286 54277 + 5.6446433720 73881i
- 20.310179863 868402 + 47.438268821 701840i	4.1536471004 20647 + 56.950966831 035500i	13.796743969 936047 - 28.103025985 218643i	- 14.894716787 776396 - 18.672520619 633282i
52.000467275 640816 - 49.661521053 486760i	- 19.878279798 064163 - 29.655745519 564170i	9.0824345497 62601 + 39.506698157 229934i	15.810165869 063495 - 23.058643172 635300i
- 16.586168288 610150 + 77.479972323 121600i	- 34.104975363 027556 + 48.086832652 071450i	- 43.232516816 585320 + 17.111304979 150212i	- 15.001881343 987968 - 20.554166120 884270i
16.120407809 420800 - 49.512432515 585870i	40.112659118 361600 + 67.055975729 209980i	11.292306318 016967 + 38.809555427 171700i	- 16.321251949 066284 + 8.5221212952 72088i
- 2.4935761568 55726 + 6.9678863061 61648i	10.459427985 299550 - 18.073544720 480907i	- 1.8064179205 05248 + 1.2368504480 01529i	5.7585401103 19029 + 18.547723091 294753i
- 10.916857899 554326 + 9.6723566271 05227i	- 20.058004011 432786 + 5.9827823509 11253i	- 3.5674236242 23920 + 0.2188115813 65035i	- 17.009960537 677650 - 8.0088132858 31748i

10.700601065 288208 + 16.884375278 324470i	5.2970494287 16298 + 20.986964120 898918i	- 2.3314339297 76022 - 3.9214191742 92755i	- 2.6036763190 28860 - 22.946848904 675825i
6.6929965737 09832 + 10.125512296 114880i	- 3.0730370487 70515 - 33.379158821 095270i	- 5.0470567431 73219 - 6.3592178894 25676i	- 12.552129149 721218 + 10.800267343 000260i
- 20.061447726 038985 - 0.2270036434 90030i	10.302924342 300393 - 52.956717836 700435i	- 3.9719244609 16120 - 8.2012075625 98345i	2.4751627341 85195 - 1.0670655409 81530i
- 11.739344364 620383 - 10.932943214 703945i	28.699126941 190578 - 30.570832020 589740i	- 2.8717657065 57013 - 5.7343494278 60680i	- 2.0079737350 85324 + 6.1190961805 21497i
- 8.9986664999 04220 + 29.488575928 000273i	- 3.8217332306 38259 - 8.3297621148 65682i	- 5.1258771784 39570 + 4.2390025365 79264i	- 5.6195244433 15664 - 2.9228521804 52616i
83.841401606 887260 + 23.109786118 730682i	- 61.076669928 809350 - 13.572483206 444794i	- 14.662770334 829230 + 48.319366581 931654i	26.812074717 839685 - 7.7785897599 92944i
39.257376442 492210 - 30.429742482 092020i	17.939049812 465590 - 14.869695665 128125i	6.4136750681 17483 + 6.2815614983 46562i	5.8102445533 38984 + 25.326735726 098190i
- 33.651788324	- 11.362533836	- 9.7967459613	5.3292094543 30151 -

210260 - 17.857828766 961830i	924602 - 6.2959047473 43140i	94269 - 14.371107131 658825i	8.4133558487 61515i
- 81.851509566 450200 + 13.271047581 257445i	22.096332372 471927 - 5.2996161461 72925i	11.016286743 494197 - 33.402384713 517250i	- 5.9647191903 57913 + 2.8634251765 24840i
26.080051948 328283 - 29.677514319 568637i	12.279007680 736974 - 8.8726159659 47507i	- 24.194147155 464980 + 11.642103506 253970i	1.7430508939 84071 + 1.2803024090 53345i
- 17.296897120 062933 + 4.0300752547 71091i	- 12.520902512 520378 + 19.665905214 446540i	- 8.5945029201 36058 - 4.5621622273 03219i	- 8.1888878850 08205 - 13.007117351 501144i
- 10.857627965 478894 - 41.087354005 568330i	0.5385467550 26939 - 20.108231247 489080i	31.449242022 740783 - 5.8446349043 98703i	5.6997247052 18852 + 3.1505030816 78096i
76.172027277 957300 + 8.4626154639 95357i	23.913899442 697230 + 35.265430607 142280i	- 23.018050639 044894 + 59.950786835 571286i	- 14.869368978 108213 + 2.1294488012 82521i
79.242938043 502590 + 26.470529423 951890i	11.652571041 658050 - 44.617343352 579454i	- 53.203505297 755925 + 12.772392900 234195i	26.273943294 825860 + 9.9438574074 46028i
- 58.456434834 364150 - 9.1680762504 87555i	- 54.975383070 815500 - 19.161115661 238313i	40.832443407 901366 - 6.7949051409 29451i	24.974208341 571412 + 3.0355861670 47739i

- 29.317455857 831643 + 9.7649713372 12874i	48.285936771 766620 - 51.050210867 131600i	11.612294036 426878 - 19.183732687 136754i	- 12.659562354 632701 + 55.372071143 996480i
12.084153385 574480 + 1.1625059711 20315i	- 10.464382245 952010 - 18.295684933 508554i	- 3.2772646844 92360 + 4.4120800137 46562i	- 3.8598036915 44895 - 11.744656427 651195i
- 5.3701231088 31466 + 5.1614781995 16722i	53.638130304 383616 + 47.127965217 031590i	- 12.297323338 362801 - 12.314599747 699507i	- 43.886240393 288400 - 17.793202917 401160i
- 0.9100495629 86252 - 10.389356132 302776i	24.300123427 955110 + 12.141656509 938151i	3.8826958559 71690 - 8.2758785242 44732i	- 2.6990031935 34056 - 0.1122613833 89457i
- 6.9199429654 10644 - 10.727000080 372958i	- 34.665799486 450750 - 20.355338571 400587i	15.088560584 254028 - 10.877727509 734793i	18.986702536 086625 - 15.084651878 630535i
- 1.7830888752 82433 + 33.285278187 823990i	- 31.016233014 204406 - 26.930821287 622422i	- 15.620085859 230741 + 0.0117554522 67555i	26.362013990 442335 + 0.0926250595 03483i
- 7.6122681539 08660 + 3.8270570156 52905i	- 2.2168774846 84965 - 16.684189349 116550i	9.8225898489 66821 - 13.845882776 867382i	3.4941914378 28630 + 10.649744848 919354i

- 26.995837919 610075 + 9.5759352247 17488i	- 30.072481617 976123 - 24.883531815 661076i	1.9624454000 34068 + 5.0127572971 77779i	7.3958927760 30232 - 14.072886408 292586i
- 14.650768123 315800 - 3.8248690687 78995i	11.009547612 228179 - 1.7905434778 08241i	- 11.315745989 440169 - 12.158970795 475772i	- 12.557325890 784117 + 5.7504568843 19393i
- 18.009656845 758627 - 30.573984618 967480i	35.054267999 662030 + 9.4979099647 61394i	39.428676819 876120 - 19.272036316 024430i	- 10.991191615 739600 + 20.582780262 269146i
24.209646754 276270 - 74.577461949 770270i	35.366130351 223596 + 10.314379404 626970i	82.682246005 180500 + 58.672104188 289800i	- 19.890853596 882458 + 7.9974925543 03570i
- 99.149684168 723600 - 40.426840270 957996i	- 9.2838922719 14068 - 33.872016461 849930i	21.181931041 499602 + 8.0949334179 33085i	14.974517090 807067 - 2.2476746123 87181i
- 43.355545413 036250 - 42.776501666 322790i	- 26.924562053 150822 + 6.2047258612 12134i	42.355476243 253335 - 1.7102549711 13419i	- 5.8204132327 74392 - 66.255395262 753070i
15.521199789 375910 + 31.142718880 579558i	- 48.963635370 297690 + 17.129880833 917188i	- 25.561099918 357463 + 2.8840887736 42700i	1.1488577164 25920 - 39.620679064 594100i
1.2834685952 28640 -	4.7094518800 55592 -	3.5369564146 85221 -	15.949170514 519405 +



12.657112180 077853i	28.555197901 942100i	5.5584094805 05606i	19.667618390 471900i
10.904888921 583620 + 11.525495782 625306i	- 10.602083946 542620 - 8.6000567542 85294i	- 5.1698098464 05980 + 18.767964539 763610i	0.3399936206 95221 - 4.9423970311 01050i
18.990992470 239767 + 33.335056674 884704i	- 16.634362486 614457 + 3.4446980086 31510i	- 31.034640614 914107 + 22.520345398 344760i	6.3839349591 99289 - 3.1634228619 49183i
- 16.996046885 130290 + 34.313381077 413210i	- 2.2096488164 52178 - 3.1881150641 14010i	- 19.663448154 794470 + 24.674806110 767776i	7.8143723477 79186 - 2.0149915529 30265i
41.828002594 782575 + 52.708515489 359690i	0.9993435969 39792 + 14.630580805 091055i	- 34.589541812 942460 + 24.223327073 753143i	- 5.5711202575 05445 + 2.2280943531 94411i
- 19.611307741 032018 + 0.7158491451 05050i	1.7822955229 45741 + 9.3772135584 90660i	0.0713420124 05863 - 6.1508656232 18351i	7.4565592282 33711 + 6.1659886255 68918i
- 2.7776683150 52074 + 4.8461409572 69199i	16.118678976 586803 - 0.0895055093 86431i	5.2607800680 25601 - 20.792715733 334276i	0.5410958301 88354 + 13.162332908 531095i
8.2145191678 81985 - 12.656272115 665270i	- 11.716901058 511468 + 5.7743201597 42865i	18.110431683 453527 + 17.952538704 882360i	6.3562513973 98400 - 11.994919553 658459i

32.760029663 377000 + 39.310118942 882546i	- 22.947262615 078188 - 3.5376428930 48199i	- 10.171872743 986960 + 18.323510236 679965i	9.9418323633 71109 - 18.616628265 793715i
- 8.1716192134 90600 + 72.317691009 917710i	46.966710182 527976 + 17.671778689 618037i	- 47.909063488 953194 - 15.568582055 122342i	- 1.0234057455 00834 + 13.010790687 527132i
45.071771377 499100 + 12.130512232 209277i	1.4923344544 23128 - 14.326414536 362195i	- 19.833898608 313150 - 5.9154310840 51420i	- 1.8169669637 03409 + 0.3660981870 98780i
10.410610660 661932 + 7.5643631852 18568i	- 3.2455357972 60605 + 4.8730702751 38383i	- 2.6266408730 47274 + 1.8051651112 04173i	- 5.5603734672 76496 + 4.6794880762 27501i
- 25.946155745 473654 - 6.7547099535 61005i	1.3636947946 68940 + 14.153814874 044969i	- 3.4415717423 74215 - 6.3499979092 55759i	5.9335110931 11973 + 2.1529047140 93302i
31.576764697 883620 - 14.719712106 206536i	- 10.155612489 007945 + 16.361430740 794262i	18.172402673 190620 + 14.386610370 592038i	- 12.211465444 218558 + 3.0327142707 95879i
- 0.7929809423 20931 - 46.226320072 228090i	26.232033007 230840 + 14.585431405 444027i	23.925030442 007202 + 13.431635572 081394i	- 1.9965535650 87584 + 10.130042402 873258i

- 7.3692269771 22133 + 21.460491097 364677i	42.677380341 603794 + 6.7007945404 93015i	- 19.975894248 661250 + 22.073095333 514340i	28.554557803 985343 + 49.346668527 307150i
7.0211073377 14136 + 12.818067979 274968i	- 2.8519432243 48772 + 15.057442461 696404i	- 20.358147301 900836 - 7.0566957851 88168i	- 18.239197600 488225 + 0.2611191179 63792i
- 6.4513047958 05283 + 5.2367575140 52716i	- 7.0729847789 34466 + 7.7910865506 50990i	- 2.8895157503 93655 + 17.907965278 361733i	- 10.995352605 021967 + 13.380387606 585558i
- 16.369752070 405910 + 6.9772350321 53522i	- 12.906083128 903559 + 25.701027213 662606i	- 18.110494615 631630 - 24.309541402 647820i	- 36.576245662 506864 + 24.907829497 032317i
- 18.066220161 051370 - 1.9740786111 96099i	- 2.0942248879 28950 - 9.0129024166 60907i	72.777315378 527050 - 18.746603871 683290i	18.737586948 104735 - 5.9048406139 96687i
- 2.3195343117 80084 + 8.8805573132 69389i	- 26.584578987 172910 + 1.2191145601 25429i	- 45.005036663 321220 + 20.578362074 478818i	50.274035929 942700 + 29.700188718 056190i
5.5202305598 42062 - 18.272598158 022838i	1.5196189532 58664 + 4.5948701309 35742i	- 79.280629694 267630 + 50.932213110 083450i	- 20.507549992 722040 - 25.218740144 156430i

27.710930735 574777 + 5.8525286542 07356i	- 5.0227207917 07336 + 4.4545351111 25013i	- 6.5101317106 69674e+01 - 1.5700250744 37372e+02i	- 5.7537984047 62991 - 35.785277215 977900i
- 34.436594648 206835 + 20.703011090 419900i	- 55.769314125 874800 + 27.626534687 862417i	- 94.443921045 129540 - 26.560976843 575048i	27.375596615 478823 - 53.960935182 498460i
- 31.322340183 911205 + 30.227992035 942925i	29.679465746 120993 + 71.840945493 300920i	- 2.8009525002 52923e+02 - 4.0790813600 37078e+01i	17.139515407 459108 - 87.177927128 843490i
- 17.797798243 326056 + 19.762082550 760920i	- 0.1918008361 21146 - 9.1100055904 31637i	- 97.602185526 760170 - 89.907322349 300390i	- 9.0255425196 72996 + 23.021883573 513260i
- 15.434835757 973794 + 8.9879841242 08449i	11.110153561 657214 + 21.465718521 904230i	- 22.978256458 327520 + 29.709709144 369842i	62.962517631 751226 - 78.345682329 013880i
3.5771541714 42931 - 8.8904520357 89068i	- 1.0008571911 41732 + 3.1251523905 17833i	7.0162249930 31398 - 14.380492372 193010i	- 21.453539370 442453 + 20.307174684 752773i
- 2.6703077834 39216 - 2.6863326717 75905i	- 9.2444476932 19556 + 10.805803232 262582i	3.3026594912 49999 + 8.5457772748 83260i	24.688583263 934362 - 16.485677165 987013i

1.1689609191 84851 - 0.6918881017 69231i	- 3.8599469096 93121 - 4.5019847814 68616i	- 2.4775055021 43188 + 0.8320828252 95862i	0.4189734621 38277 + 9.5961836890 28180i
- 0.9974469264 95330 - 1.0084964035 44147i	- 3.6321390906 94852 + 2.8472145228 06801i	1.6858707594 12806 + 2.2214533182 45719i	15.520268890 620795 + 7.3295917550 84700i
- 0.6962712307 24564 + 0.9759591180 56618i	4.4064843390 55011 + 3.8905483368 00879i	- 0.6551970697 59077 + 3.2026229167 48385i	9.5448519882 96895 - 33.713328818 314466i
0.9754383077 83765 - 1.7008003962 31197i	6.2327927962 10656 - 3.6112236002 79883i	0.5229158200 33091 - 0.6608199731 26500i	- 20.611802039 565525 + 19.008150533 461098i
- 0.3995440288 26132 - 0.4017478467 89488i	- 5.8382288299 05886 - 12.081851333 756667i	- 2.6890246463 42974 + 0.2200909869 37326i	7.0838685792 04881 + 6.7861270393 29025i
- 0.2449373565 80712 + 0.2777323136 15737i	0.3124904701 70221 + 5.1868130208 51426i	- 0.9598937195 37009 + 1.5404297808 97231i	- 5.6169923105 58550 - 4.5939317065 38530i
0.4908225009 83596 - 0.7285175696 08599i	- 7.2208293761 70359 - 5.1951776840 02341i	1.9164345365 86634 - 1.0145040228 77415i	7.2656295054 53451 + 14.790110767 865242i

0.8724562570 85678 - 0.0239871556 50948i	- 0.2859134778 65674 + 0.8181554968 23245i	- 1.2222802724 79385 - 0.4001937533 22530i	- 5.1208559284 36253 + 13.595572313 745870i
1.6841537991 52164 - 3.0322446042 21332i	- 4.6576419838 53444 - 2.4715035011 61606i	- 0.6553161930 49827 + 0.2084930327 28929i	- 3.9327899791 08185 + 16.069592949 638533i
- 0.2094527325 17515 - 0.4706310361 75517i	5.6091144637 22380 - 4.0989064939 57979i	0.2867014315 61337 + 2.2443028603 69565i	- 4.5998512792 53868 - 4.9240187655 72364i
- 2.4977498947 66046 + 1.0950308382 21437i	- 3.8856190880 44712 + 0.3934749441 44631i	1.3026617574 20975 + 3.3085058043 71849i	- 0.1608863485 17813 + 15.582773053 046367i
- 22.507985984 668900 + 4.2707536906 59301i	- 3.5290200068 22976 + 7.7837192714 36219i	18.260257828 402030 + 37.173206128 271765i	- 10.633931402 783633 + 9.8965234360 12746i
- 19.556130349 364956 + 23.333790679 790830i	1.7165693394 38947 + 53.051632043 681884i	63.043498290 923690 - 7.8638513681 63655i	47.330838247 359850 - 37.401319650 820520i
33.683315604 572820 + 5.3932424873 26530i	- 2.5867606900 42132 + 43.656747470 474166i	11.4237111313 532575 - 49.138056520 128530i	41.034309899 132055 - 5.4194656769 33566i

3.6319889780 80740 - 3.0231765222 01275i	- 13.285236762 866317 + 31.155984348 567053i	2.9277641898 17210 + 16.229884335 146114i	20.387411940 009592 - 4.6558860578 61897i
- 1.3820865882 54542 - 5.3669027218 33146i	- 18.045556903 877227 + 15.991123534 067542i	1.4722137867 54639 + 1.6839048939 30033i	28.417298386 146904 + 14.515971498 630968i
- 4.4230265651 58438 - 3.3214466913 38119i	0.0670223419 01436 + 7.3019173589 35311i	- 13.649877468 922792 + 8.3533308400 61750i	34.269856073 890600 - 34.784483255 122480i
11.379651393 838039 + 14.838126514 453396i	- 14.638551381 002786 + 8.2739239000 28894i	30.430912651 675370 - 8.0045134781 66160i	43.019163990 974940 + 17.443279063 620082i
- 0.7224991431 99482 + 10.274276370 061333i	2.2247172264 43758 - 6.5088766947 17559i	- 2.8300031135 17543 + 12.342838449 243569i	- 1.9529602037 31904 - 11.386964155 651140i
- 3.8353141973 89283 - 7.4664190840 53380i	1.1268652093 72762 + 21.113912477 441932i	- 6.0365953340 23183 + 2.7925778775 12259i	19.331303098 015255 - 34.952300317 663440i
1.2816889407 53395 + 12.857908609 861490i	- 1.0985180829 67667 + 21.544559837 440300i	- 6.3392805731 07335 - 9.9755063871 57587i	14.174443429 156536 - 19.213096077 841260i

- 44.017288525 149400 - 46.647506496 487950i	11.618666361 594748 - 7.2037224383 75595i	- 10.331385219 724327 + 67.209479748 990280i	- 44.779158638 176770 - 13.641376925 604428i
- 14.566423244 205387 + 19.896927386 005320i	- 0.0956638217 14038 + 13.704022523 259283i	24.240091222 724597 + 7.5828059008 04575i	35.660437291 674910 - 15.796021573 312310i
4.4160871473 15118 + 35.142796011 868334i	3.4367508927 84261 - 5.0576682818 19137i	16.683689733 563753 - 55.541950618 007190i	- 10.440779630 680609 - 0.7433323638 03816i
6.1686358212 79051 - 1.0660419613 57071i	- 3.0150804709 63763 - 12.942072974 234225i	- 32.812411449 099920 - 6.6934465615 28404i	- 27.341529562 197664 + 17.143936038 962070i
- 28.242128344 161430 + 5.5649528649 87904i	21.271733044 894887 - 16.681780183 278280i	47.252157393 167444 + 45.387489015 913964i	- 21.751735313 686744 - 16.638450357 779785i
2.1416273169 89781 - 9.1801462868 19928i	- 5.3409042427 99457 + 10.025049209 674360i	- 5.4821054449 99954 - 22.999785719 877640i	19.199191979 652850 + 23.125740022 601267i
6.7407837468 96706 + 2.2388265370 80421i	- 2.8423679947 92857 + 3.9114327242 47009i	- 15.626687391 641479 - 9.4179810894 04940i	11.396482047 183444 - 9.1283234890 63616i



- 1.3433374216 31119 + 0.3904816058 61175i	1.9871454539 15115 - 24.411818588 495105i	5.2613638104 20611 + 7.5889485009 58125i	- 26.939845037 518140 + 15.461351562 509368i
7.9648860401 84266 - 4.4258332026 22747i	- 8.9229378508 95343 - 14.894068820 078342i	- 34.985051432 700340 - 8.5649441498 74325i	- 34.703552513 044300 - 20.271133170 238176i
- 10.797686362 761326 + 4.0192799104 09169i	- 8.4256403157 59514 - 13.803599645 237142i	7.0211719917 11847 + 18.943394494 983950i	10.850982482 574238 - 13.671231088 596045i
24.597679510 121075 - 25.830393813 015178i	0.6680670655 92506 - 15.620251446 210924i	- 7.4071531101 44661 - 55.627494568 644350i	- 6.3508430800 32798 - 6.1247503218 37068i
- 70.120836466 523310 + 57.612866438 727764i	- 0.6453069826 81231 - 5.3931756114 25084i	1.1075903542 62714e+02 + 1.3082690920 57042e+01i	- 0.1897606677 48379 + 6.1183551845 24166i
22.141589635 852657 - 52.518847899 345204i	13.063290090 886994 - 0.8441401856 74344i	- 99.735260109 566070 + 22.552132421 891613i	11.480933930 682975 - 15.751680482 641607i
- 14.495789421 233008 + 62.583091953 332680i	5.3260637681 55788 - 10.879531543 056483i	98.428771370 718080 - 76.682516889 914960i	- 19.233815531 147634 + 5.4872679051 44434i
- 19.016695824	- 5.6754397950	- 28.732797897	3.8365032264 08627 -

733850 - 16.138067425 387103i	05692 + 0.1729385140 68015i	715102 + 34.897103725 634324i	4.6822465022 59940i
- 12.080517306 864845 + 32.539678299 195260i	9.4512092429 50782 - 7.5102543206 61707i	32.845921314 802460 + 6.4812892970 88343i	3.6623631136 81987 - 5.5051297552 10669i
- 70.826152506 605270 - 25.264973145 520578i	3.6070431810 77550 - 11.263726781 512588i	9.3607835880 01962e+01 + 1.3547433372 64682e+02i	- 16.871481642 019255 + 8.7543923782 87200i
- 69.934229551 159630 - 41.857032775 174666i	13.337754239 844650 - 10.619797588 029090i	44.000770954 914760 + 17.767731219 827393i	5.3958290191 83017 + 8.7827551875 60227i

### E. Nilai Kapasitas Kanal Link Surabaya-Merauke

SISO				MIMO
C11	C12	C21	C22	
31.9187	28.4106	29.8314	22.7141	47.3488
36.4005	33.0932	31.3631	32.2588	56.7787
36.0659	33.7814	34.4470	29.5587	55.9004
34.3789	34.6711	32.9369	32.1562	54.9228
35.3361	33.3160	33.6825	32.6105	56.0175
35.6163	34.7631	34.0782	32.3389	56.9086
34.4049	35.5760	33.6740	31.4053	57.4923
28.7754	31.7685	25.2610	31.5592	49.2812
30.7330	31.7753	26.6753	31.4656	49.9949
31.6425	31.8721	27.3795	32.0590	51.7249
30.2029	33.1340	29.0426	31.0992	50.5603
31.6530	34.5072	29.3758	25.8611	52.2628

31.0077	33.7800	28.3622	28.3743	51.6086
32.8927	29.3923	28.4675	28.3264	49.7753
35.8849	34.9348	34.3163	32.6063	57.6734
34.2687	32.0847	29.3327	32.3993	54.9830
33.5033	30.3988	31.2409	29.6322	51.6344
35.7474	32.0123	33.2728	28.4522	53.2502
33.6083	30.8424	32.4938	25.2258	52.4478
31.3013	32.0863	29.5651	30.8842	51.2074
33.8187	31.6606	32.9990	28.4065	52.0276
35.5202	33.8263	35.0099	30.8179	56.0419
35.7692	34.0544	34.5478	32.6244	56.8371
34.7737	34.7269	33.7428	32.3060	54.4745
32.8993	35.2697	31.9741	34.6558	51.5107
30.2035	31.7953	27.9169	30.2559	50.2503
28.7940	35.3159	31.2427	34.1311	55.1250
29.7652	32.5274	29.3849	25.8675	50.8203
30.3484	33.6584	31.4347	32.1999	52.5381
33.1179	33.7206	30.9308	32.4409	53.6294
29.1819	31.1462	31.1710	29.9731	49.9515
32.6804	33.5733	27.8570	30.9817	53.4595
30.8410	29.9591	31.1080	30.5757	51.7020
33.2983	33.3654	33.9115	32.0888	53.9440
35.5860	33.4065	36.3275	31.8444	57.3272
36.4851	33.2687	32.0063	30.8411	56.1806
34.8571	32.5765	33.8114	35.1111	57.9688
33.2418	34.3940	32.3701	33.6177	45.9752
30.3386	32.7102	28.4399	32.3247	52.1025
30.9760	30.5421	31.5660	27.6173	49.8126
33.5236	31.1729	33.5220	28.6658	53.4831

33.5181	26.9115	32.9594	29.0252	51.5981
35.1447	30.7487	33.8004	28.1701	51.0123
31.5893	29.5096	28.2419	29.5489	50.4475
27.9636	31.0215	31.8456	30.4392	51.4983
30.8308	30.4148	32.3450	30.5259	50.3823
34.3546	32.0745	31.7789	31.7991	53.9164
35.3710	34.2983	34.3094	30.4123	56.2480
34.0893	30.6969	31.7428	24.7806	50.9942
30.3717	28.0994	26.3446	28.7230	47.8943
32.4896	30.6597	28.7052	28.3163	50.3768
33.2454	31.5347	32.0695	30.3068	49.1170
34.0618	32.8153	32.5563	29.7362	53.2564
32.0081	33.8660	32.7917	34.6665	53.2665
30.7389	30.8758	31.8589	31.3783	51.1768
29.1095	29.7910	31.3623	31.2286	48.5279
31.3069	32.6920	32.8439	33.9354	53.4899
31.3677	29.4200	35.4636	31.5924	53.5607
29.3966	32.4682	34.2580	34.7355	56.3957
31.5093	27.5499	36.1164	33.0453	53.0051
32.6478	28.4942	37.8183	33.3595	56.3558
33.6570	34.9195	36.2327	34.8382	60.1854
33.8880	35.5609	39.2899	35.9466	64.0109
32.4663	29.3757	37.1042	32.2562	55.9600
31.3176	32.1905	33.4623	36.3025	56.6966
29.5211	26.4288	31.0003	32.7693	50.4829
26.8428	30.6599	29.3914	32.7836	43.9459
23.8839	28.1363	25.7721	29.5278	40.2703
24.0087	27.4128	25.9593	31.2027	43.3810
23.5235	28.1109	26.4178	33.2618	45.8036

24.9428	28.6975	22.5063	32.6188	46.5586
21.3609	30.4924	25.8639	29.5886	45.4372
20.1337	27.7550	24.7201	28.7186	41.8023
22.6261	29.3063	25.2334	31.0851	44.8674
22.6075	22.5872	23.7262	30.7216	42.2736
26.5888	27.7972	21.9197	31.0966	46.2415
21.0862	28.5930	25.3560	28.5049	42.4635
25.8950	26.9311	26.6604	30.9240	44.3953
32.0359	29.1907	33.7443	30.7214	53.2533
32.8564	34.4603	34.9789	34.8295	56.0059
33.1846	33.9014	34.3136	33.7426	54.3936
27.4811	33.1640	31.0875	31.7727	53.2001
27.9409	32.1834	25.3229	32.9920	49.8464
27.9353	28.7368	31.0007	34.2195	50.6200
31.4499	31.1435	32.9516	34.0735	53.8852
29.7292	28.5643	30.3252	30.0606	47.0841
29.1388	31.8045	28.4674	33.6398	51.0970
30.3835	31.8624	30.1263	32.1551	51.0377
35.0063	30.5461	35.1750	34.0977	56.7503
32.2482	30.5532	32.3334	33.5711	53.2468
33.2930	28.2247	34.7158	29.7757	50.3354
28.2925	30.4644	33.1313	33.0245	51.6153
32.6946	32.5134	35.0678	32.5508	54.8372
29.4736	30.0116	32.1269	32.8193	49.9229
28.6569	27.5472	31.3790	30.7362	42.7287
23.9688	32.2287	29.4141	32.9142	49.7720
29.3756	31.2359	33.3414	33.6577	54.0658
30.0526	31.0309	31.6731	31.2511	52.7576
33.3133	30.9334	34.6209	29.2827	52.9876

36.0079	27.8829	36.6027	28.2278	51.8273
34.6657	30.4210	36.3521	31.5697	55.8303
35.0109	30.1971	36.9264	31.6441	51.3027
32.2811	28.0109	33.9969	28.1955	51.8714
33.2347	30.1873	33.1305	28.4503	52.2328
35.4653	30.1282	37.7270	31.4971	53.0816
35.6977	31.1834	34.1369	29.7315	54.6274

#### **F. DOKUMENTASI PENGUKURAN**







## G. DAYA PANCAR TRANSMITTER







## H. PENGUKURAN VSWR ANTENA







*( Halaman ini sengaja dikosongkan )*

## **BIOGRAFI**



Tony Joshua atau biasa dipanggil Tony, lahir di Jakarta pada tanggal 19 Juli 1996. Bertempat tinggal di Bekasi namun menempuh pendidikan di Jakarta mulai Sekolah Menengah Pertama. Memulai pendidikan di TK Martha Bekasi, lalu menempuh pendidikan di SDS Pamardi Yuwana Bhakti Bekasi, kemudian melanjutkan ke SMPN 255 Jakarta, lalu SMAN 48 Jakarta, dan saat ini melanjutkan studi di Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember di bidang studi

Telekomunikasi Multimedia.