



DISERTASI - EE186601

PEMODELAN KANAL RADIO HF SKYWAVE MULTIPATH MULTIMODE DI DAERAH LINTANG RENDAH

INDAH KURNIAWATI
07111260010008

PROMOTOR

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

CO-PROMOTOR

Dr. Ir. Wirawan, DEA

Dr. Ir. Muhammad Taufik

PROGRAM DOKTOR

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2019



DISERTASI - EE186601

PEMODELAN KANAL RADIO HF SKYWAVE MULTIPATH MULTIMODE DI DAERAH LINTANG RENDAH

INDAH KURNIAWATI
07111260010008

PROMOTOR

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

CO-PROMOTOR

Dr. Ir. Wirawan, DEA

Dr. Ir. Muhammad Taufik

PROGRAM DOKTOR

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2019

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Doktor (Dr.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

INDAH KURNIAWATI
NRP: 07111260010008

Tanggal Ujian: 11 Juli 2019
Periode Wisuda: September 2019

Disetujui oleh:
Pembimbing:

1. Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D
NIP: 197011111993031002



2. Dr. Ir. Wirawan, DEA
NIP: 196311091989031011



3. Dr. Ir. Muhammad Taufik
NIP: 195509191986031001



Penguji:

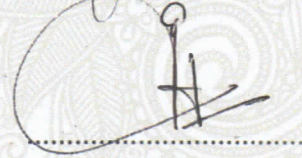
1. Dr. Ir. Buldan Muslim, M.Si
NIP: 196507261991101001



2. Dr. Ir. Puji Handayani, MT
NIP: 196605101992032002

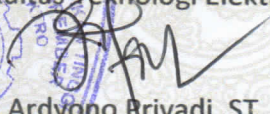


3. Eko Setijadi, ST, MT, Ph.D
NIP: 197210012003121002





Kepala Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro

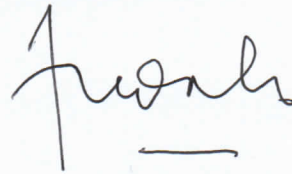

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST, M.Eng
NIP: 197309271998031004

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Disertasi saya dengan judul **"PEMODELAN KANAL RADIO HF SKYWAVE MULTIPATH MULTIMODE DI DAERAH LINTANG RENDAH"** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak sah 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, Juli 2019



Indah Kurniawati

NRP. 07111260010008

PEMODELAN KANAL RADIO HF SKYWAVE MULTIPATH MULTIMODE DI DAERAH LINTANG RENDAH

Nama : Indah Kurniawati
NRP : 07111260010008
Promotor : Prof.Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D
Co-Promotor : Dr. Ir. Wirawan, DEA
Dr. Ir. Muhammad Taufik

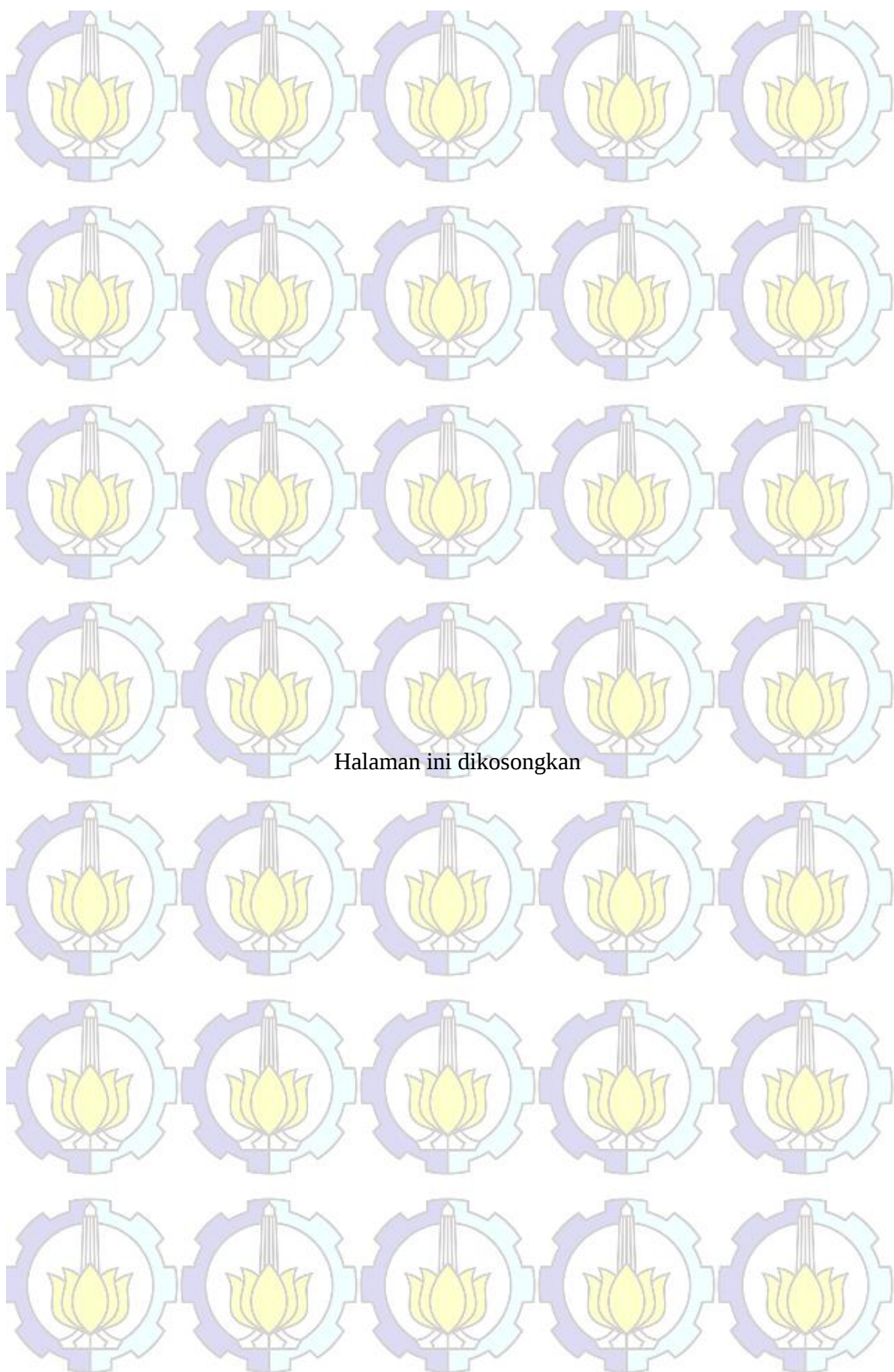
ABSTRAK

Komunikasi dengan *High Frequency* (HF) jarak jauh dengan alokasi 3 – 30 MHz banyak dipergunakan dalam di daerah terpencil dan kurang infrastruktur komunikasi terutama untuk mengatasi mahalnya teknologi satelit dan sebagai alternatif saat terjadi bencana. Penelitian tentang kanal radio HF di daerah lintang rendah masih sangat sedikit dibandingkan dengan penelitian untuk daerah lintang tinggi dan lintang menengah padahal kanal ionosfer pada daerah lintang rendah memiliki karakteristik tersendiri.

Penelitian bertujuan untuk memodelkan secara statistik respons impuls kompleks dari kanal HF jarak jauh dengan parameter seperti *channel gain*, *path gain*, pergeseran fase dan *delay spread*, melalui simulasi dan pengukuran pada link Surabaya-Merauke sejauh 3044 km. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa lintasan yang datang berasal dari mode yang berbeda yang membentuk *cluster-cluster* berdasarkan *delay*-nya. Dari hasil penelitian diketahui bahwa *channel gain* berdistribusi Rayleigh, sedangkan *rms delay spread* dan *maximum excess delay* masing-masing berdistribusi Rayleigh dan Gaussian. Model-model yang dihasilkan dapat dipergunakan untuk merancang sistem komunikasi digital HF pada daerah lintang rendah.

Tujuan kedua dari penelitian ini adalah untuk mengetahui korelasi spasial antar dua link di daerah lintang rendah yang masing-masing berjarak 3044 km dan 1895 km, dengan penerima terpisah sejauh 1900 km. Berdasarkan hasil simulasi yang diverifikasi dengan pengukuran dan simulasi pada tanggal yang berbeda diketahui bahwa kedua link yang terdiri dari multimode dan multihop memiliki korelasi yang rendah yang merupakan hasil dari penjumlahan fase yang acak dan tidak berkorelasi. Dari penelitian ini juga dibuktikan bahwa *site diversity* yang menggunakan *selection combining* dengan dua link yang konvergen dapat meningkatkan *diversity gain* dan menurunkan probabilitas *outage* secara signifikan. Untuk meningkatkan hasil dari *site diversity* dipergunakan *joint space frequency diversity* yang melibatkan dua frekuensi yang memiliki karakteristik diurnal yang berlawanan.

Kata kunci : Kanal radio HF , respons impuls, lintang rendah, multihop, jarak jauh, Site-Diversity, korelasi spasial



SKYWAVE MULTIPATH MULTIMODE HF RADIO CHANNEL MODELING IN THE LOW LATITUDE REGIONS

Name : Indah Kurniawati
Student Registered Number : 07111260010008
Supervisor : Prof.Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D
Co-Supervisor : Dr. Ir. Wirawan, DEA
Dr. Ir. Muhammad Taufik

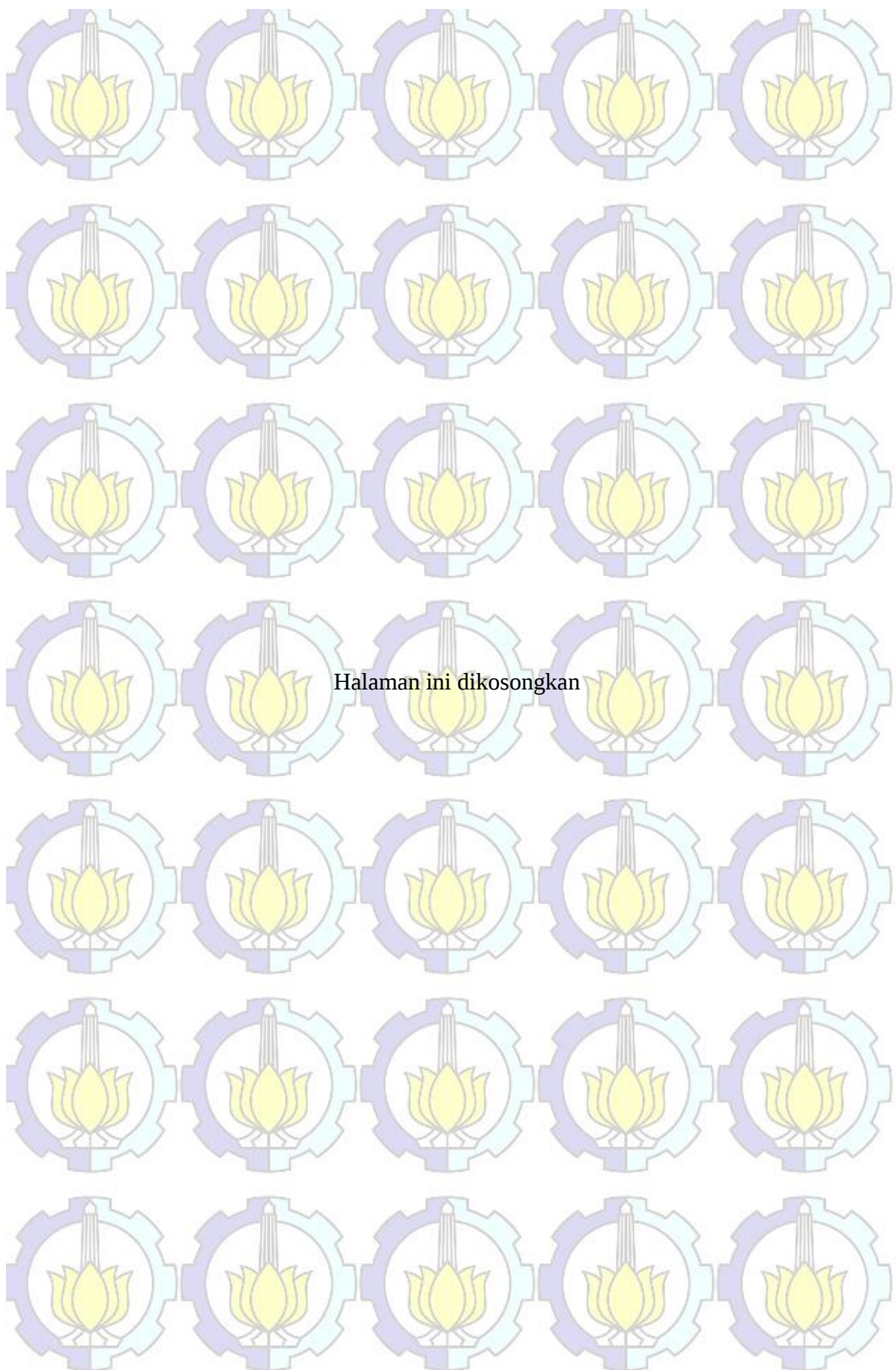
ABSTRACT

The long distance high frequency (HF) communication with an allocation of 3 - 30 MHz is widely used in remote areas and lacking communication infrastructure, especially to overcome the high cost of satellite technology and as an alternative when a disaster occurs. The research on the HF radio channels in the low latitudes area is still rarely done compared to studies for the high latitudes and the middle latitudes areas whereas the ionospheric channels in the low latitudes area has its own characteristics.

The study aims to model statistically complex impulse responses from the long distance HF channels with the parameters such as channel gain, path gain, phase shift and delay spread, through the simulations and the measurements on the Surabaya-Merauke link as far as 3044 km. The evaluation results show that the paths that comes generated from the different modes that form clusters based on the delay. The results of the study shown that the gain channel is Rayleigh distribution, while the rms delay spread and maximum excess delay are each distributed Rayleigh and Gaussian respectively. The models produced can be used as the basis for designing the HF digital communication systems in the low latitudes area.

The second goal of this study was to find out the spatial correlation between two links in the low latitudes area, each of which was 3044 km and 1895 km, with the receivers separated by 1900 km. Based on the simulation results that are verified by the measurements and the simulations on different dates, it is known that the two links consisting of multimodes and multihops have a low correlation which is the result of the sum of phases that are random and uncorrelated. From this study, it was also proved that site diversity that applies selective combining with two convergent links may increase the diversity gain and reduce the probability of outage significantly. To improve the results of site diversity it is used a joint space-frequency diversity involving the two frequencies that have opposite diurnal characteristics.

Keywords : HF Radio Channel, Impulse response, low latitude area, long distance, site diversity, spatial correlation



KATA PENGANTAR

Segala puji kepada Allah SWT atas seluruh Rahmat dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul :

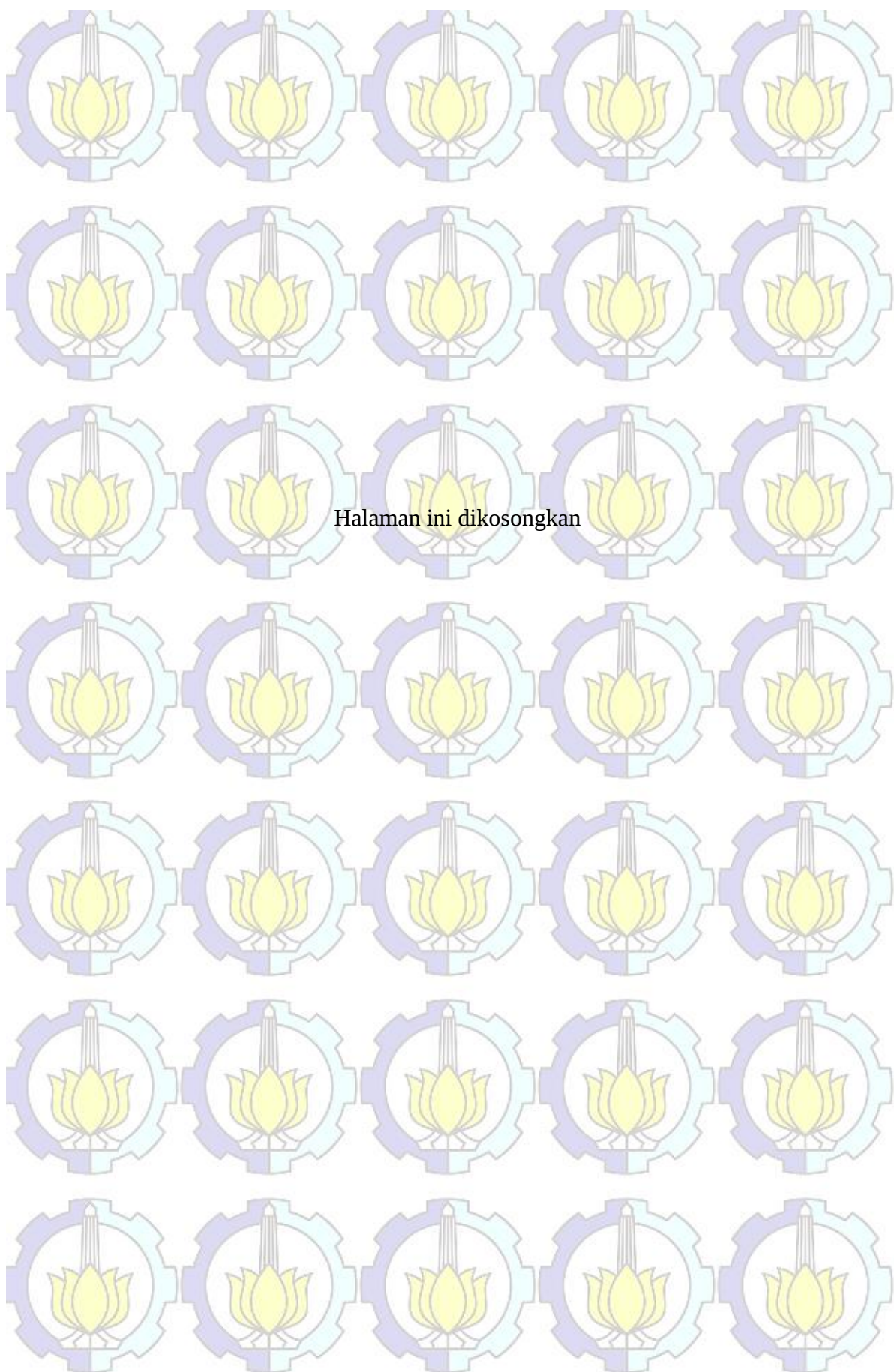
“PEMODELAN KANAL RADIO HF SKYWAVE MULTIPATH MULTIMODE DI DAERAH LINTANG RENDAH “

Disertasi ini merupakan salah satu persyaratan akademis untuk menyelesaikan pendidikan S3 pada Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dengan selesainya Disertasi ini penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Rektor dan civitas akademika Universitas Muhammadiyah Surabaya atas kesempatan yang diberikan untuk menempuh Pendidikan Doktor
2. Lembaga Layanan Pendidikan Tinggi Wilayah VII
3. Kementerian Riset dan Pendidikan Tinggi atas pemberian Beasiswa Pendidikan bagi Dosen Dalam Negeri (BPPDN) dan Beasiswa PKPI
4. Prof. Ir. Gamantyo Hendranto, M.Eng, Ph.D, Dr. Ir. Wirawan, DEA dan Dr Ir. Muhammad Taufik selaku Promotor dan Co-Promotor
5. Seluruh Penguji atas masukan yang diberikan
6. Rekan-rekan peneliti di Pusat Sains Antariksa (Pussainsa), Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan), Bandung
7. Dosen dan Karyawan Program Pasca Sarjana Departemen Teknik Elektro, ITS Surabaya
8. Rekan-Rekan S1, S2 dan S3 di Lab Antena dan Propagasi
9. Seluruh Keluarga atas doa dan dukungannya selama masa studi

Penulis



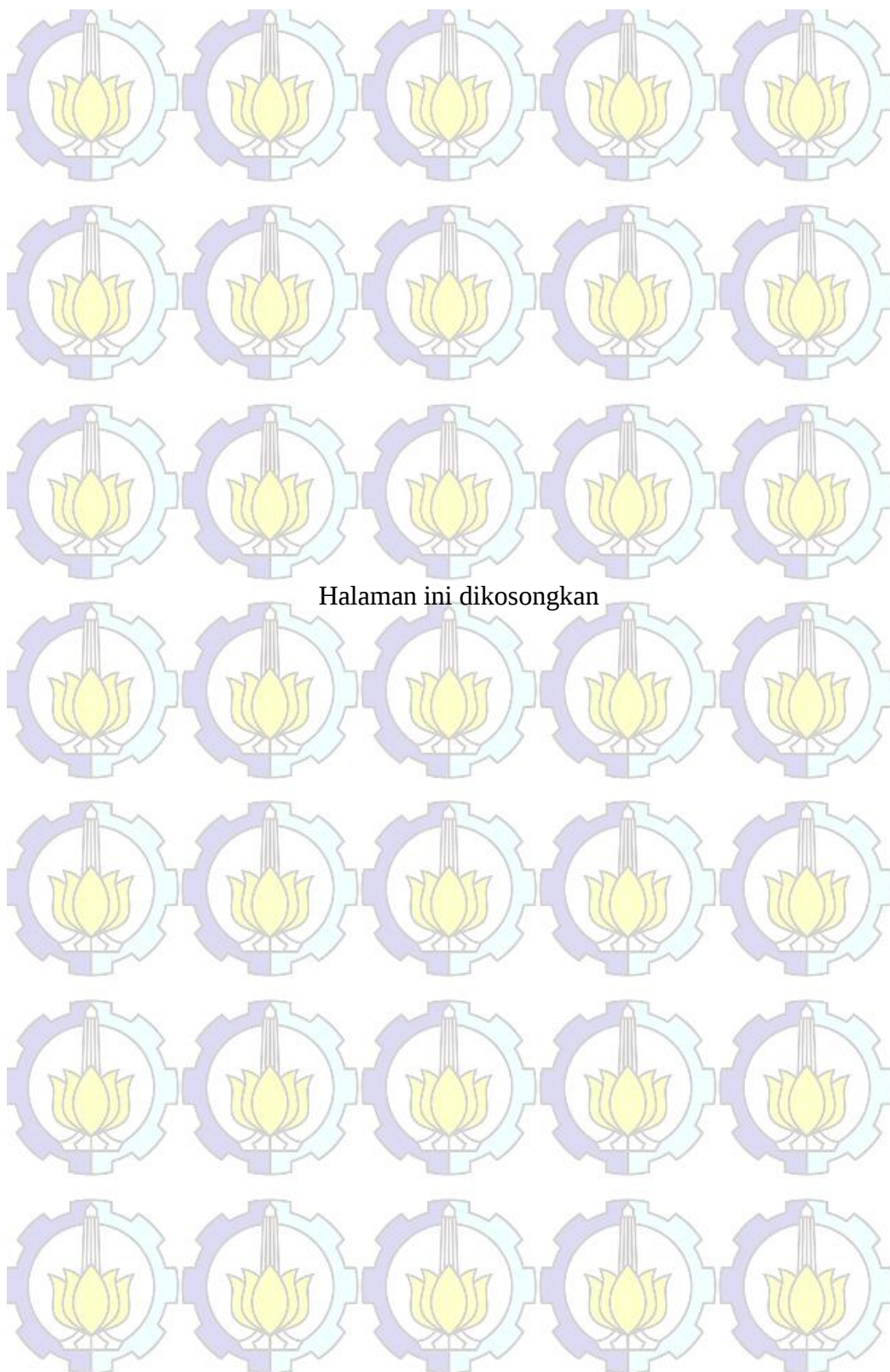
DAFTAR ISI

Isi	Hal
Halaman Judul.....	i
Lembar Pengesahan	iii
Pernyataan Keaslian Disertasi	v
Abstrak.....	vii
Abstract	ix
Kata Pengantar	xi
Daftar Isi.....	xiii
Daftar Gambar.....	xvii
Daftar Tabel.....	xxi
Daftar Lampiran.....	xxiii
Daftar Istilah dan Singkatan	xxv
Daftar Notasi	xxvii
Bab1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan dan Pembahasan Masalah	6
1.3 Tujuan Umum	8
1.4 Tujuan Khusus	9
1.5 Hipotesis	9
1.6 Orisinalitas	10
1.7 Sistematika Penulisan	11
Bab 2 Kajian Pustaka dan Dasar Teori.....	13
2.1 Dasar Teori	13
2.1.1 Lapisan Ionosfer	13
2.1.2 Perambatan Gelombang Radio HF.....	17
2.1.3 Ionosfer di Daerah Ekuator.....	19
2.1.4 Teori Magnetoionik	24
2.1.4.1 Karakteristik Plasma	23
2.1.4.2 Tabrakan Partikel Bermuatan	24
2.1.4.3 Formula Appleton	24
2.1.5 Polarisasi	27
2.1.6 Proplab-Pro	29
2.1.7 PN Sequence	31
2.1.8 Eliminasi Noise	34
2.1.9 Pemodelan Kanal HF	35
2.1.10 Pemodelan Kanal HF secara Matematis dan Statistik	36
2.1.11 <i>Cumulative Distribution Function</i> (cdf)	38
2.1.12 Koefisien Korelasi	38
2.1.13 Uji Kolmogorov-Smirnov	39
2.1.14 t-test	40
2.1.15 Distribusi Gaussian	41
2.1.16 Distribusi Rayleigh	42
2.1.17 Distribusi Uniform	42
2.1.18 Distribusi Eksponensial	43
2.1.19 Model Respons Impuls Waktu Diskret	43

	2.1.20 <i>Site-Diversity</i>	43
	2.2.20 <i>Selection Combining</i>	45
	2.2. Kajian Pustaka	46
	2.2.1 Pengukuran dan Pemodelan Respon Impuls	46
	2.2.2 Korelasi Antar Link	52
Bab 3	METODE PENELITIAN.....	55
	3.1 Simulasi Proplab	56
	3.1.1 Pemodelan Respons Impuls secara Matematis dan Statistik	60
	3.1.2 Korelasi Spasial dengan Hasil Simulasi	62
	3.1.3 Aplikasi Site Diversity	64
	3.2 Pengukuran	64
	3.2.1 Pengukuran Respons Impuls Kanal Radio HF Pita Lebar	68
	3.2.1.1 Sistem Pengukuran.....	68
	3.2.1.2 Pembangkitan Sinyal PN Sequence	68
	3.2.1.3 Skenario Pembangkitan Data	69
	3.2.1.4 Perhitungan Link Budget	70
	3.2.1.5 Pelaksanaan Pengukuran	71
	3.2.1.6 Fitting Model Distribusi dengan Kolmogorov-Smirnov	72
	3.2.1.7 Uji <i>t</i>	73
	3.2.2 Pengukuran Korelasi Spasial	74
	3.2.2.1 Perancangan Sistem Pengukuran	75
	3.2.2.2 Pelaksanaan Pengukuran	77
	3.2.2.3 Pengolahan Data IQ Hasil Pengukuran	78
	3.3 Verifikasi Hasil Simulasi dan Pengukuran	79
	3.3.1 Verifikasi Model Distribusi Kanal Radio HF	79
	3.3.2 Verifikasi Korelasi Spasial	80
Bab 4	Pemodelan Kanal Radio HF Jarak Jauh	83
	4.1 Simulasi Ray Tracing	83
	4.1.1 Pemodelan Matematis Respons Impuls	86
	4.1.2 Channel Gain (S)	87
	4.1.3 Power Delay Profile dari Hasil Pengukuran	88
	4.2 Metode Evaluasi dengan Pengukuran	89
	4.3 Pemodelan Statistik untuk Masing-Masing Kanal	92
	4.3.1 Channel Gain	92
	4.3.2 Path Gain Ternormalisasi dan Pergeseran Fase	93
	4.3.3 Delay Spread	94
	4.3.4 Maximum Excess Delay	99
	4.4 Sintesis	101
Bab 5	Korelasi Spasial dan Diversity dari Kanal Radio HF Skywave Multipath Multimode	105
	5.1 Simulasi	105
	5.1.1 Hasil Simulasi	106
	5.1.2 Perhitungan Korelasi Spasial	111
	5.2 Verifikasi Koefisien Korelasi	112

5.2.1 Pengukuran Respon Kanal Link Surabaya-Merauke dan Surabaya – Ternate	113
5.2.2 Ray Tracing dengan Proplab untuk tanggal 15-17 Nopember 2017	118
5.3 Site Diversity untuk Link Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate	123
5.4 Sintesis	127
Bab 6 Kesimpulan dan Saran	131
6.1 Kesimpulan	131
6.2 Saran	133
Daftar Pustaka	135
Lampiran A Hasil Pengukuran	141
Lampiran B Hasil Simulasi	149
Lampiran C Foto-Foto Kegiatan	154
Lampiran D Fitting Distribusi Dengan Kolmogorov-Smirnov	157
Lampiran E Uji t	161
Lampiran F Link Budget	163
Lampiran G Artikel dalam Jurnal Internasional	165
Biografi	



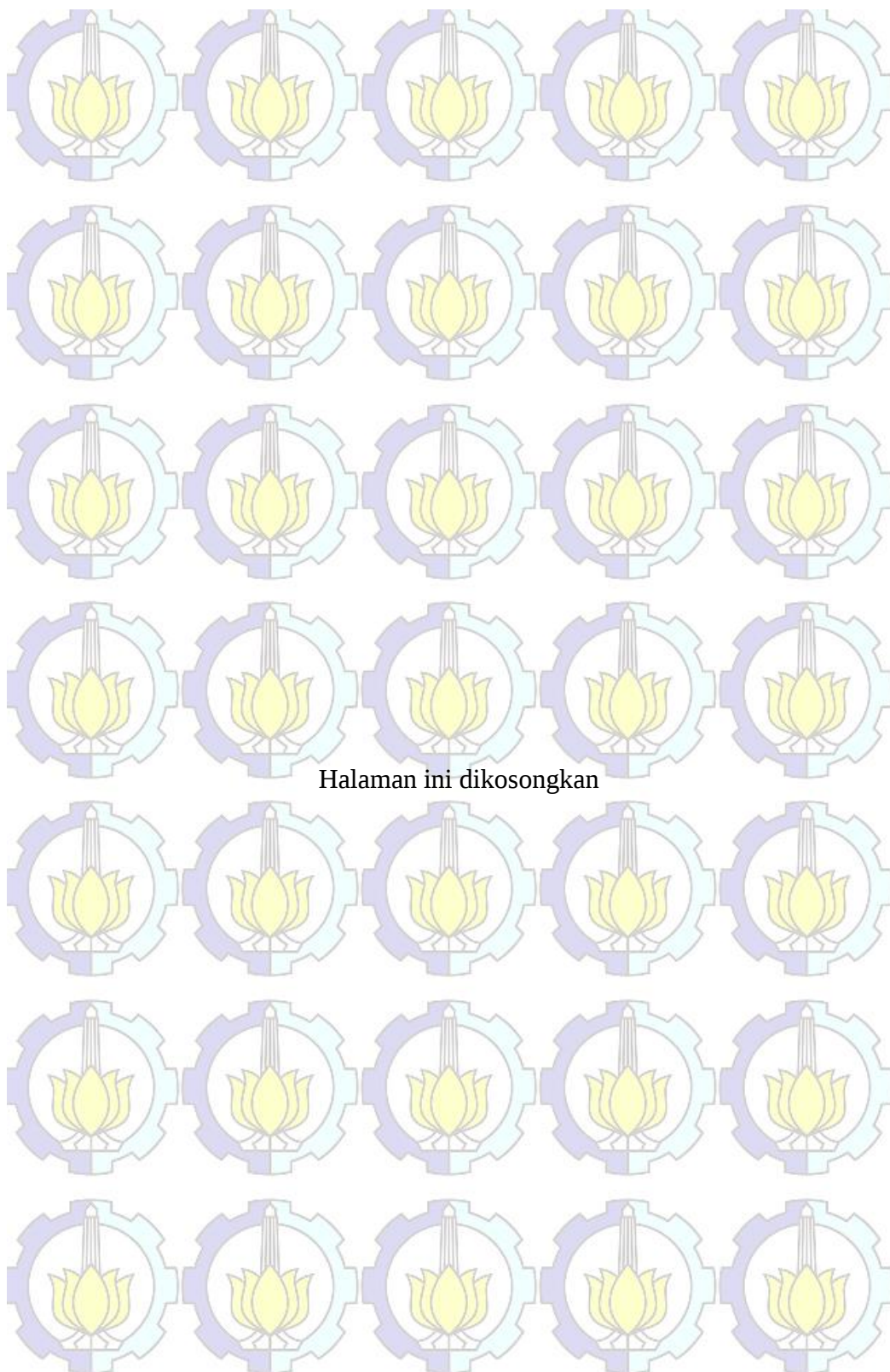


Daftar Gambar

Gambar		Hal
Gambar 2.1	Struktur Lapisan Ionosfer	13
Gambar 2.2	Frekuensi Maksimum Berdasarkan Aktivitas Matahari ..	14
Gambar 2.3	Pengaruh Perbedaan Garis Lintang pada Ionosfer.....	15
Gambar 2.4	Frekuensi maksimum pada lapisan E, F1 dan F2 sepanjang hari	16
Gambar 2.5	Tipe-tipe propagasi HF	16
Gambar 2.6	Mode Propagasi HF.....	17
Gambar 2.7	Koordinat Geomagnetik	20
Gambar 2.8	Efek Fountain	21
Gambar 2.9	Ilustrasi gangguan dikarenakan E-sporadis	22
Gambar 2.10	Arah Propagasi Fase dan Medan Magnet	25
Gambar 2.11	Contoh raypath pada suatu ionosfer dan frekuensi yang sama dengan peningkatan pada sudut elevasi Tx	28
Gambar 2.12	Definisi Rasio Polarisasi	29
Gambar 2.13	Definisi Sudut Elevasi	29
Gambar 2.14	Sinyal PN (atas) sinyal data (bawah)	33
Gambar 2.15	m-stage shift register secara umum	34
Gambar 2.16	Pemodelan Respon Impuls Kanal	36
Gambar 2.17	Diagram Blok Umum untuk Site Diversity	46
Gambar 3.1	Diagram Tulang Ikan Strategi Penelitian	55
Gambar 3.2	Halaman Pemilihan Antena dan Penentuan Daya	58
Gambar 3.3	Halaman Pengaturan Parameter Ray Tracing dan Perambatan Sinyal	54
Gambar 3.4	Letak Pemancar di Surabaya dan Penerima di Merauke sejauh 3044 km	58
Gambar 3.5	Lokasi dan jarak pemancar di Surabaya dan 2 penerima di Merauke dan Ternate.....	63
Gambar 3.6	Diagram Blok USRP dan daughterboard	65
Gambar 3.7	Antena dipole horisontal pemancar di atas jembatan antar Gedung B dan A	66
Gambar 3.8	Antena dipole horisontal sebagai penerima diatas Gedung Teknik Elektro, Universitas Musamus, Merauke	67
Gambar 3.9	Skema Pengukuran Respons Impuls. Atas : Transmitter, bawah : Receiver	67
Gambar 3.10	Panel depan Labview Pemancar	71
Gambar 3.11	Tampilan panel depan LabVIEW penerima.....	72
Gambar 3.12	Skema pengukuran korelasi spasial link Surabaya-Merauke dan Surabaya-Ternate.....	73
Gambar 3.13	Antena monopole vertikal sebagai pemancar di pasang di atas Gedung B lantai 4.....	74

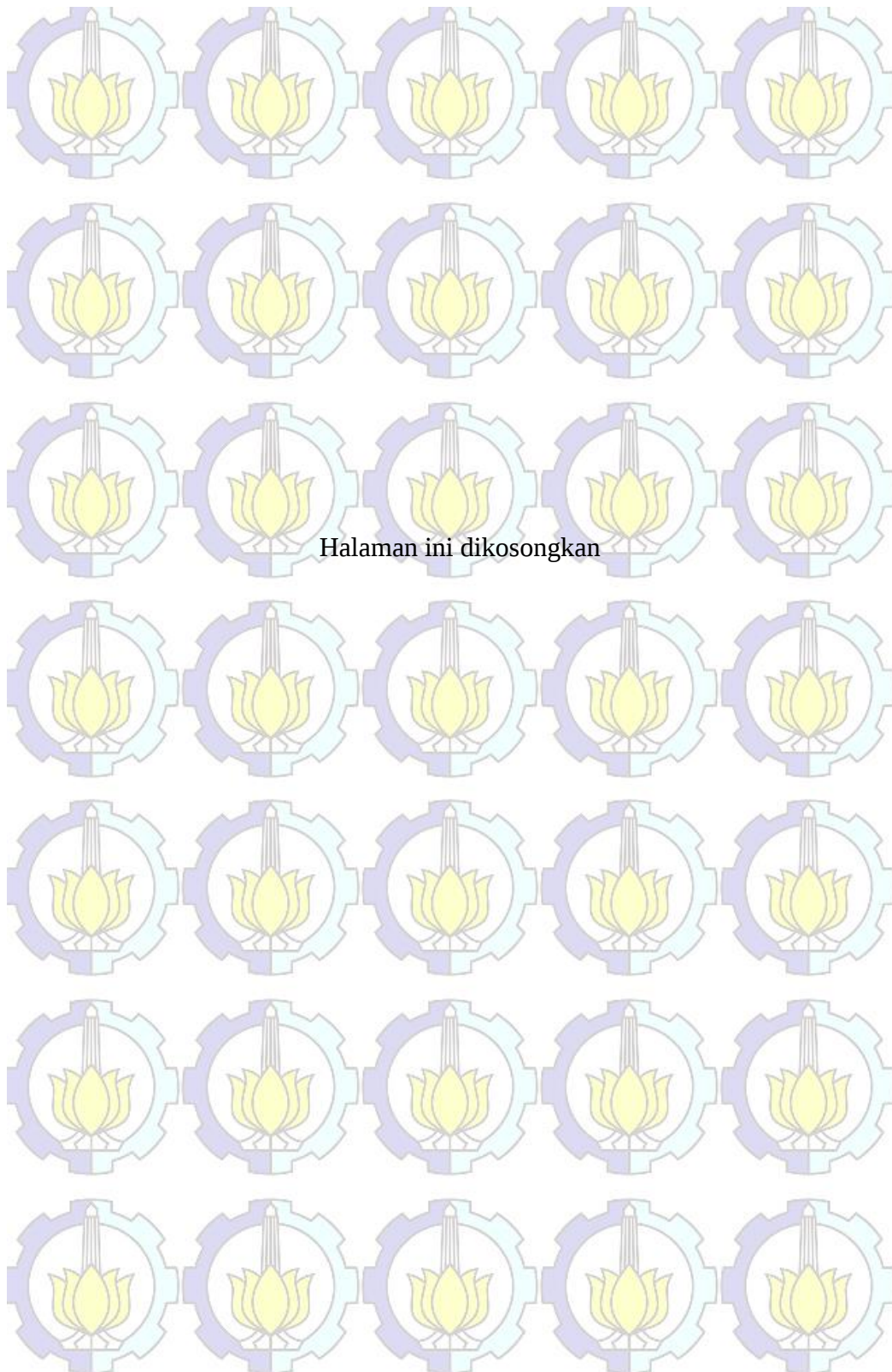
Gambar 3.14	Perangkat yang dipergunakan pada penerima	74
Gambar 3.15	Skema antara antenna penerima, LNA, USRP dengan Octoclock	75
Gambar 3.16	Antena monopole vertikal sebagai penerima di Ternate (kiri) Merauke (kanan)	75
Gambar 3.17	Panel Depan LabVIEW program Rx <i>Continuous Asynchronous</i>	76
Gambar 3.18	Diagram blok pemodelan statistik respon impuls dari hasil simulasi ray tracing diverifikasi dengan hasil pengukuran ...	79
Gambar 3.19	Diagram Blok Penelitian Korelasi Spasial dan Diversity untuk Banyak Hop dan Banyak Lintasan	80
Gambar 4.1	Titik jatuh lintasan ray tracing berada jauh dari titik penerima	83
Gambar 4.2	Lintasan diteruskan ke angkasa	84
Gambar 4.3	MUF pada tanggal 11 Mei 2015	85
Gambar 4.4	Power Delay Profile (PDP) hasil ray tracing link Surabaya – Merauke untuk tanggal 11 Mei 2015, frekuensi 14 MHz pukul 07.00 WIB	88
Gambar 4.5	Autokorelasi sinyal PN yang ditransmisikan.....	90
Gambar 4.6	Korelasi silang antara sinyal yang diterima dengan sinyal PN Sequence yang dikirimkan pada pengukuran tanggal 13 Pebruari 2014, frekuensi 14 MHz dengan a. Pukul 11.00 WIB dan b. Pukul 22.00 WIB	90
Gambar 4.7	Power Delay Profile pada pengukuran tanggal 12 Pebruari 2014 pukul 20.00 WIB.....	91
Gambar 4.8	Cumulative Distribution Function (CDF) dari Channel Gain Hasil Ray Tracing	92
Gambar 4.9	Cumulative Distribution Function (CDF) dari Pergeseran Fase Hasil Ray Tracing.....	93
Gambar 4.10	Sudut elevasi untuk bin 0 – 100 μ s	94
Gambar 4.11	Lintasan – lintasan dalam bin 0 – 100 μ s	95
Gambar 4.12	Sudut elevasi untuk bin 100 – 500 μ s	96
Gambar 4.13	Excess Delay lintasan – lintasan untuk bin 100 – 500 μ s	96
Gambar 4.14	Besar magnitudo berdasarkan sudut elevasi antenna.....	97
Gambar 4.15	Besar magnitudo berdasarkan time delay untuk seluruh lintasan	97
Gambar 4.16	CDF rms delay spread hasil ray tracing	99
Gambar 4.17	CDF rms delay spread hasil pengukuran Surabaya – Merauke pada tanggal 12-15 Pebruari 2014	100
Gambar 4.18	CDF Maximum Excess Delay hasil ray tracing Surabaya – Merauke dengan Proplab	101
Gambar 4.19	CDF Maximum Excess Delay hasil pengukuran Surabaya – Merauke pada tanggal 12-15 Pebruari 2014	101

Gambar 5.1	Lintasan-lintasan yang sampai pada penerima dengan mode 6F pada tanggal 11 Mei 2015 pukul 12.00 dengan frekuensi 7 MHz	106
Gambar 5.2	Lintasan-lintasan yang sampai pada penerima dengan mode 4F pada tanggal 11 Mei 2015 pukul 12.00 dengan frekuensi 7 MHz	107
Gambar 5.3	Ray Tracing untuk link Surabaya-Ternate pada tanggal 11 September 2015 pukul 05.00 WIB yang menunjukkan lintasan menjauhi penerima	110
Gambar 5.4	Hasil Pengukuran Ionosonde di Kupang untuk tanggal 13-14 Nopember 2017	113
Gambar 5.5	Hasil Pengukuran Ionosonde di Kupang untuk tanggal 15-16 Nopember 2017	115
Gambar 5.6	Hasil Pengukuran Sinyal yang Diterima di Ternate tanggal 16 Nopember 2017 pukul 19.00 WIB dengan frekuensi carrier 9,03 MHz	116
Gambar 5.7	Hasil Pengukuran Sinyal yang Diterima di Merauke tanggal 16 Nopember 2017 pukul 19.00 WIB dengan frekuensi carrier 9,03 MHz	117
Gambar 5.8	Lintasan 2F link Surabaya-Merauke tanggal 15 Nopember 2016 pukul 07.00 UTC atau 14.00 WIB	117
Gambar 5.9	CDF dari SNR link Surabaya – Merauke dengan 7 MHz dan Surabaya – Ternate yang menggunakan 7 MHz, 14 MHz, dan 21 MHz sebagai kemungkinan link alternatif dalam sinyal diversity yang diperoleh dari hasil ray tracing pada tanggal 11 Mei 2015	124
Gambar 5.11	Perubahan SNR dari link utama dan link alternatif tiap jam berdasarkan hasil ray tracing tanggal 11 Mei 2015	126
Gambar 5.12	Perubahan SNR dari link utama dan link alternatif tiap jam berdasarkan hasil ray tracing tanggal 11 September 2015	127



DAFTAR TABEL

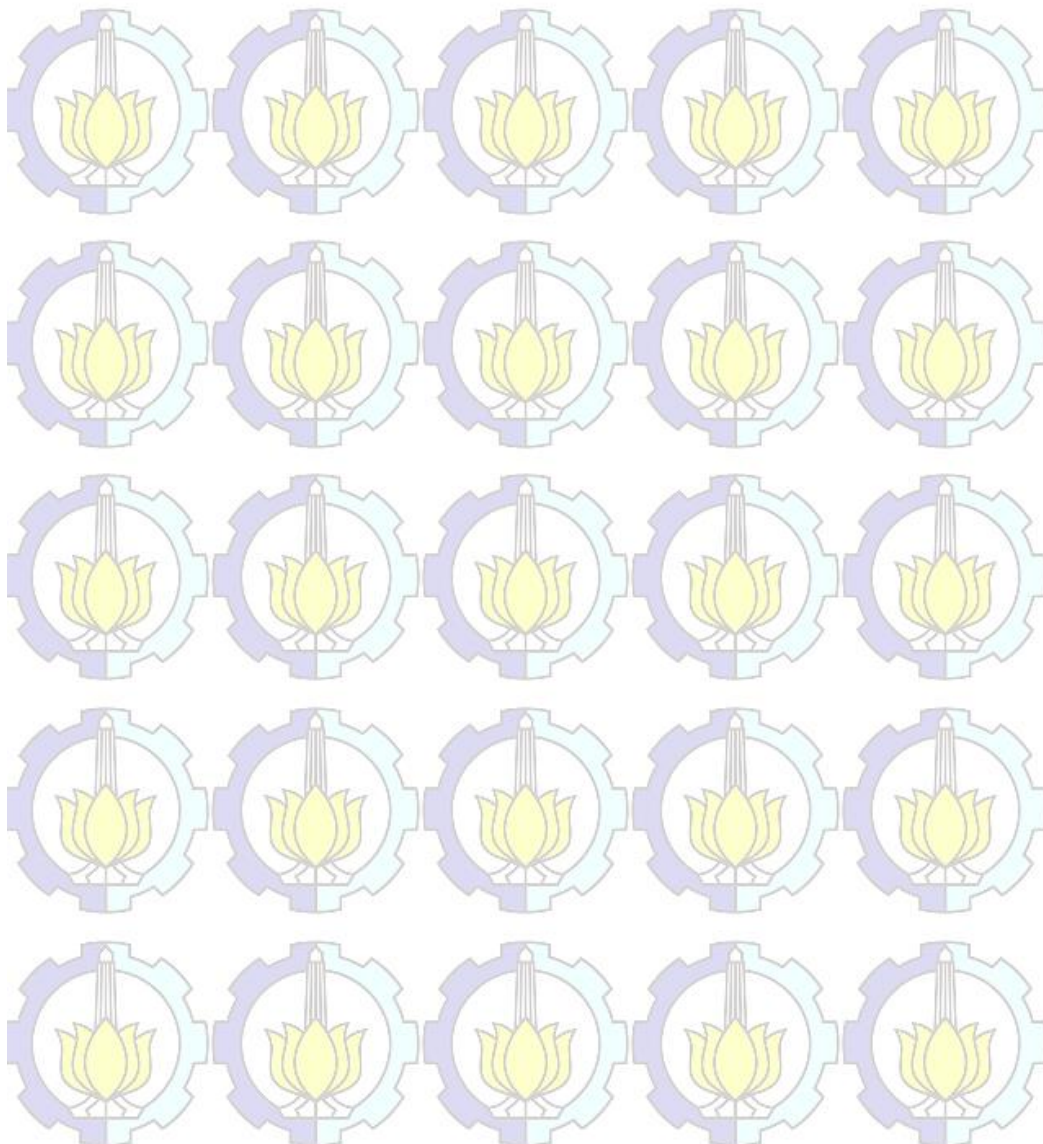
Tabel		Hal
Tabel 3.1	Koordinat Pemancar dan Penerima Secara Geografis dan Geomagnetis	61
Tabel 3.2	Koordinat Geografis dan Lintang Geomagnetis dari Pemancar dan Dua Penerima	63
Tabel 3.3	Jadwal Pengukuran	66
Tabel 3.4	Perhitungan Link Budget	70
Tabel 3.5	Parameter Pembangkitan PN Sequence	71
Tabel 4.1	Lintasan-lintasan yang diterima dengan jarak titik terima tidak lebih dari 50 km untuk ray tracing tanggal 11 September 2015 pukul 12.00 WIB	85
Tabel 4.2	Hasil Perhitungan parameter kanal untuk tanggal 11 Mei 2015	87
Tabel 4.3	Hasil Perhitungan parameter kanal untuk tanggal 11 September 2015	88
Tabel 4.4	Mode Propagasi yang Terjadi untuk Setiap Lintasan Berdasarkan Excess Delay	94
Tabel 5.1	Sebagian hasil Ray Tracing tanggal 11 Mei 2015 pukul 12.00 WIB frekuensi 7 MHz	106
Tabel 5.2	Sebagian hasil Ray Tracing tanggal 11 Mei 2015 pukul 03.00 WIB frekuensi 7 MHz	108
Tabel 5.3	Mode, kuat sinyal dan fase dari hasil simulasi link Surabaya-Merauke tanggal 11 Mei 2015 untuk pukul 06.00 WIB hingga pukul 12.00 WIB	111
Tabel 5.4	Magnitudo Respon Kanal Antara Link Surabaya-Merauke dan Surabaya – Ternate pada frekuensi 7 MHz	112
Tabel 5.5	Koefisien Korelasi antara link surabaya-Merauke (S-M) dengan Surabaya-Ternate (S-T)	113
Tabel 5.6	Hasil Perhitungan Kuat Sinyal tanggal 16 Nopember 2017 ..	118
Tabel 5.7	Hasil Perhitungan Kuat Sinyal tanggal 17 Nopember 2017 ..	119
Tabel 5.8	Hasil ray tracing link Surabaya-Merauke tanggal 15 Nopember 2016 pukul 07.00 UTC atau 14.00 WIB	120
Tabel 5.9	Hasil ray tracing link Surabaya-Merauke tanggal 15 Nopember 2016 pukul 12.00 UTC atau 19.00 WIB	121
Tabel 5.10	Hasil ray tracing link Surabaya-Ternate tanggal 15 Nopember 2016 pukul 12.00 UTC atau 19.00 WIB	122
Tabel 5.11	Magnitudo untuk link Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate	123
Tabel 5.12	Koefisien Korelasi untuk link Surabaya-Merauke dan Surabaya-Ternate	124



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran		Hal
Lampiran A	Hasil Pengukuran	141
	Tabel A.1 Sebagian hasil pengukuran link Surabaya-Merauke 2014	141
	Tabel A.2 Surabaya-Ternate tanggal 15-16 Nopember 2017.	143
	Tabel A.3 Surabaya-Ternate tanggal 17 Nopember 2017.....	144
	Tabel A.4 Surabaya-Merauke tanggal 15 Nopember 2017....	145
	Tabel A.5 Surabaya-Merauke tanggal 16 Nopember 2017....	146
	Tabel A.6 Surabaya-Merauke tanggal 17 Nopember 2017 ...	147
	Tabel A.7 Sebagian Data IQ Hasil Pengukuran Surabaya – Merauke tanggal 17 Nopember 2017 Pukul 21.17 WIB.....	148
Lampiran B	Tabel B.1 Channel Gain, rms Delay spread, maximum excess delay hasil simulasi tanggal 11 Mei 2015	149
	Tabel B.2 Mode, kuat sinyal dan Fase Hasil Simulasi Link Surabaya – Merauke frekuensi 7 MHz tanggal 11 Mei 2015	150
	Tabel B.2 Mode, kuat sinyal dan Fase Hasil Simulasi Link Surabaya – Ternate frekuensi 7 MHz tanggal 11 Mei 2015	152
Lampiran C	Foto-Foto Kegiatan	154
	Gambar C.1 Pelaksanaan Pengukuran di Surabaya	154
	Gambar C.2 Pemasangan Antena Monopole di Gedung B lantai 4 Departemen Teknik Elektro ITS Surabaya	154
	Gambar C.3 Lokasi Pengukuran di Lab Teknik Elektro, Universitas Musamus, Merauke	155
	Gambar C.4 Pemasangan antena dipole diatas atap Lab Teknik Elektro, Universitas Musamus, Merauke	155
	Gambar C.5 Persiapan pemasangan antena di Universitas Khairun, Ternate	156
	Gambar C.6 Pelaksanaan pengukuran di Universitas Khairun, Ternate	156
Lampiran D	Fitting Distribusi dengan Kolmogorov-Smirnov	157
	Gambar D.1 cdf pergeseran fase dari hasil simulasi	157
	Tabel D.1 Hasil Uji K-S untuk Pergeseran Fase Nilai $\alpha = 0,01$, $n = 30$, Tabel Distribusi $D_2 = 0,24$	157
	Tabel D.2 Uji K-S untuk rms delay spread Nilai $\alpha = 0,01$, $n = 30$, Tabel Distribusi $D_2 = 0,24$	157
	Gambar D.2 cdf rms delay spread dari hasil simulasi	158
	Gambar D.3 cdf maximum excess delay dari hasil simulasi	158
	Tabel D.3 Hasil Uji K-S untuk Maximum Excess Delay Nilai $\alpha = 0,05$, $n = 30$, Tabel Distribusi $D_2 = 0,21$	158
	Gambar D.4 cdf channel gain dari hasil simulasi	159
	Tabel D.5 Hasil Uji K-S untuk rms Delay Spread Hasil Pengukuran Nilai $\alpha = 0,01$, $n = 150$, Tabel Distribusi $D_2 = 0,134$	159
	Gambar D.5 cdf rms delay spread dari hasil pengukuran	160

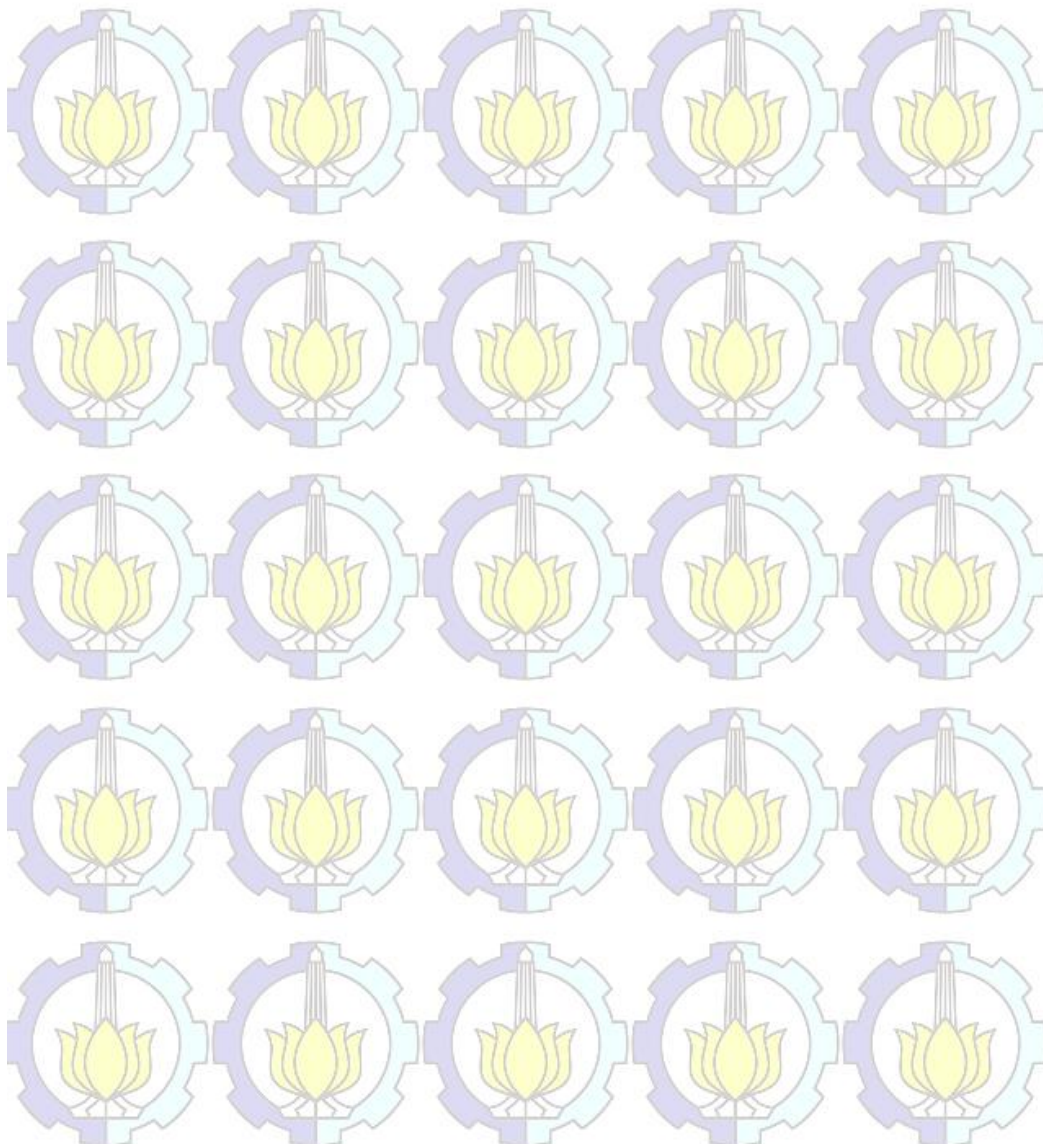
	Tabel D.6 Hasil Uji K-S untuk Maximum Excess Delay	160
	Hasil Pengukuran Nilai $\alpha = 0,01$, $n = 150$, Tabel Distribusi	
	$D_2 = 0,134$	
Lampiran E	Uji t	161
	Tabel E.1 Tabel SNR (dB) untuk Uji t	161
	Tabel E.2 Perhitungan Uji t	162
Lampiran F	Link Budget	163
	Tabel F.1 Link Budget Pengukuran Surabaya – Merauke	163
	Tabel F.2 Link Budget Pengukuran Surabaya – Ternate	163
Lampiran G	Artikel dalam Jurnal Internasional Bereputasi	165



Daftar Istilah dan Singkatan

HF	: High Frequency
ORARI	: Organisasi Amatir Radio Indonesia
o	: Ordinary
x	: Extraordinary
Es	: E sporadis
h'F2	: ketinggian virtual lapisan F2
h'E	: ketinggian virtual lapisan E
foF2	: frekuensi kritis gelombang ordinary pada lapisan F2
foE	: frekuensi kritis gelombang ordinary pada lapisan E
hmF2	: ketinggian kerapatan elektron maksimum pada lapisan F2
fc	: frekuensi kritis
ESF	: Equatorial Spread F
DAMSON	: Doppler and Multipath Sounding Network
PDP	: Power Delay Profile
LoS	: Line of Sight
MUF	: Maximal Usable Frequency
PN	: Pseudonoise
CFAR	: Constant False Alarm Rate
LUF	: Lowest Usable Frequency
SSN	: Sunspot Number
IG	: Ionosphere Global
IRI	: International Reference Ionosphere
USRP	: Universal Software Radio Pheripheral
IQ	: Inphase Quadrature
DUC	: Digital Upconverter
DAC	: Digital to Analog Converter
LPF	: Low Pass Filter
PLL	: Phase Lock Loop
VCO	: Voltage Control Oscillator
LO	: Local Oscilator
LNA	: Low Noise Amplifier
ADC	: Analog to Digital Converter
DDC	: Digital Down Converter
LFSR	: Linear Feedback Shift Register
NI	: National Instruments
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio
FFT	: Fast Fourier Transform
K-S	: Kolmogorov - Smirnov
UTC	: Universal Time Coordinate
E-MUF	: MUF pada lapisan E
IARU	: International Amateur Radio Union
TEM	: Tranverse Electromagnetic
WBHF	: Wideband High Frequency
IGRF	: International Geomagnetic Reference Field
URSI	: International Radio Science Union

COSPAR	: Committe on Space Research
SANDICOM	: Sounding System for Antarctic Radio Digital Communications
FPGA	: Field Programmable Gate Array
BPSK	: Binary Phase Shift Keying
cdf	: cumulative distribution function
pdf	: probability distribution function
MLE	: Maximum Likelihood Estimation
rms	: root mean square
WIB	: Waktu Indonesia Barat
WITA	: Waktu Indonesia Tengah
WIT	: Waktu Indonesia Timur



DAFTAR NOTASI

I	: Sudut datang lintasan
N_i	: plasma ion bermuatan tunggal
ω_{Ni}	: frekuensi angular dari plasma ion bermuatan tunggal
f_N	: frekuensi plasma ion
m	: massa elektron
M	: massa ion
f_{Ni}	: frekuensi plasma ion bermuatan tunggal
B_o	: medan magnetik seragam
f_H	: gyrofrequency dari elektron
ω_H	: $2\pi f_H$ = frekuensi angular cyclotron
r_e	: jari-jari elektron
r_n	: jari-jari neutron
B	: kerapatan flux magnetik
N_e	: kerapatan jumlah elektron
ω	: $2\pi f$ = frekuensi angular gelombang
ω_N	: $2\pi f_N$ = frekuensi angular plasma
v	: frekuensi tabrakan
X	: $(\omega_N / \omega)^2$
Y	: (ω_H / ω)
Z	: v / ω
μ	: sudut refraksi konstan
ϕ	: sudut antara gelombang normal dan tegak lurus
η	: rasio polarisasi
n	: indeks refraksi kompleks
W	: bandwidth
T_c	: interval chip
R_c	: Laju Chip
T_b	: waktu transmisi bit
m	: stage PN Sequence
σ_N^2	: varians noise
ζ	: threshold
P	: probabilitas bahwa amplitudo (x) melebihi batas ζ
α_n	: kuat sinyal yang diterima oleh lintasan ke- n
θ	: fase
τ_n	: delay untuk lintasan ke- n
S	: channel gain
Lfs	: rugi-rugi ruang hampa
La	: Rugi absorpsi
Lg	: Rugi refleksi
Lc	: Redaman kabel
GT_x	: Gain antena Tx
GR_x	: Gain antena Rx
Pr	: daya terima minimum
Lp	: rugi polarisasi
G_{LNA}	: Gain LNA

P_t	: daya pancar
V_o	: tegangan lintasan ordinary
V_x	: tegangan lintasan extraordinary
α_o	: kuat sinyal dari lintasan ordinary
α_x	: kuat sinyal dari lintasan extraordinary
ϕ_o	: fase dari lintasan ordinary
ϕ_x	: fase dari lintasan extraordinary
V	: tegangan kompleks
σ_τ	: rms delay spread
$\bar{\tau}$	: mean excess delay
$\bar{\tau}^2$	: momen kedua dari mean excess delay
p	: daya sinyal ternormalisasi
ρ	: koefisien korelasi
ε_n	: sudut elevasi lintasan ke- n
$N(m)$	: kerapatan elektron
$x_1, x_2, \dots, x_n$	: sampel dari suatu populasi X
$F^o[x_i]$	: fungsi distribusi populasi X yang diobservasi
$F_x[X_i]$	: cdf yang dihipotesis dari sampel yang diobservasi
D_2	: nilai maksimum antara cdf yang diobservasi dan cdf hipotesis
d_2	: nilai sampel dari D_2
α	: level signifikansi
μ	: rata-rata pada Distribusi Gaussian
σ	: standar deviasi

Bab 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bencana alam dapat merusak infrastruktur telekomunikasi yang telah ada di suatu daerah sehingga memutus akses informasi antara daerah tersebut dengan daerah luar. Sebagai contoh, bencana tsunami di Aceh pada 2004 (Chen, 2005) dengan magnitudo 9.0 SR yang menelan korban lebih dari 300 ribu orang dan merupakan gempa bumi terbesar keempat sejak tahun 1900 (Dutta, 2005), gempa bumi di Yogyakarta pada 2010, gempa di Lombok dan gempa dan tsunami di Palu pada 28 September 2018 telah merusak infrastruktur telekomunikasi sehingga menyebabkan daerah tersebut terisolir dan menghambat proses mitigasi bencana dan pemulihan daerah tersebut. Selain itu, di luar negeri terjadi topan Aila di India, badai Katrina di Amerika Serikat dan gempa bumi dan tsunami di Jepang yang telah merusak sistem komunikasi menyebabkan perlunya infrastruktur jaringan ad-hoc agar kondisi masyarakat yang terisolasi dari dunia luar tidak makin parah (Sujoy, 2015). Demikian pula banjir di Uttarakhand menyebabkan black-out dan kerusakan jaringan komunikasi yang parah sehingga menghambat kerja tim penolong (Kishorbhai, 2017).

Wilayah yang luas dan terpencil juga menyebabkan ketiadaan infrastruktur dan layanan telekomunikasi di suatu wilayah, misal di daerah Antartika (Vilela, 2016), dan beberapa wilayah terpencil dan terpisah lautan di Indonesia. Teknologi radio yang memanfaatkan HF *skywave* dapat menjadi solusi untuk mengatasi ketiadaan akses telekomunikasi di daerah terpencil dan daerah bencana tersebut. Sebelumnya, pada kondisi bencana yang merusak infrastruktur telekomunikasi, radio amatir frekuensi tinggi (HF) telah mempunyai peran penting dalam penyelamatan dan pemulihan (Witvliet, 2015), contohnya adalah yang dilakukan oleh Organisasi Amatir Radio Indonesia (ORARI) sesaat setelah gempa Lombok yang merusak infrastruktur komunikasi, mereka melakukan komunikasi darurat pada frekuensi 7.11 MHz untuk meminta bantuan pada daerah terdekat (IARU, 2018) dan gempa dan tsunami Palu dimana ORARI segera melakukan komunikasi darurat pada frekuensi 7.110 MHz dan 7.065 MHz beberapa menit setelah bencana alam merusak sarana komunikasi (ORARI, 2018). Hal ini disebabkan karena media

propagasi kanal radio HF adalah lapisan ionosfer yang tidak terpengaruh oleh bencana di permukaan bumi.

Sistem komunikasi HF gelombang angkasa (*skywave*) telah menjadi tulang punggung sistem komunikasi jarak jauh sejak tahun 1950-1960, sebelum lahirnya teknologi satelit pada awal tahun 1970an. Akhir-akhir ini komunikasi HF gelombang angkasa dipergunakan kembali untuk komunikasi jarak jauh antar pulau, penerbangan (Akinribido, 2003), stasiun cuaca dan lain sebagainya. Sistem komunikasi ini dapat dijadikan alternatif untuk memudahkan komunikasi daerah yang luas dan terpencil yang belum terjangkau sistem komunikasi lain, dan sebagai alternatif komunikasi dengan satelit yang mahal. Namun demikian, secara umum sistem komunikasi radio HF belum banyak dimanfaatkan untuk komunikasi data untuk keperluan komunikasi darurat maupun komunikasi dengan daerah terpencil.

Sistem komunikasi HF dengan gelombang angkasa bekerja dengan menggunakan lapisan ionosfer sebagai media propagasi. Ionosfer adalah suatu daerah dengan ketinggian 50 km – 500 km dimana pada daerah tersebut molekul-molekul yang ada mengalami proses ionisasi oleh radiasi matahari (Davies, 1990). Elektron-elektron bebas yang berada pada ionosfer merupakan faktor yang penting dalam gelombang HF, karena elektron-elektron bebaslah yang menyebabkan gelombang HF direfraksi dan dibelokkan kembali ke bumi. Semakin tinggi kerapatan elektron bebas, semakin tinggi frekuensi yang dapat dibelokkan. Pada siang hari, ada empat daerah pada ionosfer yang disebut D, E, F1, dan F2. Pada malam hari, elektron bebas yang ada pada lapisan D, E dan F1 hilang, sehingga hanya menyisakan lapisan F2 untuk komunikasi. Biasanya selalu ada paling sedikit dua jalur pembiasan gelombang angkasa pada frekuensi yang sama, yaitu dengan sudut elevasi yang lebih kecil (*low ray*), dan sudut elevasi yang lebih besar (*high ray*). Kemudian, ketika gelombang radio yang berpolarisasi datar (linier) menabrak ionosfer, gelombang tersebut akan terpisah menjadi dua karakteristik, yaitu *Ordinary* (O) dan *Extraordinary* (X) yang merambat secara terpisah pada lapisan ionosfer (Davies, 1990).

Di samping variasi frekuensi terhadap siklus matahari, musim, dan harian, terdapat variasi kondisi lapisan ionosfer yang tidak dapat diprediksikan, misalnya adalah lapisan *E* sporadis dan *spread F*. Lapisan *E* sporadis terjadi karena kerapatan

elektron yang sangat tinggi pada lapisan E, dengan kerapatan yang hampir sama dengan lapisan F. Peningkatan kerapatan elektron bebas pada lapisan E ini menyebabkan sebagian sinyal yang seharusnya direfleksikan oleh lapisan F, dipantulkan oleh lapisan E (McNamara, 1991).

Spread F terjadi ketika lapisan F menyebar secara tidak teratur sehingga menyebabkan penyebaran gelombang radio. Ketidakteraturan ini menyebabkan sinyal dipantulkan dari lintasan-lintasan yang berbeda, dengan waktu tempuh (*delay*) yang berbeda pula. Keberadaan ionosfer, terutama saat terjadi penebalan lapisan F yang disebut *Equatorial Spread F* (ESF) menyebabkan sinyal yang ditransmisikan akan mengalami fading, yaitu fluktuasi fase dan amplitudo yang menyebabkan daya sinyal yang diterima naik dan turun (Sreeja, 2009).

Ionosfer di daerah lintang rendah secara geomagnetik memiliki beberapa perbedaan dasar jika dibandingkan dengan lintang menengah dan tinggi. Perbedaan yang paling utama adalah Efek Fountain (McNamara, 1991), yang mendistribusikan elektron pada lintang rendah, memindahkan elektron dari atas ekuator geomagnetik menuju lintang 10° - 20° . Hal ini disebut dengan Anomali Ekuatorial atau Anomali Appleton. Puncak anomali ini hampir selalu terjadi pada sore hari selama *equinox* dan pada puncak aktivitas matahari. Ekuator geomagnetik terletak di Filipina, sedangkan Indonesia terletak pada lintang geomagnetik 10° - 20° pada selatan ekuator, lokasi terjadinya Efek Fountain (McNamara, 1991).

Sejumlah pemodelan dan simulator kanal telah dirancang berdasarkan model kanal Watterson (Watterson, 1970), dimana model Watterson ini hanya valid untuk daerah mid-latitude dengan kanal rendah (*narrowband*), tanpa melibatkan komponen Doppler dan *multipath* (Mastrangelo, 1997). Pemodelan yang lebih akurat untuk wideband telah dilakukan oleh *Institute for Telecommunication Sciences* (ITS), Amerika Serikat (Perry, 1989; Mastrangelo, 1997). Model ini telah divalidasi untuk pengukuran kanal HF The Mitre Corporation pada *Bandwidth* 800 kHz untuk daerah Homestead, FL ke Bedford, MA sejauh 2070 km (Perry, 1989). Tetapi model ini sangat rumit karena melibatkan banyak faktor yang harus diperoleh dari pengukuran ionosonde yang tidak selalu ada untuk setiap daerah (Clune, 2002). Pengukuran respon impuls kanal untuk jarak lebih dari 3000 km telah dilakukan oleh The Mitre Corporation (Perry, 1989; Yan, 2013; Cannon,

2000). Tetapi pengukuran tersebut dilakukan di daerah mid-latitude yang memiliki karakteristik ionosfer yang berbeda dengan lintang rendah. Selain itu, karakter wilayah propagasi adalah daratan, belum dilakukan pengukuran untuk wilayah propagasi yang didominasi lautan.

Salah satu penelitian tentang kanal radio HF di daerah lintang rendah, tepatnya Thailand, dengan arah *link* Utara-Selatan sejauh 600 km, berupa Channel Sounder, yang dilakukan oleh DAMSON (Doppler and *Multipath* Sounding Network) (Cannon, 2000). Sistem pengukuran ini menggunakan sinyal radio *continuous wave* (CW) HF yang bekerja dengan bandwidth 3 kHz (Angling, dkk, 1998). Penelitian tersebut menjelaskan fenomena lintasan pada daerah lintang rendah yang terdiri dari lintasan dengan hop tunggal pada siang hari dan hop jamak pada malam hari. Salah satu saran yang dinyatakan dalam makalah tersebut adalah pelaksanaan pengukuran pada daerah lintang rendah untuk kanal pita lebar (*wideband*) untuk mengetahui pengaruh anomali ekuatorial pada aplikasi digital yang menggunakan frekuensi HF. Oleh karena itu, pada disertasi kali ini dilakukan pengukuran respons impuls kanal radio HF dengan menggunakan kode *Pseudo Noise* (PN) sequence untuk mengetahui karakteristik kanal radio HF pada daerah lintang rendah dengan menggunakan *wideband* sebesar 500 kHz. *Link* yang dipergunakan pada disertasi ini memiliki orientasi yang berbeda dengan DAMSON, yaitu Barat-Timur dengan jarak yang lebih panjang, yaitu 3044 km. Hasil pengukuran respons impuls ini dipergunakan untuk memverifikasi karakteristik kanal radio HF pita lebar hasil simulasi dengan *ray tracing* pada *link* yang sama. Karakterisasi kanal radio HF pita lebar secara matematis dan statistik pada daerah lintang rendah merupakan kontribusi pertama dari disertasi ini.

Ketersediaan kanal radio HF untuk berkomunikasi tergantung pada kondisi lapisan ionosfer yang memiliki variasi *diurnal* yang berbeda tiap waktu. Oleh karena itu, untuk meningkatkan ketersediaan kanal radio HF dapat dipergunakan *site-diversity* dan komunikasi kooperatif yang memanfaatkan *link* alternatif untuk membantu komunikasi ketika *link* utama sedang tidak dapat dipergunakan untuk berkomunikasi. *Link* utama dan *link* alternatif dapat meningkatkan *availability* jika kedua *link* tersebut memiliki korelasi spasial yang rendah. Oleh karena itu, untuk mengetahui apakah *link* alternatif Surabaya-Ternate dapat dipergunakan untuk

meningkatkan availability, maka dihitung koefisien korelasi tegangan yang diterima pada *link* utama Surabaya-Merauke dengan *link* alternatif Surabaya-Ternate. Perhitungan ini dilakukan dengan simulasi dengan Proplab dan pengukuran langsung pada kedua *link* tersebut.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengukur korelasi spasial *link* HF skywave di lokasi yang berbeda. Pengukuran korelasi spasial single-hop gelombang radio HF telah dilakukan di Australia pada *link* sejauh 2044 km untuk mengukur korelasi sinyal antara sebuah transmitter dan tiga receiver yang masing-masing berjarak 1 km (Baker, 1971). Dari hasil pengukuran tersebut disebutkan bahwa korelasi spasial memiliki sifat isotropic dan bernilai tinggi untuk radius 1 km. Selain itu, hasil pengukuran yang dilakukan di United States untuk *link* sepanjang 1566 km dengan frekuensi 21,35 MHz menemukan korelasi sinyal yang tinggi untuk receiver yang terpisah sejauh 40λ untuk single-hop dan 10λ untuk multihop (Balser, 1962). Hasil yang sama juga ditunjukkan oleh pengukuran yang serupa di Turki (Gibson, 1995).

Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian pada disertasi ini melaporkan hasil evaluasi korelasi spasial antar *link* HF yang konvergen pada lokasi transmitter dengan dua receiver yang terpisah sejauh 1900 km di daerah low-latitude dengan mengikuti variasi *diurnal* lapisan ionosfer. Evaluasi korelasi spasial dilakukan berdasarkan simulasi *ray tracing* dan pengukuran pada dua *link* secara langsung yang memiliki jarak yang jauh, yaitu Surabaya–Merauke (3044 km) dan Surabaya–Ternate (1895 km) di Indonesia dengan memperhitungkan lebih dari satu mode propagasi dan lintasan jamak. Penelitian ini merupakan kontribusi dari disertasi ini dan merupakan pengembangan dari pengamatan dan kesimpulan yang dibuat oleh Vastberg tentang efek *multipath* pada kanal HF skywave (Vastberg, 1997).

Selain itu, jika korelasi kedua *link* tersebut rendah maka *site-diversity* antara *link* Surabaya–Merauke dan Surabaya–Ternate dapat meningkatkan availability secara signifikan. Hipotesis selanjutnya yang akan dibuktikan selanjutnya bahwa peningkatan availability dengan *site-diversity* dapat dicapai jika dipergunakan dua frekuensi yang memiliki karakteristik berbeda pada *link* utama dan *link* alternatif, misalnya frekuensi rendah pada *link* utama untuk malam hari dan frekuensi tinggi

pada *link* alternatif untuk siang hari. Evaluasi dengan simulasi Proplab untuk kedua *link* dengan menggunakan frekuensi yang berbeda pada *link* alternatif Surabaya-Ternate, yaitu 7 MHz, 14 MHz, dan 21 MHz, dilakukan untuk membuktikan pernyataan tersebut.

Pengamatan kondisi lapisan ionosfer di Indonesia dilakukan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) dengan menempatkan 7 (tujuh) buah ionosonde di wilayah Indonesia, yaitu, Kototabang, Pamengpeuk, Tanjungsari, Pontianak, Manado, Kupang dan Biak. Saat ini, ada 6 ionosonde yang aktif beroperasi, selain Pamengpeuk. Beberapa parameter ionosfer yang diamati oleh ionosonde adalah ketinggian virtual lapisan F2 ($h'F_2$), ketinggian virtual lapisan F ($h'F$), frekuensi kritis lapisan E (foE) dan frekuensi ordinary lapisan F2 (foF_2) (LAPAN, 2010).

Hasil pengukuran foF_2 yang dihasilkan oleh LAPAN dipergunakan sebagai dasar pemilihan frekuensi kerja dan waktu yang sesuai untuk pengiriman sinyal dari Tx ke Rx. Selain itu, hasil ionosonde ini juga dipergunakan untuk dasar evaluasi ketika terjadi kegagalan penerimaan sinyal akibat permasalahan ionosfer, seperti Sporadic-E (Es) dan ESF.

I.2 Perumusan dan Pembahasan Masalah

Permasalahan yang dirumuskan pada penelitian ini adalah :

1. Pemodelan karakteristik kanal radio HF secara statistik di daerah lintang rendah.

Pemodelan karakteristik kanal radio HF telah banyak dilakukan di daerah lintang menengah dan tinggi, namun jarang yang melakukannya di daerah lintang rendah. Padahal, lintang rendah memiliki karakteristik khas yang tidak ditemui pada daerah lintang tinggi dan menengah, yaitu adanya Efek Fountain dan ESF.

Penelitian terkait dengan karakteristik kanal radio HF yang pertama kali dilakukan oleh Watterson di daerah lintang menengah, kemudian Model Watterson ini dikembangkan pada daerah lintang tinggi. Model Watterson ini menjelaskan faktor-faktor yang menyusun respon impuls suatu kanal, tetapi faktor-faktor tersebut tidak dicari model statistiknya. Maka pada disertasi ini akan dirumuskan model matematis dari respons impuls dan model statistik dari parameter respons

impuls dari suatu kanal radio HF pada daerah lintang rendah yang belum pernah dibahas pada penelitian-penelitian sebelumnya.

Pada disertasi ini dirumuskan model matematika dari respons impuls dari kanal radio HF, dan dimodelkan parameter dari respons impuls, yaitu gain, pergeseran fase, *delay* dan sudut elevasi untuk setiap lintasan. Kemudian, dari parameter-parameter tersebut dihitung *channel gain*, *Power Delay Profile* (PDP) dan *rms delay spread*. Dari parameter-parameter pergeseran fase, PDP, *channel gain* dan *rms delay spread* dicari model statistiknya. Model ini dapat dipergunakan untuk menghitung parameter kanal yang dipergunakan pada saat merancang sistem komunikasi radio HF. Sudut elevasi dipergunakan untuk mengetahui sudut dari lintasan dengan mode jamak. Dengan mengetahui sudut elevasi dari suatu lintasan, dapat dipergunakan untuk memilih mode yang sesuai untuk membatasi *delay* dan menurunkan *delay spread* dengan cara mengatur sudut elevasi lintasan.

Data yang diolah untuk perumusan model matematis dan penentuan model statistik dari parameter-parameter respons impuls diperoleh dari simulasi dengan Proplab yang dilakukan selama dua hari, yaitu tanggal 11 Mei 2015 dan 11 September 2015, dan diverifikasi dengan pengukuran langsung yang dilakukan pada tanggal 12-15 Pebruari 2014 pada *link* Surabaya – Merauke sejauh 3044 km.

2. Korelasi spasial antara dua *link* dan *site-diversity*

Dalam rangka meningkatkan kehandalan dan cakupan sistem komunikasi radio HF *skywave*, dapat dipergunakan teknik komunikasi yang biasa dipergunakan pada sistem komunikasi terestrial, seperti *site-diversity*, *network-relay* dan komunikasi kooperatif. *Network relay* adalah topologi jaringan nirkabel dimana jika sumber dan destinasi tidak dapat berkomunikasi secara langsung, maka diperlukan node sebagai relay (Ono, 2016). Komunikasi kooperatif terjadi ketika komunikasi antara sumber dan destinasi ditingkatkan dengan adanya node, yang disebut sebagai relay (Sendonaris, 2003). *Site diversity* adalah transmisi sinyal yang dilakukan melalui beberapa lintasan propagasi yang berbeda dengan antena yang terpisah jauh atau *macroscopic diversity* (Rappaport, 2002). Salah satu syarat agar teknik tersebut maksimal untuk meningkatkan kehandalan dan cakupan sistem komunikasi radio HF *skywave* lintasan jamak adalah bahwa *link-link* yang dipergunakan harus

memiliki korelasi rendah. Contoh, jika dipergunakan *site-diversity* maka *link* utama dan *link-link* sebagai *link* alternatif harus bersifat acak dan tidak berkorelasi. Oleh karena itu, permasalahan selanjutnya yang dibahas pada disertasi kali ini adalah menghitung besar korelasi antara *link-link* pada kanal radio HF *skywave* lintasan dan mode jamak. Banyak penelitian yang telah dilaksanakan dalam rangka menghitung korelasi antar *link* HF, tetapi penelitian tersebut dilakukan di daerah lintang menengah, melibatkan *link* utama dan *link* alternatif yang relatif dekat dan tidak memperhatikan efek lintasan dan mode jamak.

Lapisan ionosfer yang merupakan media propagasi pada lintasan HF *skywave* berubah sesuai variasi *diurnalnya*, yang berbeda pada setiap *link*. Sifat ini dapat dipergunakan sebagai metode untuk meningkatkan availabilitas kanal radio HF dengan mempergunakan *site-diversity*, yaitu dengan mempergunakan frekuensi yang berbeda antara *link* utama dan *link* alternatif, sehingga ketika *link* utama tidak dapat mengirimkan sinyal, maka sinyal dapat dikirimkan melalui *link* alternatif yang mempergunakan frekuensi kerja yang berbeda. Oleh karena itu, permasalahan selanjutnya yang dibahas pada disertasi ini adalah pemilihan frekuensi antara *link* utama dan *link* alternatif dalam rangka meningkatkan availability kanal radio HF *skywave* lintasan dan mode jamak pada daerah lintang rendah.

Perhitungan koefisien korelasi antar *link* dilakukan dengan mengkorelasikan data tegangan yang diperoleh dari hasil simulasi Proplab pada tanggal 11 Mei 2015 dan 11 September 2015, kemudian hasilnya diverifikasi dengan pengukuran langsung pada *link* Surabaya-Merauke dan Surabaya-Ternate dan dengan hasil simulasi Proplab pada tanggal 13-15 Nopember 2016 pada *link* yang sama.

I.3 Tujuan Umum

Tujuan umum dari disertasi ini adalah memperoleh model kanal radio *skywave* multimode *multipath* HF di daerah lintang rendah secara statistik dan matematis, dan korelasi spasial antar dua *link* untuk kemungkinan penerapan *site-diversity* dan pemilihan frekuensi antara *link* utama dan *link* alternatif untuk meningkatkan availability pada kanal radio HF.

I.4 Tujuan khusus

1. Mengetahui karakteristik respons impuls kanal secara statistik, meliputi power *delay profile*, *delay spread*, *channel gain*, normalized path gain, phase shift, yang memperhitungkan efek sudut elevasi
2. Perhitungan korelasi spasial antar dua *link* untuk kemungkinan penerapan *site-diversity*
3. Penerapan *site-diversity* pada *link* utama dan *link diversity* untuk meningkatkan *availability*

I.5 Hipotesis

Hipotesis di bagi dalam dua bagian, yaitu, (1) Pemodelan Respons Impuls Kanal Radio HF, dan (2) Korelasi spasial kanal radio HF. Hipotesis yang pertama dinyatakan sebagai berikut :

a. *Channel gain*

Channel gain berasal dari akar kuadrat dari total kuat sinyal yang diterima pada setiap lintasan dengan daya pancar 1 Watt. Setiap lintasan yang dipancarkan memiliki jalur yang berbeda dan gain yang berbeda. Jalur lintasan yang berbeda menyebabkan pergeseran fase yang berbeda, yang nilainya sangat bervariasi jika dibandingkan dengan panjang gelombang 3-100 m, yang sangat kecil jika dibandingkan dengan total jarak propagasi. Dengan demikian, dapat dibuat hipotesis bahwa masing-masing lintasan bersifat independen satu sama lain, sehingga *channel gain* cenderung mengikuti Distribusi Rayleigh

b. Pergeseran Fase

Pergeseran fase diperoleh dari sisa pembagian panjang lintasan total dengan panjang gelombang, dengan asumsi tidak ada penambahan pergeseran fase yang disebabkan mekanisme yang lain. Karena panjang lintasan bisa bernilai berapapun tergantung pada kondisi ionosfer, mode propagasi dan sudut elevasi lintasan, maka bisa diambil hipotesis bahwa fase memiliki nilai acak dan mengikuti Distribusi Uniform $[0, 2\pi)$

c. *Delay Spread*

Delay spread menyatakan nilai dari waktu dispersi kanal yang nilainya mendekati kebalikan dari *Coherence Bandwidth* dari kanal yang merupakan laju

simbol maksimum yang dapat ditransmisikan melalui kanal tanpa equalizer. Variasi panjang lintasan dapat disebabkan oleh banyak mode dalam kanal yang menghasilkan waktu kedatangan tiap lintasan yang juga bervariasi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *delay spread* dari kanal yang memiliki mode tunggal, lebih pendek jika dibandingkan dengan kanal dengan mode jamak. Rms *delay spread* dihitung berdasarkan mean excess *delay* yang nilainya tergantung pada *delay* dan gain tiap lintasan. Karena gain dan *delay* antar lintasan bersifat independen satu sama lain, maka rms *delay spread* dapat mengikuti Distribusi Rayleigh. Kemudian, waktu *delay* tiap lintasan yang melalui ionosfer dapat dinyatakan bersifat acak dan memiliki Distribusi Normal. Hal ini mengakibatkan *maximum excess delay* yang merupakan interval antara *delay* terakhir dan pertama dalam respons impuls, juga berdistribusi Normal.

Hipotesis untuk penelitian kedua dinyatakan sebagai berikut :

- a. Lintasan yang berasal dari mode jamak dengan fase yang acak dan independen akan menyebabkan korelasi yang rendah untuk magnitudo tegangan dari sinyal yang diterima pada dua *link* yang penerimanya terpisah sejauh 1900 km, dengan mengikuti variasi pada kanal ionosfer
- b. Korelasi antar *link* yang rendah dapat meningkatkan availability dengan menggunakan *site diversity*
- c. Jika dipergunakan frekuensi yang memiliki karakteristik yang berbeda dengan mengikuti variasi *diurnal* lapisan ionosfer antara *link* utama dan *link* alternatif, maka dapat meningkatkan availability. Misal, frekuensi rendah pada *link* utama untuk malam hari dan frekuensi tinggi pada *link* alternatif untuk siang hari.

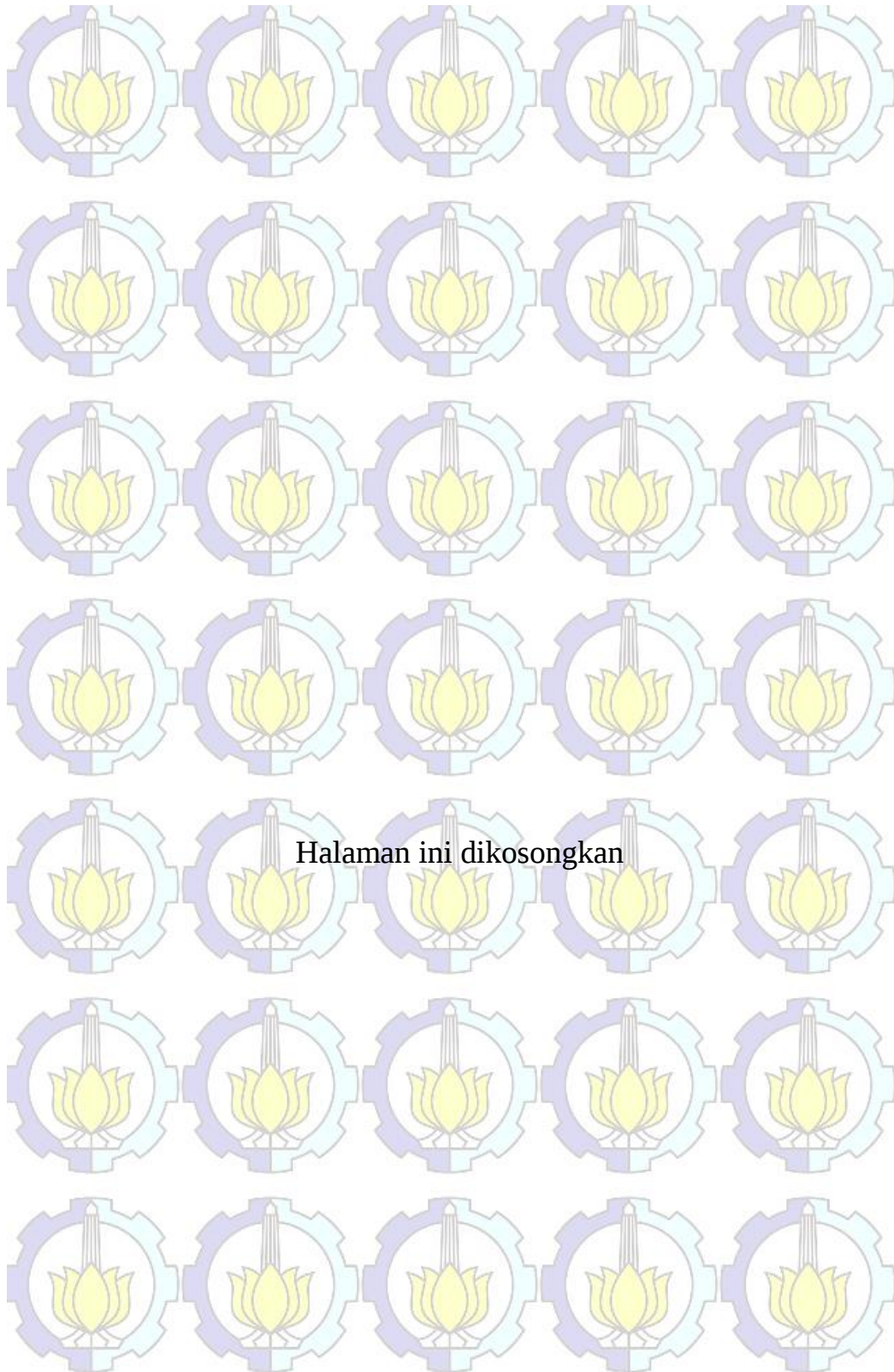
I.6 Orisinalitas

1. Model matematis dan statistik respons impuls kanal radio HF pada daerah lintang rendah
2. Korelasi spasial antara dua *link* pada daerah lintang rendah, yang melibatkan jarak yang lebih jauh dari penelitian-penelitian sebelumnya dan pengaruh lintasan dan mode jamak yang menyebabkan korelasi rendah
3. Penggunaan *site-diversity* pada kanal radio HF *skywave*

4. Pemilihan frekuensi yang memiliki karakteristik yang berbeda berdasarkan variasi *diurnal* pada *link* utama dan *link* alternatif pada teknik *site-diversity* untuk meningkatkan availabilitas kanal radio HF

1.7 Sistematika Penulisan Disertasi

1. Bab 1 PENDAHULUAN, terdiri dari latar belakang, perumusan dan pembahasan masalah, tujuan umum, tujuan khusus, orisinalitas dan sistematika penulisan disertasi
2. Bab 2 Kajian Pustaka dan Dasar Teori
3. Bab 3 Metode Penelitian, terdiri dari Pemodelan Respons Impuls, Korelasi Spasial dan *Diversity* dan Aplikasi *Site diversity*
4. Bab 4 Pemodelan Kanal Radio HF Jarak Jauh, terdiri dari simulasi *ray tracing*, pengukuran respons impuls, pemodelan matematis dan statistik untuk tiap parameter kanal, dan verifikasi model statistik hasil simulasi dengan pengukuran
5. Bab 5 Korelasi Spasial dan *Diversity* dari Kanal Radio HF *Skywave Multipath Multimode*, terdiri dari simulasi, perhitungan korelasi spasial, verifikasi hasil simulasi dengan pengukuran respons kanal dan simulasi, aplikasi *site diversity* untuk *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate
6. Bab 6 Kesimpulan dan Saran



BAB 2

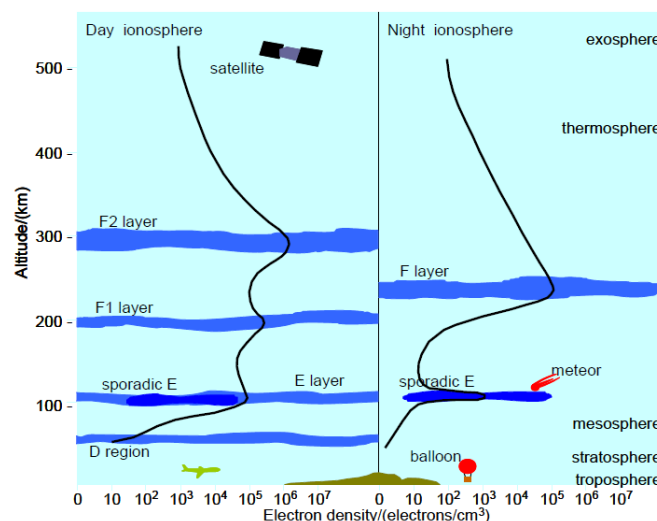
Kajian Pustaka dan Dasar Teori

2.1 Dasar Teori

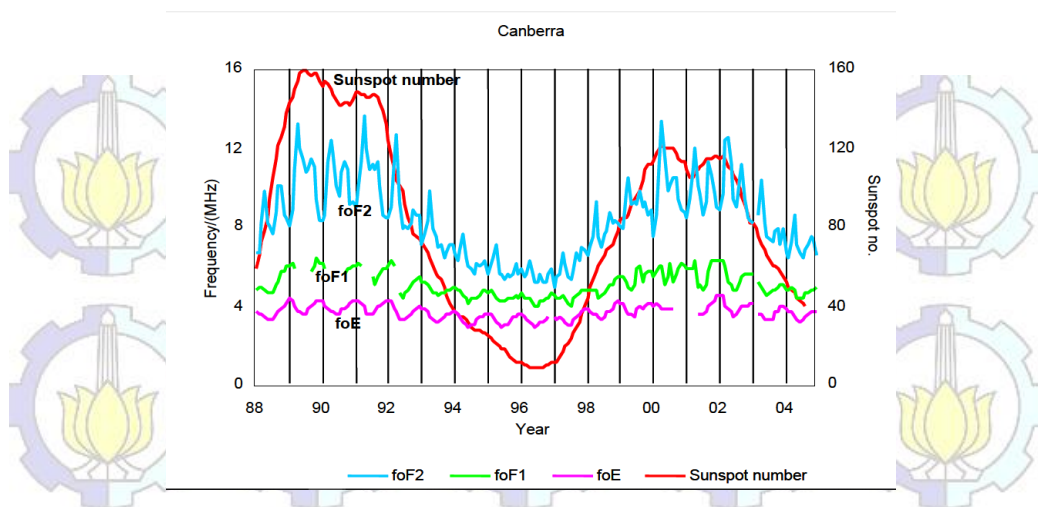
Pada subbab ini akan dibahas hal-hal yang menjadi landasan teori dalam mengolah empat hal besar dalam disertasi kali ini, yaitu pemodelan matematis respons impuls pada kanal radio HF, pemodelan secara statistik parameter-parameter yang menyusun respons impuls, korelasi antar *link* radio HF dan penerapan *site-diversity*, dan metode pemilihan frekuensi untuk meningkatkan availabilitas kanal radio HF dengan mengikuti variasi *diurnal* lapisan ionosfer.

2.1.1 Lapisan Ionosfer

Ionosfer adalah bagian atmosfer yang terionisasi oleh radiasi matahari. Di dalam sistem komunikasi HF, lapisan ini berfungsi sebagai media propagasi gelombang radio dari pemancar menuju penerima. Propagasi ini terjadi dengan memanfaatkan karakteristik difraksi pada lapisan tersebut. Lapisan ini bersifat dinamis karena dipengaruhi oleh perubahan waktu sepanjang hari, perubahan musim selama setahun, perbedaan garis lintang, aktivitas matahari serta perbedaan ketinggian lapisan ionosfer sebagai media pemantul gelombang. Kondisi perubahan



Gambar 2.1 Struktur Lapisan Ionosfer (IPS, 2001)

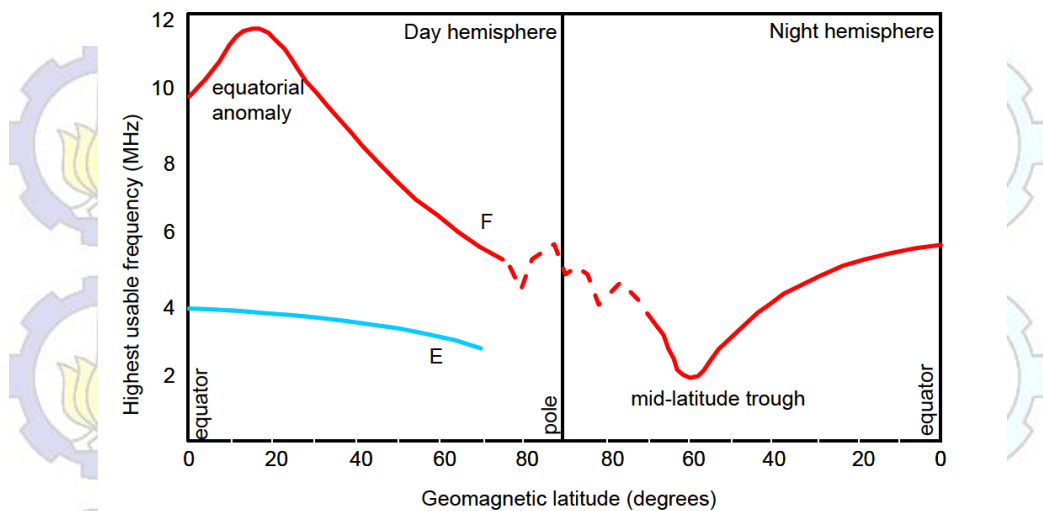


Gambar 2.2 Frekuensi maksimum berdasarkan aktivitas matahari di Canberra (IPS, 2001)

pada lapisan ionosfer terhadap perubahan waktu antara siang dan malam dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Lapisan ionosfer dapat dibagi dalam 3 layer (lapisan), yaitu lapisan D, lapisan E dan Lapisan F. Masing-masing lapisan memiliki pengaruh bagi komunikasi radio HF. Pada Gambar 2.1 terlihat ketika siang hari lapisan F terbagi menjadi 2 lapisan yaitu lapisan F1, dan F2. Untuk kondisi malam hari, lapisan F kembali menjadi hanya satu lapisan F saja.

Lapisan ionosfer bukan media yang stabil yang memungkinkan penggunaan frekuensi yang sama di sepanjang tahun atau bahkan lebih dari 24 jam. Posisi matahari berubah-ubah terhadap titik-titik tertentu di bumi, dimana perubahan itu bisa terjadi harian, bulanan, dan tahunan, maka karakteristik yang pasti dari lapisan-lapisan tersebut sulit ditentukan (IPS, 2001). Ketika aktivitas matahari mencapai titik minimum, hanya frekuensi rendah yang dapat dipantulkan oleh lapisan ionosfer, sementara ketika aktivitas matahari mencapai titik maksimum maka frekuensi yang lebih tinggi dapat berpropagasi lebih optimal. Aktivitas matahari mempengaruhi frekuensi maksimum pada lapisan E, F1 dan F2 ditunjukkan pada Gambar 2.2. Ionosfer memiliki kondisi tenang dan terganggu. Tenang adalah ketika fluktuasi yang terjadi pada kerapatan elektron relatif kecil sehingga tidak mempengaruhi jumlah lintasan jamak. Kondisi lapisan ionosfer yang terganggu berarti bahwa fluktuasi kerapatan elektron relatif lebih cepat jika dibandingkan



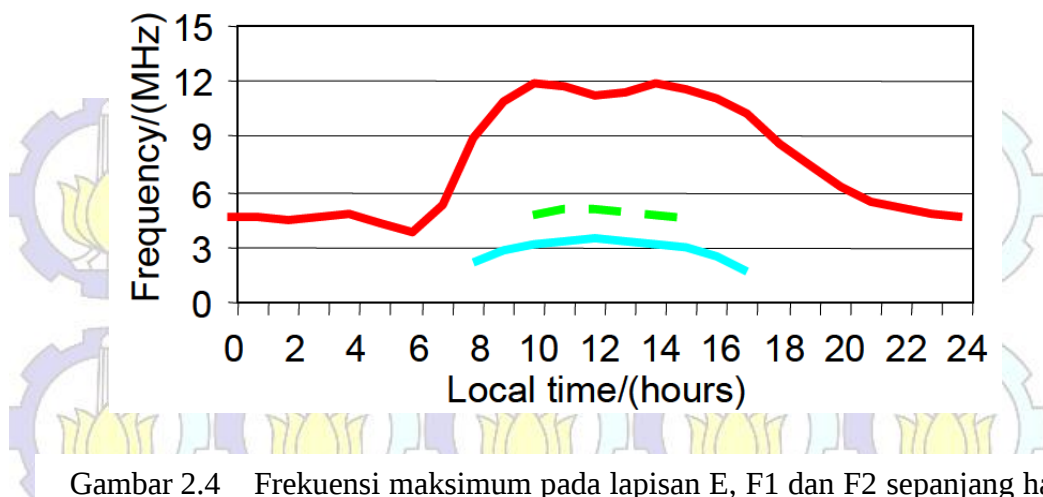
Gambar 2.3 Pengaruh perbedaan garis lintang pada ionosfer (IPS, 2001)

dengan ionosfer yang tenang sehingga mempengaruhi *delay* dan jumlah lintasan jamak. Data hasil pengukuran kanal HF di Cina oleh Yao, dkk menunjukkan bahwa pada kondisi yang tenang, ionosfer akan stabil pada waktu interval 2 menit, sedangkan pada kondisi yang terganggu, kestabilan elektron di ionosfer untuk komunikasi adalah sekitar 300 ms (Yao, 2011).

Variasi frekuensi maksimum yang dapat digunakan pada lapisan E dan F antara siang hari dan malam hari pada garis lintang tinggi hingga garis ekuator ditunjukkan oleh Gambar 2.3. Selama siang hari, seiring garis lintang yang lebih tinggi, radiasi matahari pada atmosfer semakin *oblique*, sehingga intensitas radiasi matahari dan produksi elektron menurun seiring garis lintang yang semakin tinggi. Pada lapisan F, variasi garis lintang terbentuk sepanjang malam disebabkan oleh pergerakan angin pada atmosfer di atasnya yang terjadi selama sore hingga dini hari.

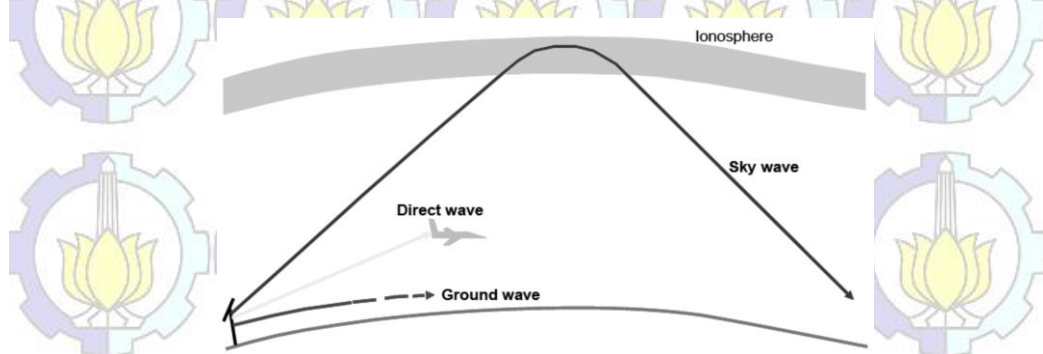
Pada siang hari, frekuensi maksimum pada lapisan F mencapai titik puncak tidak tepat di garis ekuator melainkan pada 15° sampai 20° lintang utara dan selatan dari garis khatulistiwa. Hal ini disebut sebagai *equatorial anomaly*. Pada malam hari, frekuensi mencapai minimum sekitar 60° lintang utara dan selatan garis khatulistiwa. Dengan demikian, karakteristik tersebut perlu diketahui dan dipertimbangkan dalam perancangan sistem komunikasi pada daerah khatulistiwa.

Secara umum frekuensi pada gelombang radio HF akan meningkat di siang hari dan akan turun pada malam hari ditunjukkan pada Gambar 2.4. Hal ini disebabkan karena pengaruh radiasi matahari yang memproduksi elektron di lapisan

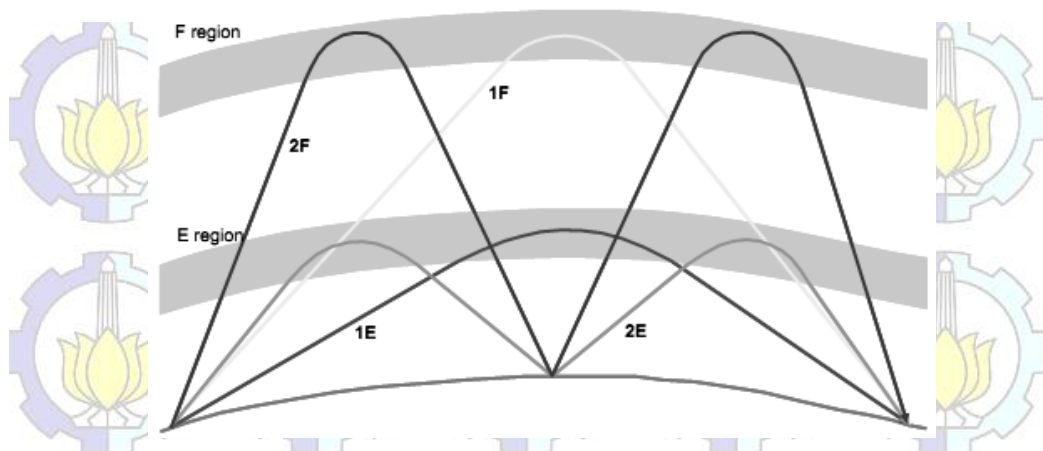


Gambar 2.4 Frekuensi maksimum pada lapisan E, F1 dan F2 sepanjang hari (IPS, 2001)

ionosfer meningkat saat siang hari sehingga lapisan D, E, dan F terlihat. Pada siang hari radiasi dari matahari akan mencapai nilai maksimum sehingga lapisan F terionisasi oleh energi sinar matahari yang sangat besar dan frekuensi meningkat dengan cepat hingga mencapai maksimum sekitar tengah hari. Selama sore hari, frekuensi berangsur-angsur berkurang secara bertahap ke arah matahari terbenam karena kehilangan elektron dan pada saat gelap lapisan D, E, dan F1 menghilang. Sedangkan pada malam hari, komunikasi hanya terjadi pada lapisan F dengan frekuensi yang akan terus menurun hingga mencapai minimum sebelum fajar tiba. Pada ketinggian ini, atmosfer bumi sangat tipis sehingga ion dan elektron bergabung kembali dengan sangat lambat. Akibatnya, lapisan F tetap terionisasi sepanjang malam dan frekuensi maksimum secara bertahap menurun hingga mencapai minimum sebelum matahari terbit. Setelah matahari terbit, ionisasi meningkat pesat selama beberapa jam pertama. Sepanjang pagi terus meningkat dengan tingkat yang lebih lambat dan mencapai maksimum setelah tengah hari.



Gambar 2.5 Tipe-tipe propagasi (IPS, 2001)



Gambar 2.6 Mode propagasi HF (IPS Online, 2001)

Sistem komunikasi HF tidak dipengaruhi oleh cuaca yang terjadi pada kondisi lapisan udara (atmosfer) di suatu daerah/wilayah dalam jangka waktu relatif pendek. Kondisi atmosfer yang menjadi unsur utama cuaca adalah komponen gejala alam seperti sinar matahari, awan, angin, hujan, kelembaban, tekanan dan suhu.

2.1.2 Perambatan Gelombang Radio HF

Gelombang radio HF dengan rentang frekuensi 3-30 MHz telah dipergunakan untuk sistem komunikasi untuk militer dan sipil, termasuk bidang-bidang pelayaran, penerbangan, dan pengguna radio amatir. Seiring perkembangan sistem komunikasi satelit, penggunaan sistem komunikasi gelombang radio HF mulai ditinggalkan. Tetapi, sistem komunikasi gelombang radio HF masih memiliki peran sebagai media komunikasi yang handal dan murah daripada satelit untuk menghubungkan wilayah-wilayah yang luas dan terpisah lautan, atau daerah-daerah terpencil di tengah hutan atau di puncak gunung dimana infrastruktur telekomunikasi yang lain sulit dibangun, seperti di beberapa wilayah Indonesia, khususnya pedalaman Papua. Selain itu, sistem komunikasi radio HF memiliki peralatan yang sederhana yang relatif tidak terganggu ketika terjadi bencana alam, sehingga dapat dijadikan sistem komunikasi alternatif pada saat terjadi bencana alam.

Sinyal radio HF dapat berpropagasi pada jarak yang berbeda dengan beberapa mekanisme sebagai berikut (IPS, 2001):

- *Groundwave* (gelombang permukaan), dimana sinyal radio pada jarak sekitar 100 km di darat dan 300 km di laut akan berpropagasi mengikuti permukaan bumi. Redaman yang terjadi pada tipe propagasi ini dipengaruhi oleh tinggi antena, polarisasi, frekuensi, tipe permukaan bumi, apakah lautan atau daratan
- Pantulan langsung atau *Line-of-Sight* (LOS), dimana sinyal radio berpropagasi dengan pantulan pada permukaan bumi. Letak pemantul gelombang tergantung pada jarak antara terminal *Tx-Rx*, frekuensi dan polarisasi.
- *Skywave* (Gelombang angkasa), sinyal radio dipantulkan oleh lapisan ionosfer. Mode propagasi ini terjadi pada semua jarak antara *Tx* dan *Rx*.

Gambar 2.5 menjelaskan perbedaan *groundwave*, LOS dan *skywave*. Untuk jarak pendek, propagasi didominasi oleh *groundwave*. Jarak yang dapat ditempuh tergantung secara langsung pada frekuensi. Dengan naiknya frekuensi kerja, jarak *groundwave* akan semakin dekat, demikian pula dengan turunnya konduktivitas bumi akan mengurangi jarak *groundwave*.

Pada sistem propagasi dengan *skywave* terdapat dua mode yaitu *single hop* atau satu kali pantulan dan *multi hop* atau banyak pantulan. Mode *single hop* akan terjadi ketika jarak propagasi yang ditempuh antara 300-2300 km, setelah 2300 km akan mengalami mode *multi hop*.

Jarak propagasi antara 2300-4500 km memiliki mode *double hop*, dan lebih dari 4500 km memiliki mode lebih dari *double hop* (Maxim, 1936). Mode pantulan dapat dilihat pada Gambar 2.6. Pada gambar tersebut dapat dilihat mekanisme propagasi melalui Lapisan E, yaitu 1E atau *single hop* pada lapisan E dan 2E atau *double hop* pada Lapisan E. Selain itu dapat dilihat juga mekanisme propagasi melalui Lapisan F, yaitu 1F dan 2F, yang masing-masing adalah *single hop* dan *double hop* pada Lapisan F.

Salah satu faktor yang penting dalam komunikasi HF adalah *Maximum Usable Frequency* (MUF), yaitu frekuensi kerja maksimum dari suatu sistem komunikasi yang dapat dipantulkan oleh lapisan ionosfer. MUF tergantung pada dua hal, yaitu frekuensi kritis dari lapisan ionosfer pada titik pemantul atau titik kontrol, frekuensi kritis (f_c), dan geometri dari lintasan. Frekuensi kritis adalah frekuensi tertinggi gelombang radio yang dapat dikirimkan langsung naik ke

ionosfer dan dipantulkan kembali. Secara umum, MUF dinyatakan dengan (McNamara, 1991) :

$$MUF = \frac{f_c}{\cos I} \quad (2.1)$$

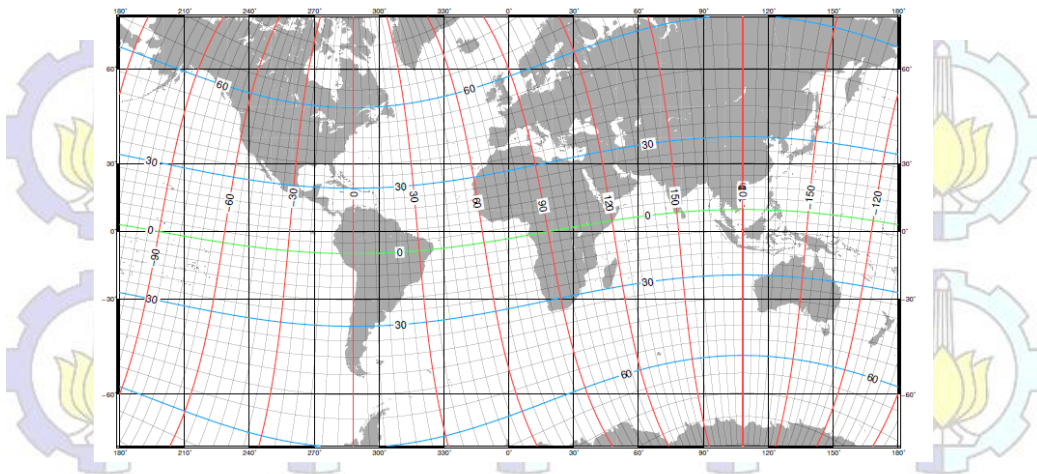
dengan I adalah sudut kedatangan dan f_c adalah frekuensi kritis.

MUF diperoleh dari kerapatan elektron maksimum dari lapisan ionosfer yang dipergunakan sebagai lapisan pemantul. Sinyal yang bekerja pada frekuensi yang lebih tinggi daripada MUF tidak akan dibelokkan ke tujuan di bumi, tetapi diteruskan ke angkasa. Pada siang hari, komunikasi bisa dilakukan dengan lapisan E dan F1 dan F2, sedangkan pada malam hari lapisan E menghilang, lapisan F1 dan F2 menjadi satu. Oleh karena itu, sebelum merancang sistem komunikasi gelombang radio HF, frekuensi kerja harus disesuaikan dengan frekuensi kritis lapisan ionosfer.

Ada juga frekuensi terendah yang dapat digunakan. Semua frekuensi di bawah frekuensi terendah yang dapat digunakan diserap oleh Lapisan-D dan dengan demikian tidak dapat digunakan untuk komunikasi. Terkadang selama periode minimum sunspot, frekuensi terendah yang dapat digunakan bisa lebih tinggi dari *Maximum Usable Frequency*. Ketika ini terjadi, mungkin tidak ada komunikasi antara dua lokasi. Komunikasi Regional sesekali berjalan dalam hal ini selama sore hari saat aktivitas sunspot adalah minimal.

2.1.3 Ionosfer di Daerah Ekuator

Koordinat geografis bumi dinyatakan dalam garis lintang dan bujur, dimana daerah ekuator dinyatakan dalam lintang 0° sedangkan kutub dinyatakan dalam lintang $\pm 90^\circ$. Karena koordinat geomagnetik juga mempertimbangkan kutub dan ekuator, maka koordinat geomagnetik juga dinyatakan dalam lintang dan bujur. Lintang geomagnetik dinyatakan sebagai kuat dan arah medan magnet pada tiap titik pada permukaan bumi, sedangkan bujur geomagnetik dinyatakan sebagai posisi relatif terhadap matahari. Pada Gambar 2.7 dapat dilihat sistem koordinat geomagnetik bumi, dimana sesuai garis mendatar yang melengkung, Indonesia



Gambar 2.7 Koordinat geomagnetik (IGRF, 2014)

terletak pada lintang $10^{\circ} - 20^{\circ}$ sebelah selatan ekuator geomagnetik bersama dengan Afrika bagian selatan dan Amerika Selatan. Secara geomagnetik, daerah lintang rendah adalah $0^{\circ} - 30^{\circ}$, menengah $30^{\circ} - 60^{\circ}$ dan tinggi $60^{\circ} - 90^{\circ}$ (Atulkar, 2014).

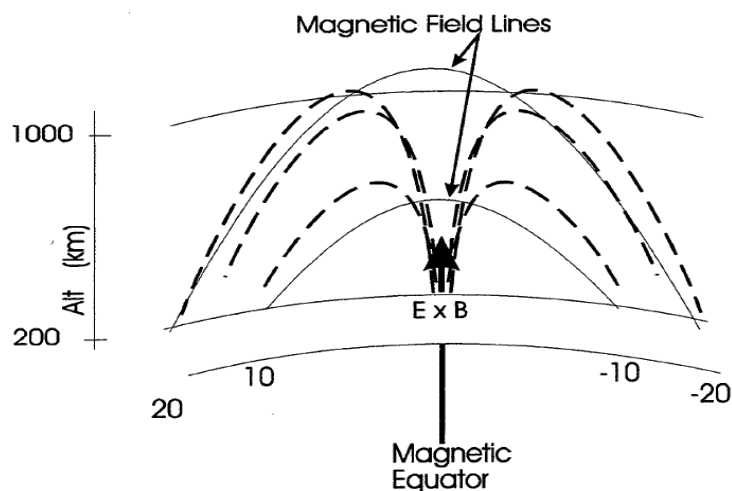
Penelitian tentang karakteristik kanal HF banyak dilakukan di daerah lintang menengah dan tinggi, dan hanya sedikit yang melakukannya di daerah lintang rendah. Padahal, struktur ionosfer pada daerah lintang rendah berbeda dengan lokasi-lokasi lain, dimana medan listrik dan medan magnet pada medan magnet ekuator paralel terhadap permukaan bumi yang mengakibatkan ionosfer pada daerah lintang rendah mengalami anomali (Smith, 1998). Salah satu anomali ionosfer pada daerah ekuatorial adalah Efek *Fountain* yang mendistribusikan kembali elektron pada daerah lintang rendah, bergerak dari atas ekuator turun menuju ketinggian 10° sampai 20° (McNamara, 1991).

Efek *Fountain* dijelaskan sebagai berikut : pada daerah ekuator geomagnetik, ditambahkan medan listrik bumi ke arah timur dan medan magnet pada arah utara-selatan bumi, yang keduanya hampir horizontal pada daerah ekuatorial. Kemudian, sejumlah elektron ditambahkan pada ekuator melalui proses fotoionisasi. Efek kombinasi dari medan listrik dan medan magnet menyebabkan elektron naik ke atas, mengenai garis gaya medan magnet bumi yang horisontal. Elektron-elektron tersebut menyebar ke bawah garis tersebut dan memasuki bagian inti ionosfer pada daerah F mengakibatkan adanya gumpalan elektron pada lintang

10° sampai 20°. Gumpalan ini disebut Puncak Ekuatorial atau Anomali Appleton (McNamara, 1991). Anomali Appleton ini dapat dilihat pada Gambar 2.8.

Anomali ini yang hampir selalu terjadi pada akhir sore atau awal malam pada saat solar maximum dan *equinox* mengakibatkan frekuensi kritis naik melebihi 15 MHz, sedangkan ketinggian dari kerapatan maksimal eletron, hmF2, lebih rendah daripada hmF2 pada daerah ekuatorial. Perubahan foF2 dan hmF2 menyebabkan kesulitan dalam menentukan efek propagasi gelombang HF pada ionosfer di daerah ekuatorial pada kondisi tersebut dan menghasilkan mode propagasi yang tidak biasa (McNamara, 1991).

Frekuensi kritis untuk ionosfer pada lintang rendah secara umum cukup tinggi sehingga diharapkan dapat menjadi media yang baik untuk sistem komunikasi radio HF. Selain itu, pada daerah lintang rendah jarang terjadi badai ionosfer dan tidak terdapat gangguan yang parah seperti daerah lintang tinggi. Tetapi, daerah ini memiliki gradien horisontal dari frekuensi kritis yang luas, dimana frekuensi kritis dapat berubah secara cepat dalam beberapa ratus kilometer. Contohnya adalah peningkatan foF2 pada jam 6 waktu lokal pada aktivitas matahari yang tinggi pada di Manila. Pada aktivitas matahari yang tinggi pada bulan Januari 1958, foF2 meningkat dari 6 MHz pada pukul 6 waktu lokal dan meningkat hingga 14 MHz hanya satu jam setelahnya. Hal ini mempersulit operator sistem komunikasi HF untuk menentukan frekuensi kerja karena dari pemerintah hanya memberikan ijin dua slot frekuensi, yaitu 5 MHz (malam) dan 12 MHz (siang). Frekuensi 12 MHz



Gambar 2.8 Efek Fountain (Smith, 1998)

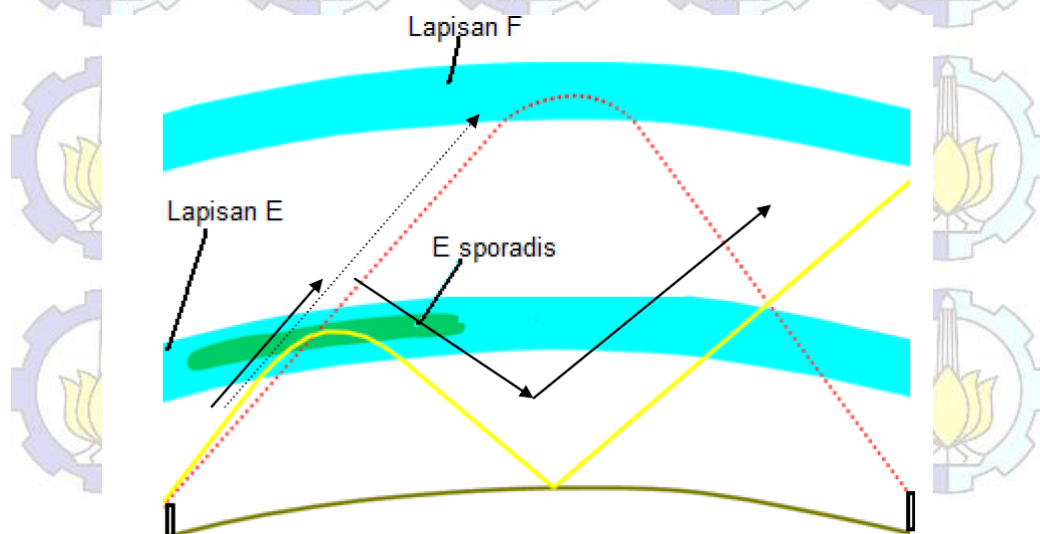
tidak dapat dipergunakan, karena frekuensi ini terlalu tinggi sebelum pukul 7, sementara jika dipergunakan frekuensi 5 MHz akan terserap selama periode transisi tersebut (McNamara, 1991).

Demikian pula untuk sirkuit jarak jauh yang terbentang antara timur dan barat yang merambat mempergunakan beberapa pantulan pada lapisan F, masalah peningkatan frekuensi yang cepat pada saat matahari terbit akan menjadi masalah yang serius, karena perubahan frekuensi yang cepat tersebut terjadi untuk tiap titik pantul sehingga mempersulit pemilihan frekuensi yang dipergunakan dan pemilihan antenna.

Salah satu ketidak teraturan pada lapisan Ionosfer yang dapat mengganggu sistem komunikasi HF adalah munculnya *sporadic-E* yang disebabkan karena meningkatnya kerapatan elektron di lapisan E. Gangguan yang disebabkan karena *sporadic-E* ini menyebabkan dimana pengiriman sinyal dari pemancar ke penerima yang seharusnya di pantulkan pada lapisan F, namun karena munculnya *sporadic-E* sangat besar maka sinyal di pantulkan oleh *sporadic-E* sehingga jarak jangkanya berubah sehingga tidak dapat sampai pada penerima. Ilustrasi tersebut dapat di gambarkan pada Gambar 2.9 (IPS, 2001).

2.1.4 Teori Magnetoionik

Teori matematika dari perambatan radio pada ionosfer dengan adanya medan magnetik bumi dikembangkan oleh Sir Edward Appleton dan rekan kerjanya



Gambar 2.9 Ilustrasi gangguan dikarenakan *sporadic-E* (IPS, 2001)

pada tahun 1920 (Ratcliffe, 1959), dan rumus indeks refraksi biasanya diasosiasikan dengan namanya, seperti Formula Appleton atau Formula Appleton-Hartree (Budden, 1985) dan Formula Appleton-Lassen (Rawer, 1976).

2.1.4.1 Karakteristik Plasma

Ionosfer terdiri dari gas dingin yang secara lemah terionisasi (plasma) dengan medan magnet bumi terletak di atasnya (magnetoplasma). Dalam hal ini plasma dibatasi memiliki jumlah elektron (dengan muatan $-e$ dan massa m) dan ion positif bermuatan tunggal (dengan muatan $+e$ dan massa M) yang sama.

Jika suatu gaya bekerja pada sebuah elektron yang berada pada suatu papan plasma dimana gas elektron dipindahkan pada jarak dekat x yang berhubungan dengan gas dari ion positif yang banyak, maka frekuensi dari plasma ion bermuatan tunggal N_i (ω_{Ni}) diberikan (Davies, 1991) :

$$\omega_{Ni}^2 = 4\pi^2 f_{Ni}^2 = \frac{N_i e^2}{\epsilon_0 M} \quad (2.2)$$

Oleh karena itu,

$$f_{Ni} = f_N \left(\frac{m}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

Dengan f_N adalah frekuensi plasma, f_{Ni} adalah frekuensi plasma ion bermuatan tunggal, dan ϵ_0 adalah permitivitas ruang hampa ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m).

Ketika suatu ion dengan muatan e diinjeksikan ke dalam ruang bebas yang mengandung medan magnetik seragam yang dikenakan B_0 (sebesar 5×10^{-5} Tesla) maka hal itu menggambarkan lintasan heliks. Proyeksi pergerakan ion di atas suatu bidang yang tegak lurus dengan B_0 adalah lingkaran dengan jari-jari ω_H dengan kelajuan angular ω_H disebut sebagai frekuensi angular cyclotron atau frekuensi angular gyromagnetic. f_H adalah gyrofrequency elektron yang kadang disebut frekuensi Larmor, maka untuk ion dengan muatan tunggal dengan massa M , dan gyrofrequency ion f_{Hi} adalah (Davies, 1991) :

$$f_{Hi} = \frac{2\pi}{\omega_{Hi}} = \frac{|e|}{2\pi M} B_0 \quad (2.4)$$

Sehingga :

$$f_{Hi} = \frac{m}{M} f_H \quad (2.5)$$

2.1.4.2 Tabrakan Partikel Bermuatan

Ketika suatu gelombang melintasi plasma, ion-ion diaktifkan dan secara umum, kecepatan elektron akan melebihi kecepatan ion dan netral yang tebal. Pada plasma dengan kerapatan netral yang tinggi, tabrakan merupakan faktor dominan pada pergerakan partikel. Secara sederhana dapat dijelaskan bahwa tabrakan elektron-neutron dan elektron ion merupakan tabrakan elastis yang terjadi ketika pusat partikel mendekati suatu jarak $r_e + r_a$, dimana r_e dan r_a masing-masing adalah jari-jari dari elektron dan netral.

2.1.4.3 Formula Appleton

Jika sebuah gelombang elektromagnetik dalam bidang datar bergerak pada arah-x dalam sebuah sistem orthogonal dimana medan magnet eksternal terletak pada bidang x-y dan membentuk sudut θ dengan arah propagasi sebagaimana terlihat pada Gambar 2.10, maka persamaan pergerakan elektron diberikan oleh (Davies, 1991) :

$$m\ddot{\mathbf{r}} = e\mathbf{E} + (e\dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{B}) - m\nu\dot{\mathbf{r}} \quad (2.6)$$

dengan ketentuan di sisi kanan adalah medan elektrostatis ($e\mathbf{E}$), gaya Lorentz ($e\dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{B}$) dan gaya gesek ($-m\nu\dot{\mathbf{r}}$); titik merepresentasikan laju perubahan, dan $\mathbf{r}$ adalah posisi vektor, $\dot{\mathbf{r}}$ adalah turunan pertama dari $\mathbf{r}$ atau kecepatan dan $\ddot{\mathbf{r}}$ adalah turunan kedua dari $\mathbf{r}$ atau percepatan. Frekuensi tabrakan ν berdasarkan asumsi bahwa momentum yang diorder, diperoleh dari gelombang, dihancurkan oleh tabrakan.

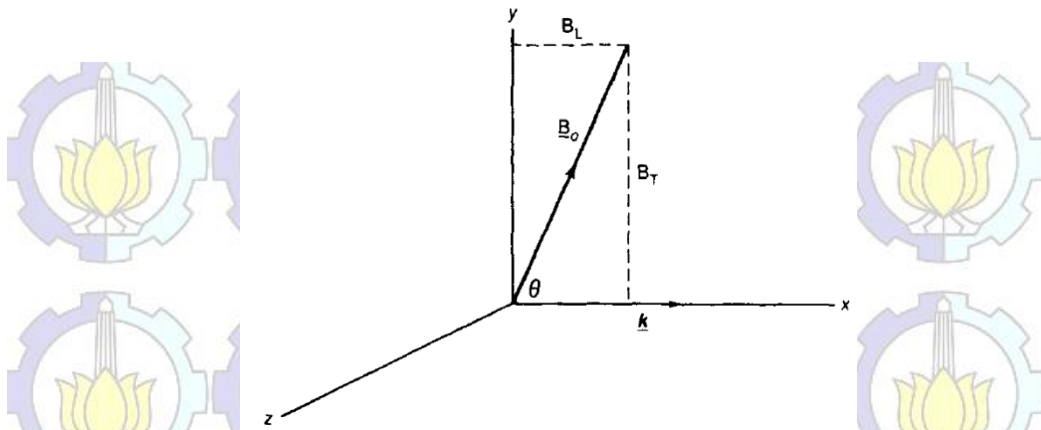
Komponen x , y , dan z untuk $\mathbf{r}$ terdiri dari (Davies, 1991) :

$$m\ddot{x} = eE_x - e\dot{z}B_T - m\nu\dot{x} \quad (2.7a)$$

$$m\ddot{y} = eE_y + e\dot{z}B_L - m\nu\dot{y} \quad (2.7b)$$

$$m\ddot{z} = eE_z + e\dot{x}B_T - e\dot{y}B_L - m\nu\dot{z} \quad (2.7c)$$

Persamaan-persamaan tersebut ditransformasikan sebagai berikut (Davies, 1991) :



Gambar 2.10 Arah $-x$ adalah arah propagasi fase, dan medan magnet eksternal terletak pada bidang x - y , sedangkan bidang y - z adalah arah wavefront

- Dikalikan dengan kerapatan muatan Ne
- $\ddot{x}$ digantikan oleh $i\omega x$, $\ddot{x}$ oleh $-\omega^2 x$, dan seterusnya
- $Nex = P_x$, komponen $-x$ dari polarisasi volume, demikian pula digunakan P_y dan P_z untuk Ney dan Nez

Dengan beberapa perubahan didapatkan hubungan pokok (Davies, 1991) :

$$\varepsilon_0 X E_x = -P_x(1 - iZ) + iP_z Y_T \quad (2.8a)$$

$$\varepsilon_0 X E_y = -P_y(1 - iZ) - iP_z Y_L \quad (2.8b)$$

$$\varepsilon_0 X E_z = -P_z(1 - iZ) - iP_z Y_T + iP_y Y_L \quad (2.8c)$$

Dengan $X = Ne^2/\varepsilon_0 m\omega^2$, $Y_L = eB_L/m\omega$, $Y_T = eB_T/m\omega$, dan $Z = v/\omega$

Subskrip T dan L menyatakan komponen transversal dan longitudinal dari medan magnet yang dikenakan dengan referensi arah normal gelombang. Dari penjelasan diatas diperoleh Formula Appleton sebagai berikut (Davies, 1991) :

$$n^2 = (\mu - i\chi)^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \left[\frac{Y_T^4}{4(1 - Z - iZ)^2} + Y_L^2 \right]^{1/2}} \quad (2.9)$$

Dimana n adalah indeks refraksi kompleks dan μ adalah indeks refraksi nyata.

Jika tabrakan ditiadakan (misalnya pada daerah E dan F) $Z \approx 0$ maka,

$$\mu^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 \pm [Y_T^4 + 4(1-X)^2 Y_L^2]^{1/2}} \quad (2.10)$$

Jika medan magnet diabaikan (misal $Y \ll 1$), maka :

$$n^2 = (\mu - i\chi)^2 = \frac{X}{1 - iZ} \quad (2.11a)$$

$$\text{Jika } v^2 \ll \omega^2, \kappa \approx \omega\chi/c \approx \frac{\omega_N^2}{2\pi\omega^2 c} \quad (2.11b)$$

$$\text{Jika } v^2 \gg \omega^2, \kappa \approx \frac{\omega_N^2}{2\mu v c} \quad (2.11c)$$

Jika baik efek tabrakan dan medan magnet diabaikan, maka :

$$\mu^2 = 1 - X = \left(\frac{f_N}{f}\right)^2 = 1 - k \frac{N}{f^2} \quad (2.12)$$

Dengan $k = 80,5$; N adalah jumlah elektron per meter³ dan f dalam Hertz.

Penjelasan tentang formula Appleton dimulai dengan memperhatikan Persamaan (2.12), dimana dapat diketahui bahwa kuadrat dari indeks refraksi (μ) adalah kurang dari satu, dan karena syarat gelombang dapat merambat adalah μ bernilai nyata, maka μ harus terletak pada 0 dan 1. Selanjutnya, untuk suatu frekuensi tertentu, indeks refraksi menurun dengan meningkatnya kerapatan elektron, dan oleh karena itu untuk suatu kerapatan elektron tertentu, indeks refraksi turun dengan menurunnya frekuensi.

Jika suatu gelombang radio datang dengan sudut kedatangan ϕ pada lapisan pembiasan datar, maka gelombang yang menembus lapisan, kerapatan elektron meningkat dan gelombang normal berubah berdasarkan Hukum Snell, sebagai berikut (Davies, 1991) :

$$\mu \sin \phi = \mu_0 \sin \phi_0 \quad (2.13)$$

dimana ϕ adalah sudut antara gelombang normal dan tegak lurus dengan permukaan dari sudut refraksi konstan μ , sedangkan μ_0 dan ϕ_0 adalah nilai yang berhubungan dengan perbatasan antara dua lapisan, yaitu $\mu_0 = 1$. Pada pencerminan, $\phi = 90^\circ$ sehingga (Davies, 1991) :

$$\mu_r = \sin \phi_0 \quad (2.14)$$

sehingga dengan perambatan vertikal dimana $\phi_0 = 0$ maka :

$$\mu_r = 0 \quad (2.15)$$

Dari Persamaan (2.14) dan (2.15) refleksi vertikal terjadi ketika frekuensi plasma f_N sama dengan frekuensi gelombang f . Jadi, ketika frekuensi gelombang melebihi frekuensi plasma maksimum atau frekuensi kritis dari lapisan, gelombang akan menembus lapisan.

Untuk mendapatkan kondisi refleksi untuk propagasi vertikal saat ada medan magnet eksternal, maka $\mu = 0$ pada Persamaan (2.10). Tanda positif berarti (Davies, 1991):

$$X_r = 1 \quad (2.16)$$

dan tanda negatif menghasilkan (Davies, 1991) :

$$X_r = 1 - Y \quad (2.17)$$

atau

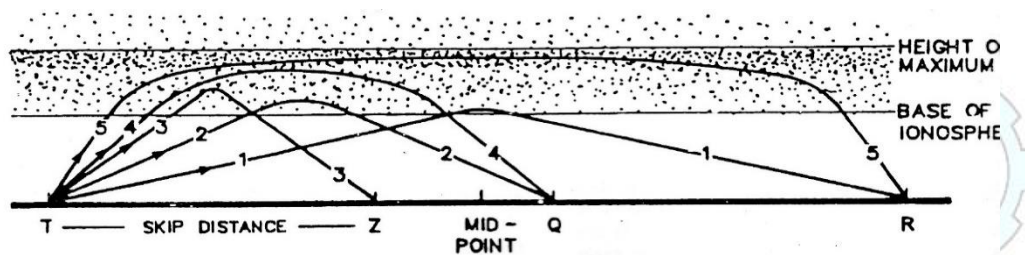
$$X_r = 1 + Y \quad (2.18)$$

Gelombang dengan tanda positif biasanya disebut ‘Gelombang Ordinary’ karena gelombang tersebut direfleksikan pada ketinggian yang sama kemungkinan karena ketiadaan medan magnetik. Gelombang dengan tanda negatif disebut gelombang extraordinary.

2.1.5 Polarisasi

Polarisasi, bersama frekuensi, sudut fase dan arah merupakan salah satu parameter untuk menjelaskan perambatan gelombang radio. Polarisasi dapat dijelaskan sebagaimana sebuah tali dihentakkan. Jika tali dihentakkan ke arah vertikal, maka pergerakan tali tersebut juga akan berada pada bidang vertikal, tanpa pergerakan menyamping, pergerakan ini disebut polarisasi vertikal. Sedangkan jika tali dihentakkan dari sisi ke sisi secara horisontal, maka pergerakan tali juga berada pada bidang horisontal. Hal ini disebut polarisasi horisontal. Pergerakan tali ketiga adalah ketika tali digerakkan membentuk lingkaran, maka akan terbentuk polarisasi sirkuler. Ketika pergerakan dibatasi pada bidang tunggal, seperti pergerakan polarisasi secara vertikal dan horisontal, maka pergerakan ini disebut polarisasi bidang (McNamara, 1991).

Ketika suatu gelombang radio dengan polarisasi bidang menabrak ionosfer, gelombang radio tersebut akan terbelah menjadi dua gelombang dengan dua karakteristik yang berbeda yang berpropagasi secara independen. Dua gelombang

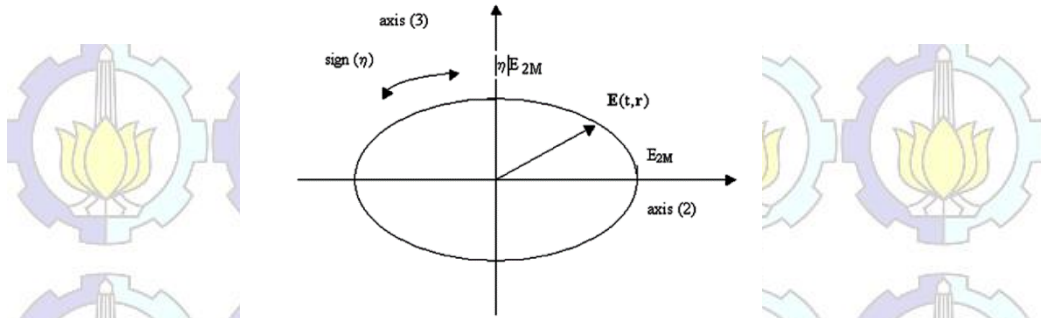


Gambar 2.11. Contoh raypath pada suatu ionosfer dan frekuensi yang sama dengan peningkatan pada sudut elevasi Tx (McNamara, 1991)

ini disebut *ordinary* (O) dan *extraordinary* (X) dan berpolarisasi secara elips (Davies, 1991). Pada prakteknya, selalu ada paling tidak dua jalur yang dilalui oleh sinyal radio saat berjalan antara transmitter dan receiver. Gambar 2.11 menggambarkan hal yang terjadi pada suatu lintasan dari suatu frekuensi gelombang yang sama. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa secara umum ada dua lintasan antara pemancar dan penerima, sebagai contoh lintasan 1 dan 5 dan lintasan 2 dan 4 yang menghubungkan titik yang sama. Lintasan 4 dan 5 disebut lintasan tinggi, sedangkan lintasan 1 dan 2 disebut lintasan rendah, dimana tinggi dan rendah berhubungan dengan sudut elevasi yang dipergunakan. Pada banyak kondisi, lintasan tinggi atau yang disebut Lintasan Pedersen akan mengalami redaman yang besar sehingga lintasan tersebut hilang dan menyisakan lintasan rendah (McNamara, 1991).

Pada teori magneto-ionik juga dijelaskan bagaimana Mode O dan X yang merambat pada plasma ionosfer berpolarisasi, dan diberikan metode untuk memprediksikan parameter-parameter yang berpengaruh secara signifikan pada proses polarisasi tersebut. Sebagai contoh, medan magnetik secara umum berpolarisasi secara eliptik tetapi tidak transversal. Tetapi, pada bagian terbawah ionosfer medan magnetik tersebut berpolarisasi secara TEM (*Transverse Elektromagnetic*) karena pada lokasi tersebut kerapatan elektron ($N(M)$) hampir nol (Budden, 1965).

Bentuk polarisasi elips ditentukan oleh dua parameter, yang pertama adalah rasio polarisasi yang berharga real (η). Nilai absolut η menyatakan panjang kedua sumbu elips sesuai putaran medan listrik. Pada Gambar 2.12 adalah elips pada bidang *wave front*, dengan $E_{3M} = |\eta| E_{2M}$ dan tandanya menyatakan sesuai jarum jam (+) dan berlawanan dengan jarum jam (-). Vektor fasor yang didefinisikan



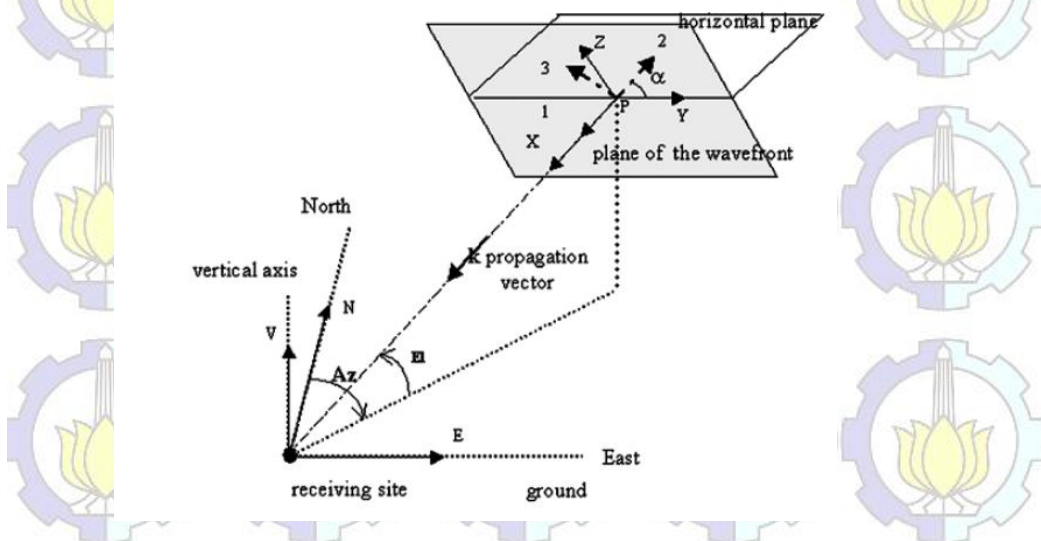
Gambar 2.12 Definisi rasio polarisasi η , untuk $|\eta| < 1$ (Erhel, 2004)
sebagai $\mathbf{w} = (0 \ 1 \ j \ \eta)^T$, merupakan persamaan medan listrik pada bidang wave front termasuk sinyal skalar yang ditransmisikan $s(t, \mathbf{r})$ sebagai berikut (Erhel, 2004) :

$$\mathbf{E}(t, \mathbf{r}) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ j\eta \end{pmatrix} s(t, \mathbf{r}) = \mathbf{w} s(t, \mathbf{r}) \quad (2.19)$$

dengan t adalah waktu dan $\mathbf{r}$ adalah vektor posisi

Untuk *Direction of Arrival* (DoA) yang telah diketahui, dua mode propagasi tersebut dikarakterisasi dengan dua nilai η_o dan η_x untuk rasio polarisasi yang memenuhi persamaan berikut (Erhel, 2004) :

$$\eta_o \cdot \eta_x = -1 \quad (2.20)$$



Gambar 2.13 Definisi sudut inklinasi (α) (Erhel, 2004)

Sumbu utama dari elips tersebut adalah orthogonal. Parameter yang kedua adalah sudut inklinasi (α) yang dievaluasi pada bidang *wave front* antara sumbu utama elips dengan bidang lokal horisontal sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.13.

Dua batasan polarisasi yang ada pada titik masuk dan keluar pada ionosfer ditentukan oleh polarisasi O dan X pada lokasi tersebut (Budden, 1985). Untuk arah rambat menuju titik masuk ionosfer yang dinyatakan oleh azimuth dan sudut elevasi $\delta_{en} = [Az_{en}, El_{en}]$, komputasi parameter – parameter polarisasi yang deterministik, yaitu η_{enO} , η_{enX} , α_{enO} , dan α_{enX} dapat dilakukan dengan menggunakan basis data medan geomagnetik terestrial. Demikian pula untuk mendapatkan nilai-nilai η_{exO} , η_{exX} , α_{exO} , dan α_{exX} pada titik keluar untuk menghitung $\delta_{ex} = [Az_{ex}, El_{ex}]$

2.1.6 Proplab Pro

Saat ini ada banyak program komputer yang dipergunakan untuk memprediksikan parameter-parameter ionosfer seperti *Maximum Usable Frequency* (MUF), lintasan jarak terpendek yang dilalui oleh suatu sinyal radio pada permukaan bumi (*great circle*), dan *grey lines* atau daerah dimana matahari terbit dan terbenam. Beberapa di antaranya memiliki fitur canggih seperti kemampuan untuk menghitung kekuatan sinyal antara dua titik, atau waktu transmisi optimal.

Proplab Pro berisi fitur-fitur diatas, bahkan berisi fitur yang sebelumnya hanya tersedia untuk peneliti atau ilmuwan. Sebagai contoh, Proplab Pro merupakan satu-satunya perangkat lunak perambatan sinyal radio yang sesuai untuk IBM dan komputer pribadi yang dapat menampilkan sinyal radio yang sedang berjalan melewati ionosfer dengan akurasi yang tinggi dengan menggunakan teknik *ray tracing* yang rumit.

International Reference Ionosphere (IRI) merupakan hasil kerja sama antara *Committee on Space Research* (COSPAR) dan the *International Union of Radio Science* (URSI) yang dipergunakan yang menyajikan model parameter-parameter ionosfer secara handal dan akurat (Bilitza, 1993,2011). IRI menampilkan profil kerapatan elektron dan nilai median parameter lapisan kritis ionosfer per jam atau per bulan untuk waktu, tanggal dan tempat tertentu untuk ketinggian 80 hingga

2000 km (Sezen, 2017, 2018). IRI mereferensikan dua model yang dikembangkan oleh dua organisasi, yaitu URSI dan CCIR. Masing-masing model dapat dipergunakan dalam kode-kode IRI untuk membangkitkan kondisi ionosfer dengan menggunakan solusi numerik. Proplab merekomendasikan penggunaan model URSI untuk sebagian besar tujuan pemodelan, walaupun beberapa hal lebih bagus dimodelkan dengan CCIR (Proplap Pro, 2003).

Proplab Pro versi 2.0 dilengkapi dengan dua teknik *ray tracing* utama, yaitu teknik sederhana dan kompleks. Teknik *ray tracing* sederhana memerlukan waktu yang cepat tetapi tidak akurat karena hanya memperhatikan pengaruh aktivitas magnetik bumi pada sinyal radio, tetapi tidak memperhatikan pengaruh medan magnetik bumi dan tabrakan antara elektron dan neutron di atmosfer. Kemudian, teknik *ray tracing* yang komprehensif merupakan teknik *ray tracing* yang rumit dan sangat kuat untuk mengikuti sinyal radio di ionosfer, dengan melibatkan efek dari medan magnetik bumi dan tabrakan (Proplap Pro, 2003).

2.1.7 PN-Sequence

Sinyal dengan spektrum yang tersebar (*spread spectrum*) yang dipergunakan untuk mengirim informasi digital dikenal dengan ciri khas lebar pita (*Bandwidth*) W jauh lebih besar daripada laju informasi R dalam bit/detik, sehingga faktor ekspansi lebar pita $B_e = W/R$ lebih dari satu. *Redundancy* yang besar yang ada pada sinyal spektrum yang tersebar diperlukan untuk menyelamatkan sinyal yang terkena interferensi pada pengiriman informasi digital melalui kanal radio dan satelit. Elemen penting dalam sinyal dengan spektrum yang tersebar adalah *pseudo-randomness*, yang membuat sinyal mirip dengan *noise* acak dan sulit untuk didemodulasi oleh penerima lain yang tidak diinginkan. Secara khusus sinyal *spread spectrum* dipergunakan untuk (Proakis, 2008) :

- Melawan atau menekan efek merugikan dari interferensi yang disebabkan oleh jamming; interferensi muncul dari pengguna kanal yang lain, dan interferensi dari diri sendiri karena propagasi lintasan jamak
- Menyembunyikan sinyal dengan cara mengirimkannya pada daya yang rendah, sehingga membuatnya sulit untuk dideteksi oleh pengguna yang tidak diinginkan karena dianggap sebagai derau

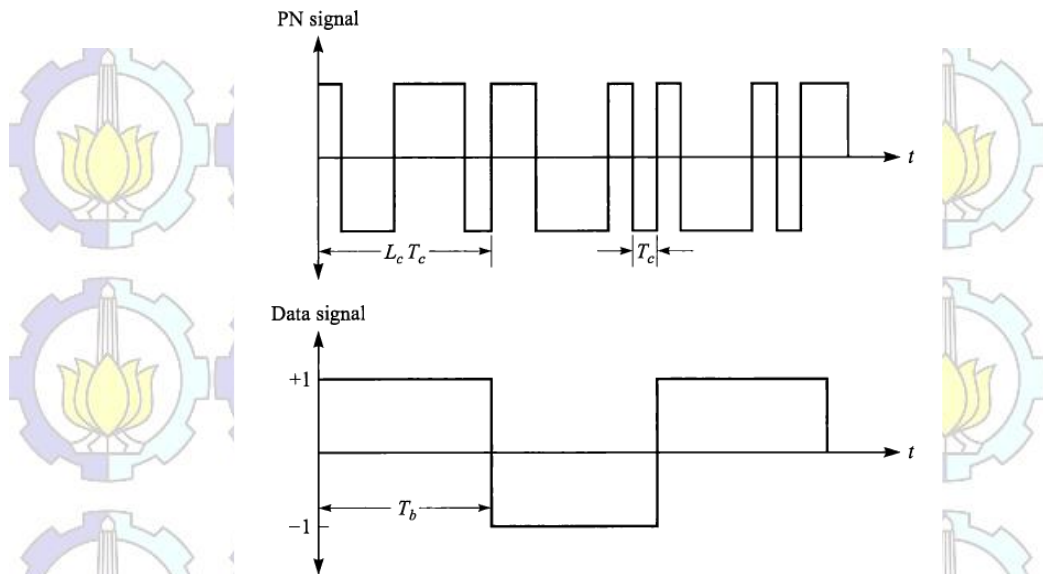
- Mendapatkan pesan secara privat tanpa adanya pengguna yang tidak diinginkan

Enkoder dan dekoder kanal, modulator dan demodulator adalah elemen dasar dari model sistem komunikasi digital *spread spectrum*. Elemen tambahan pada model ini adalah dua generator pola pseudorandom, satu yang berhadapan dengan modulator pada akhir proses pengiriman dan yang kedua adalah yang berhadapan dengan demodulator pada akhir proses penerimaan. Generator-generator tersebut membangkitkan suatu pseudorandom atau pseudonoise (PN) yang berupa urutan nilai biner yang memberi tanda pada sinyal yang ditransmisikan pada modulator dan dihapus dari sinyal yang diterima pada demodulator. Sinkronisasi dari PN sequence yang dibangkitkan pada penerima dengan PN sequence yang ada di dalam sinyal datang yang diterima diperlukan untuk demodulasi sinyal yang diterima

Laju informasi pada input enkoder dianggap sebagai R bit/detik dan *bandwidth* kanal yang tersedia adalah W Hz. Modulasi yang diasumsikan adalah binary PSK. Untuk mempergunakan semua *bandwidth* kanal yang tersedia, fase dari pembawa digeser secara pseudorandom tergantung pada pola pada generator PN pada laju W kali/detik. Kebalikan dari W adalah T_c disebut *interval chip* yang menyatakan durasi dari pulsa persegi yang disebut *chip*. Jika durasi pulsa persegi berhubungan dengan waktu transmisi bit informasi $T_b = 1/R$, maka faktor ekspansi *Bandwidth* W/R dapat dinyatakan dengan (Proakis, 2008) :

$$B_e = \frac{W}{R} = \frac{T_b}{T_c} = L_c \quad (2.21)$$

dengan L_c adalah rasio dari T_b/T_c yang menyatakan jumlah chip per bit informasi sehingga L_c adalah jumlah pergeseran fase yang terjadi pada saat transmisi sinyal selama durasi bit $T_b = 1/R$. Gambar 2.14 menggambarkan hubungan antara sinyal PN dan sinyal data. Jika dianggap enkoder mengambil k bit informasi dan membangkitkan binary linear block-code (n,k) maka durasi waktu yang diperlukan untuk mengirimkan n elemen kode adalah kT_b detik. Jumlah chip yang terjadi pada interval waktu ini adalah kL_c . Jadi, panjang blok yang dapat dipilih adalah $n = kL_c$.



Gambar 2.14 Sinyal PN (atas) Sinyal data (bawah) (Proakis, 2008)

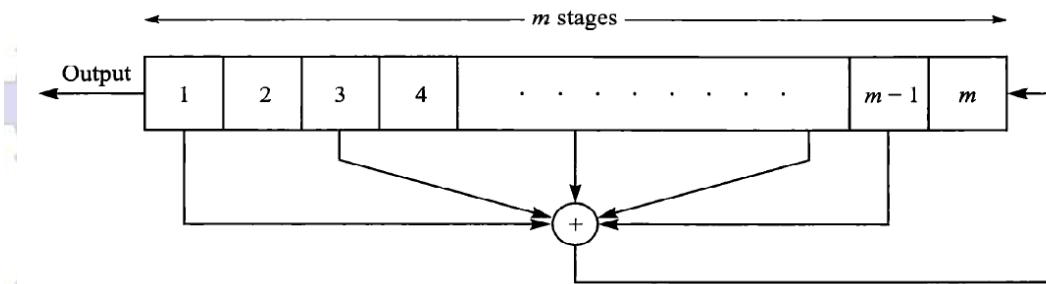
Jika enkoder membangkitkan suatu kode konvolusi biner dengan laju k/n , jumlah chip dalam interval waktu kT_b juga $n = kL_c$. Laju kode $R_c = k/n = 1/L_c$.

Pada penerima, sinyal yang datang akan dikorelasikan dengan PN *sequence* yang ada, kemudian dirapatkan kembali sesuai *Bandwidth* asalnya, selubungnya dideteksi, dan ditampilkan pada osiloskop. Karena sinyal dengan lintasan jamak yang berbeda datang pada *delay* yang berbeda, maka sinyal-sinyal tersebut akan maksimal jika dikorelasikan dengan PN *sequence* pada waktu-waktu yang berbeda. Resolusi waktu ($\Delta\tau$) dari komponen-komponen lintasan jamak yang menggunakan sistem *spread spectrum* dengan korelasi geser adalah (Rappaport, 2002) :

$$\Delta\tau = 2T_c = \frac{2}{R_c} \quad (2.22)$$

dengan R_c adalah laju *chip*

Persamaan (2.22) diatas menyatakan bahwa komponen-komponen lintasan jamak dapat diselesaikan jika resolusi waktu yang dipergunakan sama dengan atau lebih besar dari dua kali interval *chip*. Salah satu metode untuk membuat PN Sequence pada sinyal yang ditransmisikan adalah dengan mengubahnya secara langsung dengan menambahkan bit yang dikodekan oleh penambahan modulo-2



Gambar 2.15. *m-stage shift register* secara umum (Proakis, 2008)

dengan PN Sequence sehingga masing-masing kode digantikan oleh penambahannya dengan satu bit dari PN Sequence.

PN Sequence biner adalah sequence dari maximal length shift register atau *m*-sequence yang memiliki panjang bit $n = 2^m - 1$ dan dibangkitkan oleh shift register sebanyak *m*-stage dengan feedback linier sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.15. Sequence ini bersifat periodik dengan periode *n*, dimana masing-masing periode berisi bit 1 sebanyak 2^{m-1} dan bit 0 sebanyak $2^{m-1}-1$ (Proakis, 2008).

2.1.8 Eliminasi Noise

Eliminasi untuk menghilangkan efek *noise* dan mendapatkan sinyal asli yang diterima dilakukan dengan Metode Sousa (Sousa, 1994). Langkah pertama yang dipergunakan adalah menentukan besar thermal noise yang dianggap berdistribusi Gaussian, sementara amplitudo dari noise berdistribusi Rayleigh. Jika dalam seluruh sampel yang diterima terkandung noise, maka dapat ditentukan varians dari noise (σ_N^2) sebagai 1,5 kali kuadrat rata-rata dari amplitudo sampel. Untuk mengatasi data yang sangat banyak, dimana sinyal yang valid hanya sekitar 5%, σ_N^2 dievaluasi berdasarkan median dari sampel. Dengan tanpa interferensi, amplitudo berdistribusi Rayleigh. Probabilitas bahwa amplitudo lebih dari suatu nilai ζ adalah (Sousa, 1994):

$$P = \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2\sigma_N^2}\right) \quad (2.23)$$

Dengan :

- σ_N^2 = median sampel data
- P = probabilitas bahwa amplitudo (x) melebihi nilai ζ
- ζ = threshold

Selanjutnya, threshold diatur untuk mendapatkan *Constant False Alarm Rate* (CFAR) yang tidak tergantung pada SNR. Metode CFAR memerlukan nilai threshold yang diatur sebagai $\zeta = \eta \cdot \sigma_N$ dengan ζ konstant sebesar estimasi median (σ_m). Dari persamaan (2.18), diketahui probabilitas bahwa noise melebihi threshold tanpa sinyal adalah (Sousa, 1994) :

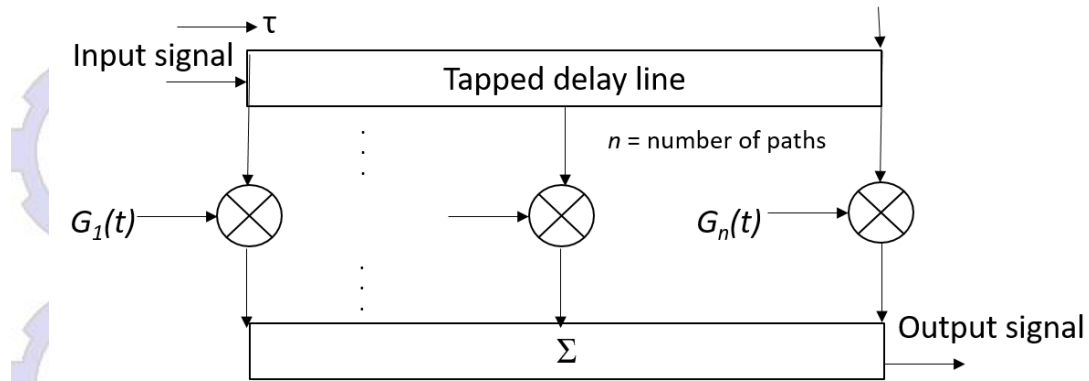
$$P_f = \exp(-\eta^2 / 2) \quad (2.24)$$

Dengan P_f = probability false alarm

Setelah mendapatkan nilai *threshold*, diambil sampel respon impuls yang lebih besar atau sama dengan P_f dari nilai *threshold*. Pada metode ini, *noise* dianggap berdistribusi Gaussian, sedangkan amplitudo dianggap berdistribusi Rayleigh. Berdasarkan (Perry, 1991), *noise* yang tercatat pada pengukuran respon impuls *Wideband HF* di Amerika Utara memiliki dua distribusi, yaitu Rayleigh, sebagaimana umumnya distribusi *noise* pada komunikasi HF, dan Log Normal.

2.1.9 Pemodelan Kanal HF

Dua metode yang dipergunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem komunikasi radio HF adalah dengan analisis secara teoritis dan pengukuran eksperimental. Tetapi masing-masing memiliki kekurangan, dimana pemodelan secara teoritis biasanya menggunakan satu pantulan dengan tanpa fading atau fading lambat, berdistribusi Rayleigh dengan beberapa faktor redaman lain yang ditambahkan (Bello 1964; Daly, 1964). Percobaan eksperimental telah banyak dilakukan, tetapi biasanya sangat sulit mendapatkan hasil kinerja sistem yang mewakili karakteristik kanal secara keseluruhan (Watterson, 1970). Oleh karena itu pada tahun 1965 dikembangkan peralatan yang khusus mengukur propagasi, untuk mendapatkan pengukuran dalam berbagai kondisi kanal dan menganalisis pengukuran untuk mendapatkan validitas dan batasan bandwidth dari model yang



Gambar 2.16 Pemodelan respon impuls kanal (Watterson, 1970)

diusulkan (Watterson, 1970). Maka hal ini menjadi pemodelan kanal HF pertama kali yang dilakukan oleh Watterson.

Kanal yang dimodelkan oleh Watterson mengasumsikan lebar pita 10 kHz dan bersifat stasioner selama 10 menit. Secara umum, pada kondisi kanal stasioner, karakteristik kanal dapat dimodelkan seperti Gambar 2.16 ini (Watterson, 1970).

Sinyal pada masing-masing tap dimodulasi secara amplitudo dan fase oleh fungsi baseband tap-gain yang sesuai $G_i(t)$, dan beberapa sinyal yang didelay dan dimodulasi dijumlahkan untuk menunjukkan sinyal keluaran atau sinyal yang diterima. Meskipun secara umum masing-masing mode terdiri dari empat komponen, yaitu komponen magnetoionik ordinary dan extraordinary baik lintasan rendah dan tinggi, tetapi jika semua komponen tersebut muncul sistem tidak dapat diselesaikan. Demikian pula jika bandwidth lebih dari 10 kHz, dua komponen magnetoionik pada lintasan rendah tidak dapat diselesaikan dan path tunggal akan melayani dua komponen tersebut.

2.1.10 Pemodelan Kanal Secara Matematis dan Statistik

Jika *delay* propagasi dan faktor redaman masing-masing merupakan time-variant sebagai hasil perubahan struktur media propagasi, maka sinyal bandpass yang diterima adalah (Proakis, 2008) :

$$x(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n(t) s[t - \tau_n(t)] \quad (2.25)$$

Dengan α_n adalah faktor redaman sinyal yang diterima pada lintasan ke- n dan τ_n adalah *delay* propagasi untuk lintasan ke- n . Ekuivalen lowpass channel dijelaskan dengan respons impuls time variant sebagai berikut (Proakis, 2008) :

$$h(\tau, \varepsilon) = \sum_n \alpha_n e^{-j\theta_n} \cdot \delta[\tau - \tau_n(t)] \quad (2.26)$$

dengan :

α_n : kuat sinyal yang diterima pada lintasan ke- n

θ : $2\pi f_c \tau_n(t)$

τ_n : *delay* propagasi untuk lintasan ke- n

Parameter *rms delay spread* dapat diperoleh dari Power Delay Profile kanal sesuai dengan (Rappaport, 2002) :

$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (2.27)$$

Dengan $\bar{\tau}$ adalah *mean excess delay*, yang dinyatakan (Rappaport, 2002) :

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k p(\tau_k) \cdot \tau_k}{\sum_k p(\tau_k)} \quad (2.28)$$

Dengan :

τ_k : *delay* waktu relatif terhadap $t = 0$

p : daya sinyal ternormalisasi.

Momen kedua dari *mean excess delay* yang dipergunakan untuk menghitung *rms delay spread* dinyatakan sebagai berikut (Rappaport, 2002):

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum_k p(\tau_k) \cdot \tau_k^2}{\sum_k p(\tau_k)} \quad (2.29)$$

Maximum excess delay dari suatu Power Delay Profile (PDP) adalah waktu *delay* dimana energi lintasan jamak turun dibawah suatu nilai (X) dB dari nilai maksimum, atau didefinisikan sebagai $\tau_x - \tau_0$ dimana τ_0 adalah sinyal yang pertama kali datang dan τ_x adalah *delay* maksimum dari lintasan jamak.

2.1.11 Cumulative Distribution Function (CDF)

Jika diberikan suatu eksperimen acak dengan variabel acak terkait adalah X dan diberi suatu bilangan real x , maka dapat diperkirakan probabilitas kejadian $\{s: X(s) \leq x\}$ atau secara sederhana $P(X \leq x)$. Probabilitas tersebut secara jelas tergantung pada nilai yang ditetapkan pada x . Fungsi berikut (Song, 2014) :

$$F_x(x) = P(X \leq x) \quad (2.30)$$

disebut sebagai fungsi distribusi probabilitas atau *Probability Distribution Function* (pdf), atau secara ringkas disebut sebagai fungsi distribusi dari X . Subscript X pada Persamaan (2.27) menyatakan sebuah variabel acak. Jika $F_x(x)$ secara sederhana disebut $P(A)$ yang menyatakan bahwa probabilitas suatu kejadian A terjadi, kejadian tersebut $X \leq x$.

Pdf merupakan probabilitas bahwa X yang akan memperkirakan sebuah nilai yang terletak pada himpunan bagian S , himpunan bagian tersebut akan menjadi titik x , dan semua titik akan terletak pada sebelah kiri dari ' x '. Karena x meningkat, himpunan bagian mencakup lebih dari garis nyata, dan nilai pdf meningkat hingga mencapai 1. Pdf dari suatu variabel acak kemudian mengakumulasi peningkatan probabilitas dari x , dan nama *cumulative distribution function* (cdf) juga dipergunakan untuk fungsi ini.

2.1.12 Koefisien Korelasi

Korelasi adalah salah satu teknik statistik yang digunakan untuk mencari hubungan antara dua variabel atau lebih yang sifatnya kuantitatif. Keeratan hubungan antara satu variabel dengan variabel lainnya, biasa disebut dengan koefisien korelasi yang ditandai dengan " r ". Koefisien korelasi " r " merupakan taksiran dari korelasi populasi dengan kondisi sample normal (acak) (Walpole, 1995).

Koefisien korelasi antara dua kejadian independen X dan Y (ρ_{XY}) mempunyai harga -1 hingga +1. harga -1 menunjukkan adanya hubungan yang sempurna bersifat negatif antara kedua variabel. Sedangkan hubungan +1 menunjukkan adanya hubungan sempurna positif (Walpole, 1995). Besar koefisien korelasi dinyatakan :

$$\rho_{XY} = \frac{E[XY] - E[X]E[Y]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (2.31)$$

$$\sigma_X = \sqrt{E[X - E[X]^2]} \text{ dan } \sigma_Y = \sqrt{E[Y - E[Y]^2]} \quad (2.32)$$

dimana:

X : Variabel ke- 1.

Y : Variabel ke- 2.

n : Jumlah data.

Jika terdapat banyak data, maka ρ dapat direpresentasikan dalam bentuk matriks korelasi. Jika terdapat data berukuran $m \times n$ yang merupakan matriks simetris, maka ρ dapat ditulis sebagai berikut (Walpole, 1995) :

$$\rho = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_{11}}{\sqrt{\sigma_1^2 \sigma_1^2}} & \frac{\sigma_{12}}{\sqrt{\sigma_1^2 \sigma_2^2}} & \dots & \frac{\sigma_{1n}}{\sqrt{\sigma_1^2 \sigma_n^2}} \\ \frac{\sigma_{21}}{\sqrt{\sigma_2^2 \sigma_1^2}} & \frac{\sigma_{22}}{\sqrt{\sigma_2^2 \sigma_2^2}} & \dots & \frac{\sigma_{2n}}{\sqrt{\sigma_2^2 \sigma_n^2}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\sigma_{m1}}{\sqrt{\sigma_m^2 \sigma_1^2}} & \frac{\sigma_{m2}}{\sqrt{\sigma_m^2 \sigma_2^2}} & \dots & \frac{\sigma_{mn}}{\sqrt{\sigma_m^2 \sigma_n^2}} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

2.1.13 Uji Kolmogorov-Smirnov

Kolmogorov-Smirnov *goodness-of-fit test* atau disebut juga Uji K-S didasarkan pada statistik yang mengukur deviasi dari histogram kumulatif dari hipotesa dari suatu cdf. Jika diberikan suatu nilai sampel $x_1, x_2, \dots, x_n$ yang diperoleh dari populasi X , histogram kumulatif dapat disusun sebagai berikut (Song, 2014) :

- Menyusun nilai sampel berdasarkan peningkatan nilai magnitudo, yang dinyatakan dengan $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$
- Menentukan fungsi distribusi X yang diobservasi, yang dinotasikan dengan $F^o[x_{(1)}], F^o[x_{(2)}], \dots$, dari hubungan $F^o[x_{(i)}] = i/n$
- Menggambar nilai dari $F^o[x_{(i)}]$ dengan garis lurus (*plotting*)

Uji statistik yang yang dipergunakan pada kasus ini adalah (Song, 2014) :

$$D_2 = \max_n \{ |F^o[X_{(i)}] - F_x[X_{(i)}]| \} \quad (2.34)$$

$$= \max_n \left\{ \left| \frac{i}{n} - F_x[X_{(i)}] \right| \right\},$$

dimana $X_{(i)}$ adalah orde statistik ke- i dari sampel. Jadi, statistik D_2 menghitung nilai absolut maksimum dari n perbedaan antara cdf yang diobservasi dengan cdf yang dihipotesis dari sampel yang diobservasi. Pada level signifikansi tertentu α , aturan yang dipergunakan adalah menolak hipotesis H jika $d_2 > c_{n,\alpha}$; atau menerima H . Disini d_2 adalah nilai sampel dari D_2 , dan nilai $c_{n,\alpha}$ didefinisikan sebagai (Song, 2014) :

$$P(D_2 > c_{n,\alpha}) = \alpha \quad (2.35)$$

Nilai dari $c_{n,\alpha}$ untuk $\alpha = 0,20, 0,05, 0,10$ dan lain-lain sesuai Tabel K-S Test.

2.1.14 T-test

Bila ingin diketahui apakah parameter dua populasi itu berbeda atau tidak, maka uji statistik yang digunakan adalah uji beda dua mean, yang umumnya dilakukan dengan uji z dan uji t . Uji z dapat digunakan jika standar deviasi diketahui dan jumlah sampelnya lebih dari 30. Jika dua syarat tersebut tidak dipenuhi, maka dipergunakan uji t dua sampel.

Berdasarkan hubungan antar populasinya, uji t dapat digolongkan ke dalam dua jenis, yaitu *dependent sample t-test* untuk membandingkan rata-rata dua grup yang saling berpasangan dan *independent sample t-test* untuk membandingkan rata-rata dua grup yang tidak saling berpasangan atau tidak saling berkaitan (Kim, 2015). Prinsip pengujian untuk *independent sample t-test* ini adalah melihat perbedaan variasi kedua kelompok data sehingga sebelum pengujian harus diketahui apakah variannya sama (*equal variance*) atau variannya berbeda (*unequal variance*). Homogenitas varian diuji berdasarkan rumus (Kim, 2015) :

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (2.36)$$

Dimana :

- F = nilai F hitung
- S_1 = varian terbesar

- S_2 = varian terkecil

Data dinyatakan *equal variance* jika $F < \text{Tabel } F$, dan data dinyatakan *unequal variance* jika $F > \text{Tabel } F$. Tabel F menggambarkan nilai distribusi F untuk analisis varian dengan mempertimbangkan probabilitas ekor kanan (α) (Dinov, 2019).

Nilai uji t untuk data yang *equal variance* menggunakan rumus *Polled Variance* (Tiemann, 2010) :

$$t = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (2.37)$$

Dimana :

- x_1, x_2 adalah rata-rata data 1 dan data 2
- n_1, n_2 adalah data 1 dan data 2
- S_1, S_2 adalah varians data 1 dan varians data 2

Nilai uji t untuk data yang *unequal variance* menggunakan rumus *Separated Variance* (Tiemann, 2010) :

$$t = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (2.38)$$

Kemudian nilai uji t dibandingkan dengan nilai pada Tabel T untuk mengetahui apakah hipotesis dua arah yang dibuat benar atau tidak. Hipotesis yang dibuat adalah H_0 dan H_1 , dimana jika nilai uji t > nilai tabel t, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima.

2.1.15 Distribusi Gaussian

Justifikasi penggunaan Distribusi Gaussian untuk pemodelan adalah teorema Central Limit yang menyatakan penjumlahan dari sampel-sampel yang independen dari sembarang distribusi dengan mean dan varians yang terhingga konvergen pada distribusi normal ketika ukuran sampel menjadi tak berhingga. Distribusi Gaussian menggunakan dua parameter yaitu μ (rata-rata) dan σ (standar deviasi). Distribusi normal memiliki rata-rata nol dan standar deviasi satu. Jika z normal standar, maka

$\sigma^2 + \mu$ juga normal dengan rata-rata μ dan standar deviasi σ . Maximum Likelihood Estimator (MLE) untuk μ dan σ^2 untuk distribusi normal, masing-masing adalah :

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (2.39)$$

$$s_{MLE}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.40)$$

dimana $\bar{x}$ adalah rata-rata dari sampel $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Cumulative Distribution Function (cdf) dari Distribusi Normal adalah :

$$p = F(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt; \text{ untuk } x \in \mathbb{R} \quad (2.41)$$

2.1.16 Distribusi Rayleigh

Distribusi Rayleigh adalah kasus khusus dari Distribusi Weibull. Jika A dan B adalah parameter dari Distribusi Weibull, maka Distribusi Rayleigh dengan parameter b ekuivalen dengan Distribusi Weibull dengan $A = \sqrt{B}$ dan $B = 2$. Cdf dari Distribusi Rayleigh adalah :

$$y = F(x|b) = \int_0^x \frac{t}{b^2} e^{\left(\frac{-t^2}{2b^2}\right)} dt \quad (2.42)$$

2.1.17 Distribusi Uniform

Distribusi uniform atau disebut juga distribusi persegi panjang merupakan distribusi yang penting karena memiliki pdf yang konstan antara dua parameternya. Distribusi ini sangat tepat untuk menggambarkan distribusi kesalahan dalam pembulatan nilai desimal, dan untuk menggambarkan teknik yang menghasilkan nilai acak. Cdf dari distribusi uniform kontinyu adalah :

$$F(x|lower, upper) = \begin{cases} 0; & x < lower \\ \frac{x - lower}{upper - lower}; & lower \leq x \leq upper \\ 1; & x \geq upper \end{cases} \quad (2.43)$$

dimana $lower$ adalah $-\infty < lower < upper$ dan $upper$ adalah $lower < upper < \infty$

2.1.18 Distribusi Eksponensial

Kekhususan distribusi eksponensial adalah karena kegunaannya dalam memodelkan kejadian yang terjadi secara acak. Daerah aplikasinya adalah dalam memodelkan waktu kerja (*life time*). Cdf dari distribusi eksponensial :

$$p = F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\mu}} \quad (2.44)$$

dimana μ adalah parameter lokasi, dimana jika $\mu = 0$ adalah distribusi eksponensial standar.

2.1.19 Model respon impuls waktu-diskrit

Model yang sesuai untuk karakterisasi untuk kanal dalam ruangan adalah model respon impuls waktu-diskrit (Hashemi, 1993). Di model ini sumbu waktu dibagi ke dalam interval waktu yang kecil disebut "bin." Setiap bin diasumsikan mengandung salah satu komponen *multipath*, atau tanpa komponen *multipath*. Ukuran bin diasumsikan adalah resolusi pengukuran spesifik jika dua lintasan tiba dalam bin tidak dapat dianggap sebagai lintasan yang berbeda. Dengan menggunakan model ini, setiap respons impuls dapat dijelaskan dengan urutan "0" dan "1" (indikator urutan lintasan), di mana "1" menunjukkan suatu lintasan pada bin yang diberikan dan "0" mewakili tidak adanya lintasan di bin itu. Untuk setiap "1" amplitudo dan nilai fase tertentu. Keuntungan dari model ini adalah sangat disederhanakan setiap proses simulasi pada kanal propagasi radio bergerak. Analisis kinerja sistem juga lebih mudah dengan model waktu diskrit, dibandingkan dengan model waktu kontinu.

2.1.20 Site-Diversity

Diversity adalah teknik komunikasi yang handal pada penerima yang menghasilkan perbaikan *link* dengan biaya yang relatif murah. Konsep sederhana dari *diversity* adalah dengan memanfaatkan sifat acak suatu propagasi radio. Konsep *diversity* dapat dijelaskan secara sederhana, yaitu jika suatu *link* mengalami fading yang parah, diharapkan *link* lain yang tidak berkorelasi atau berkorelasi rendah memiliki penerimaan sinyal yang cukup kuat untuk komunikasi. Dengan menerima lebih dari satu salinan dari sinyal yang diterima kemudian memilih satu

(atau beberapa) dari sinyal-sinyal tersebut dengan baik, baik SNR sesaat dan SNR rata-rata di penerima dapat ditingkatkan, sering sebanyak 20 dB hingga 30 dB.

Ada dua tipe *fading*, yaitu *small-scale* dan *large-scale fading*. *Small-scale fading* ditandai dengan fluktuasi amplitudo yang dalam dan cepat. *Fading* ini disebabkan oleh pantulan jamak yang terjadi di sekitar objek yang bergerak. Untuk sinyal pada pita sempit, *small-scale fading* biasanya memiliki kuat sinyal berdistribusi Rayleigh pada jarak pendek (Rappaport, 2002). Untuk mencegah fading yang dalam teknik *diversity* mikroskopik dapat memanfaatkan perubahan sinyal yang cepat. Dengan memilih sinyal terbaik dari beberapa antenna yang terpisah tempatnya, suatu penerima dapat mencegah efek small-scale fading. Dalam hal sistem komunikasi HF jarak jauh, dapat diterapkan *site-diversity* yang melibatkan lebih dari satu *link* antara suatu common terminal, misal sebagai receiver, dengan dua atau lebih terminal yang lain sebagai pemancar.

Sebelum membicarakan teknik *diversity* yang dipergunakan, akan dijelaskan keuntungan yang diperoleh dalam menggunakan *diversity*. Dipergunakan M kanal fading Rayleigh yang independen yang tersedia pada receiver. Masing-masing kanal disebut sebagai cabang *diversity*, dimana masing-masing cabang dianggap memiliki SNR rata-rata yang sama, yaitu (Rappaport, 2002) :

$$SNR = \Gamma = \frac{E_b}{N_o} \alpha^2 \quad (2.45)$$

Dengan $\overline{\alpha^2} = 1$

Jika setiap cabang memiliki SNR sesaat $SNR = \gamma_i$, maka pdf dari γ_i adalah (Rappaport, 2002) :

$$p(\gamma_i) = \frac{1}{\Gamma} e^{-\frac{\gamma_i}{\Gamma}} \quad \gamma_i \geq 0 \quad (2.46)$$

Probabilitas bahwa satu cabang memiliki SNR sesaat kurang dari suatu threshold γ adalah (Rappaport, 2002) :

$$Pr[\gamma_i \leq \gamma] = \int_0^{\gamma} p(\gamma_i) d\gamma_i = \int_0^{\gamma} \frac{1}{\Gamma} e^{-\frac{\gamma_i}{\Gamma}} d\gamma_i = 1 - e^{-\frac{\gamma}{\Gamma}} \quad (2.47)$$

Sekarang, probabilitas bahwa semua M cabang *diversity* yang independen menerima sinyal yang secara serentak kurang dari threshold SNR tertentu (γ) adalah (Rappaport, 2002) :

$$Pr[\gamma_1, \dots, \gamma_M \leq \gamma] = \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\Gamma}}\right)^M = P_M(\gamma) \quad (2.48)$$

Jika satu cabang menerima $SNR > \gamma$, maka probabilitas bahwa $SNR > \gamma$ untuk satu atau lebih cabang adalah (Rappaport, 2002) :

$$Pr[\gamma_i > \gamma] = 1 - P_M(\gamma) = 1 - \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\Gamma}}\right)^M \quad (2.49)$$

Persamaan (2.47) adalah pernyataan bahwa probabilitas melebihi threshold ketika *selection combining* dipergunakan.

Hal yang pertama kali dilakukan untuk menentukan SNR rata-rata dari sinyal yang diterima ketika *diversity* dipergunakan adalah mencari pdf dari sinyal fading. Untuk *selection diversity*, SNR rata-rata diperoleh dengan menurunkan CDF dari $P_M(\gamma)$ untuk mendapatkan pdf dari SNR rata-rata ketika M cabang dipergunakan (γ). Jadi, rata-rata SNR ($\bar{\gamma}$) adalah (Rappaport, 2002) :

$$\bar{\gamma} = \int_0^{\infty} \gamma P_M(\gamma) d\gamma = \Gamma \int_0^{\infty} Mx(1 - e^{-x})^{M-1} e^{-x} dx \quad (2.50)$$

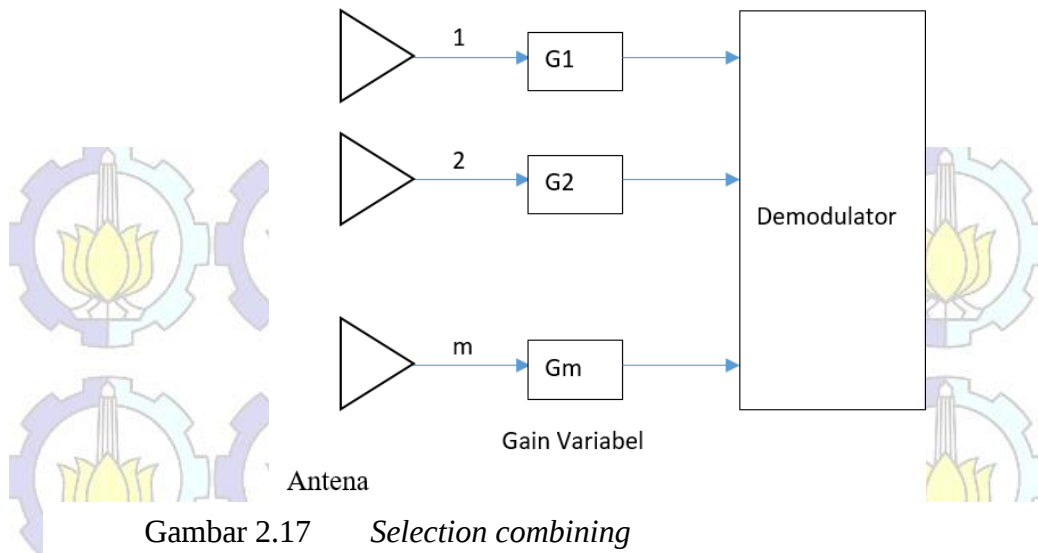
Dengan $x = \frac{\gamma}{\Gamma}$ dan Γ adalah SNR rata-rata untuk cabang tunggal ketika tidak dipergunakan *diversity*. Persamaan (2.48) dievaluasi untuk menghasilkan perbaikan SNR rata-rata yang dihasilkan oleh *selection diversity*.

$$\frac{\bar{\gamma}}{\Gamma} = \sum_{k=1}^M \frac{1}{k} \quad (2.51)$$

Dari Persamaan (2.49) dapat dibuktikan bahwa SNR rata-rata meningkat pada cabang yang dipilih oleh *selection diversity* karena cabang tersebut telah dipastikan memiliki SNR rata-rata diatas threshold. Jadi, *selection combining* memberikan penambahan rata-rata pada *link* margin tanpa meminta tambahan daya trasnmisi atau tambahan rangkaian pada penerima yang rumit.

2.1.21 Selection combining

Selection combining adalah teknik analisis *diversity* paling sederhana. Diagram blok dapat dilihat pada Gambar 2.17, dimana m demodulator



Gambar 2.17 *Selection combining*

dipergunakan untuk mempersiapkan m *link* alternatif yang gain-nya disesuaikan untuk menghasilkan rata-rata SNR yang sama untuk setiap cabang. Prinsip dari selective combining adalah memilih *link* alternatif dengan SNR sesaat yang paling besar. Cabang dari receiver yang memiliki SNR sesaat tertinggi yang akan dihubungkan dengan demodulator. Pada prakteknya, cabang dengan $(S+N)/N$ terbaik yang dipergunakan karena sulit untuk mengukur SNR sendiri.

Penelitian sebelumnya menunjukkan adanya variasi kualitas *link* terhadap waktu yang berbeda antara segmen frekuensi rendah dan segmen frekuensi tinggi pada pita HF (Kurniawati, 2018). Frekuensi 5-10 MHz cenderung memberikan kualitas lebih baik pada pagi hari, sedangkan rentang 10-30 MHz bekerja lebih baik di siang hari. Dengan demikian dapat dihipotesiskan juga bahwa sistem *diversity* pada dua *link* yang memanfaatkan dua frekuensi dari segmen yang berbeda, a joint frequency-space *diversity*, akan memberikan kinerja availability dan *diversity* gain yang lebih baik.

2.2 Kajian Pustaka

Pada subbab ini akan dibahas penelitian pemodelan kanal radio HF yang dilakukan sebelumnya pada daerah dengan lintang yang berbeda-beda, baik melalui simulasi dan pengukuran dan posisi penelitian pada disertasi ini terhadap penelitian-penelitian tersebut. Setelah itu akan dibahas penelitian-penelitian sebelumnya yang membahas tentang korelasi antar *link* radio HF dan posisinya terhadap disertasi ini yang membahas korelasi antar *link* yang terletak di daerah lintang rendah.

2.2.1 Pengukuran dan Pemodelan Respon Impuls

Penelitian tentang karakteristik kanal *Wideband* HF telah banyak dilaksanakan, utamanya yang berkaitan dengan pengaruh ionosfer dan letak geomagnetik bumi. Kanal *Wideband* HF dengan dua lintasan Norfolk, MA – Bedford dan Acousnet, MA – Bedford, MA telah diukur untuk propagasi *groundwave* (Barsoum, 1991). Pengukuran di Norfolk dilakukan pada tanggal 10 dan 16 April 1991, sedangkan untuk Acousnet dilakukan pada tanggal 18 April 1991. Pengukuran ini dilakukan di daerah lintang menengah untuk mengukur rugi-rugi lintasan sejauh 100 Mil di darat dan 1000 mil di laut. Bentuk gelombang yang dikirimkan adalah sinyal yang dimodulasi BPSK dengan *Direct-Sequence Pseudo Noise* (DSPN) dengan laju bit 512 kb/s yang menghasilkan sinyal dengan *Bandwidth* 1 MHz. Frekuensi yang dipergunakan adalah 7,664 MHz dan 10,66 MHz. Hasil pengukuran dibandingkan dengan hasil pengukuran *Narrowband* dan Rekomendasi CCIR 715-2 dan hasilnya sesuai namun masih terbatas untuk pengukuran rugi-rugi lintasan belum mengukur parameter lain seperti *delay* atau *noise/interferensi* yang bervariasi terhadap waktu. Selain itu, pengukuran hanya berlaku di daerah lintang menengah, belum untuk daerah lintang rendah.

WBHF juga diukur oleh *Naval Research Laboratory* (NRL) untuk mengukur *narrowband oblique* apakah dapat dipergunakan untuk menganalisa kondisi kanal *wideband skywave*. Pengukuran *narrowband* dipergunakan untuk memperkirakan respon impuls dari kanal, kemudian hasilnya dibandingkan dengan pengukuran respon impuls *wideband* (Hausman, 1987). Lintasan yang dipergunakan adalah San Clemente Island – Point Mugu, California sejauh 126 km, pada daerah lintang menengah pada saat sunspot maksimum. Alat uji NRL bekerja pada pita *narrowband* sebesar 125 kHz dengan deretan pulsa 255 *chip* untuk interval 8 μ s dan pita *wideband* sebesar 1 MHz dengan deretan pulsa 2047 *chip* untuk interval 1 μ s. Hasilnya menunjukkan bahwa karakteristik kanal *wideband* dapat diperoleh secara umum dari pengukuran kanal *narrowband*, namun masih secara kualitatif. Penelitian ini juga hanya berlaku untuk daerah lintang menengah dengan jumlah waktu pengukuran terbatas hanya pada tanggal 14 Januari 1983 dan hanya berlaku untuk frekuensi 4,5 MHz.

Karakteristik kanal WBHF pada daerah lintang menengah juga diteliti untuk lintasan *simplex* Homestead, FL – Bedford, MA sejauh 2070 km. Lintasan ini dianggap memiliki satu titik kontrol di Cape Lookout, NC (34,0 N 76,0 W) dengan kemiringan kira-kira 40° E lintang utara pada koordinat geomagnetik. Alat pengujian kanal ini menghasilkan gelombang DSPN dengan bit *rate* 512 kb/s *bandwidth* 400 kHz untuk menentukan parameter model kanal yang meliputi perpanjangan waktu dan frekuensi (Doppler) dan autokorelasi dan fungsi distribusi dari daya yang diterima (Perry, 1989). Pengukuran dilakukan pada 27 Pebruari – 23 Maret 1989, menghasilkan 20 himpunan data untuk 20 jam pengukuran. Frekuensi carrier bervariasi antara 6 – 26 MHz tergantung pengaturan alat uji berdasarkan *Lowest Usable Frequency* (LUF) atau frekuensi terendah yang dapat diteruskan oleh lapisan E dan *Maximum Usable Frequency* (MUF) atau frekuensi maksimum yang dapat dipantulkan oleh lapisan F . Efek ionosfer seperti badai matahari dan badai geomagnetik dimasukkan sebagai hal yang mempengaruhi rugi-rugi lintasan. Pengukuran ini juga melibatkan filter kanal untuk kanal yang terganggu. Hasil yang diperoleh dari pengukuran ini adalah *Cumulative Distribution Function* (CDF) dari amplitudo daya yang diterima, yang berdistribusi *Rayleigh* yang sering dipergunakan untuk memodelkan *fading HF narrowband*. Selama periode pengumpulan data, pada sekitar tanggal 9 Maret 1989, telah terjadi beberapa kali badai matahari dan badai geomagnetik. Setelah tanggal 9 Maret, terjadi peningkatan rugi-rugi lintasan sebesar 25 dB.

Pengukuran respon impuls kanal *Wideband HF* juga telah dilakukan melalui lintasan lintang rendah, dengan perangkat pengukuran The MITRE Corporation. Sebelumnya perangkat tes tersebut dipergunakan untuk karakterisasi lintasan Homestead, Florida – Bedford, Massachuset sejauh 2070 km, satu hop pada lapisan F. Doppler *shift*, *delay* dan Doppler *spread* diperoleh dengan interpretasi manual pada plot *Delay-Doppler*. Pengukuran kali ini melanjutkan pengukuran tersebut untuk lintasan Boulder, Colorado - Bedford, Massachuset sejauh 2800 km dan *link* multihop yang didominasi oleh dua hop pada lapisan F pada lintasan antara San Fransisco, CA - Bedford, MA sejauh 4330 km (Clune, 1991). Program komputer telah dipersiapkan untuk menghitung karakteristik *Delay – Doppler spread* secara otomatis. Bentuk gelombang yang dipergunakan untuk pengujian kanal adalah

Binary PSK yang dimodulasi oleh deretan DSPN dengan bit rate 1024 kb/s. Daya pancar yang dipergunakan adalah 100 dan 500 Watt. Hasil pengukuran Doppler *shift* dan Doppler *spread* untuk lintasan Homestead, Florida – Bedford, Massachuset yang dilakukan pada tanggal 3 – 9 Agustus 1989 memiliki hasil yang identik dengan pengukuran sebelumnya yang dilakukan pada bulan Maret 1989, sedangkan pengukuran *Delay – Doppler spread* untuk lintasan Boulder, Colorado - Bedford, Massachuset sejauh 2800 km yang dilakukan pada tanggal 4 – 30 April 1990 dengan frekuensi carrier 9,2 MHz dan 23,9 MHz menunjukkan median magnitude Doppler *shift* adalah 0,17 Hz, sedangkan median Doppler *Spread* 0,07 Hz. Selanjutnya untuk hasil pengukuran lintasan multihop San Fransisco, CA - Bedford, MA sejauh 4330 km. Kanal ini merambat melalui lapisan 2F2, sehingga memiliki satu kali pantulan pada tanah dan memiliki dua titik kontrol pada lapisan ionosfer. Frekuensi kerja adalah 23,864 MHz. Pengukuran dilaksanakan pada tanggal 13 – 28 Pebruari 1990 dengan media Doppler *spread* 0,347 Hz. Pengukuran dilakukan pada saat siang, malam dan pada saat matahari terbit dan terbenam. Hasilnya menunjukkan bahwa Doppler *spread* rata-rata untuk siang hari adalah 0,24 Hz, malam hari 0,38 Hz dan 0,36 Hz pada saat matahari terbit dan terbenam.

Sistem komunikasi HF merupakan sistem komunikasi alternatif untuk wilayah Antartika dalam berhubungan dengan negara induk, dimana seringkali satelit geostasioner tidak dapat dipergunakan di daerah kutub. Sebagai alternatif, dipergunakan radio komunikasi yang mempergunakan pantulan *skywave* pada lapisan ionosfer (Vilela, 2005). Oleh karena itu, untuk mengetahui parameter-parameter yang paling mempengaruhi perancangan modem, yaitu SNR, *delay* dan Doppler *spread* dan untuk mengimplementasikan Radiomodem yang sesuai untuk daerah Antartika, maka dibentuklah proyek SANDICOM (*Sounding System for Antarctic Radio Digital Communications*). Pengukuran dilakukan dengan menginstall sistem *sounding* antara Antarctic Spanish Base di Pulau Livingston (60,2 S 60,4 W) dengan Observatori d l'Ebre di Spanyol (40,8 N 0,5 E) sejauh 12.700 km. Sinyal yang dikirimkan adalah BPSK yang dimodulasi PN M-Sequence dengan baud rate 1225 Baud. Frekuensi kerja diadaptasikan oleh *antenna tuner* antara 3-30 MHz. Hasil pengukuran menunjukkan hasil *delay spread* 1,5 – 6 ms dan Doppler *Bandwidth* 0,4 – 2 Hz dan memiliki korelasi yang baik dengan hasil

simulasi *software* PropLab yang menggunakan pemodelan ionosfer URSI untuk lintang tinggi. Namun, *Bandwidth* yang dipergunakan pada pengukuran ini masih kecil, yaitu 3 kHz.

DAMSON (*Doppler and Multipath Sounding Network*) dioperasikan pada tanggal 26 Agustus – 22 September 1997 untuk mengukur parameter kanal HF di daerah *equatorial* Thailand pada lintasan Utara – Selatan sejauh 600 km (Cannon, 2000). Sistem ini mengirim pulsa dengan *Bandwidth* 3 kHz dengan frekuensi antara 4,1 – 10,6 MHz. *Cummulative Distribution Function* (CDF) dari Doppler spread dihasilkan untuk pengukuran pada siang dan malam hari. Pengukuran ini masih terbatas pada satu hop pada lintasan utara – selatan dengan *Bandwidth* yang sempit, sehingga perlu dilakukan perbandingan dengan lintasan *multihop* pada orientasi lintasan yang lain dengan *Bandwidth* yang lebih lebar.

Pengukuran-pengukuran untuk mendapatkan karakteristik respon impuls kanal Wideband HF banyak dilakukan pada daerah lintang menengah. Sedangkan daerah lintang rendah seperti Indonesia belum banyak dilakukan. Padahal, daerah lintang rendah memiliki karakteristik yang berbeda dengan lintang menengah. Di daerah lintang rendah, perambatan gelombang HF dipengaruhi oleh aktivitas matahari yang tinggi dan fenomena anomali ionisasi. Indonesia terletak pada puncak anomali ionisasi pada lintang rendah dan berada pada puncak koneksi paling aktif di dunia. Anomali ionisasi ini menyebabkan ketidakteraturan elektron pada lapisan F ionosfer. Ketidakteraturan ini dapat diamati pada citra ionogram berupa jejak-jejak yang tersebar pada lapisan F. Hasil pengukuran tahun 1999 menunjukkan bahwa ESF terjadi di Indonesia terjadi pada malam hari, antara pukul 22.00 – 02.00 Waktu Lokal, pada saat puncak aktivitas matahari di sekitar ekuator (*equinox*) pada bulan Maret dan September 1999 dan paling sedikit terjadi pada bulan Juli dan Desember 1999 (Suhartini, 2002). ESF menyebabkan terjadinya *fading* dan sintilasi yang mengganggu perambatan gelombang radio HF dan satelit. *Fading* adalah redaman pada daya yang terjadi menyebar sepanjang media perambatan, sedangkan sintilasi adalah efek pada atmosfer yang menyebabkan terganggunya pengamatan pada radar terhadap lokasi benda-benda angkasa (Dabas, 2004). Pada kasus sintilasi di Indonesia pada tanggal 10 Maret 2010, kenaikan

sinulasi ionosfer terjadi pada pukul 20.30 WIB dan berlangsung selama kurang lebih 2 jam (Ekawati, 2010).

Studi tentang karakteristik kanal ionosfer HF merupakan dasar sebelum merancang sistem komunikasi HF. Hal ini karena untuk mempelajari stabilitas kanal dengan pengukuran sangat sulit, mengingat perubahan karakteristik ionosfer sangat cepat baik secara spasial maupun temporal. Oleh karena itu, simulasi model kanal dipergunakan untuk mempelajari stabilitas kanal HF karena murah, mudah, akurat dan dapat dilakukan beberapa kali. Sejumlah pemodelan dan simulator kanal telah dirancang berdasarkan model kanal Watterson (Watterson, 1970), dimana model Watterson ini hanya valid untuk daerah mid-latitude dengan narrowband, tanpa melibatkan komponen Doppler dan *multipath* (Mastrangelo, 1997). Pemodelan yang lebih akurat untuk wideband telah dilakukan oleh ITS (Mastrangelo, 1997; Perry, 1989). Model ini telah divalidasi untuk pengukuran kanal HF The Mitre Corporation pada *Bandwidth* 800 kHz untuk daerah Homestead, FL ke Bedford, MA sejauh 2070 km (Perry, 1989). Tetapi, penggunaan model ini terbatas karena untuk mengaplikasikan Model ITS ini diperlukan banyak parameter yang harus dimasukkan, seperti panjang lintasan (D), frekuensi penetrasi pada lapisan ionosfer (f_p), tinggi dimana kerapatan maksimum elektron terjadi (h_o), dan faktor skala ketebalan (σ), yang diperoleh dari deteksi ionosfer (Clune, 1991). Selain itu, data yang dipergunakan dalam merancang model ini diperoleh dari hasil pengukuran The MITRE Corporation di Bedford, MA pada Bulan Maret 1989 sejauh 2070 km. Daerah ini termasuk lintang menengah. Data yang diambil adalah data pada kondisi ionosfer tenang. Oleh karena itu, model ini belum terbukti dapat diaplikasikan pada daerah selain lintang menengah pada saat terjadi perubahan konten elektron pada ionosfer.

Salah satu penelitian tentang kanal radio HF di daerah lintang rendah, tepatnya Thailand, dengan arah *link* Utara-Selatan sejauh 600 km, berupa Channel Sounder, yang dilakukan oleh DAMSON (Doppler and *Multipath* Sounding Network) (Cannon, 2000). Sedangkan penelitian kali ini akan menggunakan kode Pseudo-Noise (PN)-Sequence untuk mendapatkan respons impuls pada *link* yang berorientasi berbeda, yaitu Barat-Timur, dengan jarak yang lebih jauh lebih dari 3000 km.

2.2.2 Korelasi Antar Link

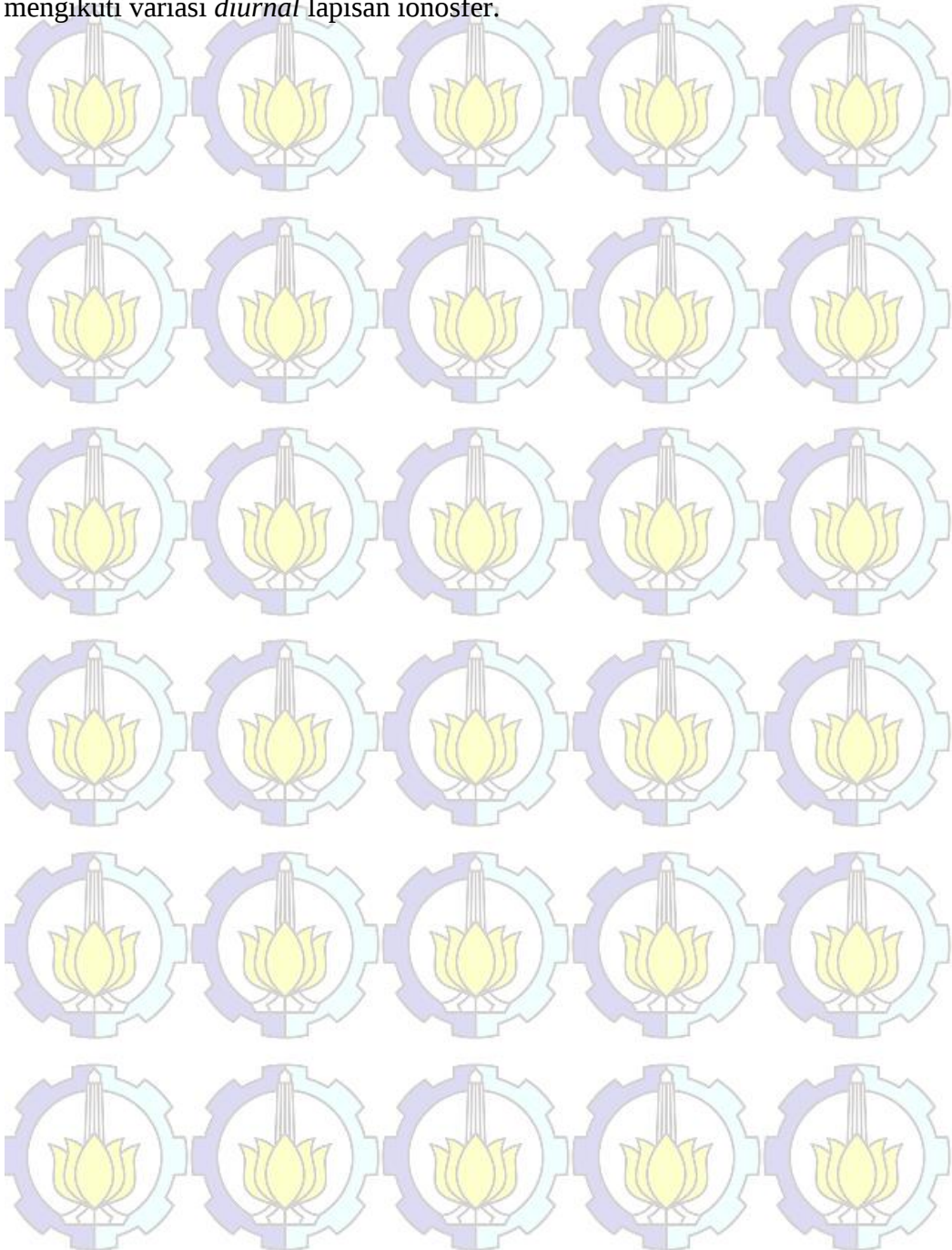
Untuk menunjang kehandalan dan cakupan sistem komunikasi radio HF *skywave* jarak jauh, beberapa teknologi yang sudah banyak digunakan pada sistem komunikasi radio terrestrial dapat dicoba diterapkan untuk HF, seperti *site diversity*, relay network, atau komunikasi kooperatif (Rappaport, 2002). Tetapi keberhasilan teknologi-teknologi tersebut diatas sangat bergantung pada korelasi antar *link* HF yang terlibat. Sebagai contoh, teknik *diversity* memanfaatkan sejumlah kanal *multipath* yang bersifat acak dan tidak berkorelasi untuk berkomunikasi (Rappaport, 2002).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengukur korelasi spasial *link* HF *skwave* di lokasi yang berbeda. Pengukuran korelasi spasial single-hop gelombang radio HF telah dilakukan di Australia pada *link* sejauh 2044 km untuk mengukur korelasi sinyal antara transmitter dan tiga receiver yang masing-masing berjarak satu km (Baker, 1971). Dari hasil pengukuran tersebut disebutkan bahwa korelasi spasial memiliki sifat isotropic dan berkorelasi tinggi untuk radius 1 km. Selain itu, hasil pengukuran yang dilakukan di United States untuk *link* sejauh 1566 km dengan frekuensi 21.35 MHz menyatakan bahwa sinyal berkorelasi tinggi untuk receiver yang terpisah sejauh 40λ untuk single-hop dan 10λ untuk multihop (Balser, 1962). Hasil yang sama juga ditunjukkan oleh pengukuran yang serupa di Turki (Gibson, 1995).

Penelitian-penelitian yang disebutkan diatas dilakukan di daerah mid-latitude yang mempunyai karakteristik berbeda dengan low-latitude (McNamara, 1991). Kanal Radio HF di daerah low-latitude geomagnetically memiliki karakteristik khas yang berbeda dengan daerah high-latitude dan mid-latitude, yaitu adanya Fountain Effect yang mendistribusikan kembali elektron pada daerah lintang rendah, yang bergerak dari atas ekuator turun menuju lintang geomagnetic 10° sampai 20° . Selain itu, pada daerah low-latitude juga terjadi perubahan frekuensi kritis yang cepat dalam beberapa ratus kilometer dan peningkatan frekuensi kritis yang tinggi setelah matahari terbit (McNamara, 1991).

Sebagian besar pengukuran diatas dilakukan dengan satu pemancar yang mengirimkan gelombang HF ke beberapa receiver yang terpisah dengan spasi sampai 40λ . Hanya satu eksperiment yang mencoba spasi antar receiver sampai 400

km. Penelitian tersebut juga belum memasukkan faktor variasi *diurnal* lapisan ionosfer, sehingga dalam penelitian ini faktor tersebut akan dipergunakan sebagai salah satu faktor yang mempengaruhi hasil korelasi. Selain itu, dilakukan juga evaluasi korelasi spasial antar *link* HF yang konvergen pada lokasi transmitter dengan dua receiver yang terpisah sejauh 1900 km di daerah low-latitude dengan mengikuti variasi *diurnal* lapisan ionosfer.





Halaman ini dikosongkan



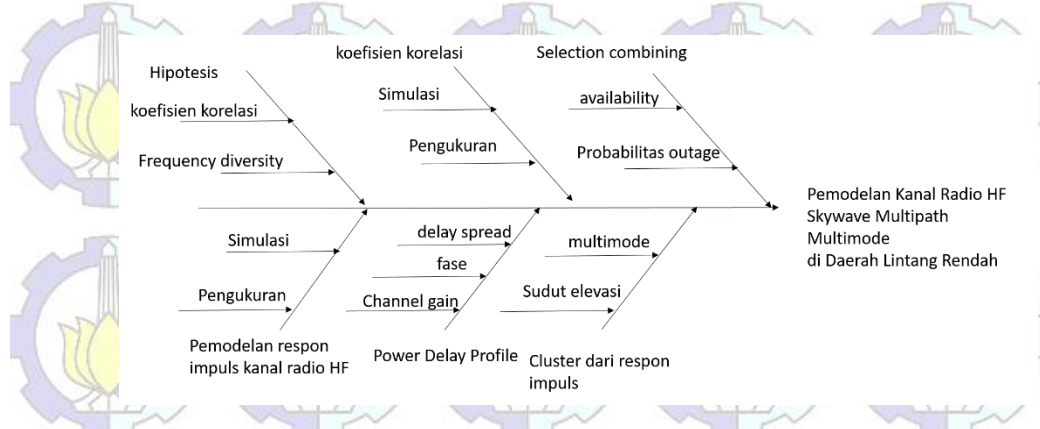
BAB 3

Metode Penelitian

Strategi untuk menyelesaikan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 dimana tujuan akhir dari penelitian ini adalah Pemodelan Kanal Radio HF di Daerah Lintang Rendah, yang terdiri dari dua topik utama, yaitu yang pertama adalah pemodelan respon impuls secara statistik dan yang kedua adalah perhitungan koefisien korelasi antara dua *link*, peningkatan *diversity gain* dan penurunan probabilitas *outage* kanal radio HF dengan mengaplikasikan *site diversity* antara dua *link* yang terpisah jauh di daerah lintang rendah.

Strategi-strategi yang diperlukan untuk menyelesaikan penelitian ini dilakukan sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.1, yang secara khusus dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Memodelkan parameter-parameter respon impuls kanal radio HF jarak jauh di daerah lintang rendah secara statistik. *Link* yang dipergunakan untuk menyusun distribusi ini adalah *link* Surabaya-Merauke sejauh 3044 km. Pemodelan ini ditentukan melalui tahapan-tahapan sebagai berikut :
 - a. Menyusun hipotesis distribusi statistik parameter-parameter respon impuls kanal radio HF jarak jauh di daerah lintang rendah. Pengujian hipotesis ini dilakukan dengan tiga tahap yang dijelaskan pada bagian, b, c dan d seperti di bawah ini



Gambar 3.1 Diagram Tulang Ikan Strategi Penelitian

- b. Pengujian hipotesis pertama dilakukan dengan memodelkan kanal radio HF secara matematis.
 - c. Pengujian hipotesis selanjutnya adalah menggunakan simulasi Proplab untuk mendapatkan respon impuls dari *link* jarak jauh Surabaya – Merauke sejauh 3044 km
 - d. Pengujian hipotesis ketiga adalah menggunakan pengukuran secara langsung dengan menggunakan *link* Surabaya-Merauke
- Selanjutnya parameter-parameter tersebut yang meliputi *delay spread* dan *channel gain* dimodelkan secara statistik dan diketahui distribusinya. Dari perhitungan *delay spread* diketahui bahwa respon impuls membentuk cluster-cluster berdasarkan mode-mode kedatangannya yang dipengaruhi oleh besar sudut elevasi.
2. Meningkatkan *diversity gain* dan menurunkan probabilitas *outage* dengan menggunakan *site diversity* dengan memanfaatkan dua *link* yang tidak berkorelasi di daerah lintang rendah. *Link* yang dipergunakan adalah Surabaya – Merauke dan Surabaya-Ternate. Upaya ini dilakukan dengan beberapa langkah di bawah ini :
 - a. Menentukan hipotesis kemungkinan penggunaan *site diversity* untuk meningkatkan *diversity gain* dan menurunkan probabilitas *outage* suatu *link* utama
 - b. Menghitung korelasi spasial antara dua *link* dengan simulasi ray tracing dengan menggunakan Proplab
 - c. Verifikasi hasil korelasi spasial antara dua *link* dengan pengukuran langsung pada *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate
 - d. Verifikasi korelasi spasial yang kedua adalah dengan simulasi ray tracing pada kedua *link* untuk tanggal yang berbeda
 - e. Menentukan penurunan probabilitas *outage* dan peningkatan *diversity gain* dengan menggunakan *site diversity*

3.1 Simulasi Proplab

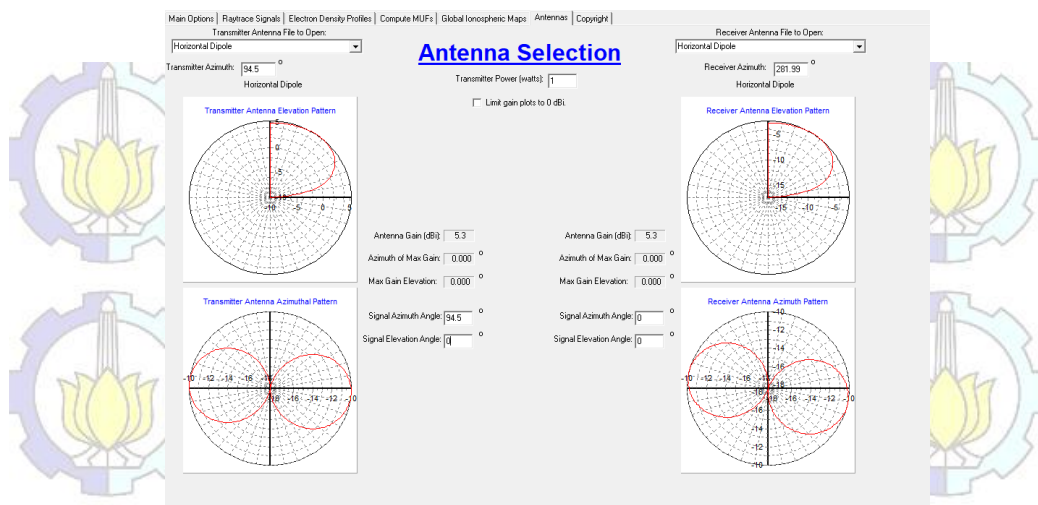
Simulasi ray tracing dengan Proplab dipergunakan untuk beberapa tujuan, yaitu :

1. Pemodelan respons impuls kanal radio HF *link* Surabaya – Merauke
Simulasi untuk pemodelan respons impuls ini dilakukan untuk *link* Surabaya – Merauke dengan frekuensi 14 MHz untuk tanggal 11 Mei 2015 dan 11 September 2015
2. Korelasi spasial antara *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate
Korelasi spasial dihitung antara *link* Surabaya – Merauke dengan frekuensi 7 MHz sebagai *link* utama dan *link* Surabaya – Ternate sebagai *link* alternatif dengan frekuensi 7 MHz, 14 MHz, dan 21 MHz. Simulasi ini dilakukan untuk tanggal 11 Mei 2015 dan 11 September 2015. Kemudian, sebagai verifikasi, dilakukan simulasi ray tracing untuk tanggal 15 – 17 Nopember 2017 dengan frekuensi 10,145 MHz untuk menghitung korelasi spasial antara *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya - Ternate
3. Aplikasi *site diversity* untuk meningkatkan *availability*
Simulasi yang dipergunakan untuk aplikasi *site diversity* adalah simulasi *link* Surabaya – Merauke dengan frekuensi 7 MHz dan *link* Surabaya – Ternate dengan frekuensi 7 MHz, 14 MHz, dan 21 MHz pada tanggal 11 Mei 2015 dan 11 September 2015.

Simulasi ray tracing untuk mendapatkan respon impuls ini dilakukan dengan menggunakan Proplab Pro Versi 3. Pemilihan frekuensi didasarkan pada Peraturan Kementerian Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia nomor 25 tahun 2014 tentang alokasi spektrum frekuensi radio Indonesia dimana frekuensi yang dipergunakan adalah frekuensi yang dialokasikan untuk amatir. Pada simulasi kali ini dipergunakan frekuensi 7 MHz, 10 MHz, 14 MHz dan 21 MHz.

Hasil yang diperoleh dari simulasi ray tracing ini adalah tegangan (Volt). Untuk mendapatkan tegangan dalam Volt ada beberapa langkah yang dilakukan sebagai berikut :

- a. Menentukan letak koordinat pemancar dan penerima pada halaman opsi peta.
Pada halaman yang sama ditentukan tanggal simulasi
- b. Pada halaman opsi Model IRI, dimasukkan nilai rata-rata Sunspot Number (SSN) selama 12 bulan, IG Index, dan 10,7 solar flux yang sesuai dengan tanggal simulasi. Nilai-nilai tersebut diperoleh dari hasil pengukuran SSN Bulanan yang ditampilkan pada laman Australia Government Bureau of Meteorology. Pada

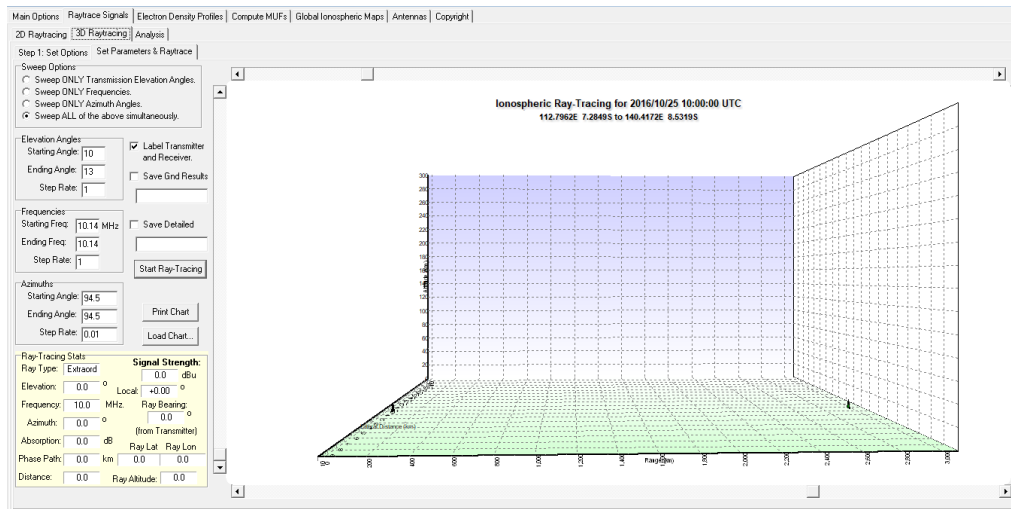


Gambar 3.2 Halaman Pemilihan Antena dan penentuan daya

halaman yang sama juga dipilih pemodelan yang dipergunakan untuk memodelkan lapisan ionosfer dengan Model IRI.

- c. Tipe antena yang dipergunakan, daya pancar dan sudut azimuth antena ditentukan pada halaman antena. Pada simulasi kali ini dipergunakan antena dipole horizontal untuk tujuan pertama dan antena monopole vertikal untuk tujuan kedua, baik untuk pemancar maupun penerima, daya pancar 1 Watt dan sudut azimuth untuk menentukan bearing utama antena $94,5^\circ$ untuk *link* Surabaya – Merauke dan bearing $62,1^\circ$ untuk *link* Surabaya - Ternate. Gambar 3.2 menunjukkan halaman antena ini dimana pada halaman tersebut juga digambarkan pola azimuth dan elevasi antena yang dipergunakan.
- d. Pada halaman *Ray Tracing Signal*, dipilih *3D Ray Tracing* yang dapat menggambarkan perambatan sinyal lebih kompleks daripada *2D Ray Tracing*, kemudian dipilih Metode *Ray Tracing* yang paling mendekati kondisi ionosfer yang sesungguhnya, yaitu *Formula Appleton-Hartree With Field With Collision*, yang melibatkan pengaruh medan magnet bumi dan tabrakan antara elektron dan neutron pada ionosfer. Sedangkan jenis lintasan yang dipilih untuk dihasilkan selama proses simulasi adalah lintasan *ordinary* dan *extraordinary*.

Parameter yang disimulasikan dalam ray tracing ini dipilih pada halaman *Set Parameters and Ray Trace*. Parameter yang dipilih untuk selalu berubah adalah sudut elevasi lintasan, sedangkan frekuensi dan sudut azimuth ditentukan bernilai



Gambar 3.3 Halaman Pengaturan Parameter Ray Tracing dan perambatan sinyal

tetap. Pada simulasi kali ini dipilih sudut elevasi dari 0° hingga 50° dengan interval $0,1^{\circ}$, sebab setelah 50° sinyal diteruskan ke angkasa. Tetapi simulasi akan dihentikan jika sebelum 50° sinyal telah diteruskan ke angkasa. Kemudian pada halaman tersebut juga terdapat tombol *Start Ray Tracing* yang dapat ditekan jika semua parameter telah lengkap dimasukkan. Setelah itu, sinyal yang dipancarkan dapat dilihat pada sisi kanan halaman tersebut sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.3. Pada gambar tersebut dapat terlihat tulisan *Save Gnd Result* diatas sebuah kotak kosong. Pada kotak tersebut diisi letak file hasil simulasi disimpan. Sedangkan pada bagian kiri bawah gambar tersebut ditampilkan *Ray Tracing Stats* yang menunjukkan catatan statistik sinyal yang sedang merambat tersebut. Tetapi, sayangnya data tersebut tidak dapat diperoleh.

e. Setelah proses ray tracing selesai, diperoleh file data dalam bentuk *.ryg. Agar dapat diolah data ini diubah dalam bentuk *.txt oleh perangkat *Database Convert-Export* yang disediakan oleh Proplab. Data dalam bentuk *.txt inilah yang akan diolah.

Data yang diolah lebih lanjut adalah data yang diasumsikan sampai di penerima. Data yang diasumsikan sampai di penerima adalah jika memiliki jarak dengan penerima kurang dari 50 km. Jarak ini dihitung dari koordinat lintang bujur sinyal yang tiba dengan koordinat penerima. Jarak antara kedua titik ini dalam km

(s) dihitung dengan Metode *Great Circle Distance* dimana titik pertama memiliki koordinat (λ_1, β_1) dan titik kedua memiliki koordinat (λ_2, β_2) adalah sebagai berikut (Williams, 2012) :

$$s = 6371 \cdot \cos^{-1}(\sin(\lambda_1) \cdot \sin(\lambda_2) + \cos(\lambda_1) \cdot \cos(\lambda_2) \cdot \cos(\beta_1 - \beta_2)) \quad (3.1)$$

dengan 6371 km adalah jari-jari bumi dan λ dan β adalah koordinat lintang dan bujur yang dinyatakan dalam radian.

Kuat sinyal yang dihasilkan oleh Proplab memiliki satuan dalam $dB\mu V$, oleh karena itu untuk perhitungan, satuan diubah dalam bentuk Volt. Kuat sinyal (α) ini yang dipergunakan untuk pemodelan respons impuls dan korelasi spasial. Selain itu, dari jarak total dalam km dihitung fase dari lintasan. Fase (θ) dalam derajat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$\theta = \frac{D \bmod \lambda}{\lambda} \times 360^\circ \quad (3.2)$$

dimana

- D = jarak total lintasan (km)
- λ = panjang gelombang (km)

3.1.1 Pemodelan Respons Impuls Secara Matematis dan Statistik dengan Hasil Simulasi

Simulasi yang dipergunakan untuk pemodelan respons impuls dihasilkan dari simulasi *link* Surabaya – Merauke sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.4. Letak koordinat lintang dan bujur Surabaya dan Merauke dapat dilihat pada Tabel



Gambar 3.4 Letak Pemancar di Surabaya dan Penerima di Merauke sejauh 3044 km

Tabel 3.1 Koordinat Pemancar dan Penerima Secara Geografis dan Geomagnetis

	Lokasi	Koordinat Geografis	Lintang Geomagnetis
Pemancar	Surabaya	7.28 S, 112.80 E	16.71 S
Penerima	Merauke	8.53 S, 140.42 E	16.38 S

3.1. Surabaya dan Merauke memiliki lintang geomagnetik kurang dari 30° sehingga termasuk dalam wilayah lintang rendah. Daya pancar yang dipergunakan 1 Watt.

Parameter yang dipergunakan dalam pemodelan adalah *channel gain*, fase, *rms delay spread* dan *maximum excess delay*. Parameter-parameter ini diperoleh dari hasil simulasi dengan metode sebagai berikut :

- i. *rms delay spread* dan *maximum excess delay*

Perhitungan *rms delay spread* dan *maximum excess delay* diawali dengan menghitung *mean excess delay* seperti dalam Persamaan (2.28). Kuat sinyal ternormalisasi (p_i) dihasilkan sedemikian rupa sehingga total kuat sinyal lintasan sama dengan 1 dan dengan memasukkan faktor *channel gain* (S) dihasilkan persamaan :

$$h(\tau) = S \sum_{i=1}^N p_i(\tau) e^{-j\theta_i} \cdot \delta[\tau - \tau_i] \quad (3.4)$$

Karena $\sum_{i=1}^N |p_i|^2 = 1$, maka jika Persamaan (3.4) dikuadratkan, maka dihasilkan :

$$S^2 \sum_{i=1}^N |p_i|^2 = \sum_{i=1}^N |\alpha_i|^2 \quad (3.5)$$

Sehingga :

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^N |\alpha_i|^2} \quad (3.6)$$

Setelah itu, dapat diperoleh *rms delay spread* untuk tiap power delay profile sesuai Persamaan (2.23) dan *maximum excess delay* dengan mengurangi τ_k yang terakhir datang dengan τ_o yang pertama kali datang. Dari perhitungan ini akan diperoleh 48 pasang data *rms delay spread* dan *maximum excess*

delay. Kedua parameter tersebut dicari nilai CDF masing-masing, kemudian di fitting untuk mendapatkan distribusi statistiknya. Hasil fitting tersebut akan diverifikasi dengan hasil pengukuran.

ii. *Channel gain (S)*

Channel gain (S) diperoleh dari Persamaan (3.6). Dari simulasi dihasilkan 48 *channel gain* yang dipergunakan untuk fitting model distribusi yang sesuai.

iii. *Fase (θ)*

Pergeseran fase (θ) dihitung untuk setiap lintasan yang diterima. θ dihitung sesuai dengan Persamaan (3.2). Fase untuk seluruh lintasan yang diterima dicari bentuk CDF-nya untuk selanjutnya difitting untuk dicari distribusi statistik yang paling sesuai.

iv. *Delay spread*

Berdasarkan *excess delay* yang diterima oleh setiap lintasan ke- k (τ_k) dapat disusun bin-bin yang akan dipergunakan untuk membagi *delay spread* yang dapat diterima dengan mempertimbangkan besar tegangan dan sudut elevasi dalam cluster-cluster tertentu. Jika semua lintasan sudah terdefinisi dalam bin masing-masing, maka dapat dibuat sebuah data tentang jumlah mode yang ada dalam bin tersebut, sudut elevasi dan besar magnitudo-nya dalam Volt.

Dari hasil simulasi dapat ditemukan faktor-faktor yang menyusun respons impuls, yaitu kuat sinyal dan *delay*. Dari hasil hipotesis yang disampaikan di Subbab 1.5 dinyatakan adanya faktor sudut elevasi tiap lintasan yang menentukan respons impuls. Oleh karena itu, dalam simulasi dapat dibuktikan apakah model respons impuls yang dihasilkan dipengaruhi oleh sudut elevasi, sehingga dapat dipergunakan untuk menyusun Model Matematis Respons Impuls untuk kanal radio HF *skywave multipath* multimode di daerah lintang rendah.

3.1.2 Korelasi spasial dengan Hasil Simulasi

Link Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate dipergunakan untuk simulasi ray tracing menghitung korelasi antar kedua *link* tersebut. Gambar 3.5 menunjukkan letak posisi *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate, dimana

Tabel 3.2 Koordinat geografis dan lintang geomagnetis dari pemancar dan dua penerima

	Lokasi	Koordinat geografis	Lintang Geo Magnetik
Pemancar	Surabaya	7.28 S, 112.80 E	16.71 S
Penerima I	Merauke	8.53 S, 140.42 E	16.38 S
Penerima II	Ternate	0.76 N, 127.34 E	8.17 S

Surabaya – Merauke berjarak 3044 km dan Surabaya – Ternate 1890 km sedangkan koordinat secara geografis dan geomagnetis dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Sinyal yang dihasilkan dari ray tracing ini dan dipergunakan dalam perhitungan terdiri dari mode *Ordinary* dan *Extraordinary* dan terdiri dari beberapa hop. Dari lintasan-lintasan yang diterima dipergunakan besaran kuat sinyal (α) dalam Volt dan fase (θ) dalam ($^{\circ}$) untuk proses perhitungan tegangan kompleks (V) (Vastberg, 1997) :

$$V_o = \alpha_o e^{j\theta_o} \quad (3.7)$$

$$V_x = \alpha_x e^{j\theta_x} \quad (3.8)$$

Dengan subscript ‘o’ dan ‘x’ adalah notasi untuk *ordinary* dan *extraordinary*, sedangkan V dan θ masing-masing adalah notasi untuk tegangan dan fase. Kemudian untuk menyusun tegangan kompleks total yang melibatkan seluruh hop dan lintasan O dan X, maka (Vastberg, 1997):

$$V = V_o + V_x \quad (3.9)$$

Tegangan kompleks hasil penjumlahan V_o dan V_x untuk seluruh lintasan dan hop dihitung nilai magnitudonya untuk keperluan perhitungan korelasi spasial antara *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate. Setelah proses perhitungan



Gambar 3.5 Lokasi dan jarak pemancar di Surabaya dan 2 penerima di Merauke dan Ternate

magnitudo, maka untuk satu waktu ray tracing memiliki satu nilai magnitudo tegangan, sehingga total dihasilkan 48 pasang nilai magnitudo. Dengan menggunakan Persamaan (2.31) dihitung nilai korelasi spasial antar *link*. Nilai koefisien korelasi spasial ini diverifikasi dengan simulasi ray tracing untuk tanggal 15-17 Nopember 2017 dengan frekuensi 10,145 MHz. Frekuensi ini merupakan frekuensi amatir yang dipergunakan oleh pengamatan kanal (Lapan, 2010). Koefisien korelasi pada simulasi ini dihitung dengan cara yang sama.

3.1.3 Aplikasi Site Diversity

Data magnitudo tegangan total yang dihasilkan oleh simulasi pada subbab 3.2.1 dipergunakan untuk mencoba menerapkan *site diversity*. Yang pertama kali dilakukan adalah menentukan frekuensi yang dipergunakan pada *link* utama Surabaya-Merauke. Pemilihan frekuensi ini didasarkan pada frekuensi yang paling banyak tersedia berdasarkan perhitungan MUF pada Proplab.

Perhitungan peningkatan *diversity gain* dilakukan dengan menghitung CDF *Signal-to Noise Ratio* (SNR) *link* utama dengan frekuensi utama, dan SNR jika diaplikasikan *site diversity*. Noise dihitung berdasarkan thermal noise dengan temperature 300 K, ditambah dengan *noise figure* yang diambil dari *datasheet* LNA (MiniCircuit, 2018). *Bandwidth* yang dipergunakan 10 kHz. Selanjutnya adalah menghitung peningkatan *diversity gain* melalui CDF dari SNR *link* utama dan SNR dengan penerapan *Selection combining*.

Langkah selanjutnya adalah mencari frekuensi yang paling baik yang dipergunakan oleh *link* alternatif. Ada tiga frekuensi yang tersedia pada *link* alternatif, yaitu 7 MHz, 14 MHz dan 21 MHz. Frekuensi yang dipilih adalah frekuensi yang memiliki karakteristik diurnal yang berbeda dengan frekuensi pada *link* utama sehingga dapat dijadikan alternatif saat *link* utama mengalami *outage*. Pada penelitian ini dapat dipilih antara frekuensi 14 MHz atau 21 MHz. Dengan metode uji-t dicari frekuensi yang terbaik yang dapat dipergunakan sebagai frekuensi untuk *link* alternatif.

3.2. Pengukuran

Pengukuran pada kanal radio HF didaerah lintang rendah ini dilakukan untuk dua tujuan, yaitu :

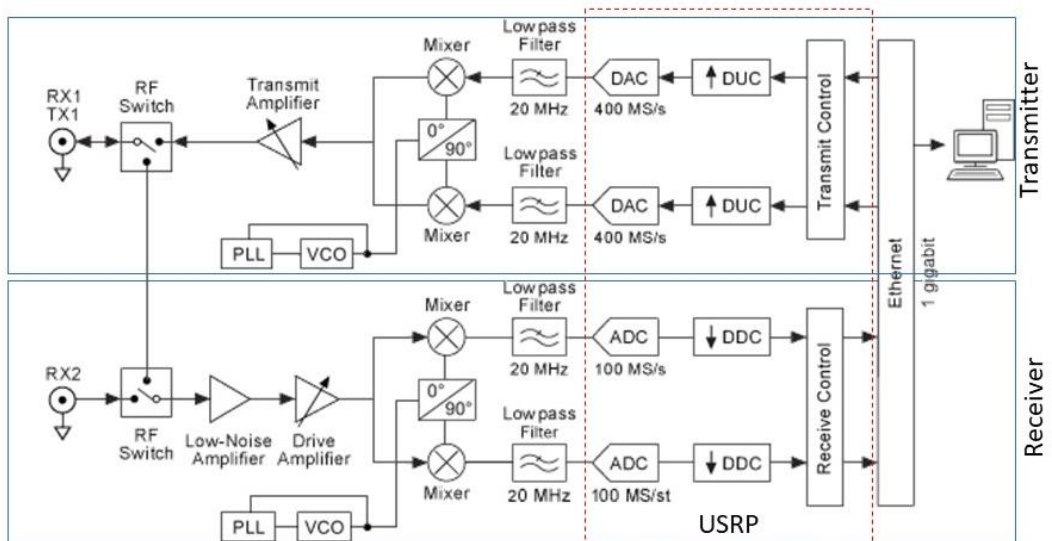
1. Mendapatkan respons impuls kanal radio HF pita lebar

Pengukuran ini dilakukan pada tanggal 12-15 Pebruari 2014 pada *link* Surabaya – Merauke dengan mengirimkan sinyal PN Sequence pada frekuensi 14 MHz sebagai verifikasi dari model parameter kanal yang dihasilkan dengan simulasi.

2. Menghitung korelasi spasial kuat sinyal antara *link* Surabaya – Merauke dan *link* Surabaya – Ternate

Pengukuran ini dilakukan pada tanggal 13-17 Nopember 2017 pada *link* Surabaya – Merauke dan *link* Surabaya – Ternate dengan mengirimkan sinyal carrier pada frekuensi 9 MHz sebagai verifikasi koefisien korelasi yang dihasilkan melalui metode simulasi

Baik pengukuran respons impuls (pengukuran I) maupun pengukuran kuat sinyal (pengukuran II) menggunakan perangkat *Universal Software Radio Peripherals* (USRP) N210 dan perangkat lunak LabVIEW. Pengukuran I menggunakan USRP dan LabVIEW untuk memproduksi PN Sequence pada pengirim (Tx) dan sebagai penerima (Rx). Pada Pengukuran I, Tx USRP dilengkapi daughterboard LFTX dan pada Rx dilengkapi daughterboard LFRX agar USRP dapat bekerja pada rentang frekuensi 2- 30 MHz. Sedangkan pada Pengukuran II hanya menggunakan USRP N210 dengan daughterboard LFRX pada Rx,



Gambar 3.6 Diagram Blok USRP dan daughterboard (National Instruments, 2012)

sedangkan sinyal carrier pada Tx dihasilkan oleh Radio HF. Gambar 3.6 adalah skema USRP dan daughterboard untuk menjelaskan pemrosesan sinyal pada Tx dan Rx sebagai berikut (National Instrument, 2012) :

- a. Sisi Tx; setelah *I/Q Baseband* disintesis oleh komputer dan dikirimkan melalui kabel Gigabit Ethernet
 - i. *Digital Upconverter* (DUC) mencampur, memfilter dan interpolasi sinyal
 - ii. *Digital to Analog Converter* (DAC) mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital

Langkah selanjutnya dilakukan oleh LFTX, yaitu :

- iii. *Low Pass Filter* (LPF) mengurangi noise dan komponen berfrekuensi tinggi
 - iv. *Mixer* menaikkan dan mengubah sinyal kepada frekuensi radio yang dikehendaki
 - v. *Phase Locked Loop* (PLL) mengatur *Voltage Control Oscillator* (VCO) sehingga clock dari perangkat dan *Local Oscillator* (LO) dapat dikunci pada frekuensi yang dikehendaki pengguna
- b. Sisi Rx; setelah *Low Noise Amplifier* (LNA) meningkatkan sinyal yang datang.

Langkah berikut dilakukan oleh LFRX :

- i. *Phase Locked Loop* (PLL) mengatur *Voltage Control Oscillator* (VCO) sehingga clock dari perangkat dan *Local Oscillator* (LO) dapat dikunci pada frekuensi yang dikehendaki pengguna



Gambar 3.7 Antena dipole horisontal pemancar di atas jembatan antar Gedung B dan AJ

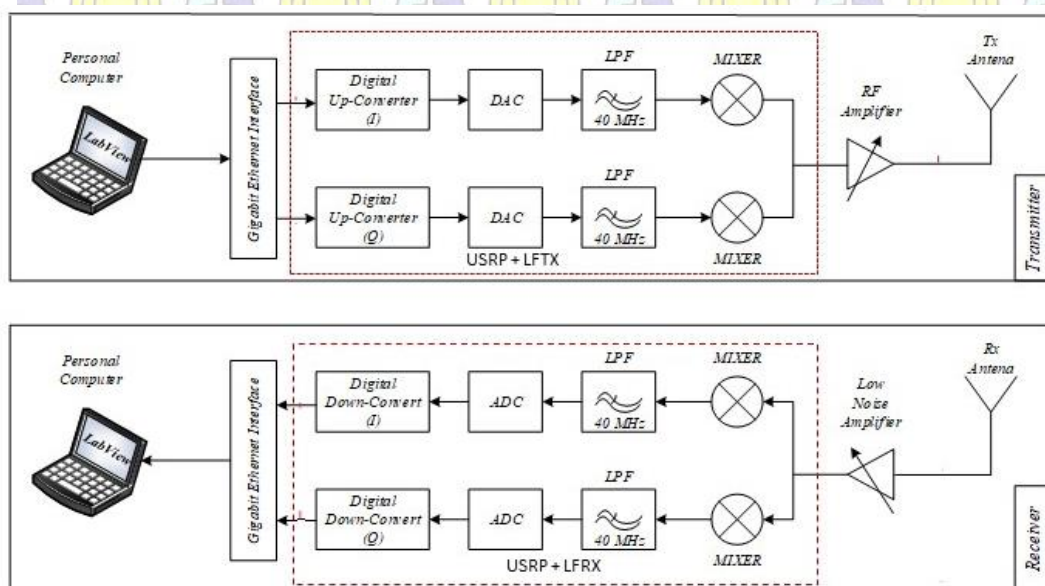


Gambar 3.8 Antena dipole horisontal sebagai penerima diatas Gedung Teknik Elektro, Universitas Musamus, Merauke

- ii. *Mixer* menurunkan dan mengubah sinyal kepada frekuensi radio yang dikehendaki
- iii. *Low Pass Filter* (LPF) mengurangi *noise* dan komponen berfrekuensi tinggi

Langkah berikut dikerjakan oleh USRP :

- iv. *Analog to Digital Converter* (ADC) digitalisasi data I dan Q
- iii. *Digital Downconverter* (DDC) mencampur, memfilter dan mengurangi laju sinyal
- v. Sinyal yang telah ter-*downconverted* dikirimkan pada komputer melalui kabel *Gigabit Ethernet*



Gambar 3.9 Skema Pengukuran Respons Impuls. Atas : Pemancar, bawah : Penerima

3.2.1 Pengukuran Respons Impuls Kanal Radio HF Pita Lebar

Pengukuran respons impuls kanal radio HF dilakukan pada *link* Surabaya – Merauke yang berjarak 3044 km. Gambar 3.2 menunjukkan letak Surabaya dan Merauke di Indonesia, sementara Tabel 3.1 menunjukkan letaknya secara geografis dan geomagnetis. Antena pemancar menggunakan antena dipole horisontal yang diletakkan diatas jembatan antara Gedung B dan AJ, Departemen Teknik Elektro, ITS Surabaya sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.7, sedangkan antena dipole horisontal penerima diletakkan di atas Laboratorium Teknik Elektro, Universitas Musamus, Merauke sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.8. Tipe yang dipergunakan adalah ICOM MN-100.

3.2.1.1 Sistem Pengukuran

Sistem pengukuran ini terdiri dari tiga subsistem, yaitu pemancar (Tx), penerima (Rx) dan akuisisi data. Diagram blok sistem pengukuran dapat dilihat pada Gambar 3.9. Subsistem Tx telah dijelaskan pada Subbab 3.2 bagian a., dimana daya yang dihasilkan oleh USRP sangat kecil, yaitu 3 mW sehingga diperlukan amplifier. *Amplifier* yang dipergunakan adalah *amplifier cascade*. *Pre-Amplifier* IC MHW591 dengan daya output 1 Watt dan *amplifier* dengan rangkaian penguat transistor MRF421 memiliki daya output hingga 60 Watt. Subsistem penerima telah dijelaskan pada Subbab 3.2 bagian b, dimana LNA yang dipergunakan adalah ZFL+1000 dari MiniCircuit. Subsistem akuisisi data terdiri dari kabel Gigabit Ethernet untuk menghubungkan antara USRP dengan komputer yang ter-install LabVIEW. Proses integrasi antara komputer dengan USRP menggunakan *default IP address* pada USRP yaitu 192.168.10.xx. Sedangkan *IP address* untuk PC harus di set dengan *subnet mask* yang sama atau satu jaringan. Sinyal yang telah *downconverted* dalam bentuk data IQ dikirim pada komputer dan disimpan dalam format .tdms dan dibuka dengan DiaDEM.

3.2.1.2 Pembangkitan Sinyal PN Sequence

Pembangkitan *PN sequence* dilakukan oleh USRP yang menggunakan interface LabVIEW dengan menggunakan algoritma *Linear Feedback Shift Registers* (LFSR) (NI, 2014) dimana panjangnya diatur untuk menentukan panjang

resolusi sehingga dua lintasan yang datang dapat dipisahkan. Periode sequence yang dipergunakan dipengaruhi oleh panjang respon impuls, dimana panjang respon impuls oleh panjang *excess delay* (τ) sebagaimana dijelaskan pada Subbab 2.1.10. Nilai τ_x adalah *delay* lintasan yang datang terakhir yang berasal dari mode 3F, sedangkan τ_0 adalah *delay* lintasan yang berasal dari mode 1F dengan tinggi lapisan F 300 km. Panjang *excess delay* adalah 7,8 ms, sehingga ditentukan panjang sequence harus lebih besar dari panjang *excess delay* sebesar 8 ms. Laju simbol adalah 500 kS/s, sehingga periode simbol adalah 2 μ s. Maka laju chip sama dengan 4000 S/s, kemudian untuk mencari panjang chip PN Sequence-nya, dicari nilai $2^m - 1$ yang mendekati 4000, sehingga $m = 12$.

Kemudian sinyal tersebut dimodulasi dengan modulasi BPSK. Setelah itu, pada penerima sinyal akan didemodulasi menggunakan IQ demodulator untuk memisahkan sinyal *Inphase* dan *Quadrature*. Sesuai dengan teorema Nyquist, sinyal IQ di sampling dua kali sinyal informasi menjadi 1 MS/s sehingga jumlah 1 periode berjumlah 8190 simbol.

3.2.1.3 Skenario Pengambilan Data

Waktu pengukuran disesuaikan dengan variasi diurnal dari lapisan ionosfer dimana kondisi kerapatan elektron tertinggi berada pada pukul 13.00 siang waktu lokal, mulai menurun setelah matahari terbenam, dan akan mulai membaik setelah matahari terbit. Pada siang hari terdapat lapisan D, E, F1 dan F2 pada ionosfer, sedangkan pada malam hari hanya terdapat lapisan F saja. Oleh karena itu, untuk mengamati perubahan kondisi lapisan F2 terhadap respon impuls, pengukuran dilakukan pada saat matahari terbit, terbenam, dan tengah hari berdasarkan WIB, WITA dan WIT. Pada malam hari di ionosfer terjadi fenomena *Equatorial Spread*

Tabel 3.3 Jadwal Pengukuran

Variasi Diurnal	Jam (WIB)
Pagi	03.00 dan 04.00
Siang	10.00 dan 11.00
Sore	16.00 dan 17.00
Tengah Malam	22.00 dan 23.00

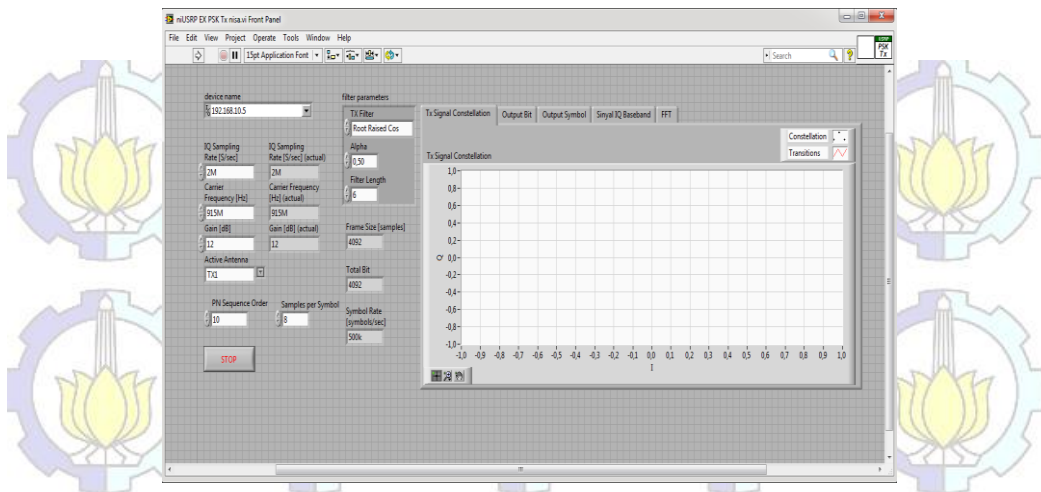
F (ESF), oleh karena itu untuk mengetahui respon impuls pada saat tersebut dilakukan pengukuran pada saat tengah malam. Tabel 3.3 adalah jadwal pengukuran yang dilakukan dimana pada setiap waktu pengukuran sinyal dipancarkan selama satu menit.

3.2.1.4 Perhitungan Link Budget

Perhitungan *Link Budget* dilakukan untuk mengetahui daya pancar yang diperlukan dalam pengukuran. Perhitungan *Link Budget* dapat dilihat pada Tabel 3.4 dimana sinyal yang dihitung berasal dari dua pantulan atau dua hop. Rugi-rugi yang mempengaruhi pengukuran adalah rugi ruang bebas untuk frekuensi 14 MHz (L_{fs}), rugi absorpsi oleh Lapisan D (L_a), rugi refleksi (L_g) dimana dalam perambatannya sinyal mengalami pantulan oleh permukaan bumi satu kali, rugi polarisasi (L_p) yaitu rugi yang disebabkan oleh perbedaan polarisasi antara sinyal dengan polarisasi antena dan rugi-rugi karena redaman kabel. Kemudian rugi-rugi tersebut dijumlahkan agar menjadi Rugi-Rugi Total. Jenis-jenis dan nilai rugi-rugi atmosferic (L_{fs} , L_a , L_g) ini berasal dari perhitungan oleh L. McNamara dalam *Ionospheric Radio* (McNamara, 1991).

Tabel 3.4 *Link Budget*

No.	Simbol	Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
1	Lfs	Rugi-rugi ruang hampa	125.32	dB	2 hop $h = 200$ m $L_{fs} = 20 \log_{10}(4\pi D/\lambda)$
2	La	Rugi absorpsi	10	dB	5 dB per hop
3	Lg	Rugi refleksi	1	dB	
4	Lct	Redaman kabel di Tx (25 m)	1.15	dB	Redaman RG58 1.4 dB/30.5 m
5	Lcr	Redaman kabel di Rx (25 m)	0.82	dB	Redaman RG8 1 dB/30.5 m
6	Gtx	Gain antena Tx	2.3	dBi	Antena horisontal dipole
7	GRx	Gain antena Rx	2.3	dBi	Antena horisontal dipole
8	L	Total Loss	138.29	dB	
9	S	Sensitivitas USRP	-120	dBW	
10	f	Fading margin	20	dB	
11	Pr	Daya terima	-100	dBW	
12	G	Gain LNA	20	dB	
13	Pt	Daya Pancar	13.69	dBW	
			23.39	Watt	



Gambar 3.10 Panel depan Labview Pemancar

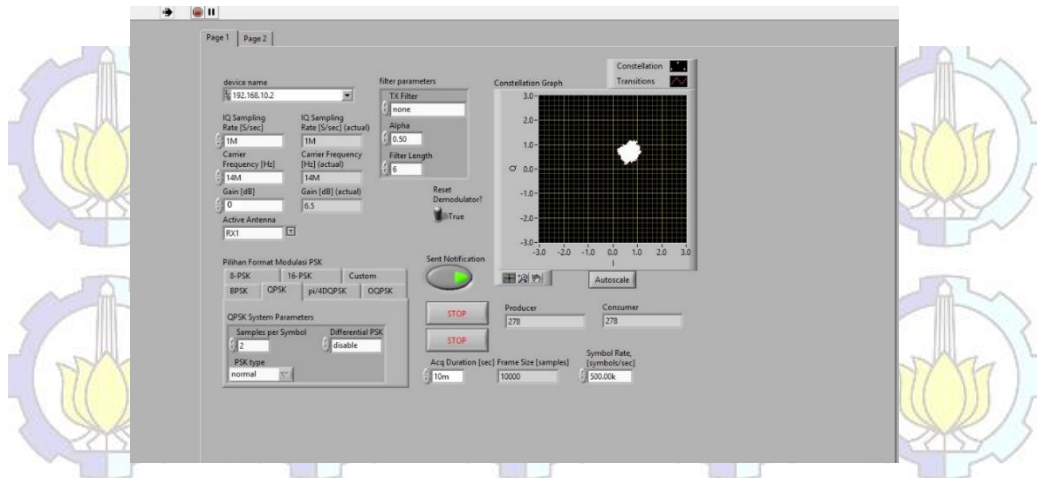
Penguatan atau *gain* yang didapatkan oleh sinyal berasal dari *gain* antenna dipole yang dipergunakan di pemancar (G_{tx}) dan penerima G_{rx}) sebesar 2,3 dBi. Daya paling kecil (P_r) yang dapat diterima adalah sesuai dengan sensitivitas USRP yaitu -90 dBm. Sehingga dengan fade margin 20 dB perhitungan $P_t = P_r - G + L$ dapat diperoleh nilai P_t yaitu minimal sebesar 23,39 Watt.

3.2.1.5 Pelaksanaan Pengukuran

Pengukuran respon impuls kanal radio HF *link* Surabaya-Merauke dilaksanakan pada tanggal 12-15 Pebruari 2014. Sinyal PN Sequence dibangkitkan oleh USRP yang diintegrasikan dengan LabVIEW 2013 *Academic Site License* dimana perangkat tersebut dapat mendukung fungsi-fungsi dalam pengukuran ini. Gambar 3.10 adalah tampilan panel depan LabVIEW pemancar dan Gambar 3.11 adalah tampilan untuk penerima. Parameter yang ditampilkan pada Tabel 3.5 dimasukkan ke dalam kotak-kotak yang ada pada panel tersebut. Parameter yang ditampilkan pada Tabel 3.5 dimasukkan ke dalam kotak-kotak yang ada pada panel tersebut. Kotak device nama adalah IP Address dari USRP N210 yang

Tabel 3.5 Parameter Pembangkitan PN Sequence

Parameter	Value
PN Sequence	orde (m) = 12
Symbol rate	500 KS/s
m	12
Modulasi	BPSK

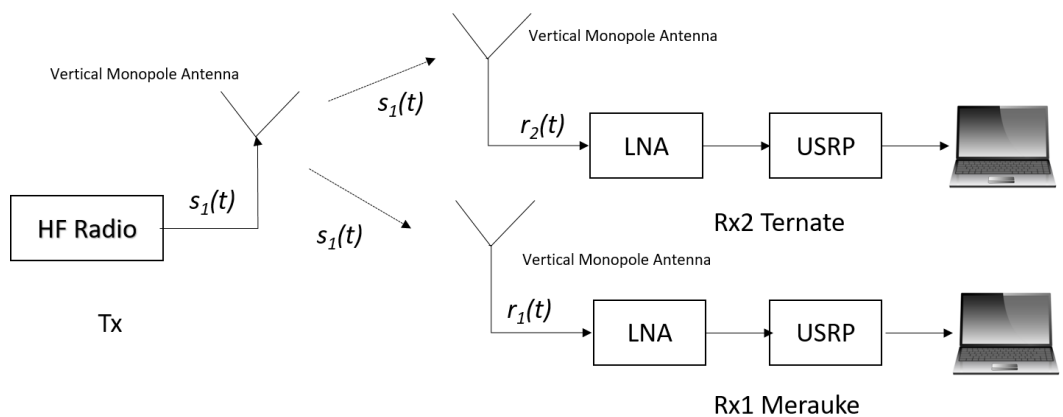


Gambar 3.11 Tampilan panel depan LabVIEW penerima

dipergunakan sebagai pemancar, *gain* adalah nol dan Tx Filter diisi 'none'. Pada panel penerima ada kotak-kotak yang juga diisi sesuai parameter yang sesuai. Sinyal IQ (*Inphase* dan *Quadrature*) yang diterima yang selanjutnya disimpan dan diolah menjadi respon impuls. Untuk setiap periode sinyal yang diterima dikorelasikan dengan PN Sequence yang dikirimkan untuk selanjutnya noise dan interferensi yang ada dihilangkan dengan Metode Sousa seperti pada Subbab 2.1.8 untuk mendapatkan *Power Delay Profile*. Sebagai perbandingan, jika tidak terjadi kesalahan karena noise, maka PN Sequence yang diterima sama dengan yang dikirimkan, sehingga hasilnya sama dengan hasil autokorelasi PN Sequence.

3.2.1.6 Fitting Model Distribusi dengan Kolmogorov-Smirnov

Setiap parameter *channel gain*, fase, *rms delay spread* dan *maximum excess delay* difitting dengan beberapa model distribusi, yaitu Gaussian, Rayleigh, Exponensial dan Uniform dan dicari yang nilainya paling mendekati dengan Uji Kolmogorov-Smirnov. Langkah-langkah yang dilakukan telah dijelaskan pada Subbab 2.1.13, yaitu mencari selisih hitung absolut (D) terbesar sesuai persamaan (2.34) antara cdf sampel dengan cdf secara teoritis pada masing-masing kelas. Nilai D kemudian dibandingkan dengan nilai kritis pada Tabel D . Hipotesis (H_0) ditolak bila nilai maksimum D lebih besar atau sama dengan nilai pada Tabel D , sebaliknya dengan tidak menolak H_0 berarti tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara distribusi sampel dengan distribusi teoritis.



Gambar 3.12 Skema pengukuran korelasi spasial *link* Surabaya-Merauke dan Surabaya-Ternate

3.2.1.7 Uji *t*

Uji *T* sebagaimana dijelaskan pada Subbab 2.1.14 adalah untuk mengetahui apakah parameter antara dua populasi itu berbeda atau tidak. Pada disertasi ini Uji *t* dipergunakan untuk mencari apakah frekuensi 7 MHz, 14 MHz, atau 21 MHz yang sesuai dipergunakan pada *link* Surabaya – Ternate sebagai *link* alternatif dari *link* utama Surabaya – Merauke dengan frekuensi 7 MHz. Populasi yang dihitung adalah SNR antara *link* Surabaya – Merauke 7 MHz dengan Surabaya – Ternate 7 MHz (γ_A), dengan SNR antara *link* Surabaya – Merauke 7 MHz dengan Surabaya – Ternate 14 MHz (γ_B) dan SNR antara *link* Surabaya – Merauke 7 MHz dengan Surabaya – Ternate 21 MHz (γ_C). Karena berasal dari sampel yang dipergunakan tidak berpasangan, maka dipergunakan Independent sample uji-*t*. Langkah-langkah uji *t* yang dilakukan adalah :

1. Mengetahui apakah variansnya sama atau berbeda dengan menggunakan Persamaan (2.36). Varians dinyatakan sama jika nilai *F* kurang dari Tabel *F* dan sebaliknya varians dinyatakan tidak sama jika *F* lebih dari Tabel *F*.
 2. Hitung nilai *t* dengan Persamaan (2.37) untuk data yang sama varians-nya, dan dengan Persamaan (2.38) untuk data yang berbeda varians
 3. Susun hipotesis dua arah *H*₀ dan *H*₁
 4. Jika nilai *t* hitung lebih dari Tabel *T* maka *H*₀ ditolak dan *H*₁ diterima
- Proses dan hasil Uji *t* dapat dilihat pada Lampiran D.

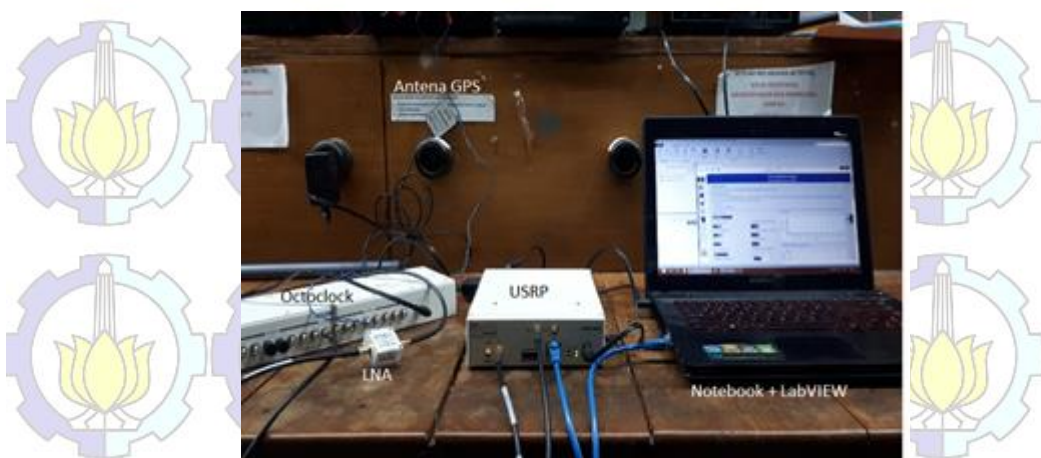
3.2.2 Pengukuran Korelasi Spasial pada Kanal Radio HF Daerah Lintang Rendah



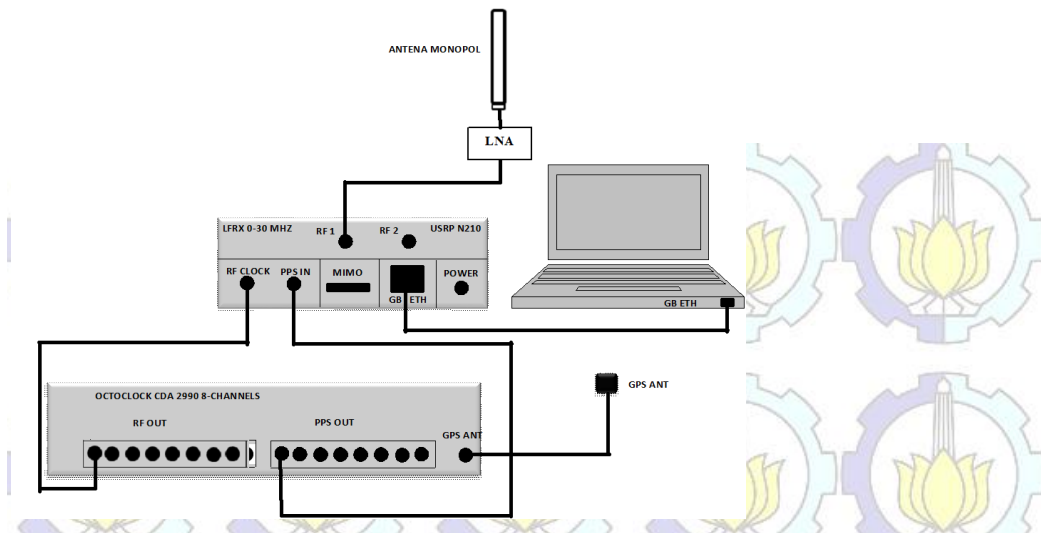
Gambar 3.13 Antena monopole vertikal sebagai pemancar di pasang di atas Gedung B lantai 4

Pengukuran respon kanal yang dilakukan ini memiliki skema seperti pada Gambar 3.12, dimana sebuah Radio HF yang menghasilkan sinyal carrier dipancarkan dari Surabaya dan secara serentak diterima di Merauke dan Ternate dengan perangkat USRP untuk tujuan aplikasi *diversity*. Letak pemancar dan dua penerima pada peta Indonesia seperti terlihat pada Gambar 3.3 dan letak secara geografis dan geomagnetis dapat dilihat pada Tabel 3.2

Perangkat pengukuran pada subsistem pemancar sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.12 adalah radio HF, antena tuner dan antena monopole vertikal. Antena tuner diperlukan untuk mengatur agar VSWR antena tetap berada di bawah



Gambar 3.14 Perangkat yang dipergunakan pada penerima



Gambar 3.15 Skema antara antenna penerima, LNA, USRP dengan Octoclock 2 untuk frekuensi selain frekuensi resonansi antenna. Frekuensi resonansi antenna adalah 10,8 MHz. Antena monopole vertikal sebagai pemancar diletakkan di lantai 4 Gedung B, Departemen Teknik Elektro, ITS Surabaya, seperti dapat dilihat pada Gambar 3.13. Sedangkan subsistem penerima terdiri dari antena monopole vertikal, LNA, USRP dengan daughterboard LFRX yang dihubungkan dengan Octoclock dan antena GPS untuk sinkronisasi *clock* dan waktu. Gambar 3.14 adalah perangkat pada subsistem penerima yang dihubungkan dengan komputer melalui kabel *Gigabit Ethernet* untuk akusisi data. Gambar 3.15 adalah skema antara antenna penerima, USRP dengan octoclock dan komputer. Sedangkan Gambar 3.16 adalah Antena monopole vertikal sebagai penerima pertama di Gedung Teknik Elektro, Universitas Musamus, Merauke dan antena monopole vertikal sebagai penerima kedua di Gedung Teknik Informatika, Universitas Khairun, Ternate.

3.2.2.1 Perancangan Sistem Pengukuran

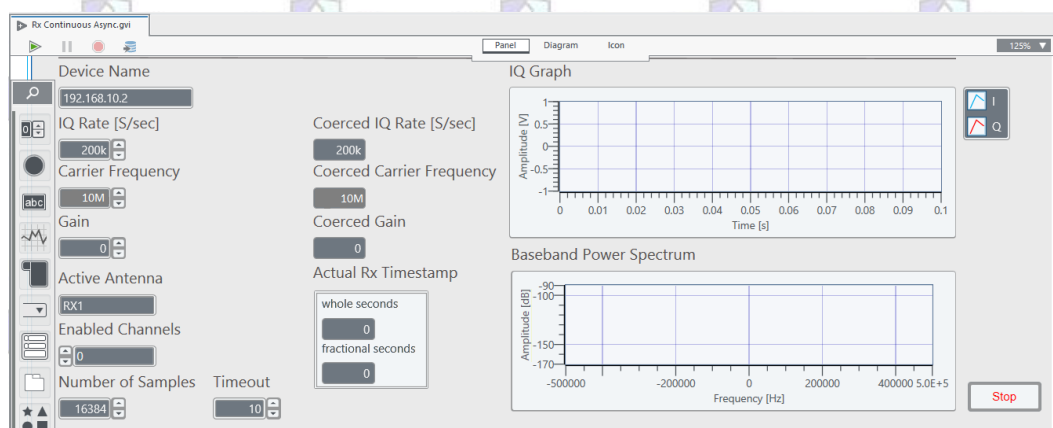


Gambar 3.16 Antena monopole vertikal sebagai penerima di Ternate (kiri) Merauke (kanan)

Perancangan sistem pengukuran dimulai dengan menghitung *link budget* untuk menentukan besar daya pancar yang diperlukan. Komponen-komponen rugi-rugi sama dengan Tabel 3.3, tetapi pemancar dan penerima masing-masing menggunakan antena monopole vertikal, maka nilai *gain*nya adalah 5,13 dBi sehingga daya pancar yang diperlukan adalah 16,75 Watt. *Link budget* untuk pengukuran ini dapat dilihat pada Lampiran E.

Daya pancar yang dihasilkan oleh Radio HF diatur diatas *link budget* sebesar 20 Watt. Radio ini memancarkan sinyal carrier sinusoidal $s_1(t) = a_c \cos(2\pi f_c t)$ dengan frekuensi carrier (f_c) sekitar 9 MHz dan a_c adalah amplitudo dari sinyal. Pemilihan frekuensi yang dipergunakan adalah frekuensi amatir, mempertimbangkan kondisi kanal dan kekosongan dari frekuensi tersebut. VSWR antena untuk frekuensi 9 MHz adalah 1,5. Sinyal $r_1(t)$ dan $r_2(t)$ merupakan sinyal yang diterima yang telah bercampur dengan noise yang diterima oleh antena Rx₁ dan Rx₂.

LabVIEW yang dipergunakan pada pengukuran ini adalah LabVIEW Communication 1.1 dengan program Rx *Continuous Asynchronous* untuk menerima dan menyimpan sinyal carrier yang dipancarkan sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.17. Device Name adalah alamat IP dari USRP yang dipergunakan, IQ Sampling Rate 200 kilo Sample/second dan *carrier frequency* adalah frekuensi yang dihasilkan oleh osilator pada penerima. Pada Gambar 3.17 *carrier frequency* diisi 10 MHz dimana frekuensi ini untuk menerima frekuensi pemancar, misal 10,02 MHz sehingga sinyal akan diterima pada *Baseband Power*



Gambar 3.17 Panel Depan LabVIEW program Rx *Continuous Asynchronous*

Spectrum di titik 20.000 Hz. *IQ Graph* menunjukkan I dan Q yang diterima, yang akan diolah secara *offline*. Sumbu ordinat *Amplitude* pada *IQ Graph* menunjukkan bahwa besaran yang diterima dan akan diolah ini merupakan besaran tegangan. *Baseband Power Spectrum* menunjukkan letak sinyal yang diterima pada frekuensi yang dikirimkan dalam Hz.

3.2.2.2 *Pelaksanaan Pengukuran*

Pengukuran ini direncanakan dilakukan pada tanggal 13-17 Nopember 2017, tetapi karena terjadi gangguan E-Sporadik pada kanal ionosfer, maka data hanya diperoleh untuk tanggal 15-17 Nopember 2017. Waktu pengukuran dilakukan mengikuti variasi diurnal ionosfer, dimana untuk *link* jarak jauh dilakukan saat lapisan D yang menyebabkan absorpsi mulai menipis hingga saat nilai kerapatan elektron pada lapisan foF2 pada ionosfer mulai berkurang. Lapisan D ini mulai menipis pada saat matahari telah terbenam, sedangkan frekuensi kritis pada lapisan foF2 mulai turun mendekati 4 MHz atau 5 MHz adalah setelah pukul 00.00 waktu setempat. Oleh karena itu, pengukuran ini dimulai pukul 14.00 WIB hingga 00.00 WIB, dengan interval waktu pengiriman tiap 10 menit.

Pelaksanaan pengukuran dilakukan dengan terlebih dahulu mencari kanal yang kosong dengan menggunakan radio HF pada frekuensi sekitar 9 MHz dan 10 MHz dengan mempertimbangkan Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia nomor 25 tahun 2014 tentang alokasi spektrum frekuensi radio Indonesia yaitu frekuensi radio amatir. Harus dipastikan pengirim, penerima I dan penerima II dapat berkomunikasi melalui radio pada frekuensi tersebut. Setelah itu, baru pengiriman sinyal carrier dilakukan. Penerima I dan II mengecek apakah sinyal carrier dapat diterima melalui kotak *Baseband Power Spectrum* pada panel depan LabVIEW. Jika terlihat sinyal pada kotak tersebut, maka dipastikan apakah sinyal tersebut adalah sinyal yang dikirimkan ataukah bukan. Caranya adalah dengan mengecek apakah jika pengirim menghentikan proses transmisinya, sinyal tersebut masih ada. Jika sinyal tersebut ada, maka dipastikan sinyal tersebut bukan sinyal yang dikirimkan, sehingga pengiriman dilanjutkan dengan mengganti frekuensi. Jika setelah pengiriman sinyal tersebut tidak ada, maka dapat dipastikan

sinyal tersebut adalah sinyal yang dikirimkan sehingga dapat disimpan untuk pengolahan lebih lanjut.

Subsistem akuisisi data diperlukan untuk proses pengambilan, pengumpulan data dan pemrosesan data sehingga dihasilkan data IQ yang siap diolah. Sinyal baseband yang sampai pada antena penerima, dikuatkan oleh LNA agar level sinyal lebih besar sehingga mudah diakuisisi. Kemudian sinyal baseband ini diproses melalui demodulator agar I dan Q dapat dipisah. Data I dan Q yang telah dipisah ini disimpan dalam format *.tdms untuk selanjutnya diproses untuk mendapatkan level sinyal dalam Volt. Untuk mendapatkan level sinyal, I dan Q diubah dalam domain frekuensi dan diambil magnitudo pada frekuensi yang sesuai dengan frekuensi kerjanya.

3.2.2.3 Pengolahan Data IQ Hasil Pengukuran

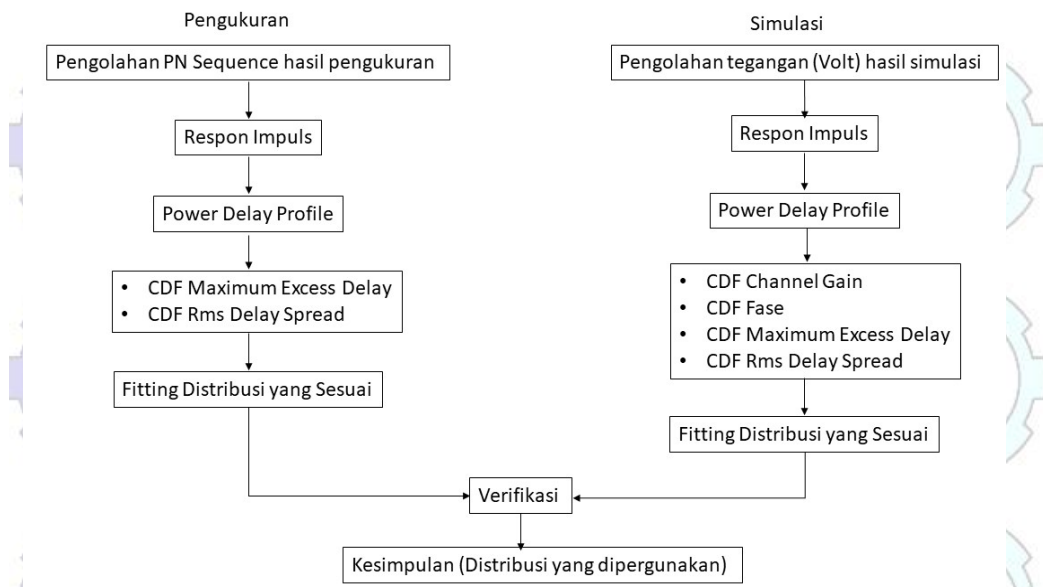
Data IQ yang dihasilkan dari pengukuran disimpan dengan format *.tdms dan dapat dibuka dengan Microsoft Excel. Jumlah sampel yang diterima sesuai dengan jumlah yang tertera pada panel depan LabVIEW, yaitu 16.384 sampel. Sebagian data IQ hasil pengukuran bisa dilihat pada Lampiran A.7. Total magnitudo yang diterima dalam pengukuran adalah :

$$\langle p \rangle = \left\langle \sum_n A_n^2 | \exp(-j\theta_n) |^2 \right\rangle \quad (3.10)$$

dimana n adalah jumlah sampel yang diterima A_n adalah amplitudo sampel ke- n dan θ_n adalah fase ke- n . Magnitudo sinyal yang diterima adalah :

$$\frac{\Delta a}{200000} = \frac{x}{n} \quad (3.11)$$

dimana x adalah magnitudo sinyal yang dimaksudkan, Δa adalah frekuensi yang dipancarkan (MHz), dimana nilainya adalah selisih antara frekuensi kerja dengan frekuensi osilator. Misalnya, sinyal dipancarkan pada 9,03 MHz, dan frekuensi osilator adalah 9 MHz, maka Δa adalah 30.000 Hz. 200.000 adalah *IQ Sampling Rate* 2 KS/s dan n adalah jumlah sampel yang diterima. Nilai diperoleh dari Baseband Spectrum pada Labview dan diverifikasi pada hasil FFT dari data IQ.



Gambar 3.18 Diagram blok pemodelan statistik respon impuls dari hasil simulasi ray tracing diverifikasi dengan hasil pengukuran

Nilai magnitudo ini yang akan disimpan dan akan dibandingkan dengan magnitudo yang diterima di Ternate untuk dicari koefisien korelasi spasialnya sesuai dengan Persamaan (2.31) dan (2.32). Koefisien korelasi yang dihasilkan dipergunakan untuk memverifikasi hasil koefisien korelasi yang dihasilkan oleh PropLab.

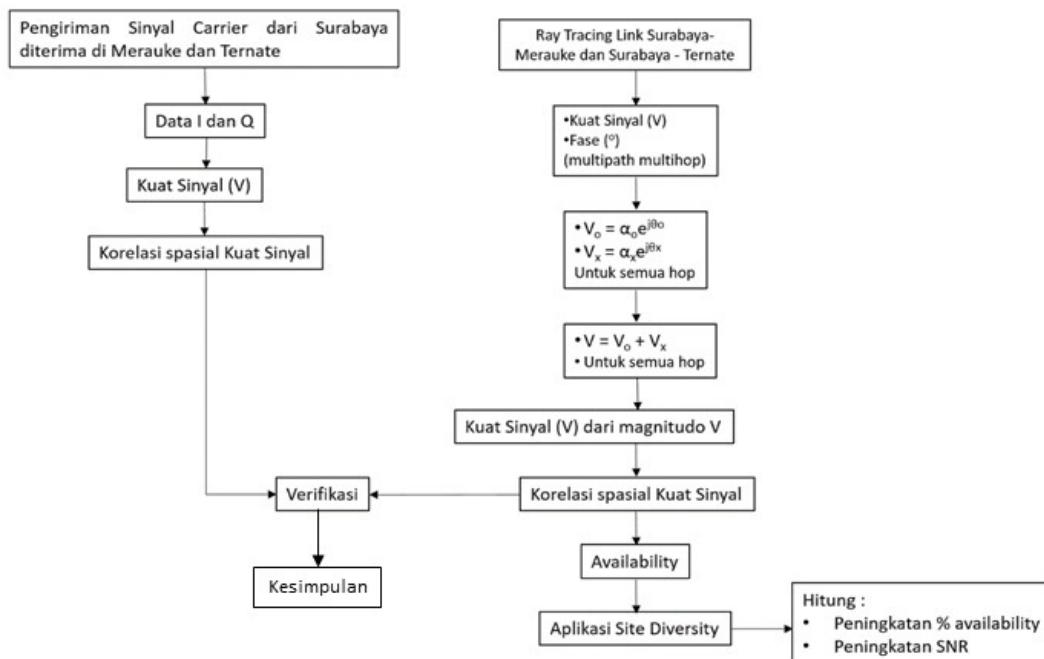
3.3. Verifikasi Hasil Simulasi dan Pengukuran

Verifikasi dilakukan untuk dua (2) hal, yaitu :

1. Verifikasi model distribusi kanal radio HF antara hasil simulasi dengan Proplab dan hasil pengukuran PN Sequence
2. Verifikasi antara korelasi spasial hasil simulasi Proplab dengan hasil pengukuran kanal radio HF pada dua *link*, yaitu Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate

3.3.1. Verifikasi Model Distribusi Kanal Radio HF

Verifikasi model distribusi kanal radio HF dilakukan antara hasil pengukuran respons impuls dan simulasi Proplab sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3.18. Parameter respons impuls hasil pengukuran yang dimodelkan adalah *rms delay spread* dan *maximum excess delay*, sedangkan dari simulasi dimodelkan *channel*



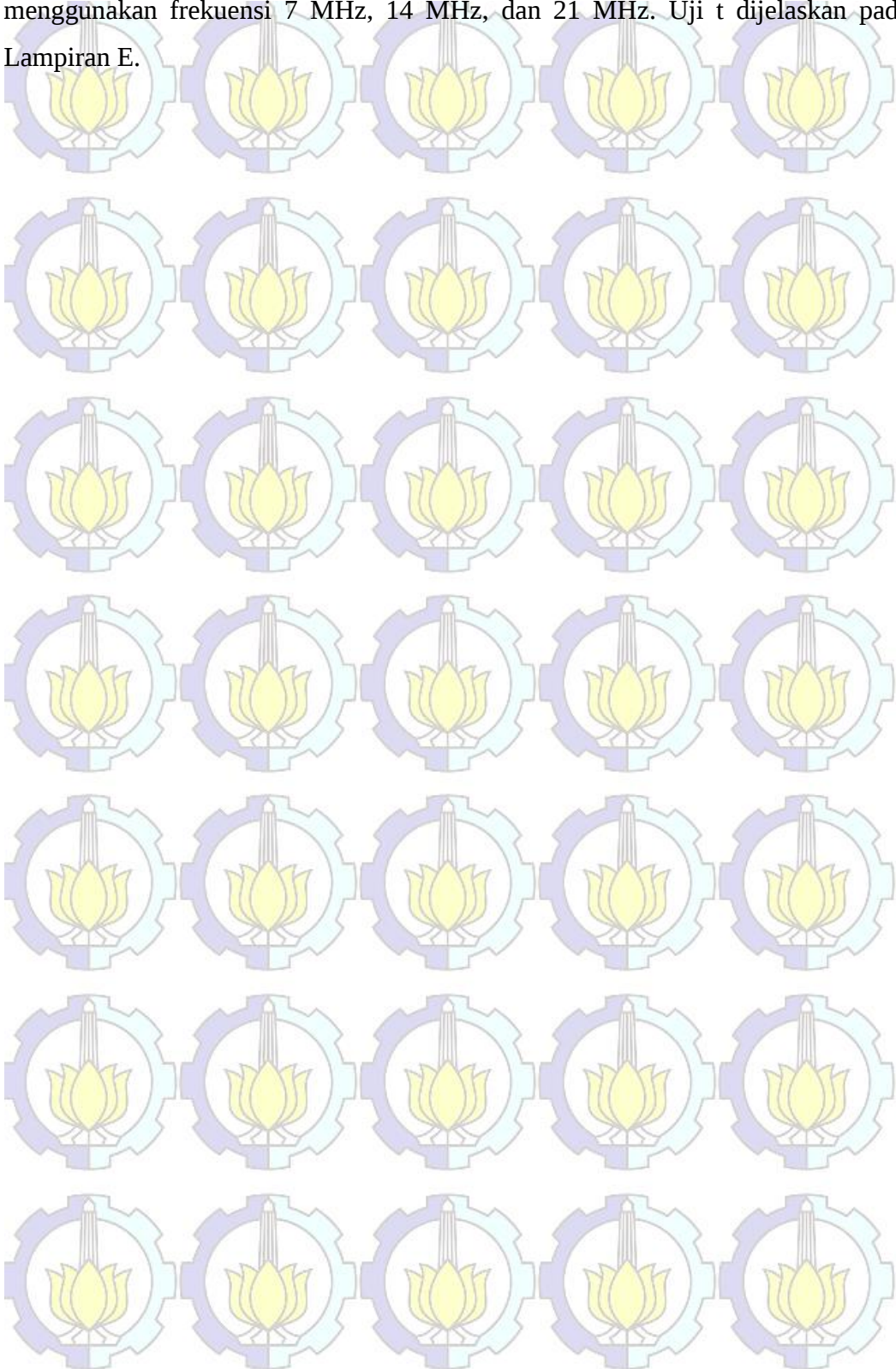
Gambar 3.19 Diagram Blok Penelitian Korelasi Spasial dan *Diversity* untuk Banyak Hop dan Banyak Lintasan

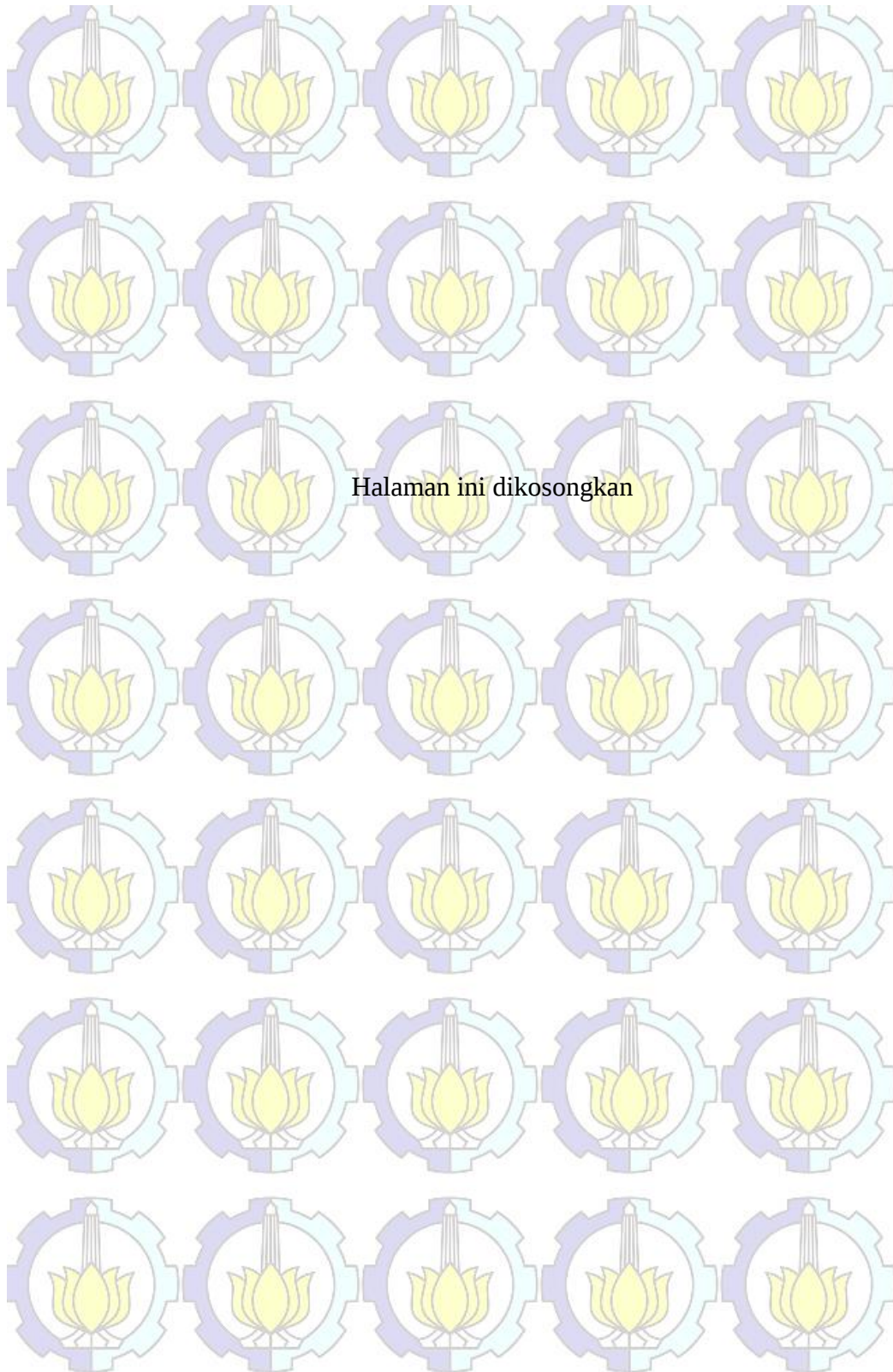
gain, *rms delay spread*, *maximum excess delay* dan fase. Setelah difitting pada distribusi yang sesuai dengan Uji Kolmogorov-Smirnov, maka kedua model tersebut dibandingkan dan dianalisis untuk diambil kesimpulan distribusi yang sesuai.

3.3.2. Verifikasi Korelasi Spasial Hasil Pengukuran dan Simulasi

Verifikasi korelasi spasial antara hasil simulasi Proplab dilakukan dengan dua cara, yaitu verifikasi dengan simulasi pada tanggal yang berbeda dan pengukuran secara langsung. Simulasi untuk mendapatkan korelasi spasial tegangan total adalah simulasi II yang dilakukan pada tanggal 11 Mei 2015 dan 11 September 2015. Sedangkan simulasi untuk verifikasi dilakukan untuk tanggal 15-17 Nopember 2016. Verifikasi kedua adalah dilakukan lewat pengukuran II antara *link* Surabaya-Merauke dan *link* Surabaya – Ternate. Proses verifikasi dapat dilihat pada Gambar 3.19, dimana setelah disimpulkan korelasi spasial antara dua *link*, maka dilanjutkan dengan perhitungan *availability* dan peningkatan SNR dari aplikasi *site diversity*. Selain itu, pemilihan frekuensi pada *link* alternatif dilakukan dengan Uji t pada SNR yang diterima pada *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate. Surabaya –

Merauke menggunakan frekuensi 7 MHz, sedangkan Surabaya – Ternate menggunakan frekuensi 7 MHz, 14 MHz, dan 21 MHz. Uji t dijelaskan pada Lampiran E.





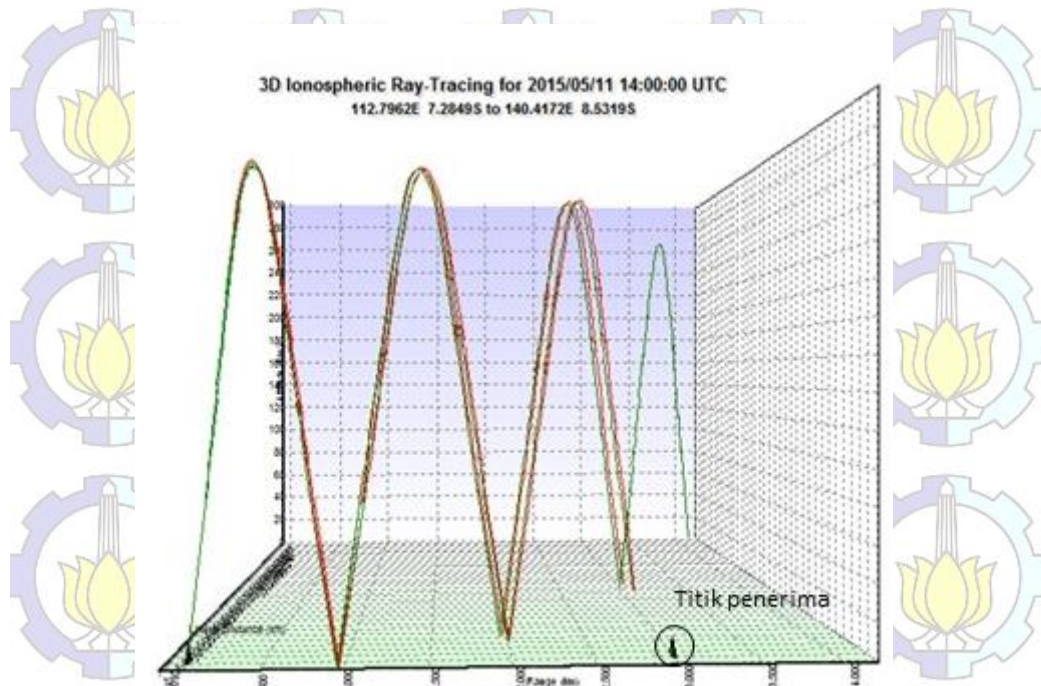
BAB 4

Pemodelan Kanal Radio HF Jarak Jauh

Pemodelan kanal radio HF yang dilakukan di daerah lintang rendah ini merupakan Tujuan Khusus dari disertasi ini, yang dilakukan dengan memodelkan respon impuls yang diperoleh dengan 2 (dua) cara, yaitu simulasi ray tracing propagasi sinyal radio HF dengan menggunakan perangkat lunak Proplab Pro 3 yang kemudian divalidasi oleh hasil pengukuran respon impuls dari pengukuran langsung pada *link* Surabaya-Merauke, sejauh 3044 km. Sebelumnya hipotesis dilakukan pada Subbab 1.5 dan dibahas pada Subbab 4.4.

4.1 Simulasi Ray Tracing dengan Proplab

Ray tracing dilakukan pada tanggal 11 Mei 2015 dan 11 September 2015 tiap satu jam selama 24 jam, sehingga untuk periode sehari dihasilkan 24 respon impuls. Jumlah sampel untuk dua hari tersebut adalah 48 respon impuls, tetapi 9 sampel tidak dipergunakan karena titik jatuh lintasan jauh dari receiver, dan 13 sampel tidak dipergunakan pula karena MUF berada di bawah 14 MHz sehingga sinyal tidak dipantulkan ke bumi melainkan diteruskan ke angkasa. Yang

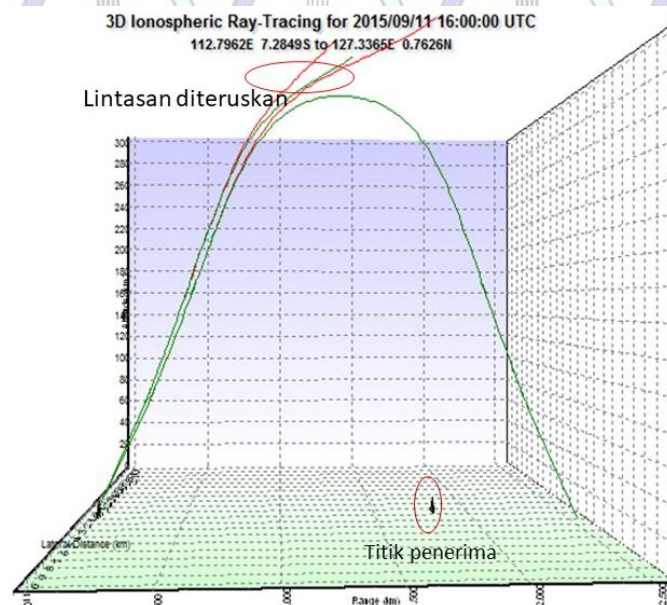


Gambar 4.1 Titik jatuh lintasan jauh dari titik penerima

dimaksudkan titik jatuh jauh dari Rx dapat dilihat pada Gambar 4.1 dimana arah perambatan lintasan menyimpang dari sudut azimuth Rx. Sedangkan sinyal diteruskan ke angkasa dapat dilihat pada Gambar 4.2. Hal ini terjadi pada saat frekuensi kerja 14 MHz berada diatas MUF, sehingga sinyal tidak direfleksikan ke bumi, tetapi diteruskan ke angkasa.

Hasil ray tracing berbentuk *.ryg sebelum diubah dalam bentuk *.txt oleh *Database Convert-Export* yang disediakan oleh Proplab. Ada 11 variabel yang dihasilkan oleh ray tracing, yaitu *Type*, *Distance*, *Height*, *Latitude*, *Longitude*, *Signal Strength*, *Elevation angle*, *azimuth*, *total distance*, *frequency* dan *hop*. *Type* adalah tipe lintasan yang dihasilkan, dimana 1 menyatakan lintasan dengan tipe 'Ordinary', dan -1 menyatakan tipe lintasan 'Extraordinary', *distance* menyatakan jarak mendatar dari pengirim ke penerima dalam km, *height* menyatakan tinggi lintasan, dikarenakan lintasan dihitung pada saat telah sampai ke penerima, maka height bernilai 0.

Latitude dan *longitude* adalah koordinat lintang dan bujur dari titik akhir lintasan, *signal strength* adalah kekuatan sinyal yang sampai pada penerima yang dinyatakan dalam dB μ V, *elevation angle* dan *azimuth* adalah sudut elevasi dan sudut azimuth dari lintasan, *total distance* adalah jarak total lintasan berdasarkan panjang lintasan propagasinya dinyatakan dalam km, *frequency* adalah frekuensi



Gambar 4.2 Lintasan yang diteruskan ke angkasa

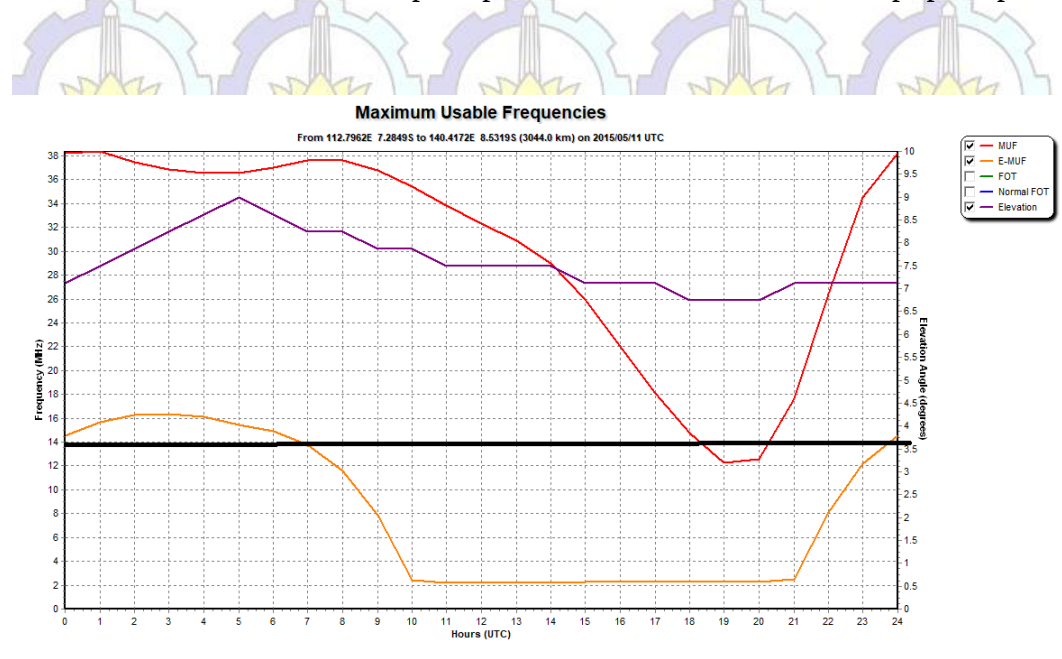
Tabel 4.1. Lintasan-lintasan yang diterima dengan jarak titik terima tidak lebih dari 50 km untuk ray tracing tanggal 11 September 2015 pukul 12.00 WIB

Tipe	Jarak (km)	Lintang	Bujur	Kuat sinyal (dBμV)	Sudut elevasi	Azimuth	Jarak total (km)	Jarak dari Rx (Km)
O	3073.41	-8.54	140.68	13.27	16.70	94.50	3246.92	29.26
X	3066.73	-8.52	140.62	13.03	16.70	94.46	3240.08	22.64

kerja yang dipergunakan yang dinyatakan dalam MHz, dan hop adalah jumlah pantulan. Jika 1 maka ada satu pantulan, jika 2 maka ada dua pantulan, dan demikian seterusnya. Lintasan yang dipergunakan adalah lintasan yang memiliki jarak maksimal 50 km dari penerima. Jarak tersebut dihitung berdasarkan koordinat lintang dan bujur lintasan yang dihasilkan oleh Proplab dengan koordinat penerima dengan Metode *Great Circle Distance* sebagaimana Persamaan (3.1).

Tabel 4.1 menunjukkan lintasan-lintasan yang diterima untuk simulasi tanggal 11 September 2015 pukul 12.00 WIB, dimana jarak titik akhir dengan lokasi penerima tidak lebih dari 50 km. *O* adalah tipe lintasan *Ordinary* dan *X* adalah tipe lintasan *Extraordinary*.

Maximum Usable Frequency (MUF) pada Gambar 4.3 yang dihitung oleh Proplab menunjukkan bahwa frekuensi 14 MHz berada di bawah E-MUF (MUF pada Lapisan E) pada pukul 06.00 – 16.00 WIB (UTC + 7), sedangkan frekuensi tersebut berada diatas E-MUF pada pukul 17.00 – 23.00 WIB. Tetapi pada pukul



Gambar 4.3 MUF pada tanggal 11 Mei 2015

00.00 – 05.00 WIB, frekuensi 14 MHz berada di atas MUF sehingga sinyal yang dikirimkan diteruskan ke atmosfer dan tidak dipantulkan ke bumi.

Frekuensi kerja yang berada di bawah E-MUF menyebabkan sinyal yang bekerja pada frekuensi tersebut mengalami pelemahan karena redaman oleh lapisan D (McNamara, 1991). Hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.2 dimana Rugi (dalam dB) yang diterima pada pukul 06.00 – 16.00 WIB lebih besar daripada pada pukul 17.00 – 23.00 WIB, dimana pada jam-jam tersebut rugi-rugi maksimum adalah -142,04091 dB terjadi pada pukul 12.00 WIB, dan rugi-rugi minimum -116,1041 dB didapatkan pada pukul 18.00 WIB. Rugi-rugi ini berasal dari kuat sinyal pukul 06.00 – 16.00 WIB berkisar antara 7 dB μ V hingga 15 dB μ V, sedangkan pada pukul 17.00 – 23.00 LT kuat sinyal berada pada kisaran 17 dB μ V hingga 25 dB μ V.

4.1.1 *Pemodelan Matematis Respons Impuls*

Persamaan matematika yang dipergunakan untuk memodelkan respon impuls merupakan persamaan yang biasa digunakan dalam pemodelan kanal sebagaimana dalam Persamaan (2.25), hanya saja ditambahkan parameter sudut elevasi dimana sudut elevasi mempengaruhi besar kuat sinyal yang diterima dan panjang delay tiap lintasan, sehingga model kanal radio HF *lowpass-equivalent* dapat dinyatakan :

$$h(\tau, \varepsilon) = \sum_{i=1}^N \alpha_i e^{-j\theta_i} \cdot \delta[\tau - \tau_i] \cdot \delta[\varepsilon - \varepsilon_i] \quad (4.1)$$

Dengan :

α_i : besar sinyal yang diterima pada lintasan ke- i

θ : fase yang bersifat acak

τ_i : delay propagasi untuk lintasan ke- i

ε_i : sudut elevasi lintasan ke- i

N : jumlah lintasan

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Parameter Kanal untuk tanggal 11 Mei 2015

Jam	S	Rugi (dB)	Rms DS (ms)	Max ED (ms)
00.00	1.10E-05	-126.14	0.48	1.13
01.00				
02.00	6.80E-06	-137.33	0.04	0.12
03.00				
04.00	5.70E-06	-138.86	0.02	0.07
05.00	3.95E-06	-142.04	0.03	0.06
06.00				
07.00	1.76E-05	-129.05	0.24	0.48
08.00				
09.00	2.19E-05	-127.16	0.06	0.21
10.00	2.26E-05	-126.88	0.03	0.11
11.00	2.55E-05	-125.86	0.04	0.11
12.00	3.18E-05	-123.94	0.04	0.12
13.00	2.85E-05	-124.87	0.04	0.14
14.00				
15.00				
16.00	3.98E-05	-121.99	0.04	0.12
17.00				
18.00				
19.00				
20.00				
21.00				
22.00				
23.00	2.27E-05	-126.86	0.03	0.10

Power Delay Profile (PDP) yang dihasilkan dari perhitungan ini menjadi :

$$p(\tau, \varepsilon) = S^2 \sum_{i=1}^N |p_i|^2 \cdot \delta[\tau - \tau_i] \cdot \delta[\varepsilon - \varepsilon_i] \quad (4.2)$$

4.1.2 Channel Gain (S)

Channel Gain (S) diperoleh dengan proses normalisasi respon impuls sebagaimana dijelaskan pada Persamaan (3.4) – (3.6). Dari hasil perhitungan Channel Gain tersebut akan dihitung *Cumulative distribution function* (CDF). Nilai S dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 pula bersama dengan rugi-rugi dalam dB masing-masing untuk tanggal 11 Mei dan 11 September 2015. Warna abu-abu menyatakan lintasan yang jauh dari penerima, sedangkan warna hitam menyatakan lintasan yang diteruskan ke atmosfer tanpa dibelokkan ke permukaan bumi.

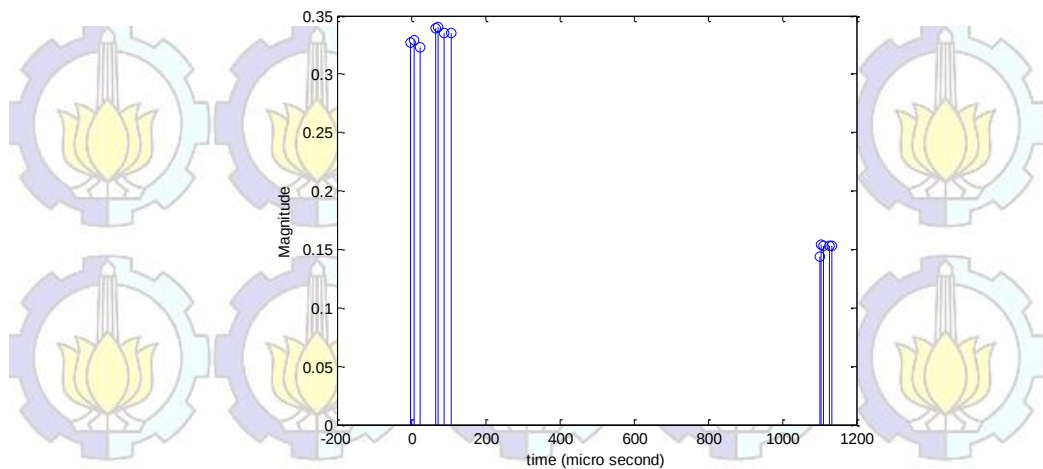
4.1.3 Power Delay Profile (PDP) dari Hasil Ray Tracing

Ray tracing menghasilkan beberapa parameter, yaitu jenis mode, O atau X, kuat sinyal, sudut elevasi, azimuth, koordinat lintang dan bujur tiap hop, frekuensi yang dipergunakan, jumlah hop, jarak mendatar dan jarak total dari Tx hingga titik terakhir lintasan. Dari hop terakhir tiap lintasan dihitung jaraknya terhadap Rx untuk menentukan lintasan yang diterima, yaitu yang memiliki jarak kurang dari atau sama dengan 50 km. Kemudian kuat sinyal dari lintasan yang diterima yang dinyatakan dalam dB μ V diubah menjadi magnitudo dalam Volt. Dari jarak total tersebut, dapat dihitung delay dan *delay spread* tiap lintasan. Dari kuat sinyal yang dinormalisasi dan *delay spread* tiap lintasan disusun *Power Delay Profile* (PDP) untuk dipergunakan pada proses perhitungan selanjutnya.

Lintasan-lintasan yang diterima tersebut kemudian disusun dalam sebuah *Power Delay Profile* (PDP), sesuai dengan Persamaan (4.2) sebagaimana Gambar

Tabel 4.3 Hasil perhitungan parameter kanal untuk tanggal 11 September 2015

Jam	S	Rugi (dB)	Rms DS (ms)	Max ED (ms)
00.00	1.05E-05	-126.55	0.042	0.123
01.00	8.34E-06	-128.57	0.060	0.193
02.00	4.26E-06	-134.41	0.046	0.092
03.00	3.07E-06	-137.24	0.000	11.494
04.00	5.25E-06	-132.59	0.014	0.032
05.00				
06.00	8.26E-06	-128.66	0.036	0.104
07.00	1.17E-05	-125.63	0.053	0.174
08.00	1.51E-05	-123.43	0.057	0.168
09.00				
10.00	3.31E-05	-116.59	0.460	1.161
11.00	3.50E-05	-116.10	0.453	1.037
12.00	3.40E-05	-116.36	0.419	1.040
13.00	3.03E-05	-117.37	0.511	1.205
14.00	1.97E-05	-121.09	0.041	0.108
15.00	2.32E-05	-119.69	0.025	0.073
16.00				
17.00				
18.00				
19.00				
20.00				
21.00				
22.00				
23.00	1.94E-05	-121.23	0.037	0.123

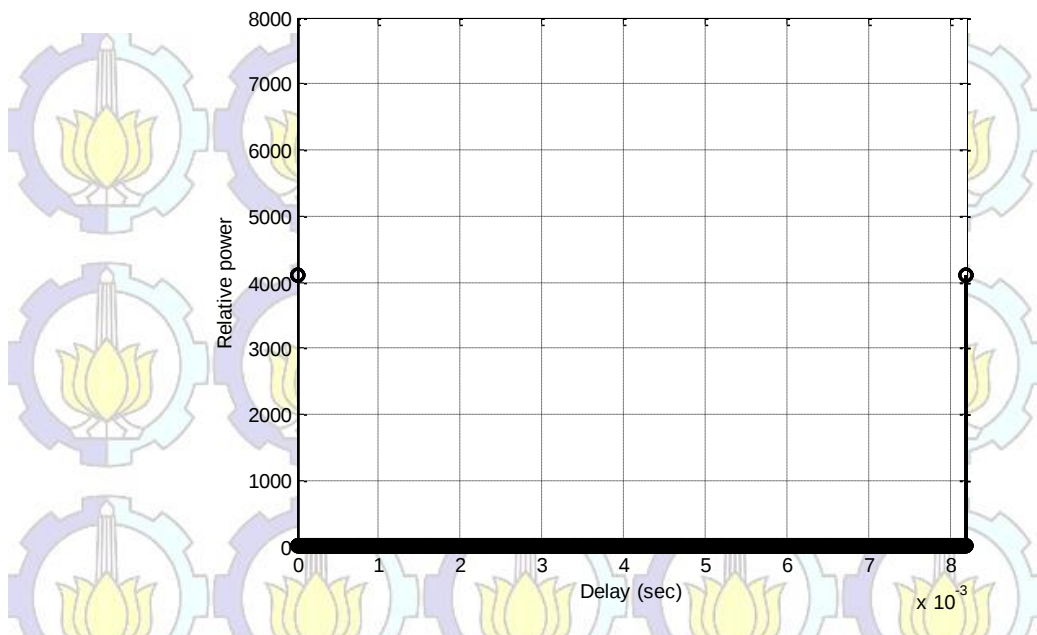


Gambar 4.4 *Power Delay Profile* (PDP) hasil ray tracing link Surabaya – Merauke untuk tanggal 11 Mei 2015, frekuensi 14 MHz pukul 07.00 WIB

4.4. Intensitas sinyal diperoleh dari normalisasi magnitudo dalam skala linear yang diperoleh dari kuat sinyal yang diterima dari setiap lintasan dalam dB μ V, sedangkan *time delay* adalah perbedaan waktu tempuh dari setiap kedatangan lintasan yang diterima. Fase dihasilkan dari sisa pembagian jarak total yang dihasilkan dengan panjang gelombang dalam derajat. PDP dapat dipergunakan untuk mendapatkan parameter-parameter kanal rms *delay spread* dan *Maximum excess delay*. Hasil perhitungan kedua parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan 4.3.

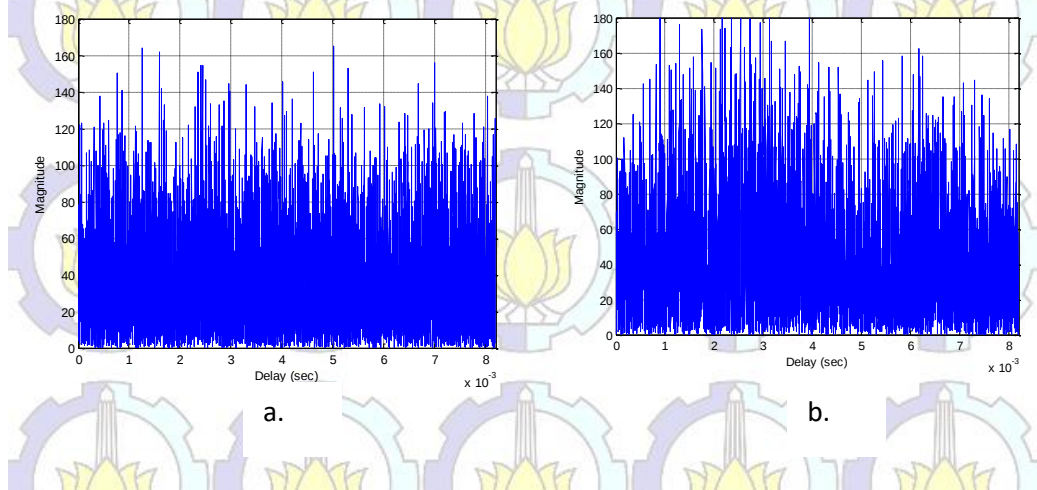
4.2 Metode Evaluasi dengan Pengukuran

Pengukuran dilakukan untuk melakukan konfirmasi terhadap hasil ray tracing dalam rangka karakterisasi kanal radio HF. Terdapat beberapa parameter karakteristik kanal radio HF, yaitu respons impuls, *Power Delay Profile* dan *delay spread*. Pengukuran ini dilakukan pada tanggal 12-14 Pebruari 2014. Respons impuls dihasilkan dari hasil korelasi silang antara I dan Q hasil demodulasi dengan sinyal PN yang asli. Sebagai verifikasi, respons impuls yang dikirimkan dibandingkan dengan autokorelasi sinyal PN. Gambar 4.5 adalah hasil autokorelasi sinyal PN yang ditransmisikan. Gambar 4.6 adalah hasil korelasi silang antara sinyal yang diterima dengan sinyal PN *Sequence* yang dikirimkan pada pengukuran tanggal 13 Pebruari 2014 dengan frekuensi 14 MHz untuk periode ke-102 – 105



Gambar 4.5 Autokorelasi sinyal PN yang ditransmisikan

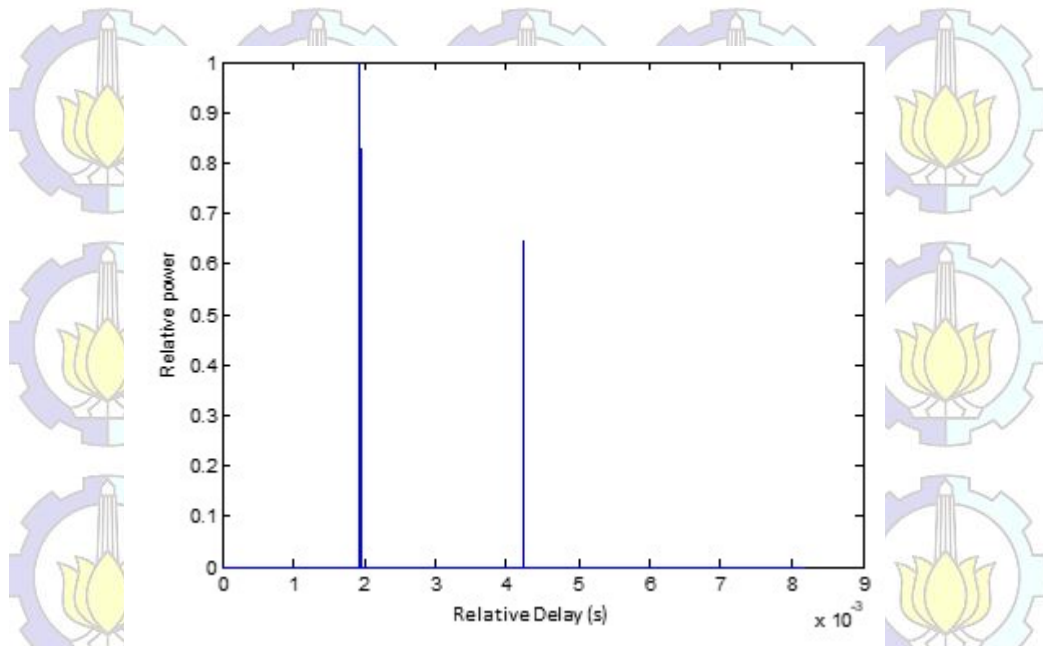
atau sama dengan sampel no. 827.191 – 859.950, dengan (a) untuk pukul 11.00 WIB dan (b) pukul 22.00 WIB. Jika dibandingkan dengan hasil auto korelasi pada Gambar 4.5 dapat dipastikan bahwa pada hasil korelasi silang berbeda dengan hasil auto korelasi. Hal ini disebabkan karena adanya sinyal yang bekerja pada frekuensi yang sama dengan sinyal yang dikirimkan sehingga terjadi interferensi atau banyaknya noise yang terjadi pada ionosfer sebagai kanal propagasi gelombang



Gambar 4.6 Korelasi silang antara sinyal yang diterima dengan sinyal PN Sequence yang dikirimkan pada pengukuran tanggal 13 Pebruari 2014, frekuensi 14 MHz dengan a. Pukul 11.00 WIB dan b. Pukul 22.00 WIB

radio HF. Oleh karena itu, untuk mendapatkan sinyal yang asli diperlukan metode untuk menghilangkannya. Pertama kali, ditetapkan *threshold* yang menentukan amplitudo minimum sinyal yang diperkenankan, artinya jika suatu sampel memiliki amplitudo dibawah *threshold*, maka sampel tersebut akan dihapus. *Threshold* diatur untuk memperoleh *Constant False Alarm Rate* (CFAR), yang diaplikasikan pada setiap periode korelasi silang sehingga empat periode sinyal akan diperoleh 4 impuls. Suatu sampel dianggap sebagai sinyal yang valid jika nilainya melebihi *threshold* pada titik yang sama pada semua *delay profile*.

Hasil dari perhitungan tersebut adalah PDP yang dirata-rata terhadap waktu. Gambar 4.7 adalah PDP yang diperoleh pada pengukuran tanggal 12 Pebruari 2014 pukul 20.00 WIB. Gambar PDP ini dipergunakan untuk mengevaluasi hasil simulasi dengan ray tracing. Berdasarkan gambar tersebut dapat dikonfirmasi bahwa dari hasil pengukuran diperoleh bahwa dalam satu PDP, lintasan datang dalam bentuk *cluster*, dimana setiap *cluster* terdiri dari lintasan-lintasan yang datang dalam mode yang sama. Seperti halnya Gambar 4.4, dimana jarak kedatangan antara *cluster* pertama dan *cluster* kedua adalah sekitar 2 ms dan besar magnitudo adalah setengah dari magnitudo dari *cluster* sebelumnya, maka demikian pula PDP pada Gambar 4.7 dimana jarak antara *cluster* pertama dan kedua



Gambar 4.7 *Power Delay Profile* pada pengukuran tanggal 12 Pebruari 2014 pukul 20.00 WIB

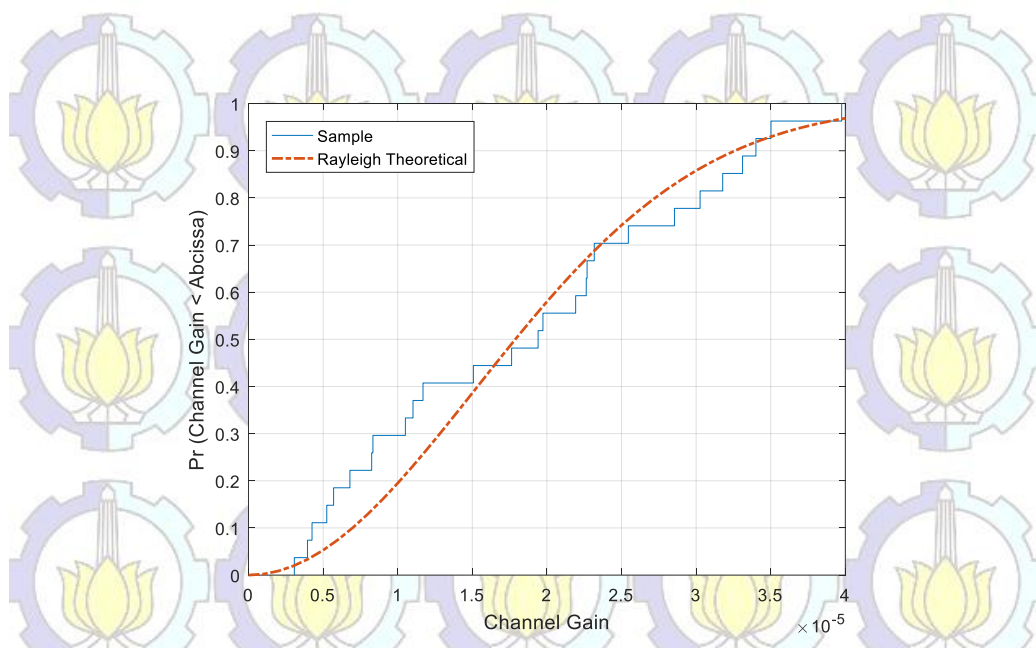
dengan *cluster* ketiga adalah sekitar 1.2 ms dan besar magnitudo impuls *cluster* sekitar setengah dari *cluster* pada kelompok pertama.

4.3 Pemodelan Statistik untuk Masing-Masing Kanal

Parameter-parameter yang dicari pemodelan statistiknya adalah channel gain, pergeseran fase, *delay spread*, yang terdiri dari *maximum excess delay* dan rms *delay spread*. Pemodelan ini dilakukan dengan menghitung cdf dari sampel data dari masing-masing parameter, kemudian dibangkitkan beberapa distribusi secara teoritis, yaitu distribusi normal, Rayleigh dan Exponential. Dengan menggunakan tes Kolmogorov-Smirnov (K-S) diperoleh distribusi yang paling sesuai dengan sampel cdf yang diperoleh. Pemodelan ini dilakukan untuk hasil ray tracing dan diverifikasi dengan hasil pengukuran. Perhitungan lengkap K-S dapat dilihat pada Lampiran D.

4.3.1 Channel Gain

Channel gain diperoleh dari akar kuadrat dari total daya sinyal yang diterima pada masing-masing lintasan dengan daya pancar 1 Watt. Gambar 4.8 adalah cdf dari channel gain yang diperoleh dari ray tracing yang diketahui berdistribusi



Gambar 4.8 Cumulative Distribution Function (CDF) dari Channel gain Hasil Ray Tracing

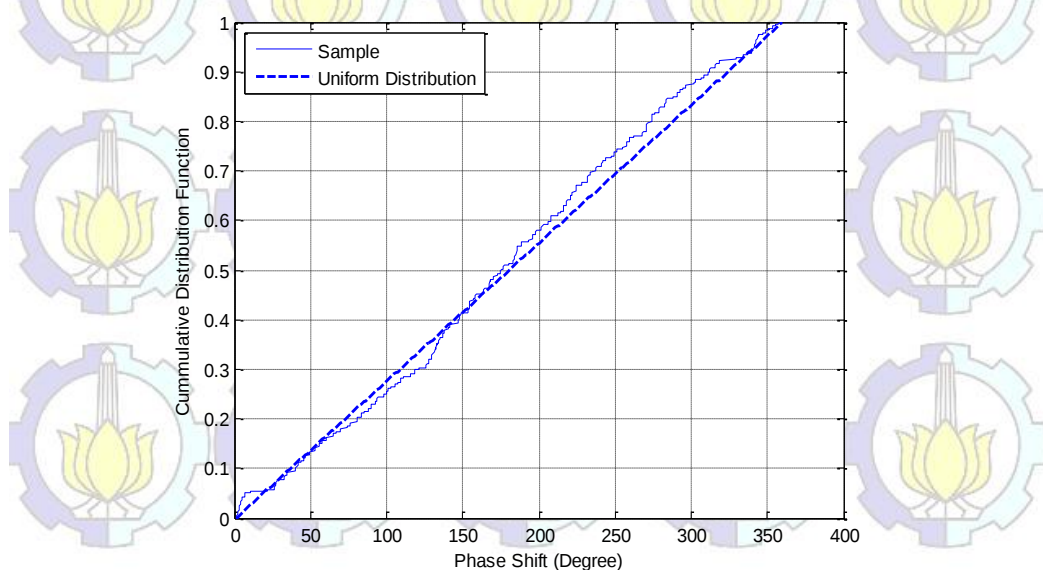
Tabel 4.4 Mode propagasi yang terjadi untuk setiap lintasan berdasarkan *excess delay*

Excess delay <i>bin</i> (ms)	2F		3F		4F	
	Total	Elevation angle (°)	Total	Elevation angle (°)	Total	Elevation angle (°)
0-100	56	12,8-21	99	19,8-30,4	-	-
100-500	21	12,6-20,8	28	19,7-30,1	-	-
500-1300	-	-	42	25,4-27,1	5	41,1-41,5

Rayleigh. Hasil Uji K-S menyatakan bahwa teori distribusi yang paling mendekati sampel adalah Distribusi Rayleigh. Hal ini sesuai dengan hipotesis bahwa tiap lintasan dalam channel gain disusun atas path gain dan pergeseran fase yang berbeda, karena dua hal tersebut independen, maka *channel gain* sesuai jika berdistribusi Rayleigh.

4.3.2 Normalized Path Gain dan Pergeseran Fase

Kemudian, didapatkan *path gain* yang dinormalisasi a_n dari lintasan ke- n yang diperoleh dengan membagi path gain a_n dengan channel gain S . Tetapi path gain yang dinormalisasi ini sulit untuk dimodelkan secara statistik. Selanjutnya dimodelkan pergeseran fase. Pergeseran fase ini diperoleh dari sisa pembagian dari panjang lintasan dengan panjang gelombang, dengan asumsi tidak ada tambahan pergeseran fase lain yang disebabkan oleh mekanisme yang lain. Gambar 4.9 adalah



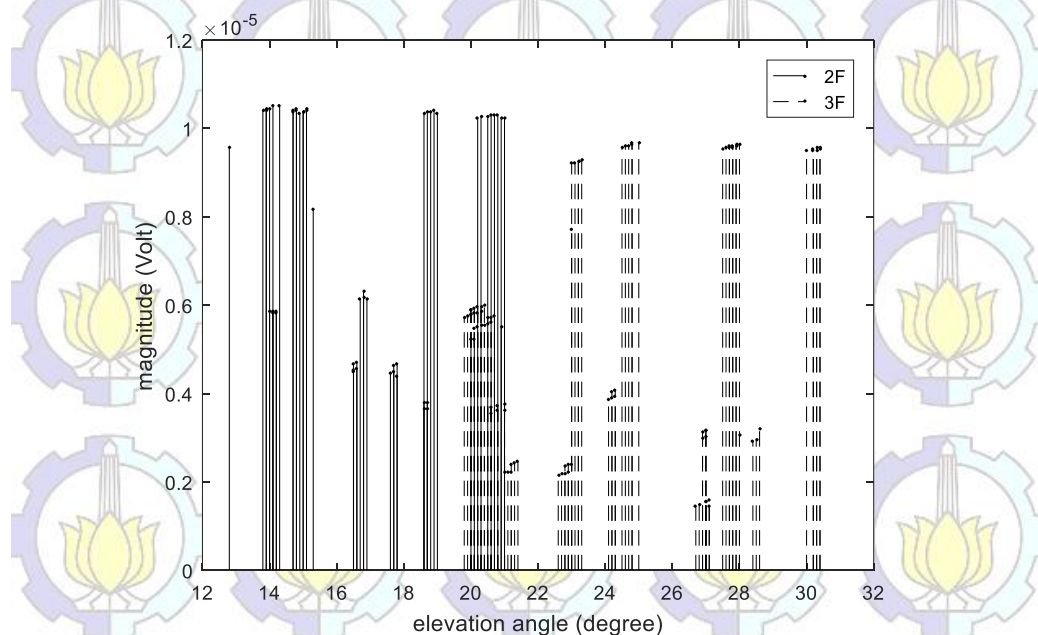
Gambar 4.9 Cumulative Distribution Function (CDF) dari Pergeseran Fase Hasil Ray Tracing

cdf dari pergeseran fase yang diperoleh dari ray tracing yang diketahui berdistribusi Uniform dari hasil Uji K-S. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa pergeseran fase bernilai acak sehingga mengikuti distribusi uniform untuk $[0, 2\pi)$.

4.3.3 Delay spread

Pemodelan yang dipergunakan untuk karakterisasi multipath propagation channels adalah model respons impuls waktu diskret (Hashemi, 1993). Pada model ini, time dibagi ke dalam interval yang disebut dengan 'bin'. Masing-masing *bin* diharapkan terdiri dari satu komponen multipath atau tanpa komponen multipath. Besarnya time delay dalam satu *bin* diperoleh dari hasil pengolahan data ray tracing sehingga diharapkan dapat untuk membatasi *delay spread* sesuai yang diharapkan. Dari hasil pengolahan data, diperoleh interval waktu 0 – 100 μs , 100 – 500 μs dan 500 – 1300 μs . Hal ini dilakukan dengan memperhitungkan semua respon impuls, baik yang memiliki mode tunggal, mode 2F dan seterusnya. Rekapitulasi proses penempatan dalam *bin* ini dapat dilihat pada Tabel 4.4.

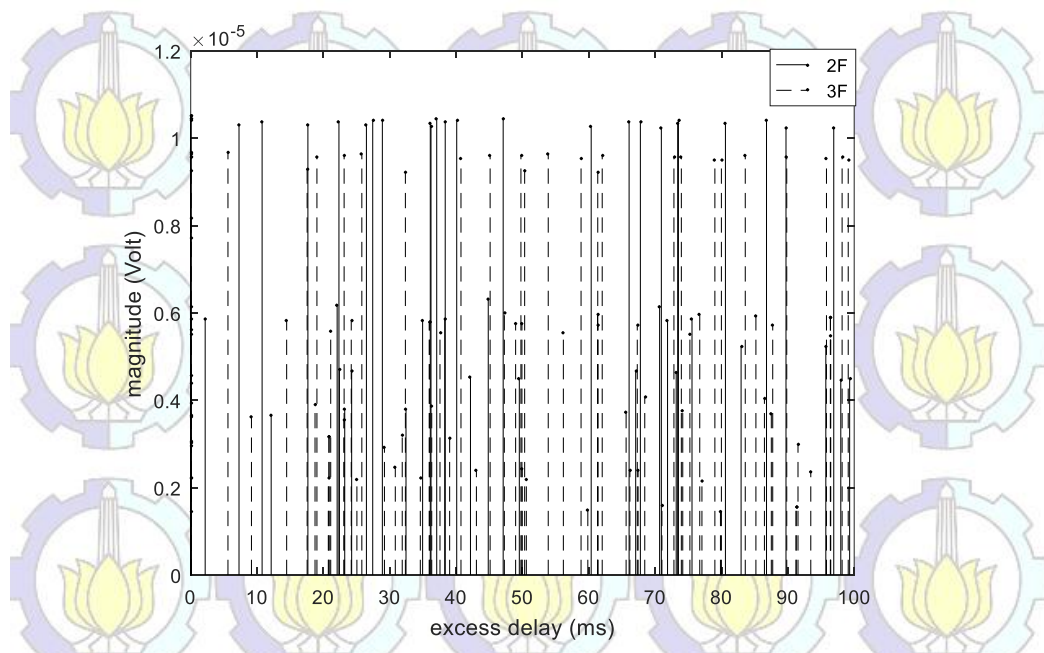
Bin 0 – 100 μs dapat dilihat pada Gambar 4.10 dimana magnitudo yang diterima berdasarkan sudut elevasi yang diperlukan. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa mode propagasi pada *bin* 0 – 100 μs didominasi oleh mode 2F dan



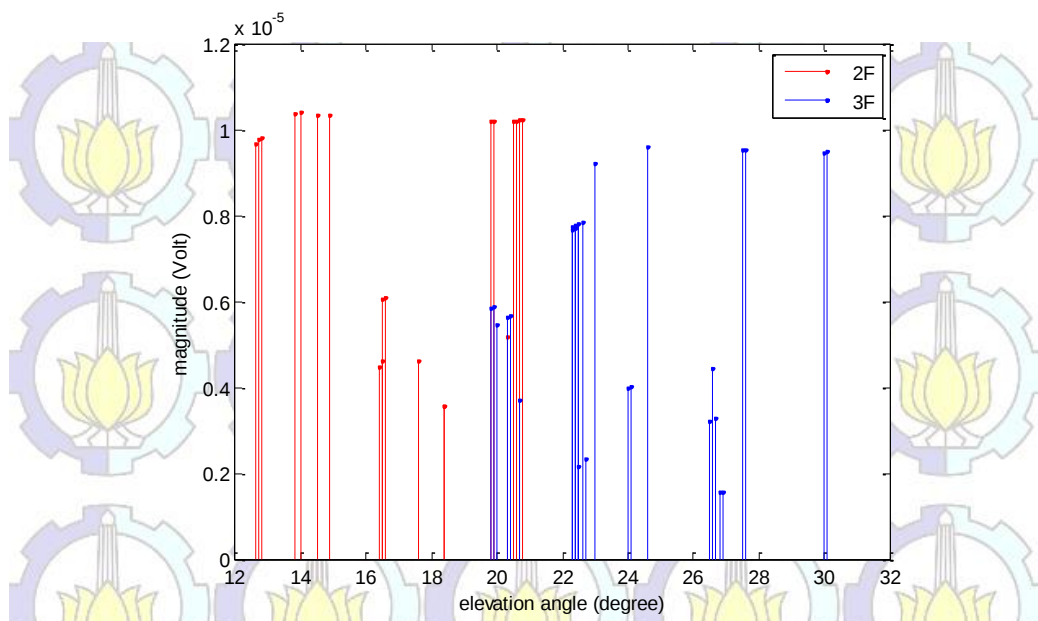
Gambar 4.10 Sudut elevasi untuk *bin* 0 – 100 μs

3F, dimana untuk mendapatkan mode 2F antenna diarahkan pada sudut elevasi $12.8^\circ - 21^\circ$. Untuk magnitude tertinggi diperoleh sekitar 10^{-5} Volt diperoleh pada sudut 14, 15, 19 dan 21. Sedangkan untuk mendapatkan mode propagasi 3F sudut antenna yang diperlukan adalah $19,8^\circ - 30,4^\circ$.

Magnitudo kuat sinyal mode propagasi 3F tertinggi adalah sekitar $9.6e^{-6}$ Volt. Dari Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa berdasarkan *bin* pertama 0 – 100 μs terdapat 145 lintasan yang terdiri dari 56 lintasan dengan mode propagasi 2F dan 99 lintasan dengan mode propagasi 3F. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa magnitude yang tinggi berasal dari lintasan – lintasan dengan mode 2F, hal ini dikarenakan mode 3F memiliki lintasan yang lebih panjang sehingga daya terimanya lebih rendah daripada mode 2F yang lebih pendek lintasannya. Selain itu, pada sudut elevasi sekitar 20° terdapat lintasan-lintasan yang berasal baik dari mode 2F dan 3F sehingga untuk mendapatkan lintasan-lintasan dengan mode 2F dapat dipergunakan sudut elevasi antenna yang rendah, antara $11^\circ - 18^\circ$. Sudut elevasi antenna yang dipergunakan juga dipengaruhi oleh kondisi lapisan ionosfer. Dari hasil ray tracing yang mempergunakan pemodelan IRI, diperoleh hasil bahwa untuk jam dan hari yang berbeda sudut elevasi yang diperoleh untuk mendapatkan

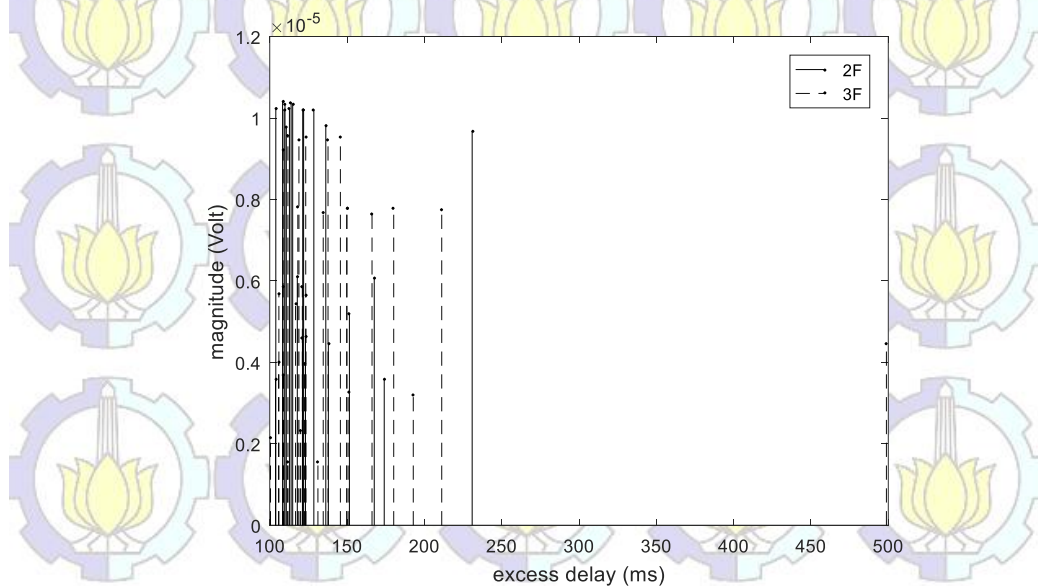


Gambar 4.11 Lintasan – lintasan dalam *bin* 0 – 100 μs

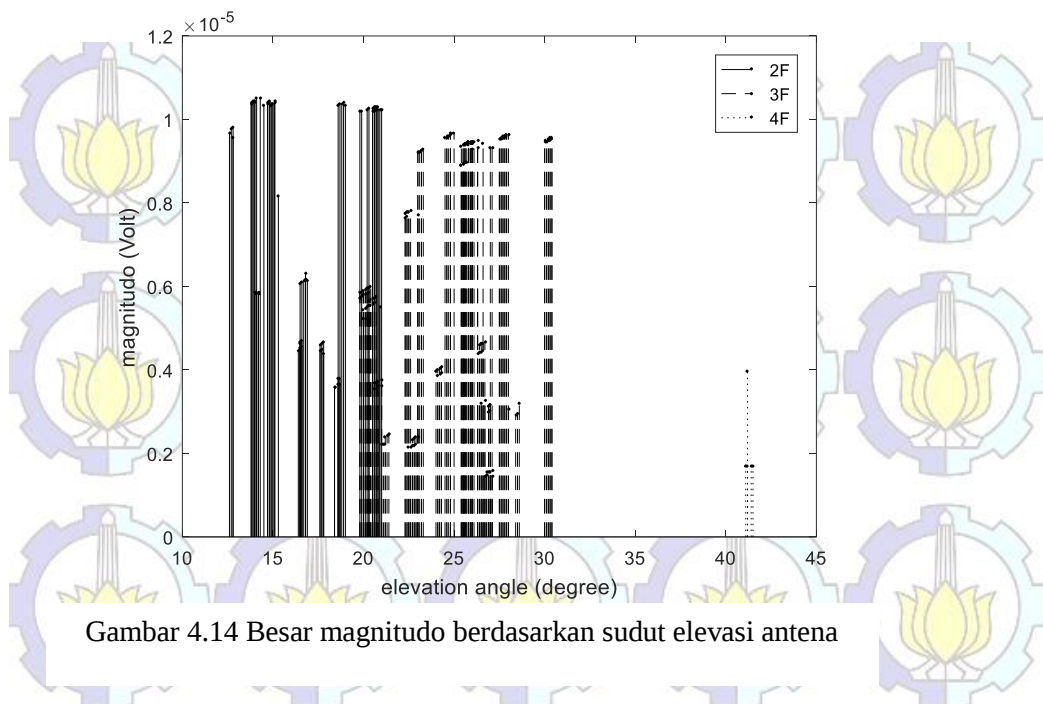


Gambar 4.12 Sudut elevasi untuk *bin* 100 – 500 μ s

lintasan yang diterima adalah berbeda. Contohnya pada pukul 07.00 UTC atau 14.00 LT tanggal 11 Mei 2015 diperoleh hasil bahwa lintasan yang diterima berasal dari mode 2F dengan sudut elevasi sekitar $16,5^\circ$ dan mode 3F dengan sudut elevasi sekitar $26,6^\circ$, sedangkan pada jam yang sama tanggal 11 September 2015 diperoleh hasil bahwa lintasan yang diterima berasal dari mode 2F dengan sudut elevasi antenna sekitar $17,6^\circ$ hingga $18,4^\circ$.

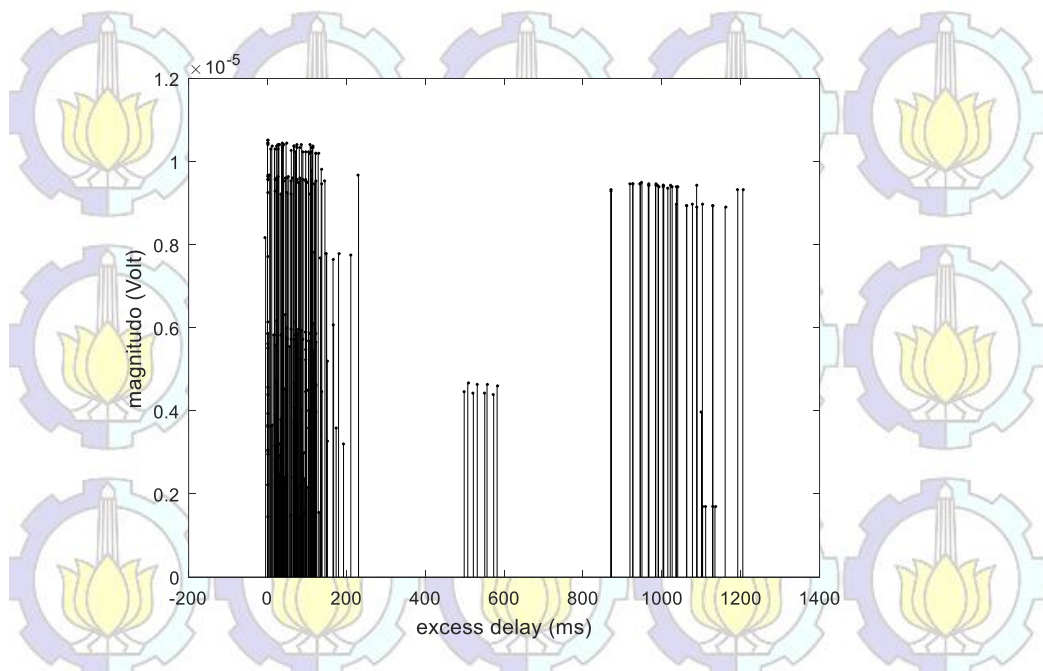


Gambar 4.13 Excess Delay lintasan – lintasan untuk *bin* 100 – 500 μ s



Gambar 4.14 Besar magnitudo berdasarkan sudut elevasi antena

Lintasan yang masuk pada *bin* 100 – 500 μ s terdiri dari 49 lintasan, dengan 21 lintasan dengan mode propagasi 2F dan 28 lintasan dengan mode propagasi 3F. Sesuai Gambar 4.12, sudut elevasi antena yang dipergunakan untuk mendapatkan lintasan dengan sudut elevasi 12,6° hingga 20,8° untuk mode 2F dan sudut elevasi



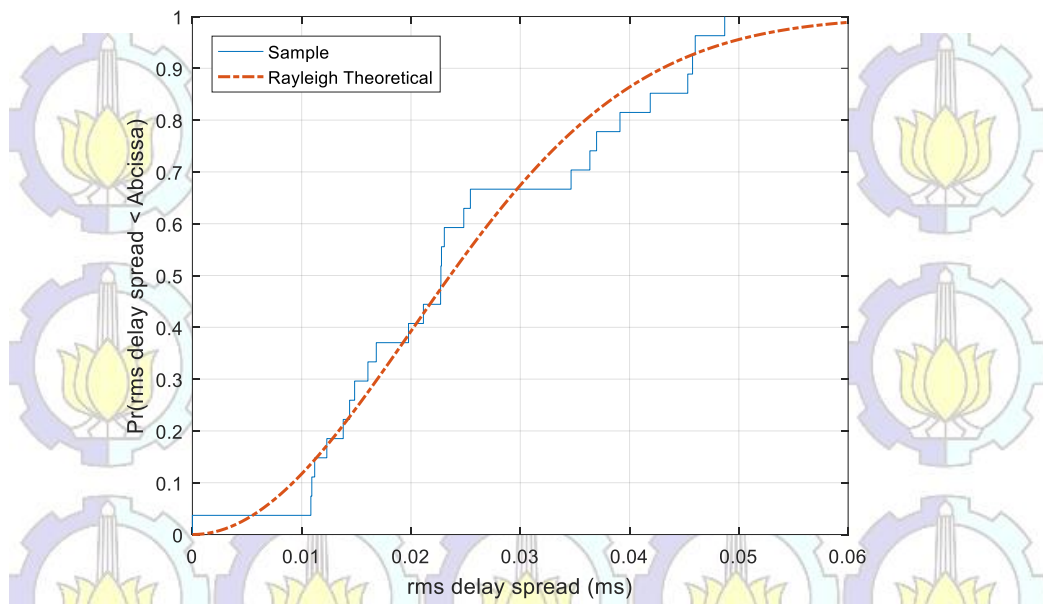
Gambar 4.15 Besar magnitudo berdasarkan time delay untuk seluruh lintasan

19,7° hingga 30,10° untuk mode 3F. Sedangkan lintasan sampai di penerima pertama kali pada 103,72 μ s, dan dilanjutkan hingga 498,79 μ s sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.13. Pada *bin* ini terdapat 49 lintasan, terdiri dari 21 lintasan 2F dan 28 lintasan 3F. Pada sudut sekitar 19° hingga 20° terdapat lintasan 2F dan 3F sehingga untuk mendapatkan lintasan dengan mode 2F dapat dipergunakan sudut yang kurang dari 19°. Pada Gambar 4.13 dapat dilihat *time delay* versus magnitudo lintasan dalam Volt. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa lintasan-lintasan yang ada pada *bin* tersebut terdiri dari lintasan mode 2F dan mode 3F. Mode 2F memiliki magnitudo yang lebih besar dari mode 3F.

Bin terakhir adalah 500 – 1300 μ s berisi 47 lintasan yang terdiri dari 42 lintasan yang berasal dari mode 3F dan 5 lintasan dari mode 4F. Sudut elevasi antenna untuk mendapatkan mode 3F adalah antara 25,4° hingga 27,1°, sedangkan untuk mendapatkan lintasan dengan mode 4F adalah 41,09° hingga 41,5°. Sedangkan tegangan maksimal adalah 9.483e-6 Volt dan minimal adalah 1,68E-06 Volt, dan lintasan sampai di penerima pertama kali pada 10,67 μ s, dan dilanjutkan hingga 11,24 μ s.

Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 adalah besarnya magnitudo jika dilihat dari sudut elevasi dan *time delay* untuk semua lintasan tanpa berdasarkan *bin*. Dari Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa magnitudo yang paling dominan adalah magnitudo yang berasal dari lintasan dengan mode 2F, yang memiliki sudut elevasi antenna lebih kecil dibandingkan dengan lintasan yang berasal dari mode 3F dan 4F. Magnitudo lintasan yang berasal dari mode 4F adalah magnitudo yang paling tidak dominan dibanding yang lain dan berasal dari sudut elevasi terbesar, yaitu sekitar 40°.

Gambar 4.15 adalah magnitudo berdasarkan waktu delay. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa lintasan-lintasan terbagi dalam tiga *cluster* dimana *cluster* pertama dengan magnitudo yang paling dominan berasal dari lintasan dengan mode 2F dan 3F, *cluster* kedua dengan magnitudo yang lebih kecil juga berasal dari lintasan dengan mode 3F dan *cluster* ketiga berasal dari lintasan dengan mode 3F dan 4F dimana magnitudo dari lintasan 4F paling tidak dominan

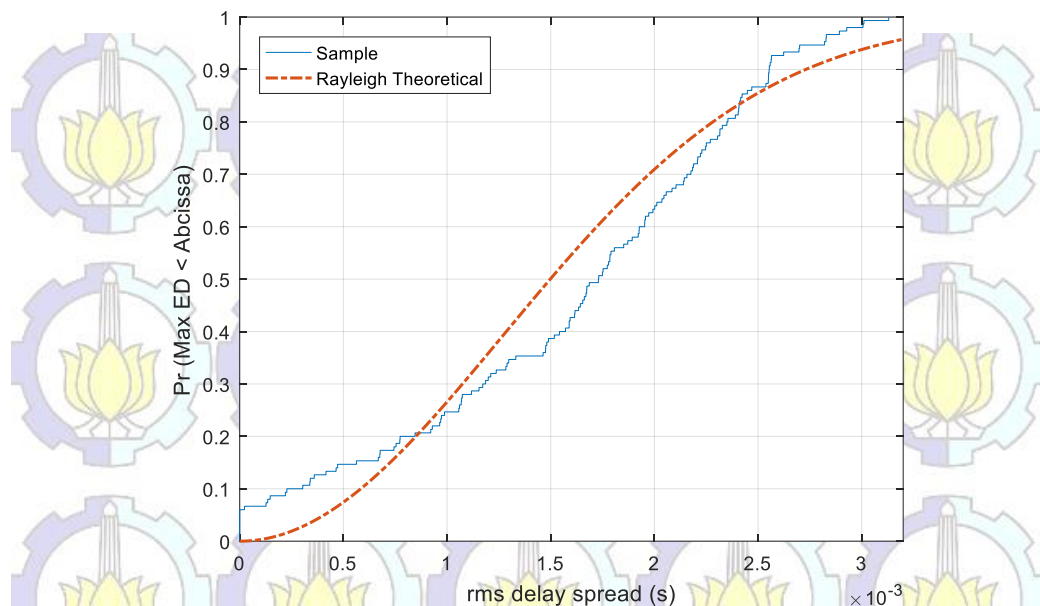


Gambar 4.16 CDF *rms delay spread* hasil ray tracing

Gambar 4.16 adalah grafik CDF *rms delay spread* hasil ray tracing yang diplot bersama dengan nilai teoritis dari Distribusi Rayleigh. Berdasarkan nilai $\alpha = 0,05$ diperoleh nilai Tabel D = 0,24. Karena t yang diperoleh adalah 0,2341, maka disimpulkan bahwa nilai CDF hasil ray tracing memenuhi Distribusi Rayleigh dengan nilai *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) (b) = 0,03. *Rms delay spread* terpanjang sebesar 0,06 ms, sehingga laju simbol maksimum yang dapat dikirimkan tanpa ekualisasi sebesar 16,7 ks/detik. Jika dibandingkan dengan CDF *rms delay spread* hasil pengukuran seperti Gambar 4.17 maka dapat disimpulkan bahwa hasil CDF tersebut memenuhi Distribusi Rayleigh dengan Tabel D 1,134 untuk $\alpha = 0,05$. Nilai t yang diperoleh adalah 0,1310 dengan $b = 1,3150$.

4.3.4 *Maximum excess delay*

Salah satu parameter multipath channel yang diturunkan dari *Power Delay Profile* adalah *Maximum excess delay*. Dari hasil ray tracing, lintasan-lintasan yang dihasilkan dalam menyusun *Power Delay Profile* berasal dari dua macam kondisi, yang pertama terdiri dari dua mode dan yang kedua terdiri dari satu mode. Dua mode yang dimaksud sebagian besar adalah mode 2F dan 3F, sedangkan satu



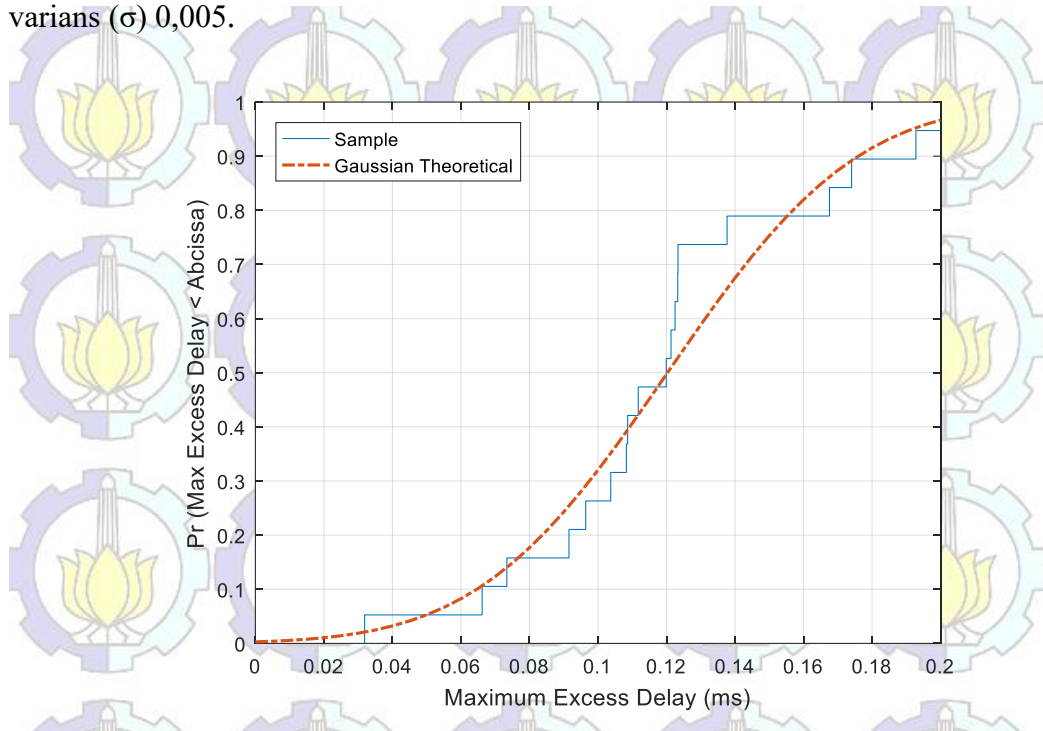
Gambar 4.17 cdf *rms delay spread* hasil pengukuran Surabaya – Merauke pada tanggal 12-15 Pebruari 2014

Power Delay Profile pukul 07.00 WIB tanggal 11 September terdiri dari dua mode 3F dan 4F.

Maximum excess delay dari lintasan-lintasan yang terdiri dari dua mode lebih panjang daripada lintasan-lintasan yang terdiri dari satu mode. Contohnya, pada pukul 14.00 LT tanggal 11 Mei 2015, lintasan yang sampai di penerima terdiri dari dua mode, yaitu 2F dan 3F memiliki *maximum excess delay* 0,48 ms, sedangkan pada pukul 14.00 WIB tanggal 11 September 2015 lintasan berasal dari satu mode 2F dimana *maximum excess delay*-nya lebih kecil, yaitu 0,17 ms.

Gambar 4.18 adalah grafik cdf *maximum excess delay* dari lintasan yang berasal dari satu mode yang terdiri dari 20 sampel. Untuk $\alpha = 0,05$, diperoleh nilai Tabel D = 0,21, sedangkan nilai yang diperoleh oleh cdf untuk Distribusi Gaussian adalah $t = 0,2175$, sehingga nilai cdf *maximum excess delay* hasil ray tracing memenuhi Distribusi Gaussian dengan nilai rata-rata (μ) 0,12 ms dan varians (σ) 0,04 ms. Jika dievaluasi dengan cdf *maximum excess delay* hasil pengukuran yang dapat dilihat di Gambar 4.19, maka dapat disimpulkan bahwa distribusi hasil ray tracing ini sesuai dengan hasil pengukuran, yaitu memenuhi Distribusi Gaussian, dimana untuk $\alpha = 0,05$, nilai Tabel D adalah 0,134, sedangkan t adalah 0,0878

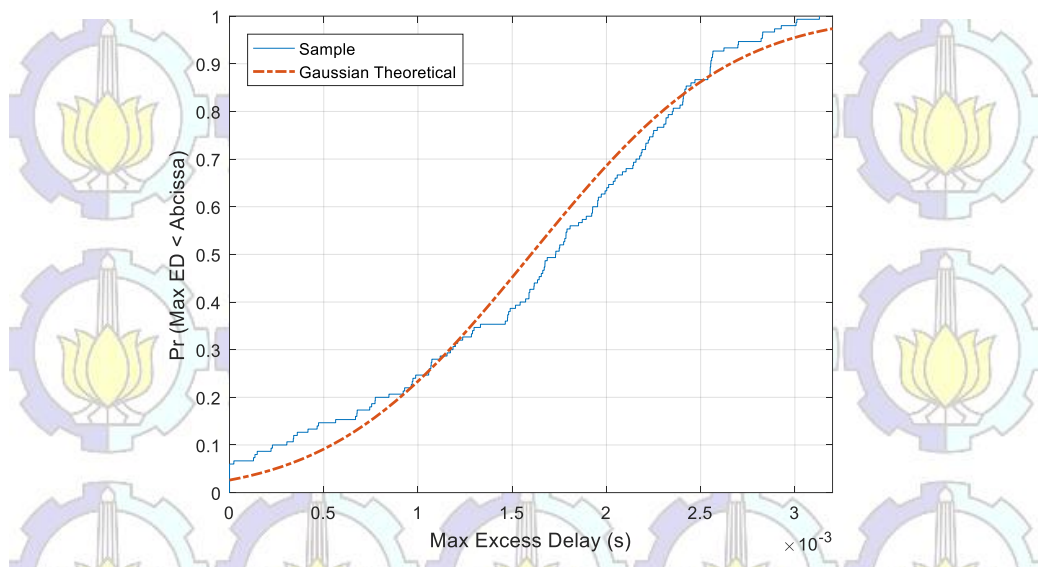
sehingga memenuhi Distribusi Gaussian dengan nilai rata-rata (μ) 4,53 ms dan varians (σ) 0,005.



Gambar 4.18 CDF *Maximum Excess Delay* hasil *ray tracing* Surabaya – Merauke dengan Proplab

4.4 Sintesis

Berdasarkan hasil simulasi ray tracing dengan Proplab diperoleh hasil bahwa channel gain berdistribusi Rayleigh. Hal ini disebabkan karena lintasan-lintasan yang menyusun channel gain berasal dari lintasan-lintasan yang berbeda, yang berasal dari refleksi pada lapisan ionosfer. Refleksi ini akan menghasilkan lintasan jamak yang diterima. Lintasan yang berasal dari propagasi pada kanal lintasan jamak diketahui bersifat saling independen (Rappaport, 2002). Rayleigh juga merupakan karakterisasi khas pada kanal dengan lintasan jamak dimana magnitudo dan fase lintasan bersifat random dan saling independen (Taricco, 2015). Selain itu, dari hasil simulasi juga diketahui bahwa lintasan-lintasan yang menyusun *Power Delay Profile* berasal dari beberapa mode propagasi yang berbeda, yaitu 2F, 3F, 4F dan 5F. Dalam PDP, lintas an-lintasan dengan mode yang berbeda ini membentuk *cluster-cluster* yang letaknya dalam sumbu waktu tergantung pada jenis modenya.



Gambar 4.19 CDF Maximum Excess Delay hasil pengukuran Surabaya – Merauke pada tanggal 12-15 Pebruari 2014

Lintasan-lintasan tersebut jika disusun dalam *bin-bin* maka mode yang lebih kecil akan mengisi *bin* yang juga kecil, demikian pula lintasan yang berasal dari mode yang lebih besar akan mengisi *bin* yang lebih besar. *Cluster* I terdiri dari excess delay dengan panjang 0-100 ms disusun oleh lintasan-lintasan dengan mode 2F dan 3F dengan sudut elevasi masing-masing adalah $12,8^{\circ}$ - 21° dan $19,8^{\circ}$ - $30,4^{\circ}$. *Cluster* II terdiri dari excess delay sepanjang 100-500 ms yang disusun oleh lintasan-lintasan dengan mode 2F dan 3F dengan sudut elevasi masing-masing adalah $12,6^{\circ}$ - $20,8^{\circ}$ dan $19,7^{\circ}$ - $30,1^{\circ}$. Sedangkan *cluster* III berisi lintasan dengan excess delay 500-1300 ms disusun atas lintasan-lintasan dengan mode 4F dan sudut elevasi $41,1^{\circ}$ - $41,5^{\circ}$. *Cluster-cluster* ini dapat dipergunakan untuk membatasi waktu delay (T_m) sehingga tidak melebihi waktu simbol (T_s) atau $T_m < T_s$. Pada kondisi ini semua komponen simbol *multipath* diterima dalam waktu durasi simbol (T_s) sehingga tidak ada kanal yang mengalami distorsi karena ISI.

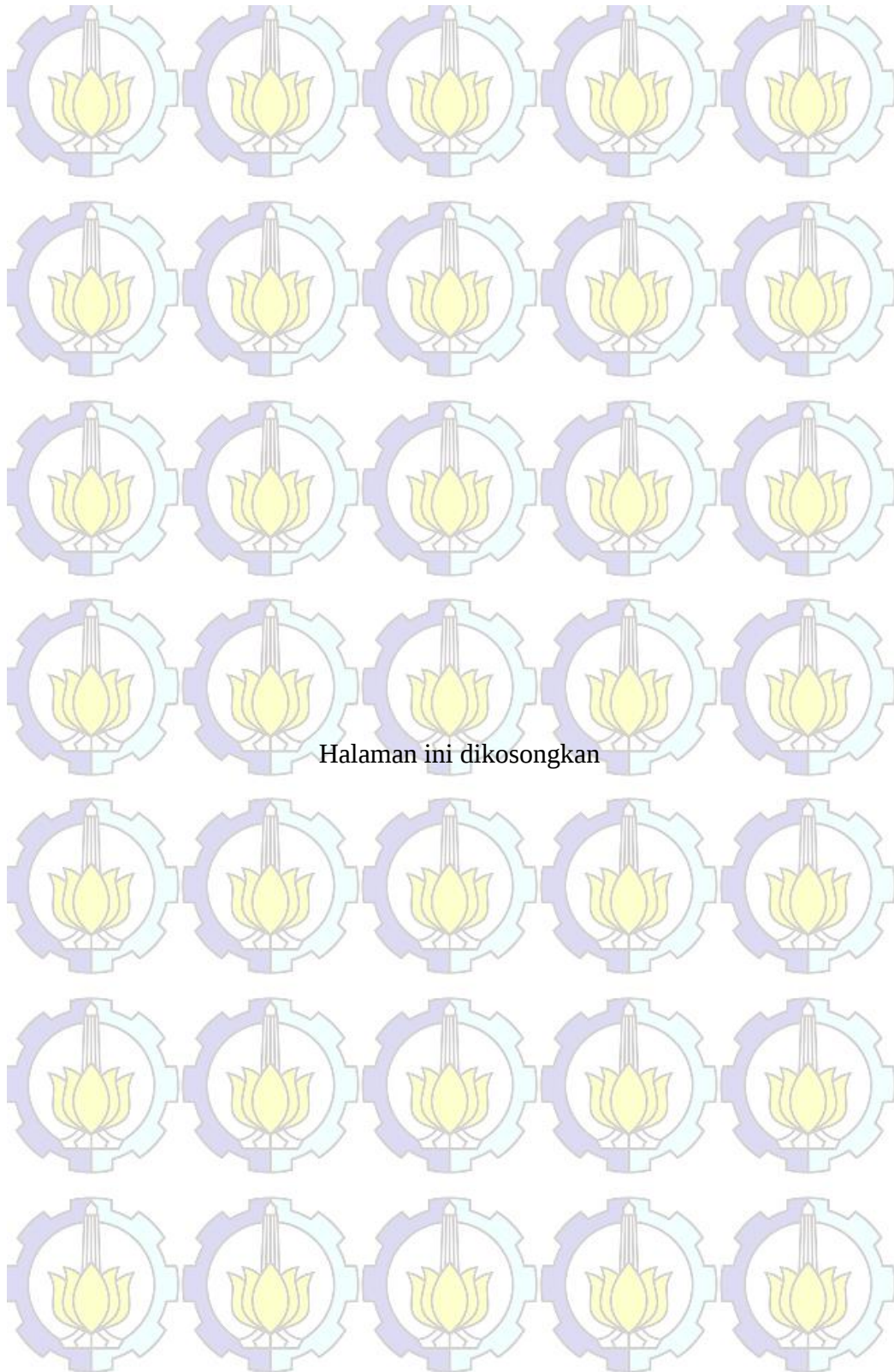
Distribusi Rayleigh dipergunakan untuk memodelkan cdf dari rms *delay spread*. Dari hasil fitting parameter kanal hasil simulasi diketahui bahwa dari simulasi dan pengukuran rms *delay spread* memiliki Distribusi Rayleigh. Hal ini disebabkan bahwa rms *delay spread* diperoleh dari komponen magnitudo dan delay dari tiap lintasan yang berasal dari lintasan jamak akibat refleksi pada lapisan ionosfer. Magnitudo dan delay keduanya bersifat acak dan saling independen,

sehingga rms *delay spread* berdistribusi Rayleigh. *Maximum excess delay* berdistribusi normal, sebab waktu delay tiap lintasan diketahui bersifat acak dan berdistribusi normal (Lacaze, 1997), sehingga *excess delay* juga berdistribusi normal.

Rms *delay spread* terpanjang yang dihasilkan dari simulasi adalah 0,06 ms, sehingga besar laju simbol adalah 16,7 kS/s. Laju simbol diperoleh dari $\frac{1}{\sigma_\tau}$, dimana σ_τ adalah rms *delay spread*.

4.5 Publikasi

Hasil penelitian ini telah dipublikasikan pada Jurnal Internasional Progress in Electromagnetic Research M (PIER M) Vol 64, 23-33, 2018 terindeks Scopus dengan judul Statistical Modeling of Low-Latitude Long-Distance HF Ionospheric Multi-mode Channels pada halaman 77-87.



BAB 5

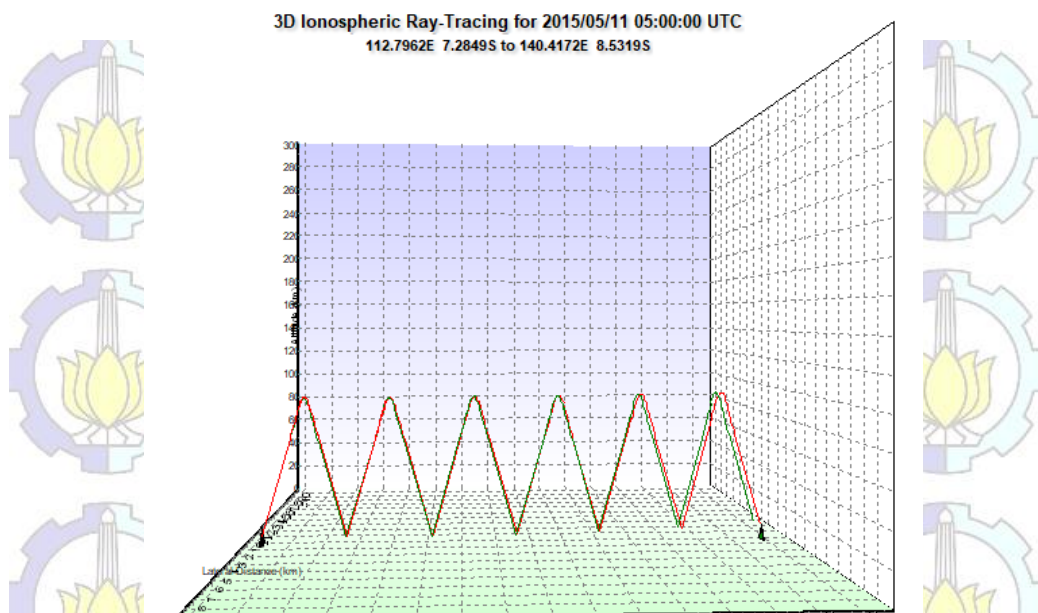
Korelasi Spasial dan *Site diversity* dari Kanal Radio HF Skywave Multipath Multimode

Bab ini adalah bagian dari tujuan penelitian yang kedua dan ketiga, yaitu perhitungan korelasi spasial antar dua *link* untuk kemungkinan peraan *site diversity* dan penerapan *site diversity* pada *link* utama dan *link* alternatif pada kanal radio HF skywave multipath multimode pada daerah lintang rendah. *Site diversity* biasa dilakukan pada sistem komunikasi terestrial untuk meningkatkan availability.

Hipotesis untuk korelasi spasial dari dua *link* sebagaimana dijelaskan pada Subbab 1.5 bagian kedua diuji dengan mengevaluasi dua *link* sesungguhnya, yaitu Surabaya–Merauke dan Surabaya–Ternate di daerah lintang rendah Indonesia. Evaluasi dilakukan dengan dua cara, yaitu simulasi dan pengukuran langsung. Simulasi dilakukan dengan ray tracing mempergunakan Proplab Pro 3, sedangkan pengukuran dilakukan untuk mendapatkan respon kanal dari dua *link* tersebut.

5.1 Simulasi

Simulasi untuk menghitung koefisien korelasi spasial respon kanal Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate dilakukan dengan mempergunakan Proplab Pro 3 untuk tanggal 11 Mei 2015 dan 11 September 2015 selama 24 jam dengan interval satu jam, sehingga dalam satu hari dihasilkan 24 sampel dan total 48 sampel untuk dua hari. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan tiga frekuensi, yaitu 7 MHz, 14 MHz dan 21 MHz, daya 1 Watt, dengan waktu simulasi dibagi dalam waktu siang dan malam untuk mengikuti variasi diurnal ionosfer. Malam hari dimulai dari pukul 18.00 hingga 05.00 WIB, sedangkan siang hari dari pukul 06.00 WIB hingga 17.00 WIB. Parameter simulasi pada Proplab sama dengan parameter yang dipergunakan dalam Bab 4. Korelasi spasial respon kanal yang dihasilkan divalidasi dengan dua metode, yaitu simulasi dengan Proplab untuk tanggal 15-17 Nopember 2016 dan dengan pengukuran secara langsung pada *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate.



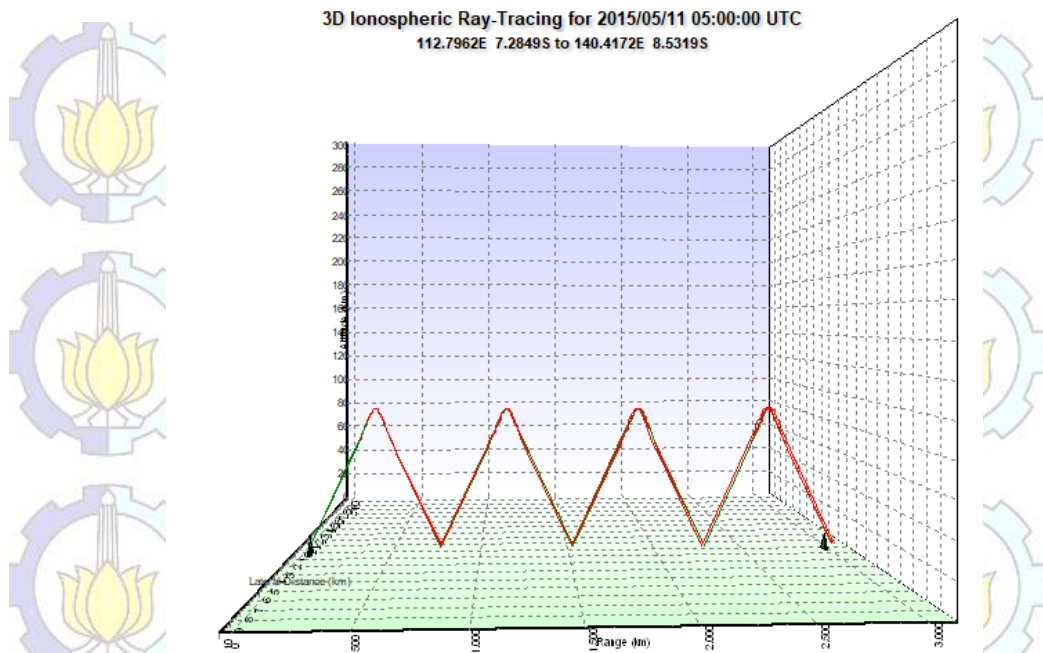
Gambar 5.1 Lintasan-lintasan yang sampai pada penerima dengan mode 6F

5.1.1 Hasil Simulasi

Hasil yang diperoleh dari ray tracing untuk tanggal 11 Mei 2015 menunjukkan bahwa pada *link* Surabaya–Merauke terjadi lintasan multimode, baik yang terdiri dari lintasan Ordinary dan Extraordinary, maupun yang terdiri dari beberapa hop, seperti *link* dengan frekuensi kerja 7 MHz terdiri dari mode 2F hingga 7F dan *link* 14 MHz terdiri dari mode 2F, 3F dan 4F, sedangkan *link* 21 MHz terdiri dari mode tunggal 2F. Sedangkan untuk *link* Surabaya–Ternate, *link* 7 MHz terdiri dari mode 2F hingga 4F, *link* 14 MHz terdiri dari mode 2F, dan *link* 21 MHz terdiri dari mode 1F.

Tabel 5.1 Sebagian hasil Ray Tracing tanggal 11 Mei 2015 pukul 12.00 WIB frekuensi 7 MHz

Mode	Jarak (km)	Koordinat Titik Jatuh		Kuat Sinyal (dBμV)	Sudut Elevasi (°)	Azimuth (°)	Jarak Total (km)	Hops
		Lintang (°)	Bujur (°)					
O	3088,11	-8,527	140,817	-55,03	20,4	94,47	3321,57	6
X	3070,72	-8,517	140,658	-59,49	20,4	94,46	3304,14	6
O	3075,51	-8,522	140,702	-55,40	20,5	94,47	3310,01	6
X	3059,89	-8,516	140,560	-59,56	20,5	94,46	3294,15	6
X	3055,09	-8,296	140,518	-23,56	12,3	93,98	3164,59	4
O	3078,02	-8,763	140,722	-21,57	12,2	94,99	3187,25	4
X	3070,63	-8,761	140,655	-23,64	12,2	94,98	3179,76	4



Gambar 5.2 Lintasan-lintasan yang sampai pada penerima dengan mode 4F Tanggal 11 Mei 2015 pukul 12.00 WIB frekuensi 7 MHz

Mode yang lebih dari 3F pada *link* Surabaya – Merauke dengan frekuensi 7 MHz terjadi pada pagi dan siang hari, yaitu mulai pukul 03.00 WIB sampai dengan pukul 17.00 WIB, seperti dapat dilihat pada Tabel 5.1 yang menunjukkan bahwa pada pukul 12.00 lintasan yang tiba di receiver terdiri dari mode 4F dan 6F. Gambar 5.1 menunjukkan lintasan yang sampai ke Rx dengan mode 6F, sedangkan Gambar 5.2 adalah lintasan dengan mode 4F. Mode yang kurang dari 3F terjadi pada malam hari, yaitu mulai pukul 18.00 WIB hingga pukul 02.00 WIB sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 5.2 yang menunjukkan bahwa pada pukul 03.00 WIB lintasan yang tiba terdiri dari mode 2F. Hal ini disebabkan bahwa pada siang hari frekuensi 7 MHz berada di atas E-MUF, sedangkan pada malam hari frekuensi 7 MHz berada di atas E-MUF, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.4. Jika sinyal radio dipancarkan pada frekuensi dibawah E-MUF, maka akan terjadi absorpsi oleh lapisan E sehingga daya yang sampai ke receiver sangat kecil.

Lintasan yang dipancarkan pada frekuensi 14 MHz tiba di receiver dengan mode yang beragam, yaitu 2F, 3F dan 4F. Mode 2F dan 3F terjadi setelah pukul 14.00 WIB hingga pukul 22.00 WIB, sedangkan mode 3F dan 4F terjadi pada pukul

Tabel 5.2 Sebagian hasil Ray Tracing tanggal 11 Mei 2015 pukul 03.00 WIB frekuensi 7 MHz

Mode	Jarak (km)	Koordinat Titik Jatuh		Kuat Sinyal (dB μ V)	Sudut Elevasi ($^{\circ}$)	Azimuth ($^{\circ}$)	Jarak Total (km)	Hop s
		Lintang ($^{\circ}$)	Bujur ($^{\circ}$)					
X	3086,80	-8,532	140,805	19,35	12,5	94,473	3235,15	2
O	3087,86	-8,527	140,815	19,45	12,7	94,476	3238,76	2
X	3069,22	-8,518	140,645	19,41	12,7	94,461	3219,11	2
O	3079,91	-8,523	140,743	19,48	12,8	94,471	3231,60	2
X	3060,77	-8,515	140,569	19,44	12,8	94,456	3211,40	2
O	3071,48	-8,520	140,666	19,50	12,9	94,464	3224,05	2
X	3052,25	-8,511	140,491	19,46	12,9	94,449	3203,73	2

05.00 WIB hingga 13.00 WIB seperti terlihat pada hasil ray tracing pukul 07.00 WIB. Jika dilihat pada Gambar 4.4 tentang MUF, maka mode 3F dan 4F terjadi pada saat frekuensi kerja berada di bawah E-MUF, sedangkan mode 2F dan 3F terjadi pada saat frekuensi kerja berada di atas E-MUF dan berada di bawah MUF. Ketika frekuensi kerja berada diatas MUF, yaitu mulai pukul 23.00 WIB, maka tidak ada lintasan yang dibelokkan ke permukaan bumi karena semua diteruskan ke angkasa.

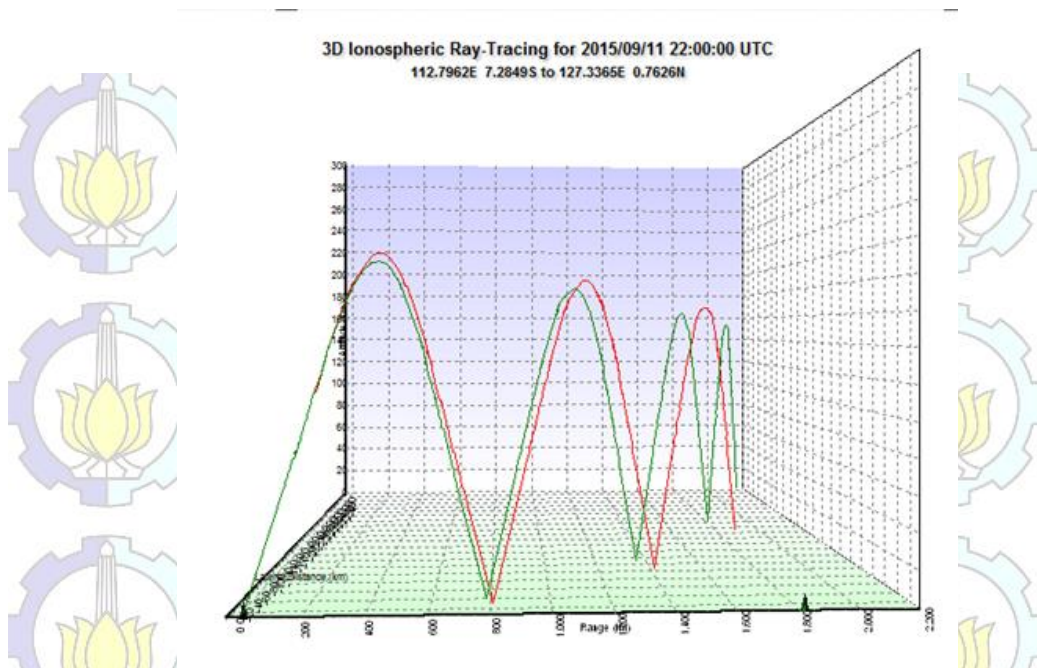
Lintasan dengan frekuensi kerja 21 MHz hanya dapat dipergunakan pada pukul 07.00 WIB hingga pukul 20.00 WIB sebab setelah jam tersebut sinyal diteruskan ke angkasa karena frekuensi kerja berada di atas MUF. Lintasan yang sampai di penerima hanya terdiri dari mode 2F saja.

Hasil ray tracing untuk tanggal 11 September 2015 menunjukkan hal yang tidak jauh berbeda dengan hasil pada tanggal 11 Mei 2015, dimana pada frekuensi 7 MHz, lintasan yang sampai di penerima memiliki mode 2F hingga 7F. Lintasan dengan mode lebih dari 3F terjadi pada pukul 03.00 WIB hingga pukul 17.00 WIB, sedangkan sisanya memiliki lintasan dengan mode 3F dan atau 2F. Sedangkan hasil ray tracing untuk frekuensi 14 MHz yang dilakukan pada tanggal 11 September 2015 menunjukkan hasil yang sedikit berbeda dimana mode yang diterima hanya mode 2F dan 3F. Mode 3F terjadi pada pukul 05.00 WIB – 12.00 WIB, sedangkan pada pukul 13.00 WIB – 22.00 WIB lintasan yang diterima terdiri dari mode 2F saja. Pada pukul 23.00 – 04.00 WIB tidak ada lintasan yang diterima sebab pada waktu-waktu tersebut sinyal diteruskan ke angkasa karena frekuensi 14 MHz

berada diatas MUF. Sinyal yang dikirimkan dengan frekuensi 21 MHz hanya dapat diterima pada pukul 07.00 WIB hingga 15.00 WIB dengan lintasan tunggal 2F sebab selain waktu-waktu tersebut semua sinyal akan diteruskan ke angkasa dan tidak ada yang dipantulkan ke bumi karena frekuensi 21 MHz berada diatas MUF.

Hasil ray tracing *link* Surabaya – Ternate untuk tanggal 11 Mei 2015 dengan frekuensi 7 MHz menunjukkan bahwa lintasan yang diterima memiliki mode 4F pada pukul 07.00 WIB hingga 14.00 WIB, mode 2F dan 3F untuk pukul 15.00 WIB hingga pukul 06.00 WIB. Sedangkan untuk frekuensi 14 MHz, lintasan yang diterima terdiri dari mode 2F untuk pukul 06.00 WIB hingga 00.00 WIB, selain dari itu lintasan diteruskan ke angkasa. Untuk frekuensi 21 MHz terdiri dari lintasan dengan mode 1F pada pukul 06.00 WIB hingga 00.00 WIB. Hasil ray tracing untuk tanggal 11 September 2015 menunjukkan bahwa untuk frekuensi 7 MHz, pada pukul 07.00 WIB hingga 16.00 lintasan yang diterima terdiri dari lintasan dengan mode 3F dan 4F, kemudian dari pukul 17.00 WIB hingga 23.00 WIB terdiri dari mode 1F, 2F dan 3F, sedangkan dari pukul 00.00 WIB hingga 01.00 WIB terdiri dari mode 2F. Pada pukul 02.00 WIB hingga 06.00 WIB, tidak ada lintasan yang diterima karena sinyal bergerak menjauh dari penerima, seperti dapat dilihat pada Gambar 5.3. Pada frekuensi 14 MHz, lintasan yang diterima pada pukul 06.00 WIB hingga 13.00 WIB terdiri dari mode 2F, sedangkan pada pukul 14.00 WIB hingga pukul 00.00 WIB terdiri dari mode 1F, dan diteruskan ke angkasa untuk pukul 01.00 WIB hingga 05.00 WIB. Untuk frekuensi 21 MHz, lintasan dengan mode 1F dapat diterima pada pukul 06.00 WIB hingga pukul 22.00 WIB, selain itu diteruskan ke angkasa dan tidak ada yang dipantulkan ke permukaan bumi.

Lintasan-lintasan yang dihasilkan oleh Proplab tidak semua diterima sebagai lintasan yang diterima. Lintasan yang diterima adalah lintasan yang memiliki jarak kurang dari atau sama dengan 50 km, dihitung secara Great Circle Distance. Kemudian, lintasan-lintasan inilah yang akan diolah lebih lanjut.



Gambar 5.3 Ray tracing untuk *link* Surabaya – Ternate pada tanggal 11 Septem 2015 pukul 05.00 WIB yang menunjukkan lintasan menjauhi penerima

Lintasan-lintasan yang dihasilkan sebagaimana Tabel 5.1 – 5.2 memiliki komponen kuat sinyal dan jarak total. Kuat sinyal (α) yang dihasilkan oleh Proplab memiliki satuan dB μ V. Untuk perhitungan korelasi maka kuat sinyal tersebut diubah dalam skala linier dengan satuan Volt. Selain itu, dari hasil sisa pembagian jarak total yang ditempuh dengan panjang gelombang akan diperoleh pergeseran fase (θ). Kedua besaran ini yang akan dipergunakan untuk menyusun kuat sinyal dalam bentuk fasor, seperti dalam Persamaan (3.7). Lintasan yang diambil dalam perhitungan fasor ini adalah yang memiliki lintasan sepasang Ordinary dan Extraordinary. Hasil perhitungan kuat sinyal dan fase dapat dilihat pada Tabel 5.3 untuk simulasi tanggal 11 Mei 2015 pukul 06.00 WIB hingga 12.00 WIB. Sesuai persamaan (3.7), total kuat sinyal (V) adalah penjumlahan secara fasor kuat sinyal ordinary (V_o) dan kuat sinyal extraordinary (V_x). Magnitudo dari V inilah yang akan dihitung korelasi respon kanal antara Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate. Tabel 5.4 adalah magnitudo respon kanal antara *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate untuk frekuensi 7 MHz.

Tabel 5.3 Mode, kuat sinyal dan fase dari hasil simulasi link Surabaya-Merauke tanggal 11 Mei 2015 untuk pukul 06.00 WIB hingga 12.00 WIB

Jam (WIB)	Mode	α	θ
06.00	Tidak ada sinyal		
07.00	4F O	1,78E-08	124,18
	4F X	1,47E-08	49,96
08.00	4F O	9,44E-09	193,00
	4F X	7,46E-09	11,46
	6F O	1,51E-10	249,34
	6F X	9,71E-11	93,73
09.00	5F O	1,42E-09	189,42
	5F X	1,01E-09	325,91
	6F O	1,57E-10	324,70
	6F X	9,78E-11	192,82
10.00	4F O	7,00E-09	113,88
	4F X	5,39E-09	169,16
	6F O	1,56E-10	124,59
	6F X	9,15E-11	173,66
11.00	5F O	1,36E-09	53,79
	5F X	9,58E-10	174,44
	7F O	6,20E-12	355,65
	7F X	3,47E-12	35,33
12.00	4F O	7,67E-09	281,70
	4F X	5,87E-09	124,12
	6F O	1,58E-10	70,41
	6F X	9,46E-11	213,04

5.1.2 Perhitungan Korelasi Spasial

Sesuai hasil simulasi dengan ray tracing, frekuensi 7 MHz selalu berada di bawah MUF sehingga tidak ada sinyal yang diteruskan ke angkasa. Oleh karena itu, untuk keperluan perhitungan koefisien korelasi, frekuensi 7 MHz dijadikan sebagai frekuensi utama untuk *link* Surabaya – Merauke yang dikorelasikan dengan *link* Surabaya – Ternate pada frekuensi 7 MHz, 14 MHz dan 21 MHz.

Perhitungan korelasi (ρ) ini dilakukan dengan Persamaan (2.33). Besaran yang dikorelasikan adalah magnitudo antara frekuensi 7 MHz pada *link* Surabaya – Merauke dengan magnitudo pada *link* frekuensi 7 MHz, 14 MHz dan 21 MHz sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 5.4. Hasil korelasi dapat dilihat pada Tabel 5.5. Dari hasil korelasi tersebut dapat disimpulkan bahwa *link* Surabaya – Merauke yang bekerja pada frekuensi 7 MHz memiliki korelasi yang rendah, atau tidak

Tabel 5.4 Magnitudo Respon kanal antara link Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate pada frekuensi 7 MHz

11-Mei-15			11-Sep-15		
Jam (WIB)	S-M	S-T	Jam (WIB)	S-M	S-T
06.00	0	1,24E-07	06.00	2,25E-08	0,00E+00
07.00	2,71E-08	6,09E-08	07.00	6,43E-08	1,21E-06
08.00	1,62E-08	4,30E-09	08.00	3,71E-09	1,17E-06
09.00	1,45E-09	3,74E-09	09.00	1,77E-08	3,83E-07
10.00	1E-08	4,57E-09	10.00	0	7,48E-07
11.00	1,89E-09	3,60E-09	11.00	0	2,97E-07
12.00	1,31E-08	4,34E-09	12.00	0	1,46E-06
13.00	1,52E-07	1,43E-09	13.00	0	4,94E-07
14.00	2,35E-07	1,30E-09	14.00	0	1,21E-06
15.00	3,77E-07	1,60E-07	15.00	9,75E-08	1,17E-06
16.00	1,8E-06	1,98E-07	16.00	0	5,24E-06
17.00	2E-06	0,00E+00	17.00	1,43E-06	7,47E-06
18.00	8,6E-06	7,28E-07	18.00	2,49E-06	3,01E-05
19.00	8,38E-07	0,00E+00	19.00	8,1E-07	6,74E-06
20.00	4,68E-07	1,98E-06	20.00	2E-06	3,00E-05
21.00	1,02E-06	1,51E-06	21.00	1,09E-08	1,10E-05
22.00	1,38E-06	2,89E-06	22.00	2,31E-06	3,95E-05
23.00	6,43E-07	3,17E-05	23.00	2,13E-06	1,94E-05
00.00	8,07E-07	1,34E-06	00.00	1,21E-06	0
01.00	1,26E-06	1,73E-07	01.00	2,62E-06	0
02.00	1,35E-06	0,00E+00	02.00	1,28E-06	0
03.00	8,98E-07	0,00E+00	03.00	0	0
04.00	5,06E-07	0,00E+00	04.00	0	0
05.00	2,29E-07	0,00E+00	05.00	0	0

berkorelasi dengan *link* Surabaya – Ternate yang bekerja pada frekuensi 7 MHz, 14 MHz dan 21 MHz.

Untuk keperluan penerapan *site diversity*, hasil ini akan diverifikasi dengan hasil ray tracing pada *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate untuk tanggal 15-17 Nopember 2016 dengan frekuensi 10.145 MHz dan pengukuran langsung di lapangan pada tanggal 13-17 Nopember 2017.

5.2 Verifikasi Koefisien Korelasi

Verifikasi ini dilakukan untuk mengetahui apakah *link* Surabaya- Merauke dan Surabaya-Ternate juga memiliki korelasi yang rendah atau tidak berkorelasi jika dihitung dengan cara yang lain.

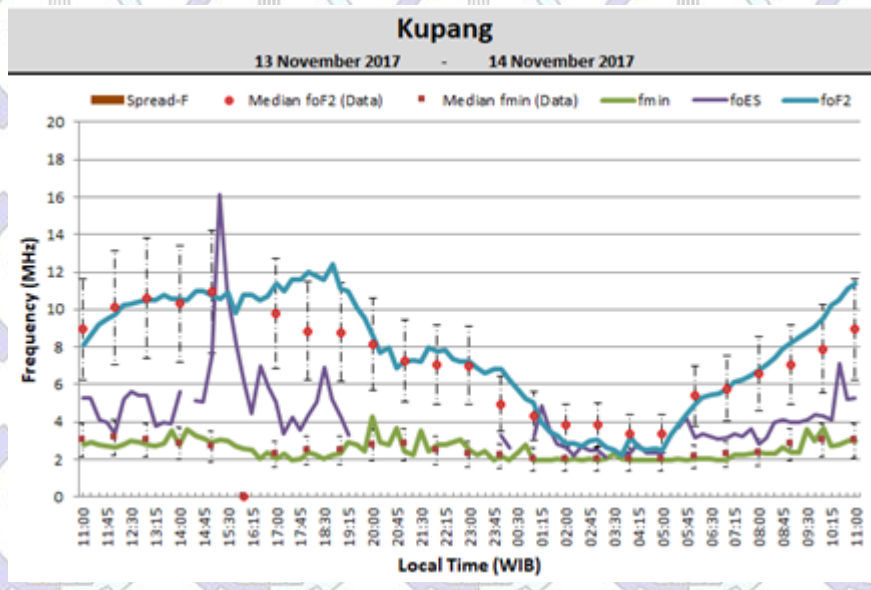
Tabel 5.5 Koefisien korelasi antara link Surabaya – Merauke (S-M) dengan Surabaya – Ternate (S-T)

	S-T 7 MHz	S-T 14 MHz	S-T 21 MHz
S-M 7 MHz	-0,054	0,039	-0,049
	Tidak berkorelasi	Tidak berkorelasi	Tidak berkorelasi

Korelasi yang rendah adalah syarat dapat dilakukannya penerapan *site diversity* untuk meningkatkan *diversity gain* pada radio HF gelombang angkasa jarak jauh. Verifikasi ini dilakukan dengan dua metode, yaitu ray tracing dengan Proplab untuk tanggal 15-17 Nopember 2016 dan pengukuran respon kanal langsung pada tanggal 15-17 Nopember 2017.

5.2.1 Pengukuran Respon Kanal Link Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate

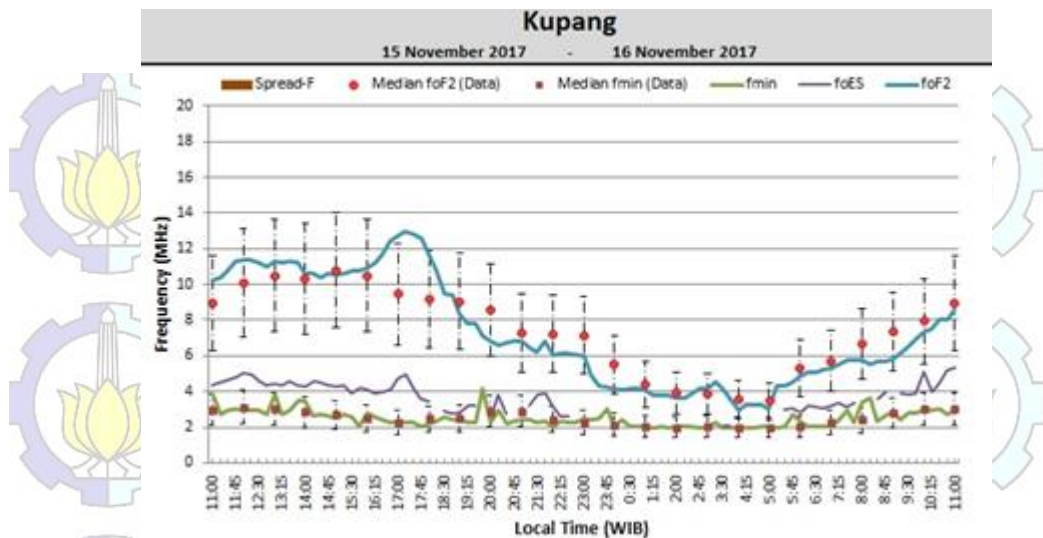
Pengukuran respon kanal *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate dilaksanakan pada tanggal 16-17 Nopember 2017. Sinyal carrier yang dihasilkan oleh Radio HF dikirimkan dari Laboratorium Antena dan Propagasi, Departemen Teknik Elektro, ITS Surabaya dan diterima secara serentak pada dua lokasi penerima, yaitu Gedung Laboratorium Teknik Elektro, Universitas Musamus, Merauke dan Gedung Teknik Informatika, Universitas Khairun, Ternate.



Gambar 5.4 Hasil pengukuran Ionosonde di Kupang untuk tanggal 13 -14 Nopember 2017

Jadwal pengukuran yang sebenarnya adalah dimulai pada tanggal 13 Nopember 2017, tetapi pada tanggal tersebut hingga 14 Nopember 2017 sinyal tidak dapat diterima baik di Ternate maupun Merauke, sebab menurut hasil pengamatan Ionosonde LAPAN di Kupang, pada tanggal tersebut terjadi *E-Sporadic (Es)*, yaitu meningkatnya jumlah total elektron pada lapisan E sehingga lapisan E menjadi menebal. *Es* bisa berdampak positif jika jarak antara pengirim dan penerima dekat, tetapi berdampak negatif untuk jarak jauh sebab menghalangi sinyal untuk mencapai lapisan F yang merupakan media untuk propagasi jarak jauh. Pada Gambar 5.4 dapat dilihat bahwa pada pukul 14.45 WIB atau 16.45 WIT terjadi lonjakan nilai foEs (frequency oblique pada *Es*) yang menandakan terjadinya *Es* yang menghambat propagasi sinyal radio HF jarak jauh. Hal ini berbeda dengan hasil pengukuran Ionosonde Kupang untuk tanggal 15-16 Nopember 2017 pada Gambar 5.5 dimana tidak terjadi lonjakan nilai foEs sehingga tidak ada gangguan dalam propagasi sinyal radio HF jarak jauh. Kondisi lapisan ionosfer untuk *link* Surabaya – Ternate tidak dapat diketahui karena pada saat yang bersamaan Ionosonde LAPAN yang berada di Manado sedang tidak beroperasi.

Frekuensi yang dipergunakan adalah 9 MHz hingga 10 MHz. Pemilihan frekuensi dilakukan dengan memperhatikan foF2 setiap waktu. Besar frekuensi yang dipilih berada di sekitar foF2 atau diatasnya sesuai perhitungan MUF. Misalnya, pada jam 11.00 WIB tanggal 15 Nopember 2017 dipilih frekuensi 9 MHz dan setelahnya. Setelah mencoba beberapa kali sesi pengiriman, maka waktu pengiriman yang tepat untuk *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate dimulai pukul 17.00 WIB hingga 20.00 WIB dengan frekuensi bervariasi antara 9 MHz hingga 10 MHz. Setelah pukul 20.00 WIB, foF2 turun di bawah 8 MHz sehingga sulit untuk memantulkan sinyal radio HF. Variasi pemilihan frekuensi ini dilakukan karena banyaknya pengguna frekuensi radio HF lain baik di Surabaya, Ternate dan Merauke sehingga harus dipilih frekuensi yang sedang tidak dipergunakan.



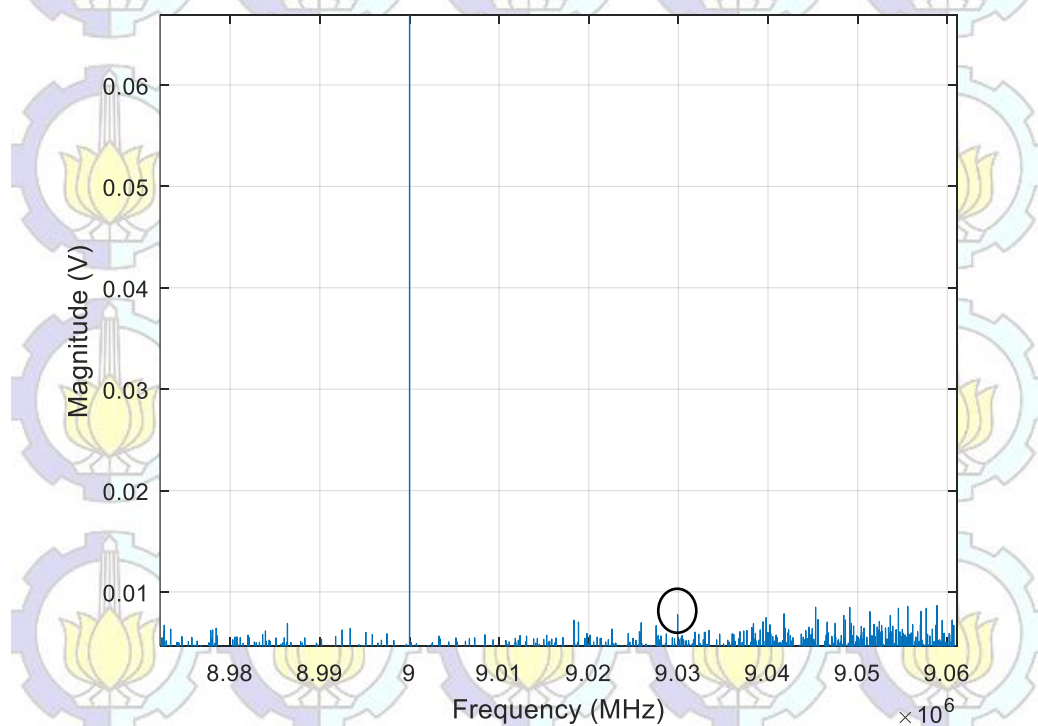
Gambar 5.5 Hasil pengukuran Ionosonde di Kupang untuk tanggal 15 -16 Nopember 2017

Sinyal CW yang dikirimkan selanjutnya diterima oleh USRP dengan Labview dan dihubungkan dengan personal computer untuk menerima sinyal yang disimpan dalam bentuk I dan Q dalam file berformat *.csv. Dalam satu kali proses pengiriman sinyal selama sekitar 10 detik, sinyal ditangkap sebanyak 5 kali setelah pengirim menghentikan pengiriman sinyalnya. Dalam satu kali penyimpanan, diperoleh sekitar 16.000 pasang I dan Q. Kemudian hasil I dan Q ini di FFT untuk mengubah domain waktu ke domain frekuensi dan ditampilkan dalam bentuk baseband-nya dalam rentang 200 kHz sesuai pengaturan pada Labview. Setelah itu dicari nilai magnitudo kuat sinyal dari hasil FFT tersebut. Kuat sinyal ini memiliki satuan Volt. Data yang dipergunakan untuk simulasi adalah yang berasal dari sesi pengukuran yang sama, yang secara bersamaan diterima di Merauke dan Ternate. Gambar 5.6 adalah hasil FFT yang diterima di Ternate pada tanggal 16 Nopember 2017 pukul 19.00 WIB, sedangkan Gambar 5.7 adalah hasil FFT yang diterima di Merauke pada waktu yang sama. Sinyal carrier yang dipancarkan dari Surabaya memiliki frekuensi 9,03 MHz. Frekuensi osilator yang diatur pada Labview penerima adalah 9 MHz, sehingga sinyal yang diterima berada pada frekuensi 30.000 Hz. Dari Gambar 5.6 diperoleh tegangan yang diterima di Ternate sebesar 0,05742 MHz, sedangkan dari Gambar 5.7 diperoleh tegangan yang diterima di Merauke sebesar 0,00776 MHz. Data yang dihasilkan dari pengukuran yang diterima di Ternate dan Merauke ditampilkan dalam bentuk tabel yang berisi tanggal, waktu pengukuran,

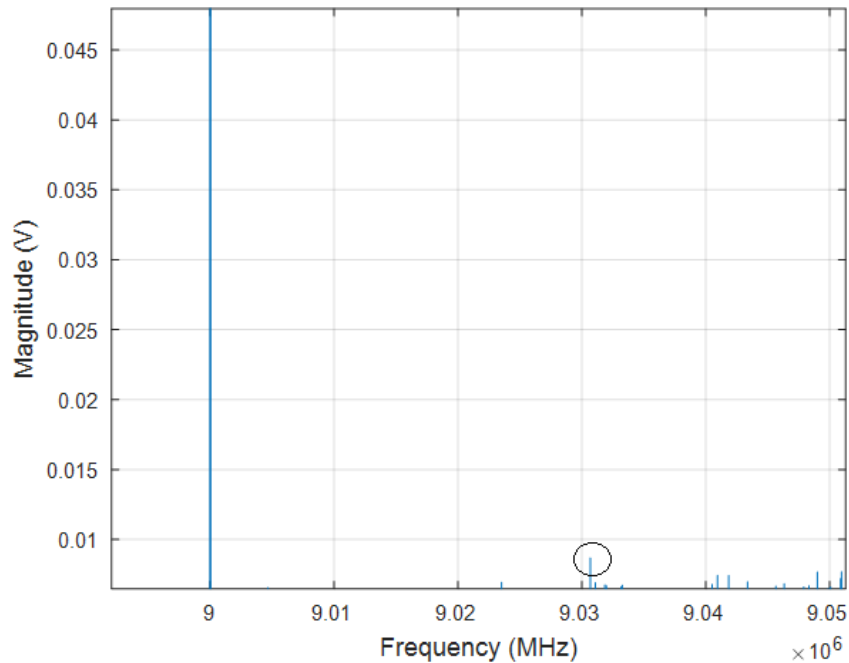
frekuensi dan magnitudo kuat sinyal yang dihasilkan. Tabel 5.6 adalah kuat sinyal yang diterima secara bersamaan di Ternate dan Merauke. Kuat sinyal yang diterima secara keseluruhan dapat dilihat pada Lampiran.

Kuat sinyal pada Tabel 5.6 dan Tabel 5.7 dipergunakan untuk menghitung koefisien korelasi antara *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate. Semua data yang dipergunakan diperoleh diatas pukul 18.00 WIB sehingga dimasukkan dalam kategori malam hari. Dari data tersebut diperoleh bahwa koefisien korelasinya adalah 0,18. Nilai korelasi ini rendah sehingga dapat disimpulkan bahwa berdasarkan hasil pengukuran, kedua *link* tersebut tidak berkorelasi.

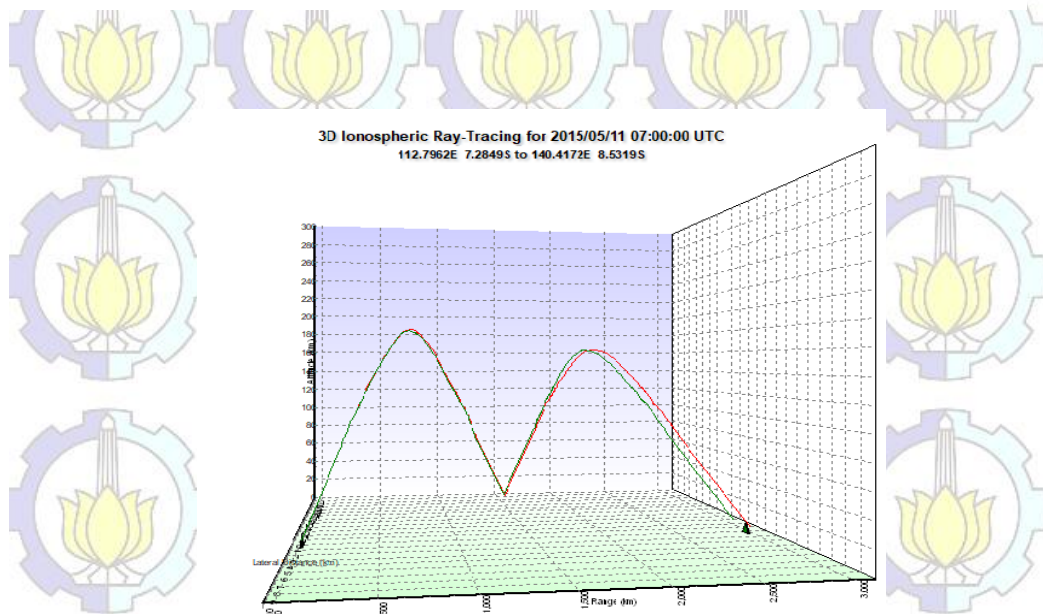
Simulasi ray tracing dengan Proplab untuk validasi ini memiliki parameter yang sama dengan simulasi pada subbab sebelumnya. Hal yang membedakan adalah tanggal simulasi, yaitu 15-17 Nopember 2016, dimana tanggal ini terdapat perbedaan nilai sunspot number, IG Index dan solar flux, dan frekuensi, yaitu 10,145 MHz. Simulasi ini juga dilakukan untuk *link* Surabaya-Merauke dan Surabaya-Ternate



Gambar 5.6 Hasil pengukuran sinyal yang diterima di Ternate tanggal 16 Nopember 2017 pukul 19.00 WIB dengan frekuensi carrier 9,03 MHz



Gambar 5.7 Hasil pengukuran sinyal yang diterima di Merauke tanggal 16 Nopember 2017 pukul 19.00 WIB dengan frekuensi carrier 9,03 MHz



Gambar 5.8 Lintasan 2F pada link Surabaya - Merauke tanggal 15 Nopember 2016 pukul 14.00 WIB

Tabel 5.6 Perhitungan Kuat Sinyal Tanggal 16 Nopember 2016

Tanggal	Ternate (V)	Merauke (V)
16 November 2017	0.003002	0.001361
	0.002629	0.00392
	0.005278	0.0008
	0.002095	0.002985
	0.000864	0.001512
	0.003194	0.002767
	0.004393	0.003588
	0.004665	0.003369
	0.003855	0.002898
	0.001078	0.001659
	0.003339	0.005139
	0.001787	0.004813
	0.005742	0.00776
	0.00257	0.006683
	0.006391	0.009463

5.2.2 Ray Tracing Dengan Proplab untuk Tanggal 15-17 Nopember 2016

Gambar 5.7 adalah gambar lintasan-lintasan yang tiba di Merauke pada tanggal 15 Nopember 2016 pukul 07.00 UTC atau 14.00 WIB dengan menggunakan mode 2F yang artinya adalah lintasan tiba di penerima melalui dua kali pantulan dengan pemantul adalah lapisan F pada ionosfer. Lintasan warna merah adalah lintasan ordinary sedangkan warna hijau adalah lintasan extraordinary.

Tabel 5.8 menunjukkan hasil ray tracing tanggal 15 Nopember 2016 pukul 14.00 WIB. Dari tabel tersebut dihasilkan kuat sinyal (α) dalam Volt dan fase (θ) dalam ($^{\circ}$). Pada pukul 14.00 WIB, frekuensi 10.145 MHz berada di bawah lapisan E-MUF dan sebagai perbandingan perbedaan hasil ray tracing saat frekuensi 10.145 MHz berada diatas lapisan E-MUF ditunjukkan Tabel 5.7 sebagai hasil ray tracing *link* Surabaya – Merauke tanggal 15 Nopember 2016 pukul 12.00 UTC atau 19.00 WIB. Dari Tabel 5.8 dan 5.9 didapatkan bahwa kuat sinyal pada Tabel 5.9 lebih besar daripada kuat sinyal pada Tabel 5.8. Hal ini disebabkan karena pada pukul 14.00 WIB, frekuensi 10,145 MHz masih berada dibawah E-MUF sehingga sinyal

Tabel 5.7 Hasil Perhitungan Kuat Sinyal tanggal 17 Nopember 2017

Tanggal	Ternate (V)	Merauke (V)
17 November 2017	0.00438	0.001067
	0.001681	0.00629
	0.002005	0.004602
	0.00154	0.002437
	0.001346	0.005076
	0.00371	0.005604
	0.003039	0.004026
	0.002568	0.007038
	0.003389	0.003618
	0.003443	0.003514
	0.001908	0.004777
	0.00343	0.002064
	0.002494	0.001109
	0.001971	0.008392
	0.002115	0.005678
	0.003261	0.01392
	0.001775	0.01416
	0.002345	0.01742
	0.002065	0.0222
	0.004612	0.01881
	0.003861	0.0072
	0.004958	0.009221
	0.001933	0.007763
	0.002206	0.004101
	0.003505	0.005829
	0.00439	0.001068
	0.001791	0.00739
	0.003115	0.005713
	0.00265	0.003548
	0.002456	0.006187
	0.00482	0.006715
	0.004149	0.005137
	0.003679	0.008149
	0.004499	0.004729
	0.004554	0.004625
	0.001908	0.004777
	0.00454	0.003175
	0.003505	0.002210
	0.002082	0.009403
	0.003226	0.006789
	0.004372	0.02403

lanjutan

Tanggal	Ternate (V)	Merauke (V)
17 Nopember 2017	0.002886	0.02527
	0.003456	0.02853
	0.003176	0.0331
	0.005723	0.02992
	0.004972	0.0082
	0.005079	0.000324
	0.002044	0.008974
	0.003317	0.005212
	0.004616	0.006931
	0.01042	0.01445
	0.01415	0.009073
	0.009719	0.004321
	0.009646	0.008657
	0.002144	0.003132

yang dikirimkan mengalami absorpsi oleh lapisan E, sedangkan pada pukul 19.00 WIB, frekuensi 10,145 MHz berada diatas E-MUF sehingga sinyal tidak mengalami absorpsi oleh lapisan E dan dapat dipancarkan semua ke arah ionosfer.

Tabel 5.8 Hasil ray tracing *link* Surabaya – Merauke tanggal 15 Nopember 2016 pukul 07.00 UTC atau 14.00 WIB

Tipe	Kuat Sinyal (dBμV)	Jarak Total (km)	Hop	Kuat Sinyal (Volt)	Fase (°)
O	6.642	3327.196	2	4.80E-07	244.65
O	6.754	3306.167	2	4.87E-07	196.96
X	6.093	3318.829	2	4.51E-07	268.46
O	6.778	3302.310	2	4.88E-07	39.68
X	6.132	3313.283	2	4.53E-07	66.74
O	6.805	3295.548	2	4.89E-07	162.52
X	6.161	3306.613	2	4.54E-07	221.17
O	6.841	3288.347	2	4.92E-07	332.48
X	6.199	3301.689	2	4.56E-07	38.49
O	5.478	3546.104	3	4.20E-07	144.20
X	4.502	3548.582	3	3.75E-07	77.65

Ket. : O = Ordinary
X = Extraordinary

Tabel 5.9 Hasil ray tracing *link* Surabaya – Merauke tanggal 15 Nopember 2016 pukul 12.00 UTC atau 19.00 WIB

Tipe	Kuat Sinyal (dBμV)	Jarak Total (km)	Hop	Kuat Sinyal (Volt)	Fase (°)
O	20.153	3281.77	2	2.28E-06	170.39
O	20.091	3302.96	2	2.26E-06	352.95
X	20.091	3294.97	2	2.26E-06	267.95
O	20.125	3291.05	2	2.27E-06	72.76
X	20.125	3282.80	2	2.27E-06	68.35
O	20.190	3268.56	2	2.29E-06	257.46
X	20.192	3259.40	2	2.29E-06	8.47
X	15.281	3582.75	3	1.30E-06	253.36
X	15.280	3582.40	3	1.30E-06	355.85
X	15.301	3574.68	3	1.30E-06	321.04
O	15.364	3565.16	3	1.31E-06	249.22
X	15.370	3549.23	3	1.31E-06	16.06
O	18.234	3993.03	4	1.82E-06	41.08
X	18.247	3966.77	4	1.83E-06	308.49

Lintasan-lintasan yang dihasilkan dari *link* Surabaya – Ternate memiliki mode 1F, 2F dan 3F. Pada pukul 14.00 WIB hingga 22.00 WIB frekuensi 10,145 MHz selalu berada diatas E-MUF sehingga tidak ada sinyal yang mengalami absorpsi oleh lapisan E sehingga kuat sinyal relatif sama. Perbedaan kuat sinyal yang diterima dipengaruhi oleh mode yang dipergunakan, yaitu 1F, 2F atau 3F. Tabel 5.10 menunjukkan hasil ray tracing *link* Surabaya – Ternate pada tanggal 15 Nopember 2016 pukul 19.00 WIB dimana terdapat perbedaan kuat sinyal yang diterima berdasarkan perbedaan mode. Perbedaan mode disebabkan oleh sudut elevasi antenna, dimana untuk sudut antenna sekitar 14° akan diperoleh mode 1F, sudut 33° akan diperoleh mode 2F dan mode 3F diperoleh dari sudut elevasi antenna 48°.

Kuat sinyal total yang dihasilkan untuk tiap jam pada dua *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya - Ternate dihitung dengan menjumlahkan lintasan ordinary dan extraordinary untuk tiap mode sehingga dalam satu jam dihasilkan satu respon kanal dalam bentuk bilangan kompleks. Kuat sinyal dalam Volt yang merupakan bagian α dan fase yang merupakan bagian θ dalam bilangan $\alpha e^{i\theta}$ diubah dalam

bentuk kompleks $a + jb$, dan kemudian dijumlahkan secara kompleks untuk seluruh mode yang diterima baik dalam bentuk lintasan ordinary dan extraordinary sehingga untuk satu jam dihasilkan satu kuat sinyal total dalam bentuk bilangan kompleks. Dari bilangan kompleks ini dihitung magnitudonya sebelum dipergunakan untuk menghitung koefisien korelasi. Magnitudo respon kanal untuk tiap *link* pada tiap jamnya dapat dilihat pada Tabel 5.11. Dari hasil tersebut dihitung koefisien korelasi untuk waktu siang, malam dan korelasi secara keseluruhan. Magnitudo yang dihasilkan untuk *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate pada Tabel 5.9 dipergunakan untuk menghitung koefisien korelasi antara dua *link* untuk dua kondisi berdasarkan variasi diurnal lapisan ionosfer, yaitu siang hari dan malam hari. Siang hari dihitung untuk pukul 14.00 WIB hingga 17.00 WIB dan malam hari untuk pukul 18.00 WIB hingga 22.00 WIB. Setelah itu dihitung koefisien korelasi secara total antara dua *link* tersebut.

Tabel 5.12 adalah koefisien korelasi antara dua *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate untuk siang hari dan malam hari. Pada siang hari koefisien korelasi mencapai 0,52 dan malam hari -0,08. Jika nilai korelasi yang dianggap signifikan adalah 0,2 (Gibson, 2004), maka pada siang hari korelasi antara dua *link* tersebut adalah signifikan, sedangkan pada malam hari tidak signifikan. Secara total korelasi antara dua *link* tersebut adalah 0,06. Dengan demikian, dengan frekuensi 10,145 MHz pada siang hari kedua *link* tersebut memiliki korelasi yang tinggi dan pada malam hari kedua *link* tersebut tidak berkorelasi. Kondisi tidak berkorelasi ini merupakan salah satu syarat bahwa *site diversity* dapat diterapkan dengan baik pada kedua *link* tersebut.

Tabel 5.10 Hasil ray tracing *link* Surabaya – Ternate tanggal 15 Nopember 2016 pukul 12.00 UTC atau 19.00 WIB

Tipe	Kuat Sinyal (dBμV)	Jarak Total (km)	Hop	Kuat Sinyal (Volt)	Fase (°)
O	21.01	1979.66	1	2.512E-06	202.06
X	21.02	1967.61	1	2.516E-06	55.98
O	12.50	2230.67	2	9.429E-07	340.21
X	12.61	2215.42	2	9.554E-07	68.88
O	11.69	2774.72	3	8.586E-07	227.42
X	11.72	2728.09	3	8.621E-07	284.15

Tabel 5.11 Magnitudo untuk *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate

Jam (WIB)	Surabaya - Merauke	Surabaya - Ternate
14.00	1.48E-06	1.35E-06
15.00	4.00E-07	2.08E-06
16.00	1.02E-06	2.97E-07
17.00	3.47E-06	1.63E-06
18.00	1.69E-06	3.79E-06
19.00	4.37E-06	2.10E-06
20.00	7.24E-06	4.43E-06
21.00	5.12E-07	3.82E-06
22.00	4.64E-06	2.19E-06
14.00	1.02E-06	2.99E-06
15.00	2.17E-06	2.04E-06
16.00	2.16E-06	3.70E-06
17.00	4.66E-06	1.19E-06
18.00	3.53E-06	4.23E-06
19.00	4.94E-06	4.45E-06
20.00	5.93E-06	5.93E-06
21.00	6.75E-06	4.91E-06
22.00	1.61E-06	2.51E-06
14.00	3.75E-07	7.39E-07
15.00	9.67E-07	1.73E-06
16.00	1.16E-06	3.38E-06
17.00	3.75E-06	1.93E-06
18.00	3.38E-06	5.70E-06
19.00	8.45E-06	4.81E-06
20.00	2.33E-06	1.41E-06
21.00	3.65E-06	4.49E-06
22.00	4.04E-06	1.54E-06

5.3 *Site diversity* untuk *Link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate

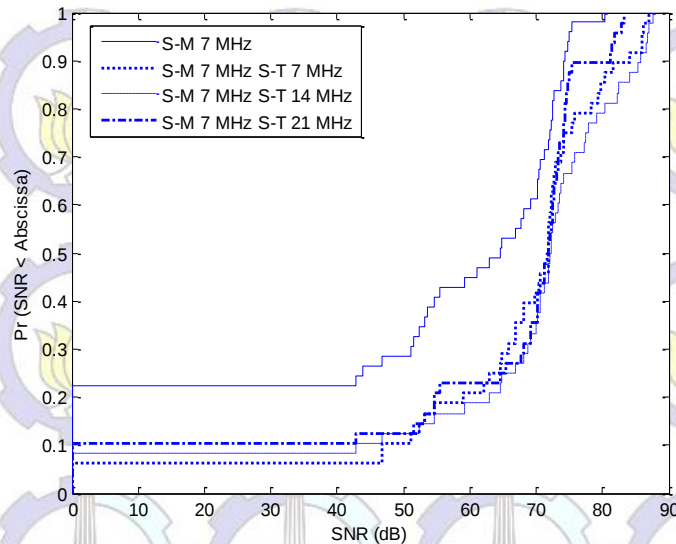
Salah satu syarat keberhasilan sistem *diversity* adalah dua atau lebih *link* yang terlibat memiliki korelasi yang rendah. Sementara hasil korelasi *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya- Ternate yang dibahas pada subbab sebelumnya menunjukkan bahwa korelasi antara kedua *link* tersebut rendah, baik dari hasil simulasi maupun verifikasi pada pengukuran sesungguhnya. Hal ini mengindikasikan bahwa *site diversity* berpotensi untuk diterapkan pada kedua *link* tersebut.

Tabel 5.12 Koefisien korelasi untuk *link* Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate

Waktu (WIB)	Koefisien Korelasi
Siang	0,52
Malam	-0,08

Cumulative distribution function (CDF) dari SNR untuk *link* tunggal Surabaya – Merauke dengan frekuensi 7 MHz, dan CDF dari SNR untuk *site diversity* dengan selective combining antara *link* 7 MHz Surabaya – Merauke sebagai *link* primer, dan *link* Surabaya – Ternate dengan frekuensi 7 MHz, 14 MHz dan 21 MHz sebagai *link* alternatif dihitung untuk mengevaluasi *diversity gain* dan peningkatan ketersediaan (*availability*). Hasil simulasi dengan Proplab yang dilakukan pada tanggal 11 Mei 2015 dan 11 September 2015 dipergunakan untuk menghitung *diversity gain* dan ketersediaan setelah penggunaan *site diversity* pada kedua *link* tersebut.

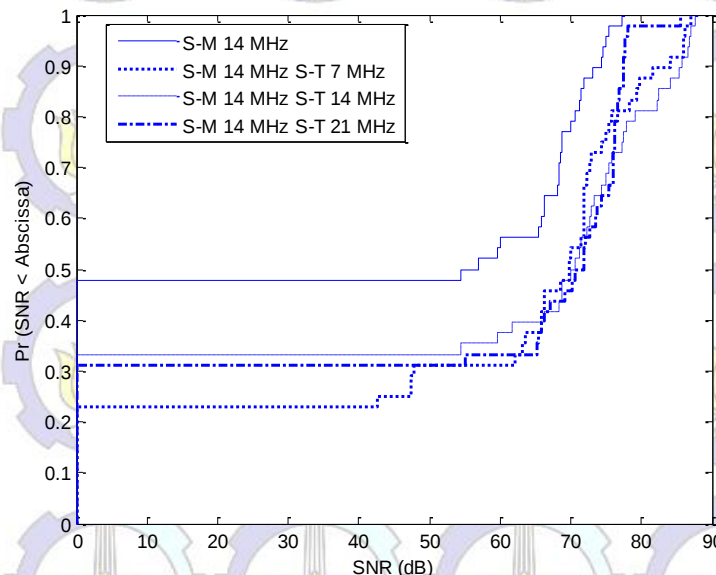
Kuat sinyal yang diterima dipergunakan untuk menghitung SNR, dimana daya noise diperoleh berdasarkan perhitungan daya thermal noise pada suhu 300 K dan bandwidth receiver 10 kHz dan dengan memperhitungkan noise figure dari



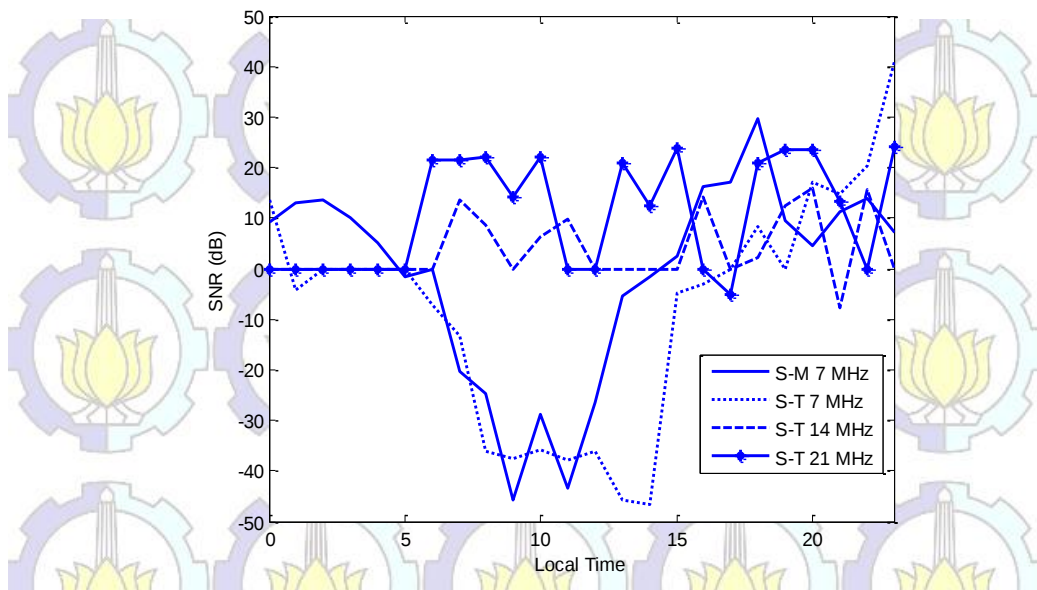
Gambar 5.9 Cdf dari SNR link Surabaya – Merauke dengan 7 MHz dan Surabaya – Ternate yang menggunakan 7 MHz, 14 MHz dan 21 MHz sebagai kemungkinan link alternatif dalam sistem diversity yang diperoleh dari hasil ray tracing pada tanggal 11 Mei 2015

LNA (Low-Noise Amplifier). Karena LNA yang dipergunakan dalam pengukuran adalah ZFL-1000LN, maka berdasarkan data sheet dari LNA tersebut, noise figure dinyatakan sebesar 2,9 dB (MiniCircuits, 2018).

Gambar 5.9 menunjukkan cdf dari SNR dari hasil ray tracing yang dilakukan pada tanggal 11 Mei 2015, sedangkan Gambar 5.10 adalah cdf dari SNR yang dilakukan pada tanggal 11 September 2015. Dari dua gambar tersebut dapat ditentukan *diversity* gain dan pengurangan probabilitas outage yang dihasilkan oleh sistem *diversity* jika dibandingkan dengan penggunaan sistem *link* tunggal. Jika probabilitas outage dianggap 0,3, dari Gambar 5.9 diketahui bahwa dengan menggunakan teknik *diversity* terjadi penambahan SNR yang diterima, yaitu dari 50 dB untuk *link* tunggal menjadi antara 66 dB hingga 70 dB untuk *link* dengan sistem *diversity*, yang menggunakan *link* Surabaya – Ternate dengan frekuensi 7 MHz, 14 MHz dan 21 MHz sebagai *link* alternatif, sehingga terjadi *Diversity Gain* sebesar 16-20 dB. Pada Gambar 5.10 yang merupakan hasil ray tracing tanggal 11 September 2015 diperoleh *Diversity Gain* sebesar 7 dB untuk *link* alternatif 14 MHz, dan 12,5 dB untuk *link* alternatif 21 MHz.



Gambar 5.10 Cdf dari SNR link Surabaya – Merauke dengan 7 MHz dan Surabaya – Ternate yang menggunakan 7 MHz, 14 MHz dan 21 MHz sebagai kemungkinan link alternatif dalam sistem *diversity* yang diperoleh dari hasil ray tracing pada tanggal 11 September 2015



Gambar 5.11 Perubahan SNR dari link utama dan link alternatif tiap jam berdasarkan hasil ray tracing tanggal 11 Mei 2015

Jika probabilitas outage diobservasi pada SNR 10 dB, pada Gambar 5.9 dapat dilihat bahwa *link* tunggal menghasilkan probabilitas outage sekitar 0,22, availability-nya mencapai 0,78, kemudian probabilitas outage turun hingga 0,06 (availability 0,94) pada *diversity* dengan *link* alternatif 7 MHz, 0,08 (availability 0,92) dengan *link* alternatif 14 MHz dan 0,1 (availability 0,9) dengan *link* alternatif 21 MHz. Kemudian jika dilihat berdasarkan Gambar 5.10, tanpa *diversity*, probabilitas outage mencapai 0,7 (availability 0,3), sedangkan berdasarkan sistem *diversity* dengan *link* 7 MHz probabilitas outage 0,43 (availability 0,57), 0,5 (availability 0,5) dengan *link* alternatif 14 MHz dan 0,25 (availability 0,75) dengan alternatif *link* 21 MHz. Dari hasil-hasil tersebut dapat dilihat bahwa probabilitas outage dapat diturunkan, atau availability dapat ditingkatkan dengan menggunakan teknik *diversity*.

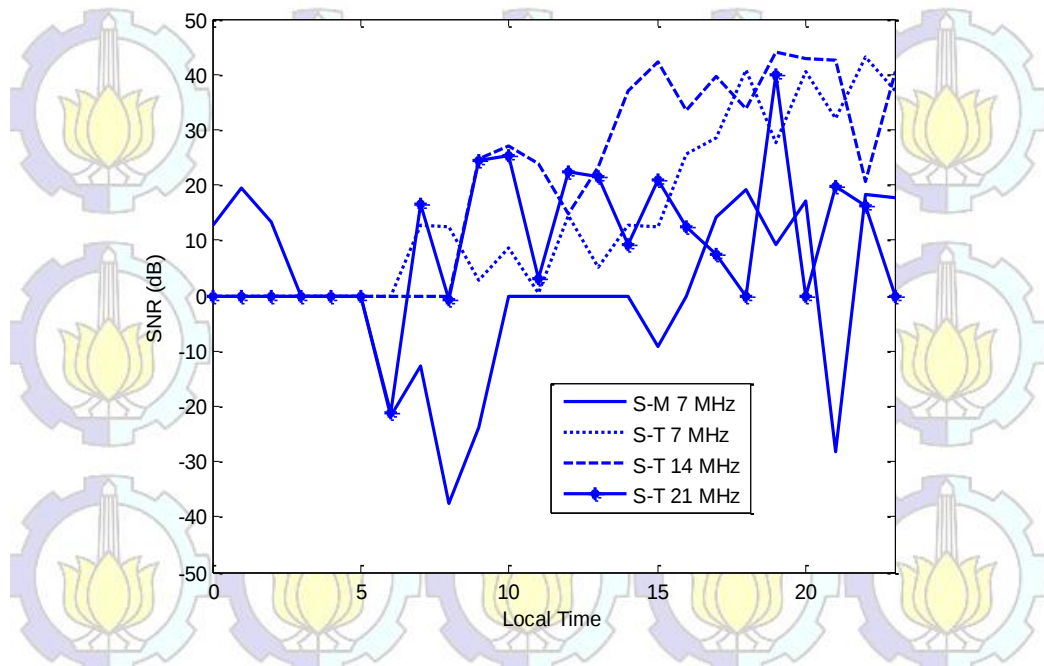
Karakteristik diurnal dari *link* utama dijadikan pertimbangan untuk mendapatkan frekuensi yang sesuai untuk *link* alternatif. Dari Gambar 5.11 dan 5.12 diketahui bahwa SNR untuk masing-masing *link* bervariasi terhadap waktu. *Link* utama Surabaya – Merauke dengan frekuensi 7 MHz bekerja dengan baik pada pukul 00.00 WIB hingga 05.00 WIB, sedangkan pada jam yang lain, frekuensi 14 MHz dan 21 MHz bekerja dengan baik sehingga sesuai untuk dijadikan *link*

alternatif. Hal ini karena setelah pukul 05.00 WIB, SNR dari *link* utama turun menjadi -40 dB disebabkan oleh frekuensi 7 MHz berada di bawah LUF. SNR akan kembali meningkat setelah malam hari.

Frekuensi 7 MHz juga berada di bawah LUF pada *link* Surabaya – Ternate sehingga tidak dipergunakan sebagai *link* alternatif. Selain itu, berdasarkan *t-test* diperoleh hasil bahwa SNR dari *site diversity* dengan *link* Surabaya – Ternate dengan frekuensi 7 MHz memiliki nilai lebih kecil dibanding dengan SNR pada *link* yang sama dengan frekuensi 14 MHz. Kemudian, *t-test* dilakukan juga untuk memilih frekuensi dari *link* alternatif, apakah 14 MHz dan 21 MHz. Hasil *t-test* tersebut menunjukkan bahwa SNR yang dihasilkan dari kedua *link* alternatif tersebut memiliki nilai yang sama, sehingga kedua frekuensi tersebut dapat dipergunakan sebagai *link* alternatif untuk *link* Surabaya – Merauke dengan frekuensi 7 MHz.

5.4 Sintesis

Pada section sebelumnya telah dihitung koefisien korelasi tegangan antara *link* Surabaya – Merauke dengan frekuensi 7 MHz dengan *link* Surabaya – Ternate



Gambar 5.12 Perubahan SNR dari link utama dan link alternatif tiap jam berdasarkan hasil ray tracing tanggal 11 September 2015

dengan frekuensi 7 MHz, 14 MHz, dan 21 MHz. Dari hasil perhitungan didapatkan hasil bahwa *link* Surabaya – Merauke memiliki korelasi yang rendah dengan *link* Surabaya – Ternate dengan semua frekuensi yang telah ditetapkan.

Tegangan yang dikorelasikan terdiri dari dua komponen yaitu magnitudo dan fase. Sebagaimana penelitian sebelumnya (Kurniawati, 2018), fase memiliki distribusi uniform, sehingga bersifat acak dengan nilai probabilitas yang sama. Oleh karena itu, faktor acak dari fase ini menyebabkan korelasi antar tegangan dari kedua *link* tersebut rendah.

Hal ini terverifikasi dengan hasil simulasi PropLab pada frekuensi 10,145 MHz yang dilakukan pada tanggal 15-17 November 2016 dan pengukuran secara langsung yang dilakukan pada tanggal 13-17 November 2017 yang juga memiliki koefisien korelasi yang rendah. Nilai korelasi antar *link* yang rendah menunjukkan bahwa kedua *link* tersebut saling independen yang menjadi salah satu faktor dapat dipergunakannya *site diversity* untuk meningkatkan *diversity gain* sebuah *link* nirkabel.

Link Surabaya – Merauke dengan frekuensi 7 MHz dipergunakan sebagai *link* utama sebab berdasarkan grafik MUF, frekuensi tersebut selama 24 jam berada di bawah MUF sehingga tidak ada yang diteruskan ke atmosfer. Sebagai alternatif *link* alternatif, dipergunakan *link* Surabaya – Ternate dengan frekuensi 7 MHz, 14 MHz dan 21 MHz. Dari penelitian ini, diketahui bahwa penggunaan *site diversity* ini dapat dipergunakan untuk meningkatkan *Diversity Gain* dan menurunkan *Probabilitas Outage*.

Siang hari frekuensi 7 MHz berada di bawah LUF sehingga terjadi penurunan nilai SNR, kemudian naik lagi pada malam hari. Oleh karena itu, frekuensi yang dipergunakan sebagai *link* alternatif adalah yang memiliki karakteristik yang berbeda dengan frekuensi 7 MHz, yaitu frekuensi yang berada diatas LUF pada siang hari, dalam hal ini adalah frekuensi 14 MHz dan 21 MHz. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 5.10 dan 5.11 bahwa pada siang hari SNR untuk frekuensi 7 MHz turun hingga -40 dB, sehingga pada saat ini diperlukan *link* alternatif yang memiliki SNR tinggi pada siang hari. Dari hasil t-test diperoleh hasil bahwa *link* yang dapat

dipergunakan sebagai *link* alternatif berdasarkan karakteristik diurnal *link* utama adalah *link* Surabaya – Ternate dengan frekuensi 14 MHz atau 21 MHz.

5.5 Publikasi

Penelitian ini telah diterima pada Jurnal Internasional International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP) terindeks Scopus dengan judul makalah Spatial Correlation and *Diversity* of Low-Latitude Multipath Multimode HF *Skywave* Radio Channels dan akan diterbitkan untuk edisi April 2019.



BAB 6

Kesimpulan dan Saran

6.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

1. Melalui penelitian ini telah dimodelkan secara statistik parameter respon impuls kanal yang rms delay spread, channel gain, dan pergeseran fase. Model statistik ini dihasilkan dari simulasi ray tracing dan diverifikasi dengan pengukuran langsung. Dari hasil penelitian diketahui bahwa channel gain berdistribusi Rayleigh, fase berdistribusi uniform, sedangkan rms delay spread dan maximum excess delay masing-masing berdistribusi Rayleigh dan Gaussian. Hasil penelitian ini memiliki panjang rms delay spread rata-rata 0,013 ms dan panjang maksimum 0,06 ms sehingga laju simbol maksimum yang dapat dilalui sebesar 16,67 kS/s
2. Model respon impuls kanal HF yang dipergunakan kali ini memasukkan faktor sudut elevasi sebagai salah satu parameternya. Sudut elevasi menyebabkan lintasan-lintasan yang menyusun power delay profile membentuk cluster atau berkelompok berdasarkan besar excess delay-nya. Besar excess delay tergantung pada mode dari lintasan yang dibangkitkan. Cluster I terdiri dari excess delay dengan panjang 0-100 ms disusun oleh lintasan-lintasan dengan mode 2F dan 3F dengan sudut elevasi masing-masing adalah $12,8^{\circ}$ - 21° dan $19,8^{\circ}$ - $30,4^{\circ}$. Cluster II terdiri dari excess delay sepanjang 100-500 ms yang disusun oleh lintasan-lintasan dengan mode 2F dan 3F dengan sudut elevasi masing-masing adalah $12,6^{\circ}$ - $20,8^{\circ}$ dan $19,7^{\circ}$ - $30,1^{\circ}$. Sedangkan cluster III berisi lintasan dengan excess delay 500-1300 ms disusun atas lintasan-lintasan dengan mode 4F dan sudut elevasi $41,1^{\circ}$ - $41,5^{\circ}$.
3. Jika dua buah link terpisah dengan jarak yang jauh, maka kedua link tersebut akan memiliki korelasi spasial yang rendah, sebab korelasi merupakan penjumlahan fase yang bersifat acak dan tidak berkorelasi. Link Surabaya-

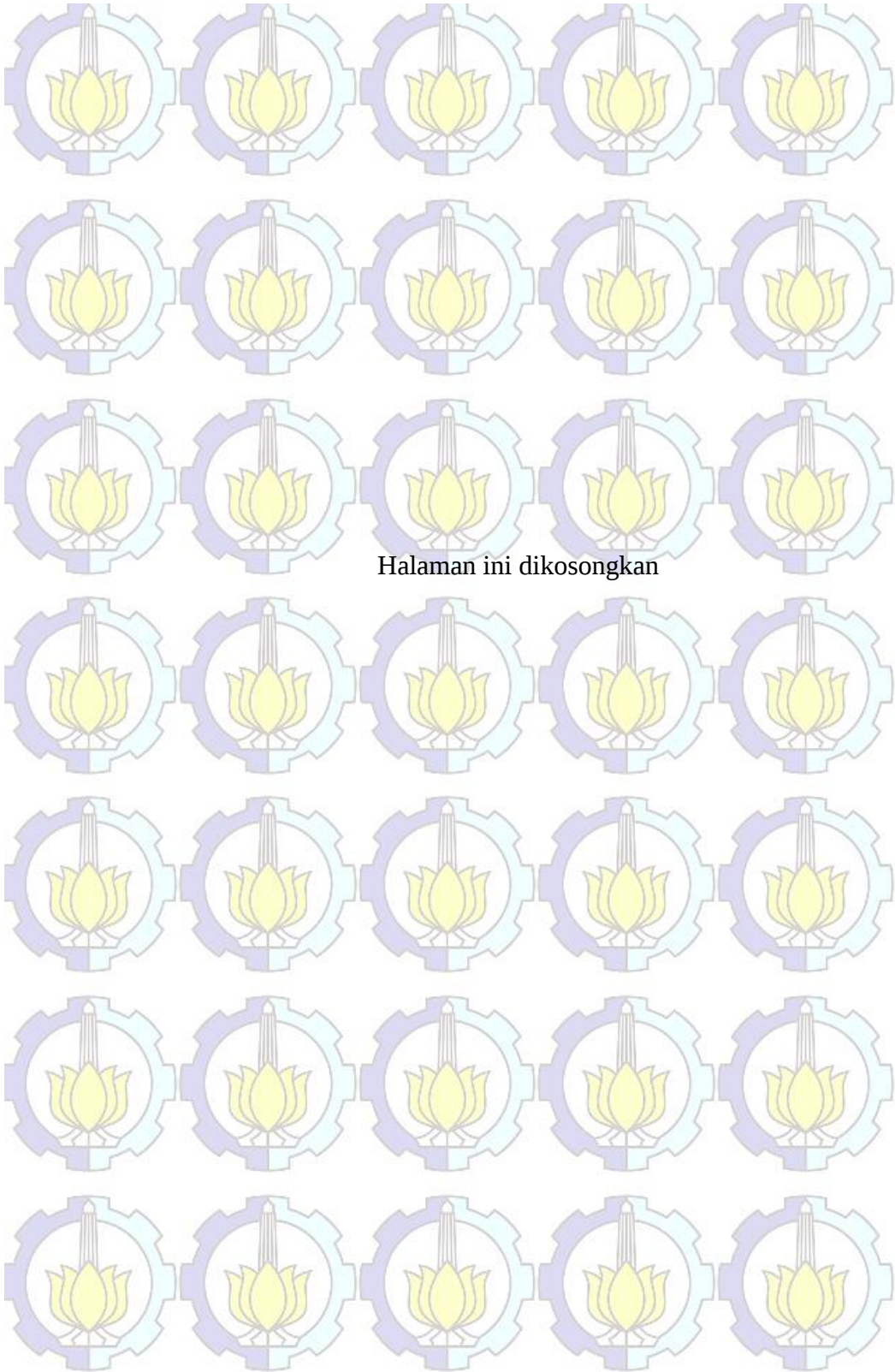
Merauke dengan frekuensi 7 MHz yang dipilih sebagai link utama memiliki koefisien korelasi dengan link Surabaya-Ternate dengan frekuensi 7 MHz sebesar -0,054, 0,039 dengan frekuensi 14 MHz dan -0,049 dengan frekuensi 21 MHz. Kedua link tersebut terpisah sejauh 1900 km. Hal ini juga diverifikasi dengan hasil simulasi pada kedua link pada tanggal yang berbeda dengan frekuensi 10,145 MHz dimana hasil koefisien korelasi adalah 0,06. Hasil pengukuran langsung juga menunjukkan bahwa pada siang hari koefisien korelasi adalah 0,56 dan malam hari -0,07 sehingga korelasi total adalah 0,18. Jika kedua link tidak berkorelasi, maka site diversity dapat lebih efektif diaplikasikan pada kedua link tersebut untuk meningkatkan diversity gain dan menurunkan probabilitas outage.

4. Site diversity dapat dipergunakan untuk meningkatkan diversity gain dan menurunkan probabilitas outage dari suatu sistem komunikasi radio HF jarak jauh. Dari cdf SNR diketahui bahwa jika probabilitas outage diasumsikan sama dengan 0,3, maka diperoleh SNR tanpa diversity sebesar 50 dB, sedangkan jika menggunakan link alternatif link Surabaya-Ternate diperoleh SNR sebesar 66 dB-70 dB, dan terjadi peningkatan diversity gain sebesar 16-20 dB. Jika probabilitas outage diamati pada SNR 10 dB, maka link tunggal memiliki probabilitas terjadi outage sebesar 0,22, sedangkan jika menggunakan diversity dengan link Surabaya-Ternate dengan frekuensi 7 MHz, probabilitas outage menjadi 0,06, dengan frekuensi 14 MHz menjadi 0,08 dan dengan frekuensi 21 MHz menjadi 0,1.
5. Pemilihan frekuensi yang sesuai untuk link alternatif adalah dengan memilih frekuensi yang memiliki variasi diurnal yang berlawanan dari frekuensi yang dipergunakan pada link utama sehingga ketika link utama mengalami outage, maka sinyal dapat dikirimkan melalui link alternatif, atau joint space frequency diversity.

6.2. Saran

Beberapa hal yang dapat disarankan berkaitan dengan tindak lanjut penelitian ini adalah :

1. Proplab yang dipergunakan untuk simulasi menggunakan model ionosfer dari IRI, yang sebagian besar datanya diambil di daerah lintang menengah Eropa dan Amerika, dan sedikit data yang berasal dari lintang rendah. Oleh karena itu, untuk menghasilkan simulasi yang mendekati kondisi nyata lapisan ionosfer daerah lintang rendah seharusnya dipergunakan model ionosfer yang mengakomodasi karakteristik khusus daerah lintang rendah
2. Link yang dipergunakan untuk pemodelan statistik respon impuls selanjutnya adalah link yang tegak lurus dengan garis (transequatorial) atau yang membentuk sudut tertentu untuk melihat pengaruh garis ekuator terhadap respon impuls kanal radio HF
3. Setelah site diversity dapat dicoba diaplikasikan komunikasi kooperatif untuk meningkatkan availabilitas kanal radio HF di daerah lintang rendah
4. Site diversity dapat diaplikasikan pada link-link yang lain dan dengan data pengamatan yang lebih banyak, misalnya dengan link-link yang telah dibangun oleh ALE yang dioperasikan oleh Lapan.
5. Power Delay Profile yang diterima dapat dipergunakan untuk menghitung panjang lintasan yang dilalui sesungguhnya dari relative delay yang diterima yang selanjutnya dapat dipergunakan untuk menentukan panjang lapisan ionosfer yang sesungguhnya



Daftar Pustaka

- Abraham, L.G., Clune, M.I, dkk (1989), "Stationarity of Wideband HF Noise After Interference Excision", *IEEE Military Communication Conference*, pp. 840-845 vol.3
- Angling, M., Cannon, PS, (1998), "Measurements of Doppler and Multipath Spread on Oblique High-Latitude HF Paths and Their Use in Characterizing Data Modem Performance", *Radio Science*, Volume 3 : 1, pp. 97-107
- Akinribido, B.A. (2003), "HF Propagation in Tropical Region : Nigerian Air Space, A Case Study", *Ninth International Conference on HF Radio Systems and Techniques*, Bath, UK
- Atulkar, R., Bharwaj, S., dkk (2014), "Geomagnetic disturbances and its impact on ionospheric critical frequency (foF2) at high, mid and low latitude region", *American Journal of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 2, No.6, pp. 61-65
- Australian Government Beureau of Meteorology, *Monthly Sunspot Number*. [Online]. Available : www.sws.bom.gov.au/Solar/1/6
- Baker, P. (1971), "Spatial Correlation Measurements on One-Hop HF Radio Waves", *IEEE Transactions on Antenna and Propagations*, Volume 19 (Issue 6), pp.793 – 794
- Barsoum, Yosry A., Niessen, Chris A, dkk (1991), "Preliminary Measurement of The Wideband HF Groundwave Channel", *IEEE Military Communication Conference*, pp. 220-225, vol.1
- Bilitza, D., Rawer K, dkk (1993), "International Reference Ionosphere - Past, Present and Future: I. Electron Density", *Advanced in Space Research* 13:3, pp. 3-13
- Bilitza, D, McKinnell, A.L, dkk (2011), "International Reference Ionosphere Today and In The Future", *Journal of Geodesy* 85:12, pp. 909-920
- Becker-Guedes F, Sahai Y., dkk (2004), "Geomagnetic Storm and Equatorial Spread-F", *Annales Geophysicae* 22, pp. 3231-3239
- Bello, PA (1965), "Selective Fading Limitations of the Kathryn Modem and Some System Design Considerations", *IEEE Transactions on Communication Technology*, vol. COM-13, pp. 320-333
- Brousseau, C., Parion, P., Bertel, L (1999), "Possible Use of The LOCAP I Ionospheric Software to Digital Communication", *Phys. Chem. Earth*, 24,4, pp.339 - 342
- Budden, KG (1952), "The Teory of The Limiting Polarization of Radio Waves Reflected From The Ionosphere", *Proc. Royal Society* 215 (1121), 215-233

- Budden, KG (1985), *The Propagation of Radio Waves*, Cambridge University Press, Cambridge
- Cannon, Paul S., Angling, Matthew J., Davies, dkk (2000), "Measurements of The HF Channel Scattering Function Over Thailand", *Proc International Antenna and Propagation Conference*, Davos, Switzerland
- Chen, P., Liew and, SC., Kwoh, LK. (2005), "Tsunami Damage Assessment using High Resolution Satellite Imagery : A Case Study of Aceh, Indonesia", *Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Seoul, South Korea
- Clune, M.I., Fine, P.B., dkk (1991), "Delay and Doppler Spreading Characteristics of The Wide-Bandwidth HF Channel", *Fifth International Conference on HF Radio Systems and Technique*, pp. 194-198
- Dabas, RS., Das, R.M., dkk (2004), "Study of The Equatorial and Low-Latitude Spread-F Occurrence Characteristics and Their Possible Predictions in The India Zone", *Proc URSI General Assembly and Scientific Symposium*, GP1.20
- Daly, RF. (1967), "Dispersion-limited Error Probabilities for Correlated FSK Diversity Reception", *Stanford Research Institute*, Contract DCA-100-66-C-0075, pp. 1-25
- Davies, Kenneth (1990), *Ionospheric Radio*, Peter Peregrinus Ltd, London
- Dutta, HN., Dabas, RS, dkk. (2005), "Ionospheric Perturbations over Delhi Caused by December 26, 2004 Sumatra Earthquake", *International Journal of Remote Sensing* 28:13, pp. 3141-3151
- Dyson, P.L., Bennett, J.A (1988), "A Model Of The Vertical Distribution of The Electron Concentration in The Ionosphere And Its Application to Oblique Propagation Studies", *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 50, No. 3, pp. 251-262
- Departemen Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia (2014), *Tabel Alokasi Spektrum Frekuensi Radio Indonesia*, No. 25 Tahun 2014 dari : https://jdih.kominfo.go.id/produk_hukum/unduh/id/222/peraturan+menteri+komunikasi+dan+informatika+nomor+25+tahun+2014+tanggal+18+agustus+2014/1411742740-Salinan_PM_No_25_tH_2014_TAFSRI.pdf
- Dinov, A (2019), *F Distribution Tables*, diunduh dari http://socr.ucla.edu/Applets.dir/F_Table.html pada 5 Mei 2019
- Ekawati, Sri (2011), "Analysis Occurrence of Equatorial and Low Latitude Ionospheric Scintillations Over Indonesia", *Proc XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*

- Erhel, Yvon, Lemur, Dominique, dkk (2004), "HF Radio Direction Finding Operating On A Heterogeneous Array : Principles and Experimental Validation", *Radio Science* Vol. 39, RS1003
- Ettus Research (2015), *USRP Bandwidth*, diunduh dari <http://www.ettus.com/kb/detail/usrp-bandwidth> pada 1 Januari 2015
- Gibson, AJ., Yilmaz, UM., dkk. (1995), "Characteristics of Fading of HF Signal and Noise, Intensities on Three Paths Between The United Kingdom and Turkey", *Radio Science, Volume 30, Number 3*, pp. 649 – 658
- Hausman, C., Uffelman, D.R., Walton, T.L. (1987), "Wideband High Frequency (HF) Skywave Channel Parameters From Narrowband Measurement", *IEEE Military Communication*, pp. 0898-0904
- International Amateur Radio Union (IARU), *Indonesia – Lombok Earthquake*, diunduh dari <https://www.iaru-r1.org/index.php/emergency-communications/1799-indonesia-lombok-earthquake> pada tanggal 12 Desember 2018
- International Geomagnetic Reference Field (IGRF) diunduh dari https://ngdc.noaa.gov/geomag/maps/IGRF10_GeomCoor.pdf
- Introduction to HF Propagation* diunduh dari <http://www.sws.bom.gov.au/Category/Educational/Other%20Topics/Radio%20Communication/Intro%20to%20HF%20Radio.pdf>
- Jones, R.M, Stephenson, JJ., (1975), *A Versatile Three Dimensional Ray Tracing Computer Program For Radio Wave in The Ionosphere*, Office of the Telecommunication Report 75-77, US Government Printing Office, Washington, D.C
- Kim, Tae Kyun (2015), "T test as a Parametric Statistic", *Korean J Anesthesiol*, Vol. 68(6), pp. 540-546
- Kishorbai, V.Y., Vasantbhai N.N (2017), "AON : A Survey on Emergency Communication System During A Catastrophic Disaster", *Procedia Computer Science* 115, pp. 838-845
- Kramer, J.D.R Jr., William, Ronald T. (1994), "High Frequency Atmospheric Noise Mitigation", *IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing*, pp. VI/101 – VI/104 vol 6
- Kurniawati, I., Hendranto, G., Wirawan, Taufik, M. (2018), "Statistical Modeling of Low-Latitude Long-Distance HF Ionospheric Multi-Mode Channels", *Progress in Electromagnetics Research M*, Volume 64, 23-33, pp 77 – 86
- Lacaze, Bernard (1998), "Modeling The HF Channel with Gaussian Random Delay", *Signal Processing* (64), pp. 215 - 220

- Lemmon, J.J, Behm, C.D (1991), *Wideband HF Noise/Interference Modelling – Part I: First Order Statistics*, NTIA Report 91-277, (NTIS Order no. PB 91-208454)
- Low Noise Amplifier ZFL-1000LN+, <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZFL-1000LN.pdf>, accessed August 20, 2018
- Mastrangelo, John F., Lemmon, John J., dkk (1997), “A New Wideband High Frequency Channel Simulation System”, *IEEE Transaction on Communication*, Vol. 45 No.1, pp. 26-34
- Maxim, Hiram Percy (1936), *The Radio Amateur’s Handbook Fourteenth Edition*, The American Radio Relay League, Inc., West Harford, Connecticut
- McNamara, Leo (1991), *The Ionosphere: Communications, Surveillance, and Direction Finding*, Krieger Publishing Company, Malabar Florida
- National Instruments (NI) (2012), NI USRP-2922 Block Diagram, diunduh dari http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/373380B-01/usrphelp/2922_block_diagram/
- National Instruments (NI) (2014), Understanding Spread Spectrum for Communications, diunduh dari <http://www.ni.com/en-id/innovations/white-papers/06/understanding-spread-spectrum-for-communications.html>
- Ono, F., Ochiai, H., Myura, R. (2016), “A Wireless Relay Network Based on Unmanned Aircraft System with Rate Optimization”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 15, Issue 11, pp. 7699 - 7708
- Organisasi Amatir Radio Indonesia (ORARI), Saat Gempa dan Tsunami Melanda Donggala dan palu ORARI Terdepan Melakukan Komunikasi Darurat diunduh dari <https://orari.or.id/berita/8491-saat-gempa-dan-tsunami-melanda-donggala-palu-orari-terdepan-melakukan-komunikasi-daerurat.html> pada tanggal 12 Desember 2018
- Perry, B.D., Rifkin R.(1989), ” Measured Wideband HF Mid Latitude Channel Characteristic”, *IEEE Military Communication Conference*, pp. 822-829 Vol. 3
- Perry, B.D., and Abraham, L.G (1991), “A Wideband HF Interference and Noise Model Based on Measured Data”, *IEEE International Conference on HF Radio Systems and Techniques*
- Proakis, John D. (2008), *Digital Communication 3rd edition*, McGraw-Hill, New York
- Pusat Sains Antariksa (2013), *Buletin Data Ionosfer Regional Indonesia*, Vol. 01 No. 04, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

- Rappaport, Theodore (1996), “*Wireless Communication*”, Prentice Hall, New York
- Rawer, K, Suchy, K. (1976),”Remarks Concerning The Dispersion Equation of Electromagnetic Waves in A Magnetized Cold Plasma”, *Journal on Atmospheric and Solar Terrestrial Physics* 38, pp. 395-398
- Ratcliffe, J.A (1962), *The Magneto-Ionic Theory and Its Application to the Ionosphere*, Cambridge Univ Press, New York
- Sendonaris, A., Aazhang, B., Erkip, E. (2003), “User Cooperation Diversity Part I : System Description”, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 51, issued : 11, pp. 1927-1938
- Sezen U., Gulyaeva, TL., Arikan, F. (2017),”Online International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere (IRI-Plas) Model”, *32nd URSI General Assembly and Scientific Symposium (GASS)*, Montreal, Canada
- Sezen U., Gulyaeva, TL., Arikan, F. (2018),”Online computation of International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere (IRI-Plas) Model for Space Weather, *Geodesy and Geodynamic* 9:5, pp. 343-357
- Smith, Rasler W (1998), *Low Latitude Ionospheric Effects On Radiowave Propagation*, Dissertation, Naval Post Graduate School, Monterey, California
- Solar Terrestrial Dispatch, Proplab-Pro Version 3, 2010
- Sousa, E.S, Jovanovic, V.M, Daigneault, C., ”Delay Spread Measurement for The Digital Cellular Channel in Toronto”, *IEEE Trans. On Vehicular Technology* Vol. 43, No. 4, November 1994, pp. 837-847
- Sreeja, V., Devasia, V.,dkk (2009), “The Persistence of Equatorial Spread-F – an Analysis on Seasonal, Solar Activity and Geomagnetic Activity Aspect”, *Annales Geophysicae*, 27, pp. 503-510
- Sujoy, S., Nandi S., dkk. (2015),”Designing Delay Constrained Hybrid Ad Hoc Network Infrastructure for Post-Disaster Communication”, *Ad Hoc Network* Vol. 25 Part B, pp. 406-429
- Tanis, EA. And Hogg VA,(1997), *Probability and Statistical Inference*, Pearson
- Taricco, G., (2015), “On the Convergence of Multipath Fading Channel Gains to the Rayleigh Distribution”, *IEEE Wireless Communication Letters*, July 2015, pp. 549-552
- Tiemann, T.K., Mahbobi, M. (2010), *Introductory Business Statistics with Interactive-Spreadsheets*, Pressbooks.com
- Vastberg, A., Lundborg,B. (1997),”Superposition of Signals in Ionospheric Multipath Channels”, *Radio Science, Volume 32, Number 5*, pp 2083 – 2090

- Vilela, C., Miralles, D., dkk (2005), "A New Sounding System for HF Digital Communications From Antarctica", *Proc International Symposium on Antenna and Propagation*, Seoul, Korea
- Walpole, RE (1995), *Ilmu Peluang dan Statistika*, ITB Bandung
- Watterson, C.C., Juroshek, John R., Bensema, William D.(1970), "Experimental Confirmation of An HF Channel Model", *IEEE Transactions on Communication Technology*, Vol.-com 18, No. 6
- Williams E. (2007), *Aviation Formulary V1.43* [Online]. Available: williams.best.vwh.net/avform.html
- Witvliet, B., Van Maanen, E., dkk (2015), "Near Vertical Incidence Skywave Propagation : Elevation Angle and Optimum Antenna Height for Horizontal Dipole Antenna", *IEEE Antenna and Propagation Magazine* 57 : 1, pp. 129-146
- Yan, Zhao Wen, Wang, Gang, dkk (2011), "The HF Channel EM Parameters Under a Complex Enviroment Using The Modified RI and IGRF Model", *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, Vol.59, No. 05, pp. 1778-1783
- Yan, Zhao Wen, Zhang, Lanlan, dkk (2013), "Prediction of The HF Ionospheric Channel Stability Based On The Modified ITS Model", *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, Vol. 61 No. 06, pp. 3321-3332
- Zhou, Hao, Wen, Biyang and Wu, Shicai (2005), "Dense Radio Frequency Interference Suppression in HF Radars", *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 12, No. 5

LAMPIRAN A . SEBAGIAN HASIL PENGUKURAN

Tabel A.1 Sebagian hasil pengukuran link Surabaya- Merauke 2014

Pengukuran ke	Jam (GMT+7)	Mean ED (s)	Rms DS (s)	Max ED (s)
1	15:20:00	0.002933283	0.000127127	0.0003
1	15:20:00	0	0	0.008189
1	15:20:00	0	0	0.008189
1	15:20:00	0.005133	0	0
1	15:20:00	0.005489	0	0
1	15:20:00	0.0053004	2.29443E-05	0.000046
1	15:20:00	0.004836166	0.003010544	0.006991
1	15:20:00	0.006392659	0.001669884	0.003884
1	15:20:00	0.005671636	0.001070279	0.003146
1	15:20:00	0.003744531	0.000227491	0.000455
1	15:20:00	0.006304159	0.001634212	0.003737
1	15:20:00	0.004695889	0.002892307	0.007822
1	15:20:00	0.003714373	0.002411561	0.006732
1	15:20:00	0.001463225	0.00123721	0.002476
1	15:20:00	0.005005561	0.002537878	0.00761
2	20:30:00	0.002692088	0.002406625	0.004854
2	20:30:00	0.005699459	0.000340433	0.0008
2	20:30:00	0.003033941	0.002623463	0.005804
2	20:30:00	0.00408976	0.001772914	0.003625
2	20:30:00	0.004821908	0.002469617	0.005987
2	20:30:00	0.002773501	0.000220418	0.000647
2	20:30:00	0.002751512	0.000134925	0.00027
2	20:30:00	0.002418699	0.000929142	0.003336
2	20:30:00	0.005175507	0.001957223	0.004301
2	20:30:00			0.008189
2	20:30:00	0.007212458	0.000677404	0.001371
2	20:30:00	0.002976747	0.001673439	0.003814
2	20:30:00	0.004513778	0.002046074	0.005283
2	20:30:00	0.005402324	0.002565135	0.005973
2	20:30:00	0.002965087	0.002176335	0.005093
3	22:00:00	0.002708027	0.00179069	0.004126
3	22:00:00	0.006159435	0.001972671	0.003948
3	22:00:00	0.003068165	0.000773476	0.001963
3	22:00:00	0.003492052	0.001615151	0.007391
3	22:00:00	0.004610714	0.001662217	0.005696
3	22:00:00	0.006150901	0.00092135	0.001856

lanjutan

3	22:00:00	0.003025441	0.002827605	0.007646
3	22:00:00	0.003626107	0.002829246	0.006969
3	22:00:00	0.004585155	0.000359589	0.001048
3	22:00:00	0.004384502	0.001481134	0.003939
3	22:00:00	0.002422426	0.002416177	0.007139
3	22:00:00	0.004984728	0.002927749	0.008036
3	22:00:00	0.004441593	0.002084928	0.004714
3	22:00:00	0.005226691	0.002327867	0.005248
3	22:00:00	0.00486281	0.001779069	0.005403
4	23:00:00	0.007146	0	0
4	23:00:00	0.003682974	0.001542097	0.004552
4	23:00:00	0.003155766	0.000754095	0.00237
4	23:00:00	0.004164095	0.002184194	0.005872
4	23:00:00	0.002876561	0.002247213	0.005131
4	23:00:00	0.004323635	0.002390547	0.006194
4	23:00:00	0.002124199	0.002316185	0.007324
4	23:00:00	0.004416967	0.002250518	0.007288
4	23:00:00	0.003825652	0.002011703	0.005596
4	23:00:00	0.005422153	0.002550812	0.007708
4	23:00:00	0.002588151	0.002057193	0.005018
4	23:00:00	0.003623985	0.001463213	0.003624
4	23:00:00	0.003262557	0.00158912	0.003898
4	23:00:00	0.004570559	0.002140126	0.00559
4	23:00:00	0.005406865	0.001926088	0.004541
5	00:00:00	0.002929842	0.002563055	0.007742
5	00:00:00	0.002168324	0.001059887	0.002725
5	00:00:00	0.005407539	0.001297488	0.003284
5	00:00:00	0.004741485	0.001674187	0.00634
5	00:00:00	0.004995201	0.001154323	0.004118
5	00:00:00	0.003483172	0.002156927	0.005079
5	00:00:00	0.003574397	0.002550311	0.006036
5	00:00:00	0.005218414	0.001752313	0.006764
5	00:00:00	0.003438562	0.001807106	0.005758
5	00:00:00	0.003987683	0.002354639	0.006302
5	00:00:00	0.003477818	0.002209192	0.005833
5	00:00:00	0.002709162	0.002423021	0.006788
5	00:00:00	0.005075475	0.00168587	0.00446
5	00:00:00	0.006539414	0.000964432	0.002232
5	00:00:00	0.004288256	0.001056689	0.003326

Hasil Pengukuran Korelasi Spasial Surabaya – Merauke dan Surabaya – Ternate tanggal 15-17 Nopember 2017

Tabel A.2 Surabaya – Ternate tanggal 15 -16 Nopember 2017

No	Tanggal	jam	frekuensi (MHz)	letak frekuensi (X)	level daya (Y)
1	15-11-2017	18.20	9.06	60020	0.0505
2				59980	0.05666
3				59980	0.05001
4				60020	0.06721
1	16-11-2017	20.50	9.02	20010	0.04275
2				19999	0.05186
1		18.21	9.02	29930	0.06242
2				30100	0.04488
1		21.00	9.02	29980	0.0338
1				30000	0.003002
2		19.55	9.02	30000	0.002629
3				30000	0.005278
4				30000	0.002095
5				30000	0.0008636
1				30000	0.003194
2		20.10	9.03	30000	0.004393
3				30000	0.004665
4				30000	0.003855
5				30000	0.001078
1		20.50	9.03	30000	0.03308
2				30000	0.04773
1		21.37	9.03	30000	0.001454
2				30000	0.003463
3				30000	0.0008351
4				30000	0.003398
5				30000	0.003102
1		14.22	10.08	20100	0.003339
2				20010	0.001787
3				20010	0.005742
4				20010	0.00257
5				20010	0.006391

Tabel A.3 Surabaya – Ternate tanggal 17 Nopember 2017

No	Tanggal	jam	frekuensi (MHz)	letak frekuensi (X)	level daya (Y)
1		17.05		19990	0.003186
2				19990	0.001214
3				20010	0.002144
4				20010	0.002142
5				20010	0.002797
1		17.21		19990	0.002589
2				19990	0.002283
3				20010	0.00177
4				20010	0.002374
5				19990	0.001199
1		18.20	9.17	19990	0.00438
2				20010	0.001681
3				19990	0.002005
4				20010	0.00154
5				19990	0.001346
1	17-11-2018	18.30		19990	0.00371
2				20010	0.003039
3				20010	0.002568
4				19990	0.003389
5				20010	0.003443
1		14.40	10.13	19990	0.003861
2				20010	0.004948
3				19990	0.001933
4				20010	0.002206
5				20010	0.003505
1		12.24	10.13	19990	0.002246
2				19990	0.002207
3				20010	0.002133
4				19990	0.00139
5				20010	0.001726
1		19.19	10.087	19990	0.001908
2				20010	0.00343
3				19990	0.002494
4				19990	0.001971
5				20010	0.002115

Lanjutan

No	Tanggal	jam	frekuensi (MHz)	letak frekuensi (X)	level daya (Y)
1	17-11-2017	19.32		19990	0.001743
2				19990	0.002391
3				19990	0.002741
4				19990	0.001821
5				20010	0.004577
1		20.32		19990	0.003261
2				20010	0.001775
3				20010	0.002345
4				19990	0.002065
5				19990	0.004612
1		14.00	10.181	10010	0.002619
2				10010	0.001211
3				10010	0.0007755
4				10010	0.003224
5				10010	0.002762
1		15.10	10.13	30000	0.01042
2				30000	0.01415
3				30000	0.009719
4				30000	0.009646
5				30000	0.002144

Tabel A.4. Surabaya – Merauke tanggal 15 Nopember 2017

No	Tanggal	Jam	Frekuensi (MHz)	Letak Frekuensi (X)	Level Daya (Y)
1	15-11-2017	15.45	9.08	79990	0.006088
2				80000	0.006096
3				80000	0.005101
4				79990	0.002692
5				79990	0.005457
1		15.00	10.099	99000	0.006753
2				99000	0.01211
3				99000	0.007492
4				99000	0.002427
5				99000	0.001556

Tabel A.5. Surabaya – Merauke tanggal 16 Nopember 2017

No	Tanggal	Jam	Frekuensi (MHz)	Letak Frekuensi (X)	Level Daya (Y)
1	16-11-2017	19.00 (AM)	9.03	30000	0.002533
2				30000	0.001872
3				30000	0.001809
4				30000	0.001912
5				30000	0.003249
1		20.00		30000	0.001361
2				30000	0.00392
3				30000	0.0007998
4				30000	0.002985
5				30000	0.001512
1		20.30		30000	0.002767
2				30000	0.003588
3				30000	0.003369
4				30000	0.002898
5				30000	0.001659
1		19.30		30000	0.003363
2				30000	0.003083
3				30000	0.001456
4				30000	0.0017
5				30000	0.004992
1		16.30	9.06	60000	0.001718
2				60000	0.001003
3				60000	0.00337
4				60000	0.002277
5				60000	0.003636
1		14.00	10.08	30000	0.001798
2				30000	0.003729
3				30000	0.00295
4				30000	0.00201
5				30010	0.004044
1		14.30		30010	0.005139
2				30000	0.004813
3				30010	0.00776
4				30030	0.006683
5				30010	0.009463

Tabel A.6. Surabaya – Merauke tanggal 17 Nopember 2017

No	Tanggal	Jam	Frekuensi (MHz)	Letak Frekuensi (X)	Level Daya (Y)
1	17-11-2017	19.17	10.097	30720	0.008904
2				30720	0.01831
3				30720	0.01411
4				30720	0.003603
5				30720	0.01385
1		20.16	10.087	30720	0.01166
2				30720	0.01022
3				30720	0.005451
4				30720	0.005488
5				30720	0.009431
1		20.34		30720	0.01392
2				30720	0.01416
3				30720	0.01742
4				30720	0.0222
5				30720	0.01881
1		14.30	10.13	30010	0.0072
2				30010	0.009211
3				30010	0.007763
4				30010	0.004101
5				30010	0.005829
1		15.00		30010	0.01445
2				30010	0.009073
3				30010	0.004321
4				30010	0.008657
5				30010	0.003132
1		19.25	10.087	50010	0.004777
2				50010	0.002064
3				50010	0.001109
4				50010	0.008392
5				50000	0.005678
1		19.45		56990	0.002531
2				57000	0.003329
3				56990	0.01872
4				56990	0.03006
5				56990	0.03221

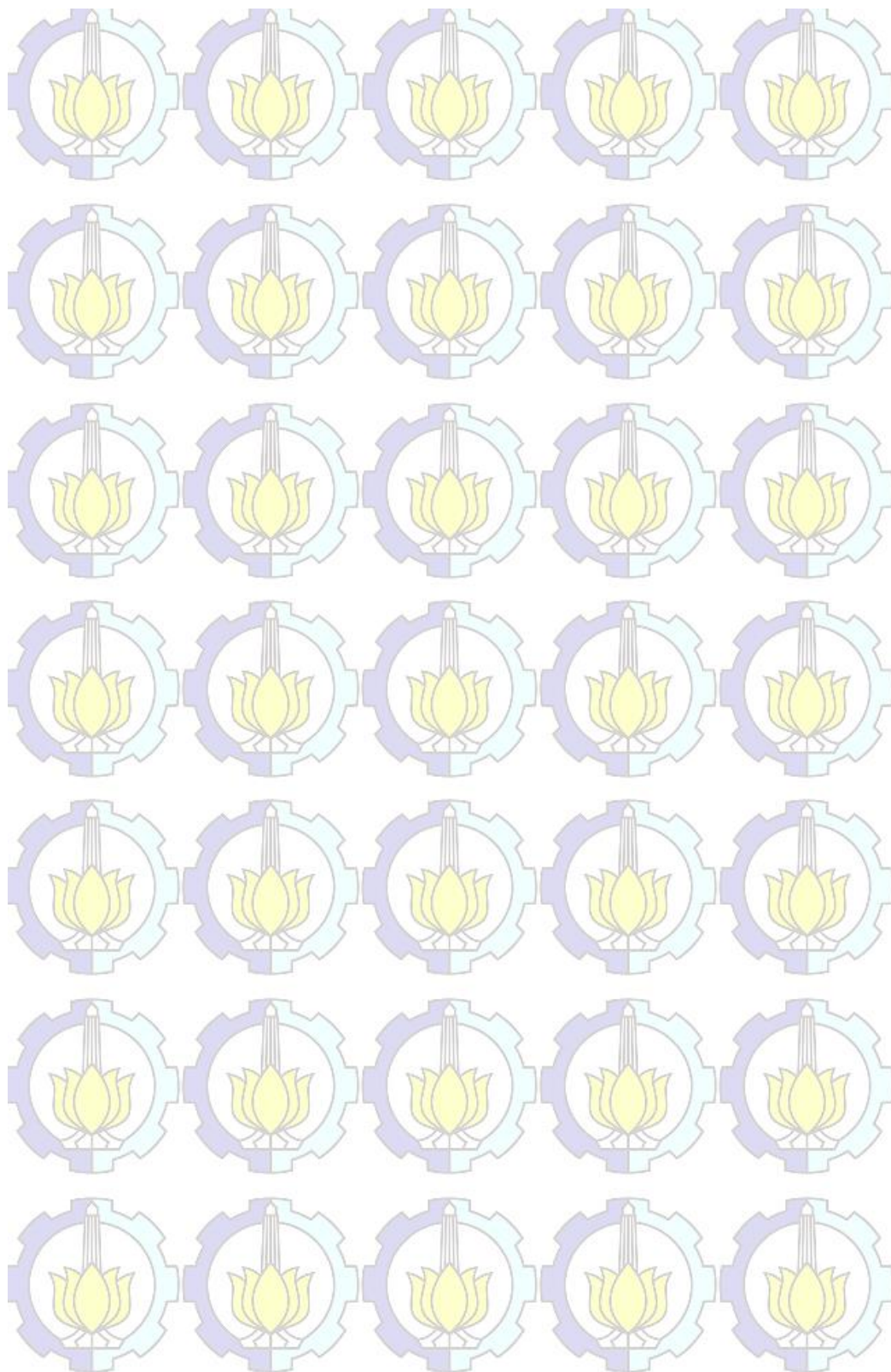
Lanjutan

No	Tanggal	Jam	Frekuensi (MHz)	Letak Frekuensi (X)	Level Daya (Y)
1	17-11-2017	18.22	9.17	69990	0.001067
2				70020	0.00629
3				70010	0.004602
4				69990	0.002437
5				70010	0.005076
1		18.30		69990	0.005604
2				70010	0.004026
3				70020	0.007038
4				70010	0.003618
5				70010	0.003514

Tabel A.7 Sebagian Data IQ Hasil Pengukuran Surabaya – Merauke tanggal 17 Nopember 2017 Pukul 21.17 WIB

IQ Graph

Timestamp	01/01/1904 07:00	Timestamp	01/01/1904 07:00
Interval	5.00E-06	Interval	5.00E-06
0	0	0	0
5.00E-06	-3.05E-05	5.00E-06	0
1.00E-05	3.05E-05	1.00E-05	0
1.50E-05	-3.05E-05	1.50E-05	0
2.00E-05	3.05E-05	2.00E-05	0
2.50E-05	-3.05E-05	2.50E-05	0
3.00E-05	0	3.00E-05	-3.05E-05
3.50E-05	0	3.50E-05	0
4.00E-05	0	4.00E-05	0
4.50E-05	0	4.50E-05	0
5.00E-05	0	5.00E-05	3.05E-05
5.50E-05	0	5.50E-05	-3.05E-05
6.00E-05	-3.05E-05	6.00E-05	0
6.50E-05	0	6.50E-05	0
7.00E-05	0	7.00E-05	0
7.50E-05	0	7.50E-05	0
8.00E-05	0	8.00E-05	0
8.50E-05	-3.05E-05	8.50E-05	0
9.00E-05	3.05E-05	9.00E-05	0
9.50E-05	0	9.50E-05	0
0.0001	-3.05E-05	0.0001	-3.05E-05



LAMPIRAN B. Hasil Simulasi

Tabel B.1 Channel Gain, Rms Delay Spread, Maximum Excess Delay Hasil Simulasi

Tanggal 11 Mei 2015

Jam (UTC)	Jam (WIB)	S (Channel Gain)	Rms DS (ms)	Max ED (ms)
00.00	07:00	1.10258E-05	0.484224573	1.134718423
01.00	08:00	Tidak ada sinyal yang diterima		
02.00	09:00	6.7975E-06	0.036058997	0.119932453
03.00	10:00	Tidak ada sinyal yang diterima		
04.00	11:00	5.70358E-06	0.020926194	0.06619222
05.00	12:00	3.95298E-06	0.031188415	0.062471517
06.00	13:00	Tidak ada sinyal yang diterima		
07.00	14:00	1.76329E-05	0.23801719	0.48292643
08.00	15:00	Tidak ada sinyal yang diterima		
09.00	16:00	2.19263E-05	0.058706394	0.211223143
10.00	17:00	2.26368E-05	0.034828948	0.108654787
11.00	18:00	2.54582E-05	0.03912208	0.111754557
12.00	19:00	3.17808E-05	0.042736502	0.123276367
13.00	20:00	2.85484E-05	0.04279058	0.137683107
14.00	21:00	Tidak ada sinyal yang diterima		
15.00	22:00			
16.00	23:00	3.97553E-05	0.042709392	0.12132243
17.00	00:00	Tidak ada sinyal yang diterima		
18.00	01:00			
19.00	02:00			
20.00	03:00			
21.00	04:00			
22.00	05:00			
23.00	06:00	2.26923E-05	0.034649324	0.09641927

Tanggal 11 September 2015

Jam (UTC)	Jam (WIB)	S (Channel Gain)	Rms DS (ms)	Max ED (ms)
00.00	07:00	1.05152E-05	0.04229773	0.12250244
01.00	08:00	8.33873E-06	0.059774266	0.192810873
02.00	09:00	4.2578E-06	0.045763662	0.091529133
03.00	10:00	3.07167E-06	0.049354624	0.494039713
04.00	11:00	5.24529E-06	0.014383068	0.03188151
05.00	12:00	Tidak ada sinyal yang diterima		
06.00	13:00	8.25505E-06	0.036369572	0.103720703
07.00	14:00	1.16963E-05	0.05305069	0.17402588
08.00	15:00	1.50735E-05	0.05698219	0.167578937

Lanjutan

09.00	16:00	Tidak ada sinyal yang diterima		
10.00	17:00	3.31126E-05	0.460090089	1.160542807
11.00	18:00	3.50171E-05	0.453252152	1.03702637
12.00	19:00	3.40079E-05	0.418934271	1.040249023
13.00	20:00	3.02649E-05	0.511365656	1.205367027
14.00	21:00	1.97348E-05	0.040838625	0.108297527
15.00	22:00	2.31742E-05	0.025435733	0.07339925
16.00	23:00	Tidak ada sinyal yang diterima		
17.00	00:00			
18.00	01:00			
19.00	02:00			
20.00	03:00			
21.00	04:00			
22.00	05:00			
23.00	06:00	1.94085E-05	0.036825952	0.123361817

Tabel B.2 Mode, Kuat Sinyal dan Fase Hasil Simulasi link Surabaya – Merauke frekuensi 7 MHz untuk tanggal 11 Mei 2015

Time (LT)	Modes	α	θ
06.00			
07.00	4F O	1.78123E-08	124.178643
	4F X	1.46746E-08	49.95747
08.00	4F O	9.44264E-09	193.009233
	4F X	7.4642E-09	11.462358
	6F O	1.51156E-10	249.343374
	6F X	9.71085E-11	93.733623
09.00	5F O	1.42091E-09	189.421875
	5F X	1.00941E-09	325.913394
	6F O	1.57325E-10	324.700869
	6F X	9.70168E-11	192.818892
10.00	4F O	7.00653E-09	113.879721
	4F X	5.39353E-09	169.160595
	6F O	1.55509E-10	124.589781
	6F X	9.15011E-11	173.661138
11.00	5F O	1.35925E-09	53.785971
	5F X	9.58326E-10	174.444477

Lanjutan

	7F O	6.20338E-12	355.65249
	7F X	3.44612E-12	35.327373
12.00	4F O	7.6667E-09	281.698404
	4F X	5.86736E-09	124.120488
	6F O	1.58076E-10	70.41189
	6F X	9.45939E-11	213.038394
13.00	4F O	1.08488E-07	42.884985
	4F X	8.62882E-08	12.855615
	6F O	1.6864E-09	48.493608
	6F X	1.08285E-09	275.225727
14.00	4F O	1.35479E-07	207.212901
	4F X	1.129E-07	44.518257
15.00	4F O	2.07312E-07	11.390625
	4F X	1.85446E-07	117.628008
16.00	3F O	1.01558E-06	213.472134
	3F X	8.31711E-07	288.451245
	5F O	9.61138E-09	53.785971
	5F X	6.77639E-09	174.444477
17.00	5F O	3.77464E-06	252.096006
	5F X	3.51575E-06	142.691469
Nighttime			
18.00	5F O	4.84405E-06	167.418867
	5F X	4.71705E-06	179.082846
19.00	2F O	8.45695E-07	55.134024
	2F X	8.40906E-07	158.985879
	3F O	8.0681E-07	321.646098
	3F X	4.43011E-07	69.756225
	4F O	7.5208E-07	280.847886
	4F X	7.43719E-07	341.635152
20.00	3F O	8.17491E-07	117.947652
	3F X	8.16583E-07	14.855406
21.00	2F O	8.66115E-07	33.110127
	2F X	8.6247E-07	56.364639
22.00	2F O	8.63295E-07	315.511113
	2F X	8.59687E-07	21.476103
23.00	3F O	8.17837E-07	76.339029
	3F X	8.1451E-07	218.521098
00.00	3F O	8.16924E-07	125.902866
	3F X	8.14788E-07	148.928643

<i>Lanjutan</i>				
01.00	2F O	8.6344E-07	156.540483	
	2F X	5.25006E-07	249.891753	
02.00	2F O	8.5559E-07	87.829629	
	2F X	8.56438E-07	189.691845	
03.00	2F O	8.37565E-07	302.761656	
	2F X	8.3351E-07	122.556108	
04.00	4F O	5.72202E-07	232.572276	
	4F X	5.74926E-07	71.4375	
05.00	4F O	1.43989E-07	107.275401	
	4F X	1.20641E-07	93.648897	

Tabel B.3 Mode, Kuat Sinyal dan Fase Hasil Simulasi link Surabaya – Ternate frekuensi 7 MHz untuk tanggal 11 Mei 2015

Time (LT)	Modes	α	θ
Daytime			
06.00	Tidak ada sinyal yang diterima		
07.00	3F O	1.07672E-06	293.218374
	3F X	7.68935E-07	276.120864
08.00	3F O	7.57908E-07	331.136301
	3F X	4.82168E-07	331.837713
09.00	3F X	4.19328E-07	351.613908
	4F O	6.13931E-08	292.641753
	4F X	1.75169E-08	289.806087
10.00	3F O	6.8673E-07	250.638369
	3F X	4.10251E-07	296.334141
11.00	3F O	6.7435E-07	260.287851
	3F X	4.01492E-07	43.294431
12.00	2F X	6.10439E-07	30.46875
	3F O	6.79198E-07	282.299319
	3F X	4.05932E-07	318.58905
13.00	3F O	6.99873E-07	26.006016
	3F X	4.25749E-07	317.365767
	4F O	2.91983E-08	35.974599
	4F X	1.67086E-08	33.544995
14.00	3F O	7.86771E-07	109.542906
	3F X	4.99383E-07	259.618608

lanjutan

15.00	3F O	1.21029E-06	3.710478
	3F X	8.7575E-07	150.21405
16.00	2F O	4.53487E-06	184.894218
	3F O	6.96783E-06	268.865976
17.00	3F O	8.25499E-06	359.198028
	3F X	7.52599E-06	179.145513
Nighttime			
18.00	1F O	2.42788E-05	274.807779
	1F X	2.41397E-05	88.463298
	2F O	1.07877E-05	174.206718
	2F X	1.06764E-05	154.046499
	3F O	1.94534E-05	298.11936
	3F X	1.93019E-05	222.577749
19.00	2F O	1.09799E-05	8.384985002
	2F X	1.09047E-05	100.094502
	3F O	1.90214E-05	248.440884
	3F X	1.88926E-05	358.427724
20.00	3F O	1.93147E-05	296.288979
	3F X	1.91602E-05	75.022017
21.00	3F O	1.95443E-05	217.3656
	3F X	1.94336E-05	257.634024
22.00	3F O	1.97887E-05	119.854278
	3F X	1.97331E-05	201.43374
23.00	3F O	1.94479E-05	330.291987
00.00	2F O	1.0999E-05	315.442764
	2F X	1.10791E-05	299.245488
01.00	2F O	1.02255E-05	223.041987
02.00	Tidak ada sinyal yang diterima		
03.00			
04.00			
05.00			

LAMPIRAN C Foto-Foto Kegiatan

Gambar C.1 Pelaksanaan Pengukuran di Surabaya



Gambar C.2 Pemasangan Antena Monopole di Gedung B lantai 4 Departemen Teknik Elektro ITS Surabaya



Gambar C.3 Lokasi Pengukuran di Lab Teknik Elektro, Universitas Musamus, Merauke



Gambar C.4 Pemasangan antenna dipole diatas atap Lab Teknik Elektro, Universitas Musamus, Merauke



Gambar C.5 Persiapan pemasangan antenna di Universitas Khairun, Ternate

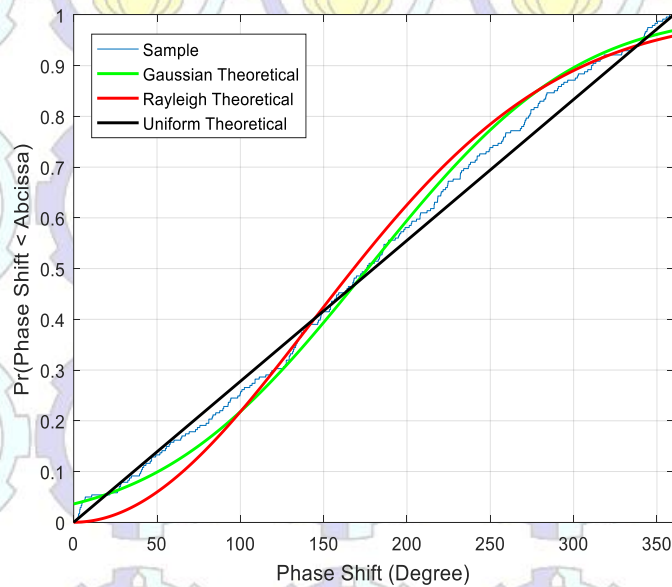


Gambar C.6 Pelaksanaan pengukuran di Universitas Khairun, Ternate



LAMPIRAN D

Fitting Distribusi dengan Kolmogorov-Smirnov



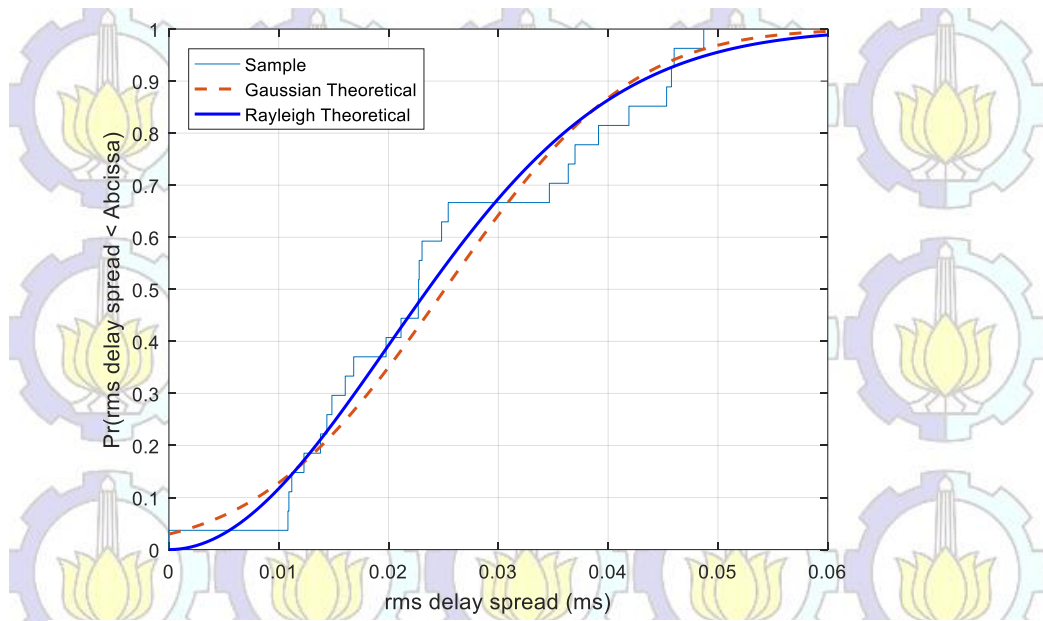
Gambar D.1 cdf pergeseran fase dari hasil simulasi

Tabel D.1 Hasil Uji K-S untuk Pergeseran Fase Nilai $\alpha = 0,01$, $n = 30$, Tabel Distribusi $D_2 = 0,24$

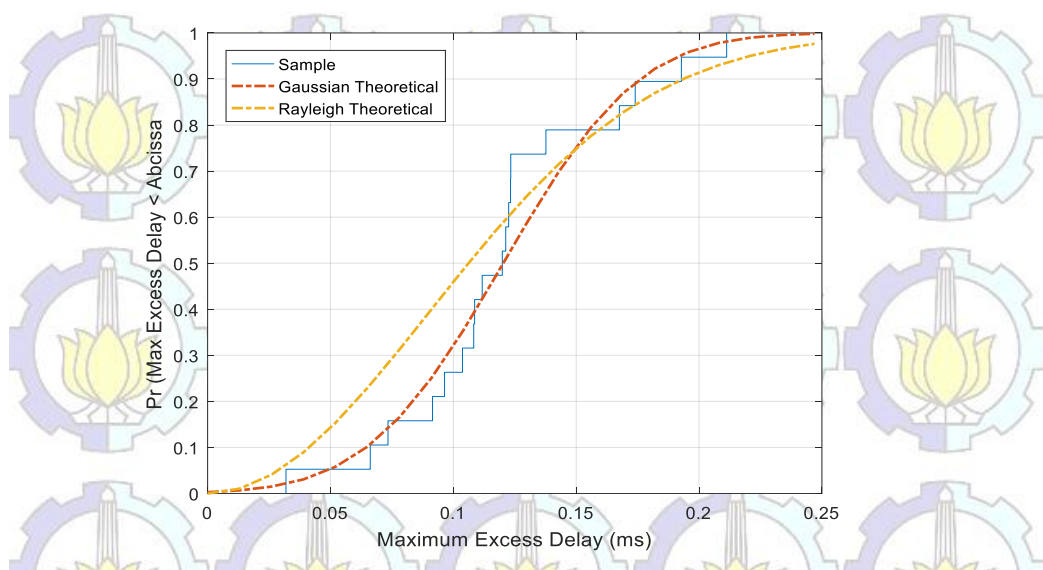
Distribusi	D2max	Kesimpulan
Rayleigh	0,3333	Ditolak
Uniform	0,2230	Diterima
Gaussian	0,2385	Ditolak

Tabel D.2 Hasil Uji K-S untuk rms delay spread Nilai $\alpha = 0,01$, $n = 30$, Tabel Distribusi $D_2 = 0,24$

Distribusi	D2max	Kesimpulan
Rayleigh	0,2341	Diterima
Gaussian	0,2551	Ditolak



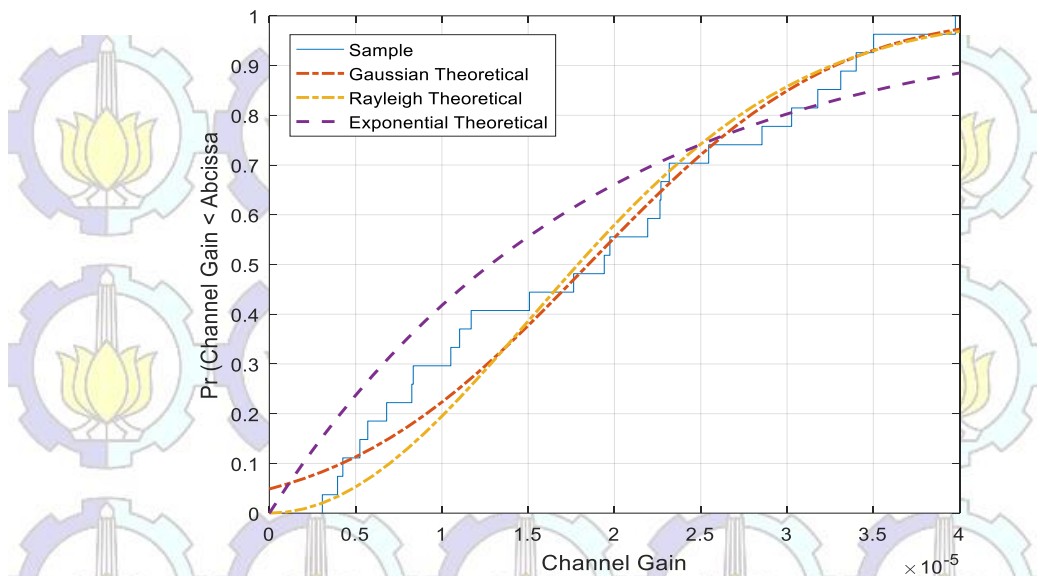
Gambar D.2 cdf rms delay spread dari hasil simulasi



Gambar D.3 cdf maximum excess delay dari hasil simulasi

Tabel D.3 Hasil Uji K-S untuk Maximum Excess Delay Nilai $\alpha = 0,05$, $n = 30$,
Tabel Distribusi $D_2 = 0,21$

Distribusi	D2max	Kesimpulan
Rayleigh	0,2232	Ditolak
Gaussian	0,2175	Diterima



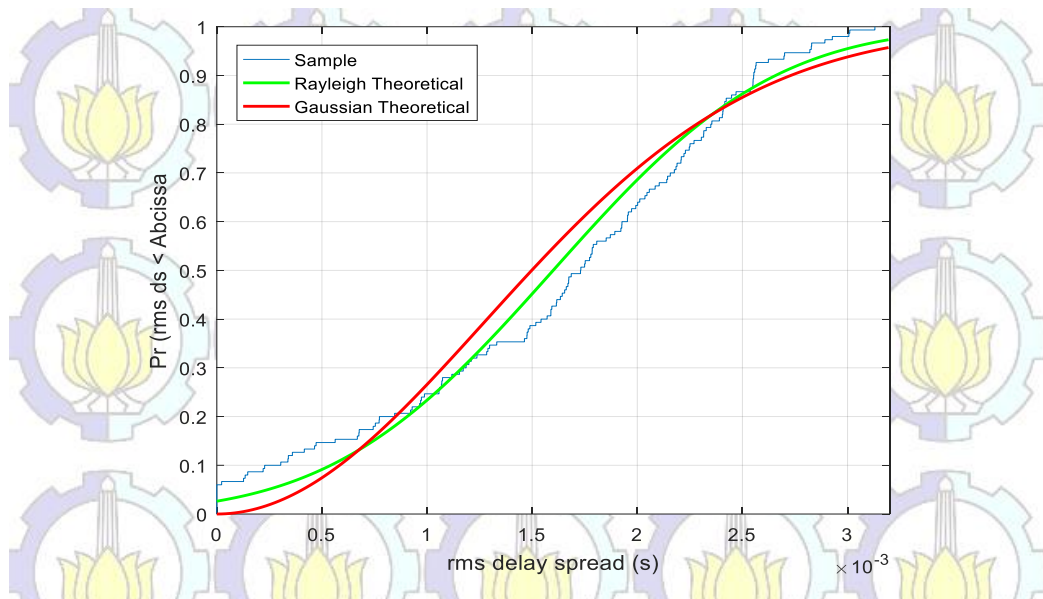
Gambar D.4 cdf channel gain dari hasil simulasi

Tabel D.4 Hasil Uji K-S untuk Channel Gain Hasil Simulasi Nilai $\alpha = 0,05$, $n = 30$, Tabel Distribusi $D_2 = 0,24$

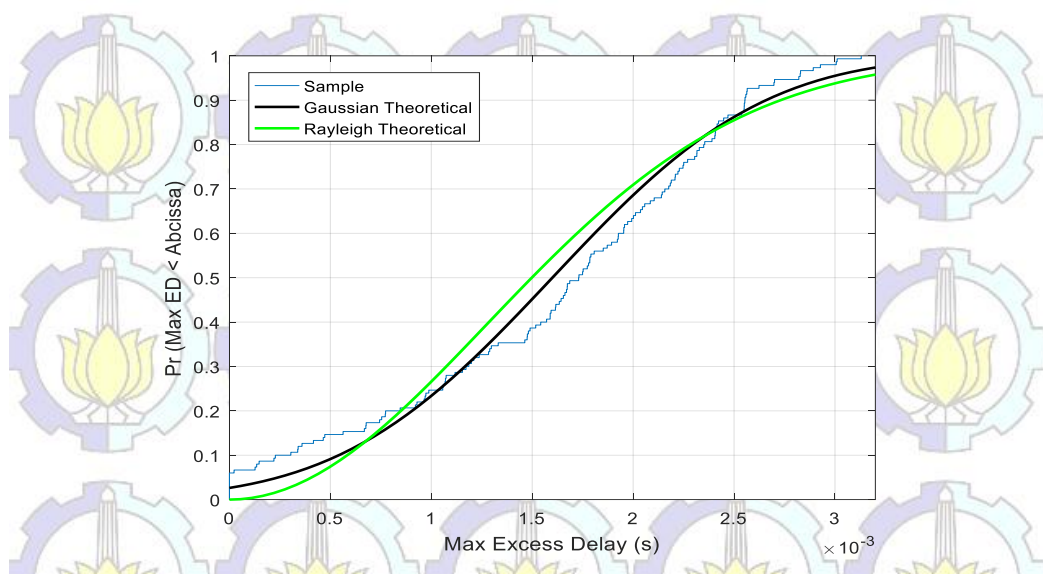
Distribusi	D2max	Kesimpulan
Rayleigh	0,231	Diterima
Exponensial	0,245	Ditolak
Gaussian	0,235	Ditolak

Tabel D.5 Hasil Uji K-S untuk rms Delay Spread Hasil Pengukuran Nilai $\alpha = 0,01$, $n = 150$, Tabel Distribusi $D_2 = 0,134$

Distribusi	D2max	Kesimpulan
Rayleigh	0,1310	Diterima
Gaussian	0,1330	Ditolak



Gambar D.5 cdf rms delay spread dari hasil pengukuran



Gambar D.6 cdf maximum excess delay dari hasil pengukuran

Tabel D.6 Hasil Uji K-S untuk Maximum Excess Delay Hasil Pengukuran
 Nilai $\alpha = 0,01$, $n = 150$, Tabel Distribusi $D_2 = 0,134$

Distribusi	D2max	Kesimpulan
Rayleigh	0,131	Diterima
Gaussian	0,0878	Diterima

LAMPIRAN E Uji t

Tabel E.1 Tabel SNR (dB) untuk Uji t

Jam (WIB)	γ_A (SNR S-M 7 MHz, S-T 14 MHz)	γ_B (SNR S-M 7 MHz, S-T 21 MHz)	γ_C (SNR S-M 7 MHz, S-T 7 MHz)
0	9.237053281	12.75527199	13.64535338
1	13.10632411	19.46112763	13.10632411
2	13.68453245	13.26397739	13.68453245
3	10.16637473	0	10.16637473
4	5.182220981	0	5.182220981
5	-1.717670353	0	-1.717670353
6	0	21.47456729	0
7	13.45052645	21.36216439	-13.2056026
8	8.768122804	22.1677606	-24.72035535
9	-45.65805459	14.20225094	-37.4414127
10	6.227389613	22.2190942	-28.89679294
11	9.941080534	-43.39345285	-37.77794228
12	-26.57662328	-26.57662328	-26.57662328
13	-5.274694281	20.91736373	-5.274694281
14	-1.487393333	12.52377084	-1.487393333
15	2.617378897	23.91357785	2.617378897
16	16.21968069	16.21968069	16.21968069
17	17.11839724	17.11839724	17.11839724
18	29.79447728	29.79447728	29.79447728
19	12.44537263	23.67111315	9.562698379
20	15.87988437	23.66973612	17.01217269
21	11.27829188	13.21986252	14.69939856
22	15.50013526	13.92724134	20.32120059
23	7.27073383	24.02551274	41.11849062
0	12.75527199	12.75527199	12.75527199
1	19.46112763	19.46112763	19.46112763
2	13.26397739	13.26397739	13.26397739
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	-21.85887075	-21.07190773	-21.85887075
7	-12.74143255	16.5309363	12.71995119
8	-37.52194865	-0.735656979	12.45212359
9	24.56246596	24.38401262	2.765080122

10	27.15801584	25.19593767	8.580193958
11	23.72361996	3.163624823	0.541000107
12	14.82086246	22.37132126	14.36221086
13	23.3859997	21.48361427	4.978772638
14	37.06985708	9.288780198	12.73988184
15	42.17393573	21.04848931	12.46179859
16	33.33958041	12.45002083	25.48798623
17	39.51508933	14.23398425	28.56261528
18	33.85176341	19.02690772	40.65719283
19	44.00298774	39.93100011	27.67020497
20	42.97852577	17.10203005	40.63427357
21	42.46102198	19.79208092	31.92950124
22	20.65660717	18.38773688	43.02544686
23	40.46552965	17.65403192	36.87743196
var	396.0094262	209.5855899	385.5600416
mean	12.51453184	12.95112903	8.900362199
size	24	24	24

Tabel E.2 Perhitungan Uji t

Ho :	$\gamma_A \neq \gamma_B$	$\gamma_C < \gamma_A$
	γ_A dan γ_B	γ_C dan γ_A
F hitung	3.570164345	0.28009915
F Tabel	2.047770309	2.047770309
Tipe Varian	Unequal	Equal
uji t	-0.004773745	0.092620034
t-table	0.451230212	0.072634497
	uji t < t-table, Ho ditolak	uji t > t-table, Ho diterima
Maka	$\gamma_A = \gamma_B$	$\gamma_C < \gamma_A$

LAMPIRAN F Link Budget

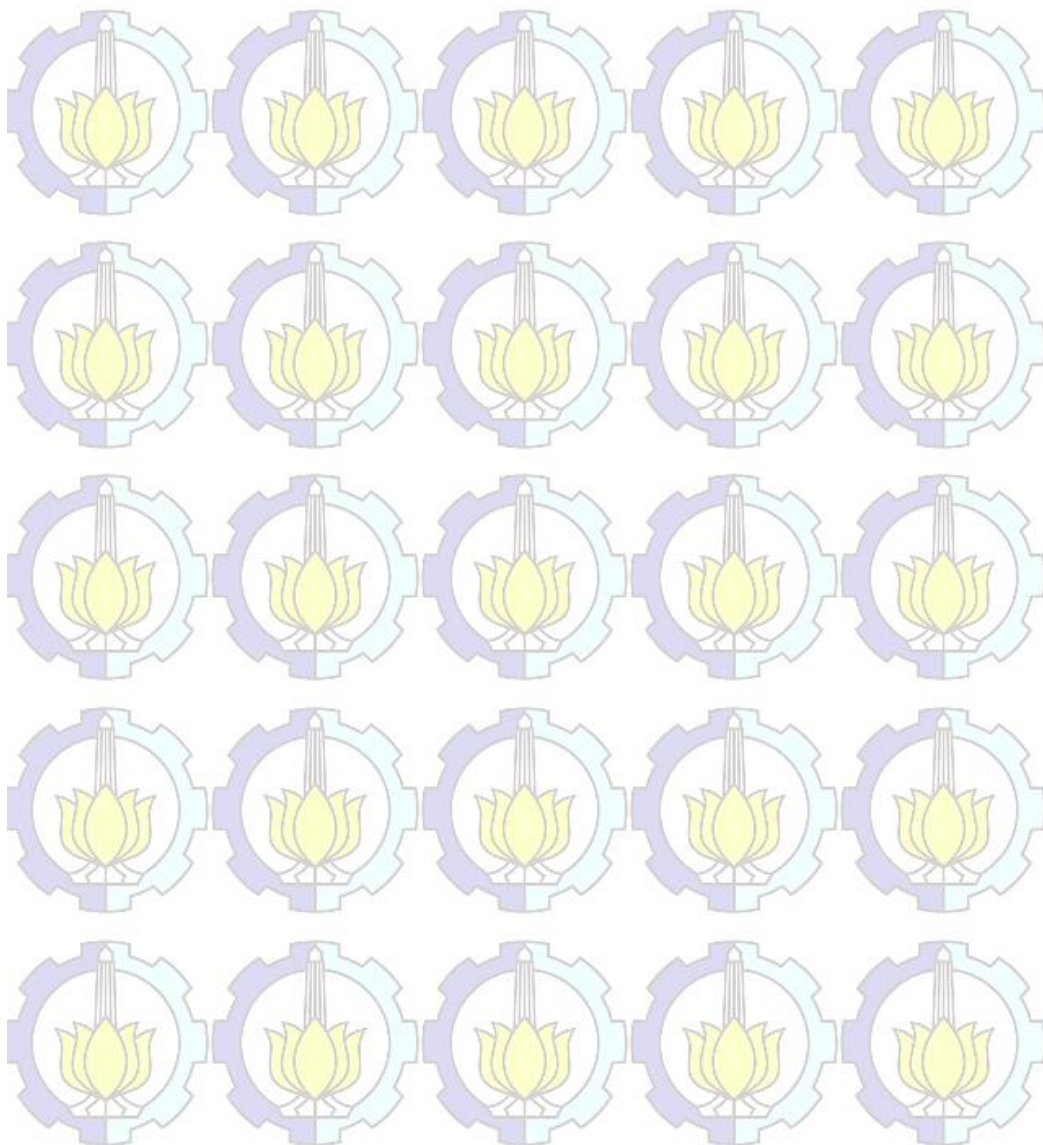
Tabel F.1 Link Budget Pengukuran Surabaya – Merauke

No.	Simbol	Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
1	Lfs	Rugi-rugi ruang hampa	125.32	dB	2 hop, h = 200 m $L_{fs} = 20 \log_{10} \left(4\pi \frac{D}{\lambda} \right)$
2	La	Rugi absorpsi	10	dB	5 dB per hop
3	Lg	Rugi refleksi	1	dB	
4	Lct	Redaman kabel di Tx (25 m)	1.15	dB	Redaman RG58 1.4 dB/30.5 m
5	Lcr	Redaman kabel di Rx (25 m)	1.15	dB	Redaman RG8 1 dB/30.5 m
6	Gtx	Gain antena Tx	5.19	dBi	Antena monopole vertikal
7	GRx	Gain antena Rx	5.19	dBi	Antena monopole vertikal
8	L	Total Loss	138.62	dB	
9	S	Sensitivitas USRP	-120	dBW	
10	f	Fading margin	24	dB	
11	Pr	Daya terima	-96	dBW	
12	G	Gain LNA	20	dB	
13	Pt	Daya Pancar	12.24	dBW	
			16.75	Watt	

Tabel F.2 Link Budget Pengukuran Surabaya – Ternate

No.	Simbol	Nama	Nilai	Satuan	Keterangan
1	Lfs	Rugi-rugi ruang hampa	118.16	dB	1 hop h = 200 m $L_{fs} = 20 \log_{10} \left(4\pi \frac{D}{\lambda} \right)$
2	La	Rugi absorpsi	10	dB	5 dB per hop
3	Lg	Rugi refleksi	1	dB	
4	Lct	Redaman kabel di Tx (25 m)	1.15	dB	Redaman RG58 1.4 dB/30.5 m
5	Lcr	Redaman kabel di Rx (25 m)	1.15	dB	Redaman RG8 1 dB/30.5 m

6	Gtx	Gain antena Tx	5.19	dBi	Antena monopole vertikal
7	GRx	Gain antena Rx	5.19	dBi	
8	L	Total Loss	131.46	dB	Antena monopole vertikal
9	S	Sensitivitas USRP	-120	dBW	
10	f	Fading margin	24	dB	
11	Pr	Daya terima	-96	dBW	
12	G	Gain LNA	20	dB	
13	Pt	Daya Pancar	5.08	dBW	
			3.22	Watt	



Statistical Modeling of Low-Latitude Long-Distance HF Ionospheric Multi-Mode Channels

Indah Kurniawati^{1, 3, *}, Gamantyo Hendrantoro¹, Wirawan¹, and Muhammad Taufik²

Abstract—Studies have been reported in the literature on High Frequency (HF) radio channels in mid-latitude areas more frequently than in low latitudes, where the ionospheric channels might behave differently. This paper reports a statistical model of HF sky wave channel complex impulse response and its parameters, i.e., channel gain, path gain, phase shift, and delay spread statistics, derived from both simulation and measurement on a 3044 km link in Indonesia. Evaluations show that multipaths observed with respect to their propagation delays form multiple clusters corresponding to different propagation modes. The channel gain is found to be Rayleigh distributed, whereas the rms and maximum delay spread exhibit Rayleigh and Gaussian distributions, respectively. This model can be used in performance evaluation of digital communication schemes in low-latitude HF channels.

1. INTRODUCTION

High frequency (HF) sky wave communication systems in 3–30 MHz band were the core of long distance communication systems in the past before the development of satellite technology. However, HF systems have recently gained renewed interest for emergency communications or low-rate remote monitoring in isolated or disaster-struck areas unreachable by other means which require infrastructures that are either undeployed or damaged.

HF sky wave systems exploit ionospheric layer at a height between 50–500 km as its propagation medium that refracts and reflects HF waves back to earth [1]. The diurnal and seasonal variations of free electron conditions, solar activities, geomagnetic position, and height of ionospheric layers greatly impact communication in HF sky wave channels [2]. Consequently, the channels are commonly time-varying and frequency-selective with limited bandwidth. Hence, the knowledge on characteristics of HF channel impulse response is crucial in designing an HF digital radio communication system.

Many existing channel models commonly refer to the Watterson model [3]. However, it is only valid for narrow band and excludes multipath components originating from multiple modes. A more accurate wideband modeling has been reported in [4], with validation against measurement over 800 kHz bandwidth on a 2070 km link [5, 6]. Nevertheless, this model is complicated because it consists many factors gained from ionosonde measurement that is not always available everywhere [7]. Channel impulse response measurements for longer distance (more than 3000 km) have also been reported in [4–6], all of which were made in mid-latitude regions. Ionosphere in low latitude geomagnetic regions is distinct from that in mid latitudes, e.g., the presence of fountain effect called equatorial anomaly [2]. To our knowledge, there have been only a few attempts to model the HF sky wave channel impulse response in low-latitude regions compared to the more explored mid- and high-latitudes. A study on HF channel in

Received 16 October 2017, Accepted 18 January 2018, Scheduled 30 January 2018

* Corresponding author: Indah Kurniawati (kurniawati12@mhs.ee.its.ac.id).

¹ Department of Electrical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia. ² Department of Geomatic Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia. ³ Department of Electrical Engineering, Muhammadiyah University, Surabaya, Indonesia.

low-latitude region (Thailand) with a 600 km link has been reported in [8], but the distance is considered short, in which a single 1F propagation mode is usually relied on.

In this paper, our original contribution is a low-latitude HF long distance channel impulse response model, which consists of multiple paths that might originate from different propagation modes. The statistics of channel parameters, i.e., channel gain, path gain, phase shift and delay spread, are derived from ray tracing-based simulation and real measurement on a 3044 km link in Indonesia. Our results indicate that in addition to channel gain, path gain, phase shift and delay, impulse response is also characterized by elevation angle of the propagation paths. The findings also suggest that channel gain follows Rayleigh distribution, whereas rms and maximum delay spread follow Rayleigh and Gaussian, respectively.

In Section 2 we start with mathematical expression of channel impulse response, the hypothesized statistical model, and evaluation methods that comprise simulation and measurement. Results on statistical channel parameters are presented in Sections 3 and 4, followed by discussions and conclusions in Section 5.

2. HF SKY WAVE CHANNEL MODELING

2.1. Mathematical Model

The impulse response of lowpass-equivalent HF sky wave channel can be formulated as:

$$h(\tau, \varepsilon) = \sum_n \alpha_n e^{-j\theta_n} \delta[\tau - \tau_n] \cdot \delta[\varepsilon - \varepsilon_n] \quad (1)$$

where α_n , θ_n , τ_n and ε_n represent gain, phase shift, delay and elevation angle of the n -th path. Channel gain S results from:

$$h(\tau, \varepsilon) = S \sum_n a_n(t) e^{-j\theta_k} \delta[\tau - \tau_k] \cdot \delta[\varepsilon - \varepsilon_n] \quad (2)$$

where $\sum_n |a_n|^2 = 1$, so that

$$S = \sqrt{\sum_n |\alpha_n|^2}. \quad (3)$$

Power delay profile (PDP) of the channel is given by:

$$p(\tau, \varepsilon) = S^2 \sum_n |a_n|^2 \delta[\tau - \tau_n] \cdot \delta[\varepsilon - \varepsilon_n] \quad (4)$$

The root mean square (rms) delay spread can be obtained [9]:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (5)$$

where $\bar{\tau}$ represents mean excess delay, expressed as:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k p(\tau_k) \cdot \tau_k}{\sum_k p(\tau_k)} \quad (6)$$

and τ_k denotes delay time of the k -th path relative to the first path.

The second moment of mean excess delay is expressed as:

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k p(\tau_k) \cdot \tau_k^2}{\sum_k p(\tau_k)} \quad (7)$$

The maximum excess delay is expressed as $\tau_x - \tau_o$, with τ_x representing maximum delay, i.e., delay of the last path and τ_o delay of the first arriving path.

2.2. Statistical Hypotheses of Channel Parameters

2.2.1. Channel Gain

Channel gain S in Eq. (3) refers to the square root of total signal power received on each path with 1 watt transmit power. Different paths undergo different trajectories with different path gains. The difference in phase shift among different paths might vary widely when we consider wavelengths in the order of 30–100 meters, which is very small compared to total path length. This can be true for paths experiencing the same propagation mode and having only slightly different trajectories, and even more so for paths belonging to different propagation modes. Accordingly, we could safely assume that these paths are not correlated with one another. This reasoning leads to a hypothesis that the channel gain in Eq. (3) tends to have Rayleigh distribution.

2.2.2. Normalized Path Gain and Path Phase Shift

Normalized path gain a_n for the n -th path is obtained by dividing the path gain α_n by channel gain S , which makes it difficult to model a_n statistically. On the other hand, path phase shift is obtained from remainder of the division of path length by the wavelength, assuming that there is no additional phase shift caused by other mechanisms. Since path length can take any value depending on ionospheric condition, propagation mode and elevation angle, it is reasonable to hypothesize that the resulting phase is random and follows uniform distribution in $[0, 2\pi)$.

2.2.3. Delay Spread

Delay spread is a measure of channel time dispersion that approximates inverse of the channel coherence bandwidth representing maximum symbol rate that can be transmitted through the channel without equalization [9]. Path length variation may be caused by variety of modes in a channel and results in varying path arrival time. It is hence natural to surmise that the delay spread of a channel containing a single mode is shorter than that with multiple modes.

In Eq. (5) rms delay spread is computed based on mean excess delay, which in turn depends on delay and gain of each path. Since the gains of paths with different delays are not correlated with each other, it can be conjectured that rms delay spreads of impulse responses with a single mode have Rayleigh distribution.

Furthermore, time delay of each propagation path through the ionosphere can be described as random and normally distributed [10]. It implies that maximum excess delay, which is the interval between arrivals of the first and the last path in an impulse response, is also normally distributed.

2.2.4. Elevation Angle

The elevation angle of a path might indicate its propagation mode. Therefore, knowledge on elevation angle statistics is useful in finding a strategy to limit the arriving modes by choosing a receiving antenna with appropriate elevation pattern, thereby reducing the delay spread.

2.3. Simulation Method

The HF radio channel simulation is carried out by ray tracing using PropLab [11]. PropLab adopts the 2007 International Reference Ionosphere (IRI) model for the condition of ionospheric layers, which is adjusted to approximate the real condition by manually defining the 12-month mean sunspot number (SSN) and the effective SSN (IG index) [12].

SSN data are obtained from space weather radar (SWR) in Australia [13]. The geomagnetic A-index value is given by radio station WWV and WWVH [11]. The Appleton-Hartree model is adopted for ray tracing [14]. The method accommodates effects of earth magnetic field and collision between electrons and neutral particles. The dipole field model is selected for magnetic field with two exponential terms as collision frequency model.

Carrier frequency of 14 MHz is used, which has the longest period of being under MUF for the selected days. The geographical and geomagnetic locations of transmitter and receiver in Surabaya and

Merauke in Indonesia, respectively, are presented in Table 1. Ray tracing is carried out for May 11 and September 11, 2015, each with one hour intervals for 24 hours, resulting in 24 impulse responses in each day. From the total of 48 impulse responses, nine samples are excluded because none of the simulated paths arrive sufficiently close to the receiver location. The type of antenna used in this simulation is horizontal dipole with 93.89° transmit beam azimuth and 50 Watt transmit power.

Table 1. Geographical and geomagnetical coordinates of the transmitter and receiver.

Location	Geographical Coordinate	Geomagnetical Coordinate
Transmitter	7.28 S, 112.80 E	16.86 S, 174.43 E
Receiver	8.53 S, 140.42 E	16.52 S, 145.79 E

The transmit elevation angle used in ray tracing ranges from 10° to 50° with 0.1° steps because elevation angles smaller than 10° are almost impossible to occur in real measurement due to ground clutter. The azimuth angle is in the $\pm 2^\circ$ range around 93.89° , i.e., the transmitter-receiver bearing angle. The great circle distance equation [15] is used to measure the distance between the end of path on earth and the receiver to determine whether the path can be regarded as ‘arriving’ at the receiver.

2.4. Measurement

A measurement campaign is performed to measure the HF radio channel low pass-equivalent impulse responses. The measurement system block diagram and parameters have been reported in a previous paper [16], with the only change being the carrier frequency used herein, which is 14 MHz, instead of 7 MHz [17].

The locations of the transmitter and receiver are shown on the map in Figure 1. The transmitter is installed on top of Building B of the Institut Teknologi Sepuluh Nopember in Surabaya, while the receiver is on the rooftop of the Electrical Engineering Laboratory building, Musamus University, Merauke. The two sides are located in different time zones: the transmitter is in the Western Indonesia Standard Time zone (GMT +7) and the receiver in the Eastern Indonesia Standard Time zone (GMT +9). Meanwhile,

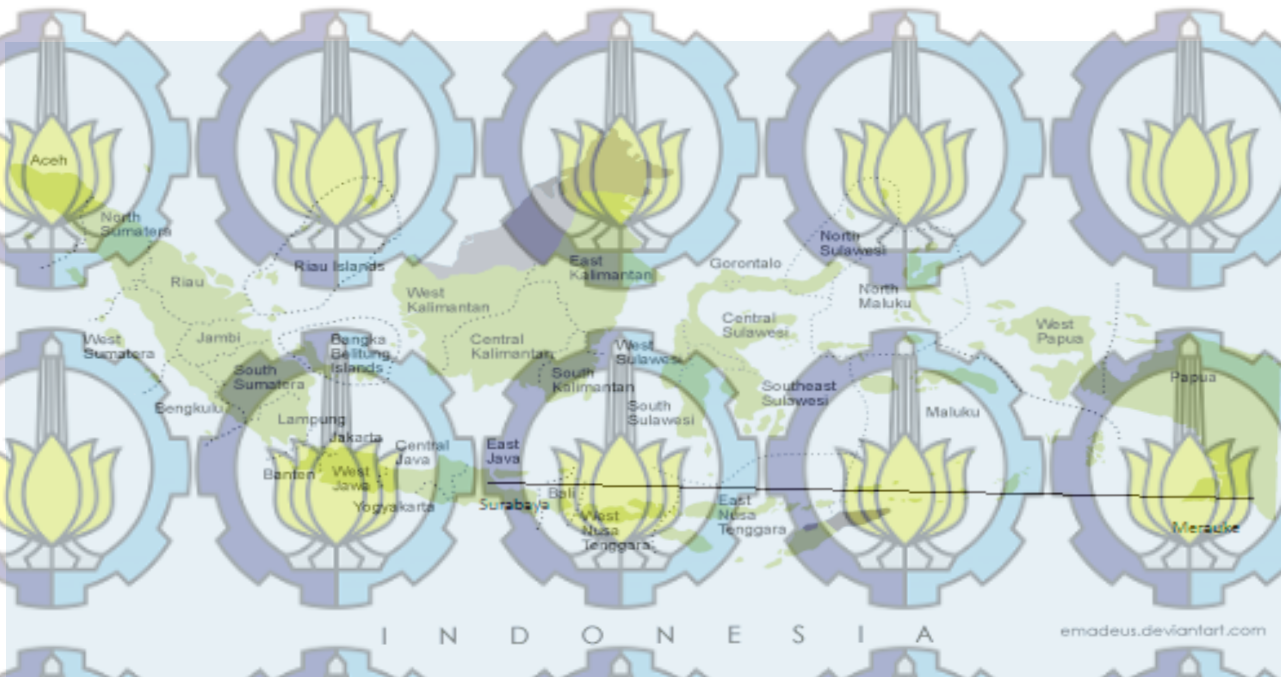


Figure 1. Transmitter and receiver locations in Surabaya and Merauke.

the wave bending in the ionosphere is considered to occur mostly in the Central Indonesia Standard Time zone (GMT +8). We subsequently refer to GMT +7 as local time (LT).

The measurement is carried out on February 12–15, 2014 in the hours when in western, central and eastern part of Indonesia it is successively sunrise (03:00–05:00 LT), noon (10:00–12:00 LT), sunset (16:00–18:00 LT), and night (19:00–23:00 LT). The total of measurement sessions is 20. We use 12th-order PN sequence resulting in a total of 4095 bits with 500 kbps bit rate and 1 MHz sampling. Hence, the total number of samples of PN sequence is 8190, so that the maximum measurable excess delay is 8.19 ms. In each session, multiple periods of PN sequence are transmitted for 5 seconds, resulting in a total of 561 periods or 2297295 samples. Weakness of the measurement system is relatively low resolution due to limited bandwidth, prohibiting separation of paths belonging in the same cluster.

An impulse response estimate is obtained by cross-correlating the original PN-sequence and the received IQ sequence. Noise filtering is applied to eliminate noise using the algorithm proposed by Sousa et al. [18]. The noise threshold is defined to obtain a constant false alarm rate (CFAR) by taking 5% probability of noise rising above the threshold. CFAR is applied to each PN correlation result, so that ten impulse responses are generated from the original ten periods, from which a time-averaged PDP is obtained.

3. RESULTS

3.1. Channel Gain and Phase Shift

Channel gain S is acquired from simulation results using Eq. (3) and analyzed further through its cumulative distribution function (CDF). The Kolmogorov-Smirnov (K-S) fitting test shows that the closest theoretical distribution fit to channel gain is Rayleigh as shown in Figure 2, which confirms the hypothesis in Section 2.

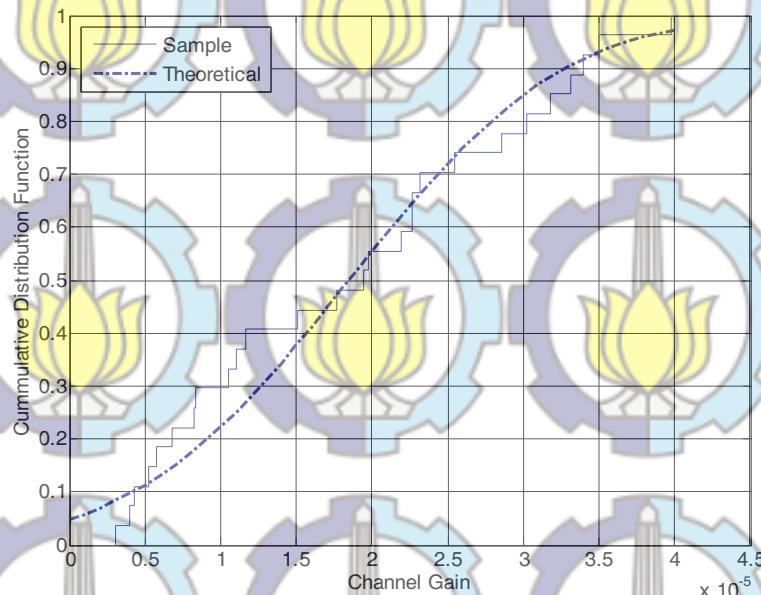


Figure 2. Cumulative distribution function of channel gain from ray tracing result.

Calculation of the path phase shift has been explained in Section 2.1. The K-S test of the CDF suggests that the nearest theoretical fit to this is the uniform distribution, in line with our conjecture in Section 2. Figure 3 shows visually the closeness of CDF of the path phase shift to the uniform distribution.

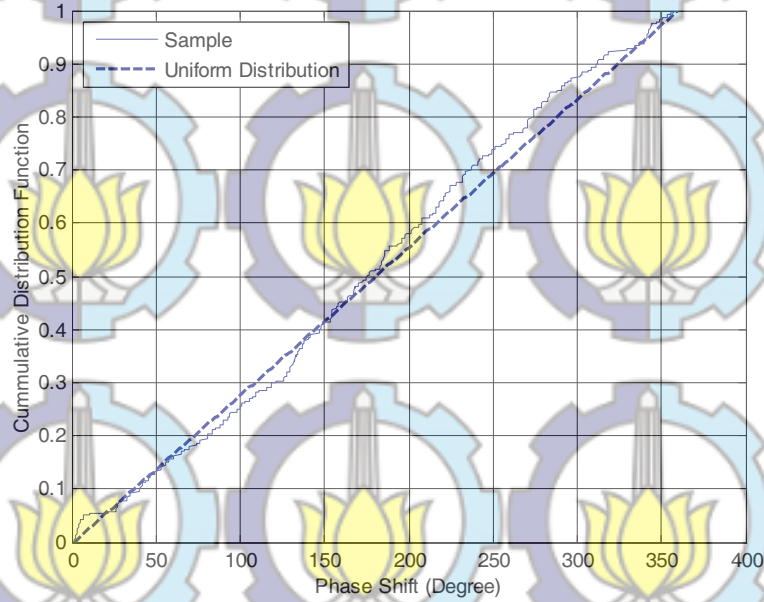


Figure 3. Cumulative distribution function of path phase shift of the ray tracing result.

3.2. Delay Spread

Invoking discrete-time impulse response model [19], the delay axis is divided into intervals called ‘bin’. For each simulated channel, each bin might consist of a number of multipath components of different propagation modes.

The results of data processing suggest that it is best to divide the delay axis into three bins, 0–100 μs , 100–500 μs , and 500–1300 μs . This is done by taking into account all possible events of an impulse response having only a single mode, two simultaneous modes, or more. Table 2 recapitulates the binning results.

Table 2. Propagation modes occurrence in each excess delay bin.

Excess delay bin (ms)	2F		3F		4F	
	Total	Elevation angle ($^{\circ}$)	Total	Elevation angle ($^{\circ}$)	Total	Elevation angle ($^{\circ}$)
0–100	56	12.8–21	99	19.8–30.4	-	-
100–500	21	12.6–20.8	28	19.7–30.1	-	-
500–1300	-	-	42	25.4–27.1	5	41.1–41.5

Figures 4 and 5 present path magnitude variation with respect to elevation angle and time delay for all simulated paths regardless of the bin they belong to. Figure 4 shows that the most dominant magnitude originates from paths with 2F propagation mode, which have smaller elevation angle than those from 3F and 4F. The paths in 4F mode are the least dominant in magnitude due to their highest elevation angles. Figure 5 shows that the paths can be classified into three clusters. The first cluster contains paths with the most dominant magnitudes arriving through 2F and 3F modes. The second cluster contains paths in 3F mode, and the third contains paths in 3F and 4F modes.

Figures 6 and 7 present CDFs of rms delay spread as the results of ray tracing simulation and field measurement, respectively, plotted together with the theoretical Rayleigh CDF with the same statistical parameters. Visual inspection and K-S test suggest that Rayleigh distribution provides a good fit to rms delay spread obtained from ray tracing and field measurement [20]. This is in line with our hypothesis in Section 2.

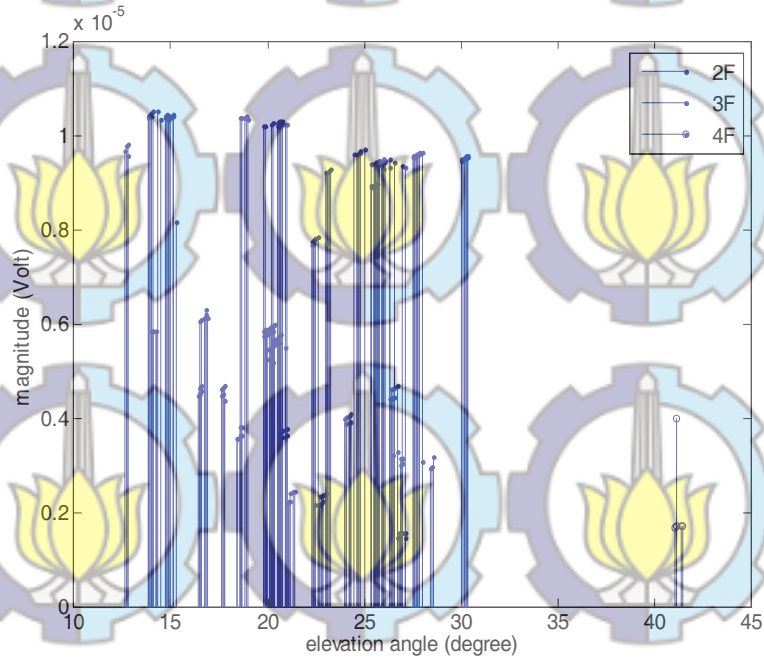


Figure 4. Received signal magnitudes with respect to elevation angles for all of paths from ray tracing.

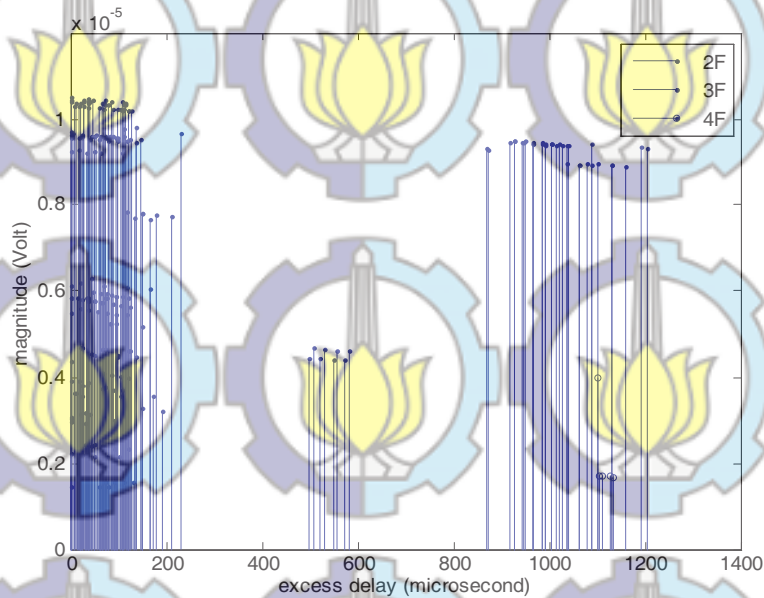


Figure 5. Received signal magnitudes with respect to excess delay for all paths from ray tracing.

3.3. Maximum Excess Delay

Based on the results of ray tracing, PDPs can be classified into two, i.e., those having paths originating from two modes and those with a single mode. The two modes referred here are mainly 2F and 3F, except for one PDP on September 11 at 07:00 LT containing paths in 3F and 4F. The maximum excess delays of PDPs consisting of two modes are longer than those from single mode PDPs. For example, on May 11 at 14:00 LT, the PDP consists of two modes, 2F and 3F, with maximum excess delay of 0.483 ms, while on September 11, 2015, the received path originates from one mode with shorter

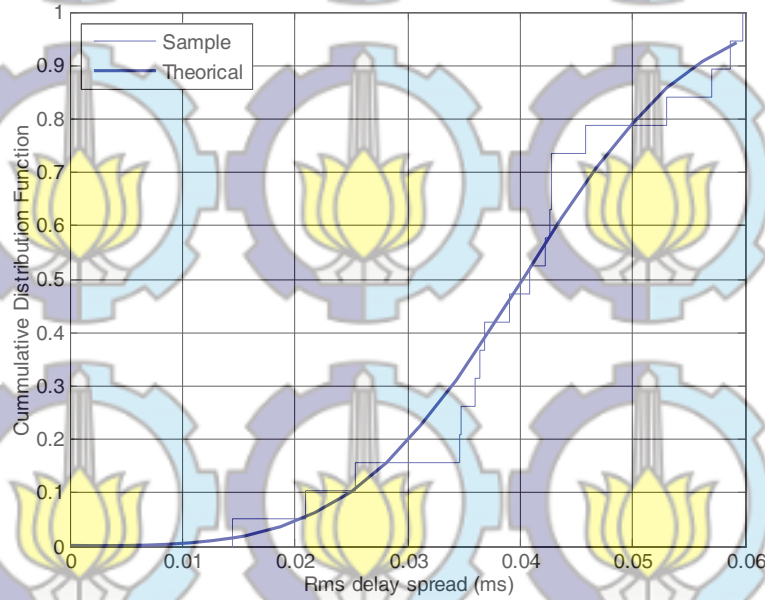


Figure 6. CDF of the rms delay spread from the result of ray tracing.

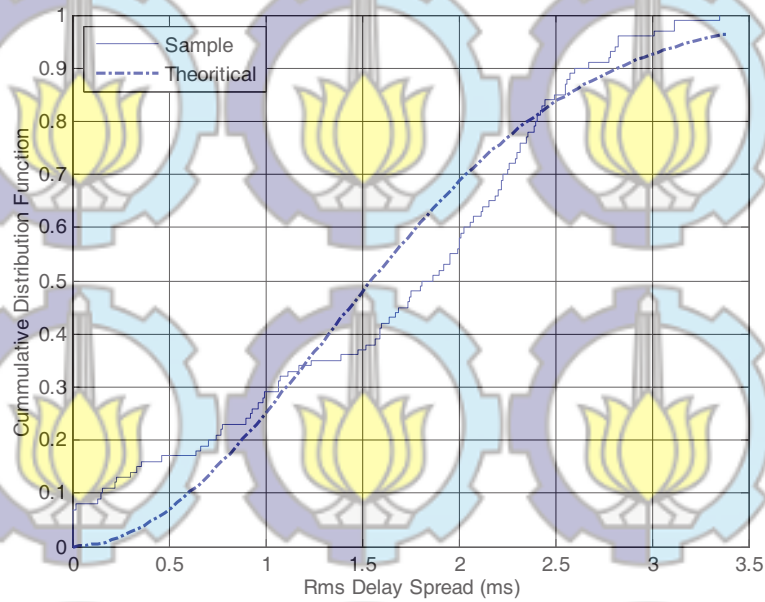


Figure 7. CDF of the rms delay spread from the Surabaya-Merauke measurement result on February 12–15, 2014.

maximum excess delay of 0.174 ms. Figure 8 depicts CDF of maximum excess delay for paths from a single mode, consisting of 20 samples.

K-S test suggests that maximum excess delay from ray tracing agrees with Gaussian distribution with mean 0.12 ms and standard deviation 0.043 ms. Similarly, as shown in Figure 9 and K-S tested, the measured maximum excess delay also approaches Gaussian distribution with mean 4.5138 ms and standard deviation 2.4321 ms. The difference in mean and variance is due to the presence of a single mode in the simulated channel and of multiple different modes in the measured channels. These two findings verify our hypothesis in Section 2.

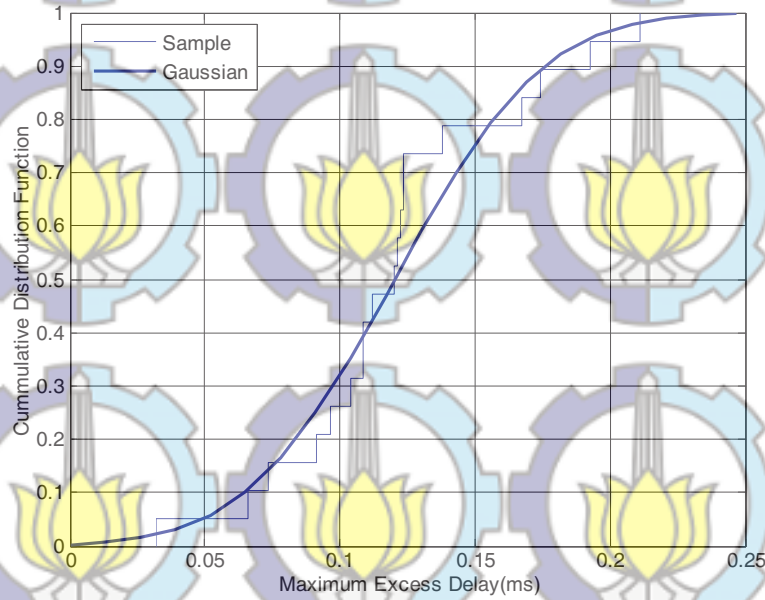


Figure 8. CDF of maximum excess delay from ray tracing result.

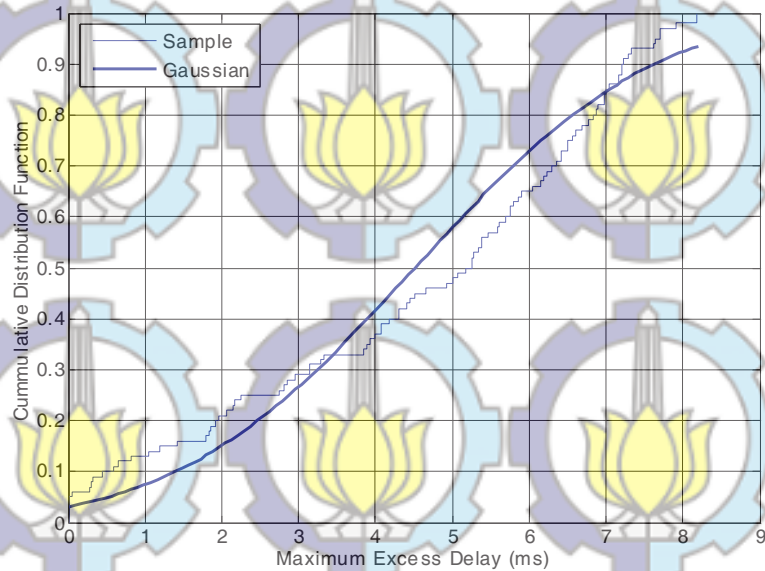


Figure 9. CDF of maximum excess delay from measurement on February 12–15, 2014.

4. CONCLUSION

We have shown a statistical model of wideband HF radio channel impulse response in a low-latitude region evaluated by ray-tracing simulation and real measurement on a 3044 km link. The results of simulation indicate that the channel gain is Rayleigh distributed, and path phase shift is uniformly distributed. It is found that the paths composing a channel impulse response are clustered following their propagation modes, which contradicts previous research [10] which states that the time delay for each path is randomly Gaussian. Results of grouping path elevation angles into delay bins can be used to choose an antenna with the desired elevation pattern to limit the modes arriving at the receiver, thereby alleviating inter-symbol interference. Rayleigh and Gaussian distributions are found to fit well rms delay spread and maximum excess delay, respectively.

Overall, the proposed statistical model describes the HF sky-wave long-distance channel impulse response behavior with multiple propagation modes. The model can be used in evaluation of HF long-distance communication systems in low latitudes.

ACKNOWLEDGMENT

This reported study was financially supported by Indonesian Ministry of Research, Technology and Higher Education through BPPDN scholarship to the first author and PUPT research grants, as well as PREDICT 2 grant from JICA Japan.

REFERENCES

1. Australian Government Bureau of Meteorology, *Introduction to HF Radio Propagation*, [Online], Available: www.sws.bom.gov.au/Educational/5/2/2, 2016.
2. McNamara, L., *The Ionosphere: Communications, Surveillance and Direction Finding*, Krieger, Florida, 1991.
3. Watterson, C. C., J. R. Juroshek, and W. D. Bensema, "Experimental confirmation of an HF channel model," *IEEE Trans. on Communication Technology*, Vol. 18, No. 6, 792, 1970.
4. Mastrangelo, J. F., J. J. Lemmon, et al., "A new wideband high frequency channel simulation system," *IEEE Trans. on Communications*, Vol. 45, No. 1, 26, 1997.
5. Perry, B. and R. Rifkin, "Measured wideband HF mid latitude channel characteristic," *IEEE Military Communication Conference*, Boston, 1989.
6. Clune, M. and P. Fine, "Delay and doppler spreading characteristics of the wide-bandwidth HF channel," *Fifth International Conf. on HF Radio Systems and Technique*, Edinburg, 1991.
7. Yan, Z., L. Zhang, T. Rahman, and D. Su, "Prediction of the HF ionospheric channel stability based on the modified ITS model," *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, Vol. 16, No. 6, 3321, 2013.
8. Cannon, P. and M. J. Angling, "Measurements of the HF channel scattering function over Thailand," *Proc. International Antenna and Propagation Conf.*, Davos, 2000.
9. Rappaport, T., *Wireless Communications*, 160, Prentice-Hall, New York, 2002.
10. Lacaze, B., "Modeling the HF channel with Gaussian random delays," *Signal Processing*, Vol. 64, 215, 1997.
11. Solar Terrestrial Dispatch, Proplab-Pro Version 3, 2010.
12. Mitran, R. and M. Stanic, "Delay spread evaluation of HF channels based on ray tracing," *2016 IEEE International Black Sea Conf. on Communication and Networking (BlackSeaComm)*, Varna, 2016.
13. Australian Government Bureau of Meteorology, *Monthly Sunspot Number*, [Online], Available: www.sws.bom.gov.au/Solar/1/6.
14. Jones, R. and J. Stephenson, *Versatile Three Dimensional Ray Tracing Computer Program for Radio Wave in the Ionosphere*, US Gov. Printing Office, Washington D.C., 1975.
15. Williams, E., *Aviation Formulary V1.43*, [Online] Available: williams.best.vwh.net/avform.html, 2007.
16. Kurniawati, I., P. H. Mukti, R. Corputty, and G. Hendrantoro, "Preliminary study on HF channel complex impulse response and power delay," *XXXI URSI General Assembly and Scientific Symposium*, Beijing, 2014.
17. International Telecommunication Union, *Radio Regulations Articles*, ITU, 2016.
18. Sousa, E., V. Jovanovic, and C. Daigneault, "Delay spread measurement for the digital cellular channel," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 43, No. 4, 837, 1994.
19. Hashemi, H., "Impulse response modelling of indoor radio propagation channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 11, No. 7, 967, 1993.
20. Dixon, W. J., J. Frank, and J. Massey, *Introduction to Statistical Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1957.

Spatial Correlation and Diversity of Low-Latitude Multipath Multimode HF Skywave Radio Channels

Indah Kurniawati^{1,3}, Gamantyo Hendrantoro¹, Wirawan¹, Muhammad Taufik²

Abstract – To support the reliability and coverage of long-range skywave HF radio communication systems, it is necessary to consider technologies that involve multiple links, such as site diversity, network relay, or cooperative communication. This paper reports a study on the spatial correlation of signals between two HF skywave links with a common end and the benefit of site diversity systems using such links. For this study, two links in a low-latitude region are considered, each with a groundrange of 3044 km and 1895 km, both having a common transmitter and different receivers separated 1900 km apart. The correlation is evaluated from the results of ray-tracing simulations, verified with measurements and simulations for different dates. This study confirms that the correlation between two HF links is low, which can be explained as being the result of sum of multiple paths with random, uncorrelated phase-shifts. The study also proves that site diversity using two convergent links with selective combining can provide diversity gain and reduce the probability of outage significantly. To enhance the benefit of site diversity, a joint space-frequency diversity involving two different frequencies with opposite diurnal characteristics on the primary and alternative link is recommendable. Copyright © 2019 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.

Keywords: HF Radio Channel, Multihop, Long-Distance, Low-Latitude, Site-Diversity, Spatial Correlation

Nomenclature

	Description	Unit of measure
V	Matrix of Signals	[V]
A	Total Voltage	[V]
a	Amplitude of signals	[V]
R	Correlation coefficient	
X	Matrix of Absolute data of Complex Voltage Received in Merauke	[V]
Y	Matrix of Absolute data of Complex Voltage Received in Ternate	[V]
$\bar{x}$	Mean of the X data	[V]
$\bar{y}$	Mean of the Y data	[V]
Greek Notations		
Φ	Matrix of Phase Shift	[°]
λ	Wavelength	[m]
Subscripts		
O	Ordinary wave	
X	Extraordinary wave	
N	Number of data	
j	Imaginary part of a Complex number	
m	Number of path modes	
M	Total number of path modes	
i	Number of sample	
k	Surabaya-Merauke link index	
l	Surabaya-Ternate link index	

I. Introduction

The high frequency (HF) skywave communication system in the lower part of 3-30 MHz band is still important for regular and emergency communications in remote areas and islands that have not had the luxury of communication infrastructure or as an alternative communication access when a disaster occurs. In addition, this system can also be used as an alternative to expensive satellite communication systems that are not always available in high-latitude areas [1]. In all applications of radio communications, link availability has been a key factor that determines the performance of the whole system [2]-[4]. Link availability improvement is very often achieved by applying some kinds of link diversity, the success of which usually depends on the correlation between the diversity links [3], [5]. To support the reliability and coverage of long-distance HF skywave radio communication systems, technologies that have been widely used in terrestrial radio communication systems can be tried for HF, such as site diversity, network relay, or cooperative communications [6].

However, as in other terrestrial systems, the success of these technologies depends on the correlation between the HF links involved. For example, the diversity techniques exploit a number of random and uncorrelated multipath channels to improve communication over multiple branches. Several studies have been implemented to calculate the spatial correlation of HF

skywave links in different locations. For instance, measurement of spatial correlation of single-hop HF radio waves has been performed in Australia on a 2044 km link to measure the correlation of signals between a transmitter and three receivers, each 1 km apart [7]. The measurement results show that the spatial correlation is isotropic and exhibits high values for a radius of 1 km. In addition, the results of measurement carried out in the United States for a 1566 km link at 21.35 MHz found a high signal correlation for receivers separated 40λ for single-hop and 10λ for multihop [8]. Similar results are also found in Turkey [9].

The studies mentioned above are performed in mid-latitude areas, the characteristics of which differ from those for low-latitude [10]. HF radio channels in low-latitude regions geo-magnetically have distinct characteristics that are different from the areas of high-latitude and mid-latitude, especially because of the existence of the fountain effect, which redistributes electrons in the low latitude region from the top of the equator down to geomagnetic latitude of 10° to 20° . In addition, in the low-latitude area there is also a rapid change in the critical frequency within a few hundred kilometers and a high increase after sunrise [10]. Most of the measurements above are performed with one transmitter that sends HF waves to several separate receivers with spacings up to 40λ . Only one experiment tried the ranges between receivers up to 400 km [9]. This paper reports the results of spatial correlation evaluations between HF links that converge at a transmitter location with two receivers separated 1900 km apart in low-latitude regions by following diurnal variations in the ionosphere layer. The proposed hypothesis is that multiple paths with random and independent phases will cause a low correlation of the voltage magnitudes from the signals received on the two links. An evaluation is performed based on ray-tracing simulations and field measurements on two real links that have large ground ranges in the equatorial areas of Indonesia, taking into account multiple propagation modes that constitute the multiple paths to confirm the hypothesis. The finding of low spatial correlation is the first contribution of this paper and is an extension of the observations and conclusions made by Vastberg et al about the multipath effects on the HF skywave channel [11]. This paper also confirms that if the correlation between two links is low, site-diversity scheme involving both can increase the availability significantly. The next hypothesis is that increasing availability with site-diversity can be achieved by using two different frequencies with different characteristics on the main link and alternative links, i.e., a joint space-frequency diversity, for example lower frequencies on the main link that performs well at night and higher ones on alternative links that give a strong reception during daytime. The evaluation with the PropLab simulation for joint space-frequency diversity on both links using different frequencies, namely 7, 14 and 21 MHz, confirms the assumption. This is the basis for recommending the use of joint space-frequency

diversity techniques for HF skywave links, which is our second contribution.

In Section II the hypotheses and mathematical expression for calculation of the spatial correlation, site diversity gain and availability are presented. Section III discusses the simulation and measurement methods for evaluating the frequency diversity and the spatial correlation, followed by a discussion on the joint space-frequency diversity and conclusions in Section IV.

II. Problem Formulation

II.1. Spatial Correlation

The voltages in the form of complex phasor V_o and V_x received by the receiver antenna from ordinary (O) and extraordinary (X) waves are stated as follows:

$$\begin{aligned} V_o &= A_o \exp(j\Phi_o) = \sum_{m=1}^M a_o^{(m)} \exp(j\phi_o^{(m)}) \\ V_x &= A_x \exp(j\Phi_x) = \sum_{m=1}^M a_x^{(m)} \exp(j\phi_x^{(m)}) \end{aligned} \quad (1)$$

where A_o and A_x denote the total voltage amplitudes of the O and X waves respectively, Φ_o and Φ_x the corresponding total voltage phases, M the total number of path modes, e.g., 2F, 3F, etc., $a_o^{(m)}$ and $\phi_o^{(m)}$ the amplitude and phase of the O wave from the m -th path, and so do $a_x^{(m)}$ and $\phi_x^{(m)}$ for the X wave. The total voltage being the sum of the two modes is stated as [11]:

$$V = V_o + V_x \quad (2)$$

To calculate the spatial correlation of the received voltages between two links the following equation is used:

$$R_{kl} = \frac{\sum_i (|V_{k_i}| - |\bar{V}_k|)(|V_{l_i}| - |\bar{V}_l|)}{\left(\sum_i (|V_{k_i}| - |\bar{V}_k|)^2 \right) \sum_i (|V_{l_i}| - |\bar{V}_l|)^2}^{1/2} \quad (3)$$

where k and l are different link indexes with received voltages denoted as V_{k_i} and V_{l_i} in the i -th sample of measurement or simulation. Since the total voltage is the sum of complex terms of all paths and modes, the magnitude depends on the amplitude and, in particular, the phase of each constituent path, as occurs in the multipath trajectories [6].

The proposed hypothesis is that in long distance skywave HF radio channels, the number of paths is quite large with random and uncorrelated phase shifts [12], so that although the path amplitudes might be highly correlated, the signal level expressed in the total complex voltage would be low correlated as well.

II.2. Diversity

The simple concept of diversity is that if a link experiences severe fading, it is expected that other links that are not correlated or have low correlation with the first link have a signal reception that is strong enough for communication. The receiver subsequently performs the combining process by selecting the link that has the best SNR (signal-to-noise power ratio) in order to increase the overall received SNR, a technique known as selective combining. In the case of long distance HF communication systems, the site diversity can be applied which involves more than one link around a common terminal, for example, a common receiver with two or more transmitters or vice versa. In addition to the increasing availability, the diversity also provides a gain in the form of an increase in SNR statistics after combining. If the low correlation hypothesis for the convergent links can be proven, the next hypothesis that can be proposed is that the site diversity techniques for HF links can provide diversity gain and significant increase in availability. A previous research [12] has showed variations in the link quality with different times between low frequency segments and high frequency segments on the HF band. The frequency of 5-10 MHz tends to provide a better quality in the morning, while the range of 10-30 works better during the day. Thus it can also be hypothesized that joint frequency-space diversity will provide better availability and diversity gain performance.

III. Evaluation Methods

The hypothesis for spatial correlation of the two links is tested by evaluating two real links, namely the 3044-km Surabaya-Merauke (S-M) and the 1895-km Surabaya-Ternate (S-T) in the equatorial region of Indonesia, as shown in Fig. 1. The evaluation is held in two ways, namely simulation and direct measurement.

The simulation is carried out using the ray tracing feature in Proplab Pro 3 software, while measurements are taken to acquire complex channel responses from the two links simultaneously.

III.1. Simulation

The Proplab Pro estimates the ionosphere parameters [13] using the 2007-International Reference Ionosphere (IRI) to model the conditions of the ionosphere layer that are adjusted to the real conditions by determining the 12-month sunspot number (SSN) and the effective SSN (IG Index) manually [14]. This paper uses the first Appleton-Hartree model, considered to be the most accurate in Proplab for ray tracing, which involves the effects of the geomagnetic field and collisions between electrons and neutral particles [15]. In this study, the 12-month running mean sunspot number (SSN) data, the IG index (effective SSN) and the 10.7 cm solar flux were taken from the Space Weather Radar (SWR), Australia [16]. The

geographical and geomagnetic locations of the links can be seen in Table I.

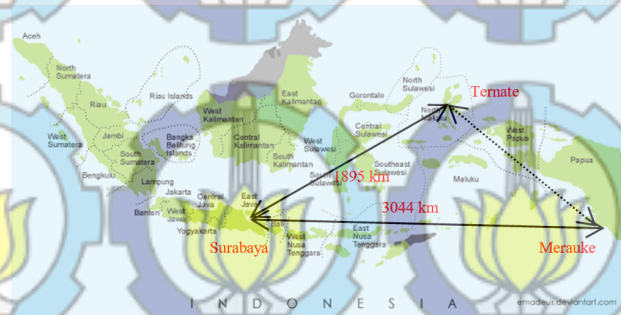


Fig. 1. Map of locations of the common transmitter in Surabaya and the two receivers in Merauke and Ternate

TABLE I
GEOGRAPHICAL COORDINATES AND MAGNETIC DIPS OF THE TRANSMITTER IN SURABAYA AND RECEIVERS IN MERAUKE AND TERNATE

	Location	Geographical Coordinate	Magnetic Dip
Transmitter	Surabaya	7.28 S, 112.80 E	16.71 S
Receiver I	Merauke	8.53 S, 140.42 E	16.38 S
Receiver II	Ternate	0.76 N, 127.34 E	8.17 S

The transmitter is located on the rooftop of the EE Building, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya (7.28 S, 112.80 E), the first receiver on the top of the EE Laboratory, Musamus University, Merauke (8.53 S, 140.42 E) and the second receiver on the Informatics Building, Khairun University, Ternate (0.76 N, 127.34 E). The ray tracing produces O and X wave trajectories, distance or ground range, latitude and longitude coordinates of the path endpoint, signal strength, elevation angle, azimuth, total propagation distance, frequency and number of hops. The phase shift for each path is obtained from the remainder of division of the total propagation distance by the wavelength. By using the great circle distance equation [17] the distance between the endpoint of the path and the receiver is calculated to determine whether the path is considered to arrive at the receiver. Three carrier frequencies are used in this ray tracing, namely 7, 14 and 21 MHz, to determine the variation in the correlation between two links with changes in frequency. The ray tracing is conducted for May 11, 2015 and September 11, 2015 for 24 hours at one hour intervals, so that in one day 24 samples are produced and a total of 48 samples for two days. The transmit power is 1 Watt and the antenna used in each location is a vertical monopole suitable for long distance links where the elevation angle is very low [10].

The method for obtaining the sample used and for determining the path considered acceptable by the receiver is the same as that adopted in a previous paper [18]. The simulation results are used to calculate the correlation coefficients between the S-M and S-T links for the three frequencies, following the diurnal variations of the ionosphere layer in local time (LT) where LT = UTC + 7 hours. The night times start from 18:00 to 05:00 LT, while the daytimes from 06:00 to 17:00 LT. The

direct measurements in the field were carried out on 13-17 November 2017 which will be explained in section III-B. The validation with ray tracing done for another period of time is carried out using the simulation results for November 15-17, 2016 obtained hourly on the hour starting from 14:00 to 22:00 LT for 3 days, so that 27 hours of observation of the received complex voltage is obtained for each link. The timing of the simulation is based on the condition of the ionospheric layer where in the afternoon the absorption by the D layer decreases [10] which minimize the non-deviative loss effect that occurs in the channel trajectory. The parameters needed in this ray tracing are obtained in the same way as the simulations that have been done before, except that the frequency used is 10.145 MHz. For diversity analysis, each total voltage at the receiver is used to calculate SNR, where the thermal noise power is calculated for temperature of 300 K and receiver bandwidth of 10 kHz, accounting for an LNA (Low-Noise Amplifier) with 6 dB noise figure [19].

III.2. Measurement

The measurement is carried out by sending a CW (continuous carrier wave) signal from a HF transmitter at a frequency of about 10 MHz, with a power of 30 Watt. At the receiver, the signal is received by a software defined radio (SDR) on an Ettus USRP N210 platform, which is controlled through LabVIEW™ from a personal computer as reported in [18]. Fig. 2 shows a block diagram of the measurement system where signals are generated by an HF radio transmitter and received through the LNA before entering the USRP.

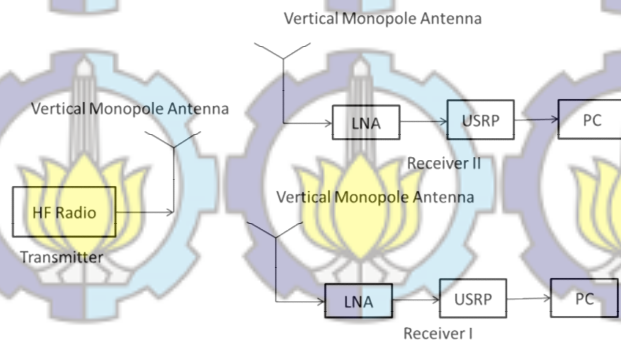


Fig. 2. Block Diagram of the Measurement System

TABLE II
CORRELATION COEFFICIENT BETWEEN SURABAYA – MERAUKE
LINK AND SURABAYA – TERNATE LINK

	S-T 7 MHz	S-T 14 MHz	S-T 21 MHz
S-M 7 MHz	-0.054	0.039	-0.049

The measurement locations as shown in Fig. 1 are the same locations used in the simulation. Measurements are made on November 13-17, 2017 at 12:00 to 00:00 LT every 10 minutes where at 12:00 the highest frequency reflected vertically by the F2 layer of the ionosphere, i.e., foF2, is above 8 MHz. The foF2 data is obtained from

the ionosonde measurements made by the Indonesian National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) in Kupang (10.16 S, 123.67 E) located around the midpoint of the Surabaya-Merauke link. The received signals are stored in the form of a complex baseband. There are 87 pairs of data from both links from only the last three days of measurement, namely November 15-17, 2017. For the previous days the ionosonde measurements show that in Kupang there is a Sporadic E layer (Es) during which the E layer thickens so that the signal that should have penetrated layer F is reflected back to earth and not sent to the receiver.

IV. Results and Discussion

IV.1. Spatial Correlation

The results obtained from ray tracing for two days in May and September 2015 show that in the S-M link there are multiple modes, which implies multiple paths, where the 7 MHz link consists of 2F to 7F modes and the 14 MHz consists of 2F and 3F modes, but the 21 MHz consists only of a single 2F mode. For the S-T link, the 7 MHz link consists of 2F to 4F modes, the 14 MHz consists of a single 2F mode, and the 21 MHz link also consists of a single 1F mode. A previous simulation shows that on the S-M link, 7 MHz is always below maximum useable frequency (MUF). Later, this characteristic makes the 7 MHz carrier suitable for use on the main link of the joint space-frequency diversity.

For diversity purpose, a correlation coefficient is calculated between the voltages received on the 7 MHz S-M link with the S-T link at 7, 14 and 21 MHz, respectively, by applying (3). The results given in Table II indicate that the 7 MHz S-M link and the S-T link at any of 7 MHz, 14 MHz and 21 MHz invariably exhibit a low correlation. As a comparison, the simulation results of the 10.145 MHz link for three days in November 2016 show that the S-M link consists of three modes, 2F, 3F and 4F, while the S-T link consists of 1F, 2F and 3F. The voltage correlation coefficient between the two multimode links is found to be 0.06. The measurement results in November 2017 show that the correlation is 0.56 during the day and -0.07 at night. However, the amount of data obtained during the day is very small so it cannot be concluded that the daytime correlation is higher than at night. The overall correlation coefficient between the two links from the measurement is 0.18.

IV.2. Diversity

The correlation coefficients between the links presented in III-A show that correlation between the S-M and S-T links is low, indicating the potential for site diversity to increase the link availability. To evaluate the diversity gain and availability improvement, we calculate the cumulative distribution function (CDF) of SNR for the 7 MHz S-M link as a single link and CDF of SNR for site diversity with selective combining between the 7 MHz S-M link as the primary link and the S-T link at one

of 7, 14 and 21 MHz as the alternative. Fig. 3 shows CDF of SNR from ray tracing results for May 11, 2015, while Fig. 4 is obtained from ray tracing for September 11, 2015. From these two figures the diversity gain and outage probability reduction of the diversity system with respect to the single link system can be determined.

Suppose the outage probability is 0.3, in Fig. 3 it is known that the SNR is around 50 dB for the single or non-diversity (ND) link and around 66-70 dB for the diversity system with one frequency out of the three on the alternative link, which implies a diversity gain of around 16-20 dB. Whereas in Fig. 4, the diversity gain is 7 dB with the alternative link at 14 MHz and 12.5 dB with the alternative link at 21 MHz.

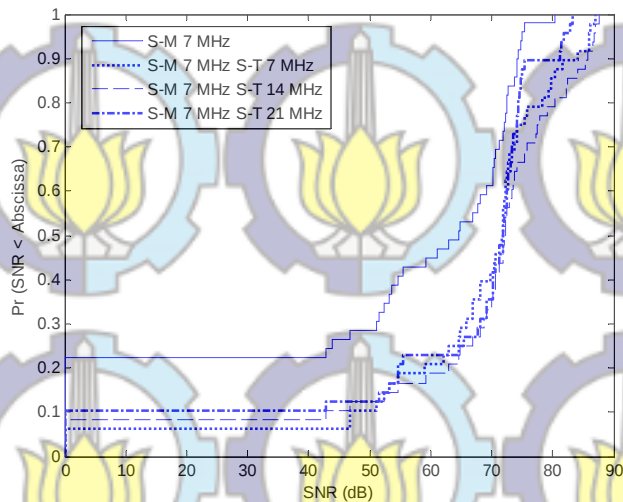


Fig. 3. CDF of 7 MHz Surabaya – Merauke link and Surabaya-Ternate link that uses frequencies of 7 MHz, 14 MHz and 21 MHz as a possibility of diversity branch obtained from ray tracing on 11 May 2015

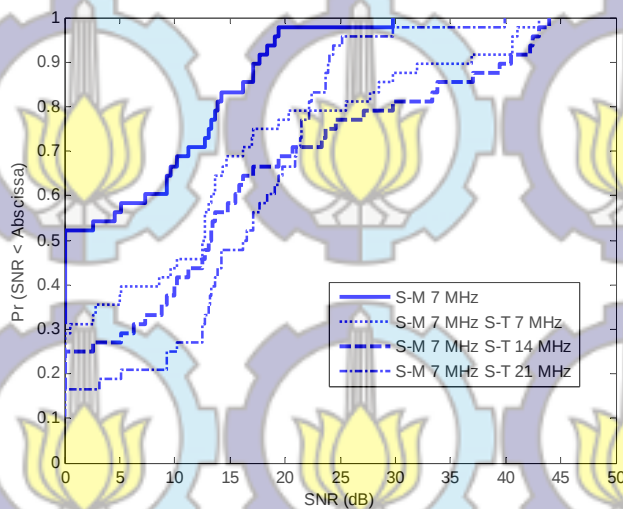


Fig. 4. CDF of 7 MHz Surabaya – Merauke link and Surabaya-Ternate link that uses frequencies of 7 MHz, 14 MHz and 21 MHz as a possibility of diversity branch obtained from ray tracing on 11 September 2015

If the outage probability is observed at 10 dB SNR, Fig. 3 shows that a single link system produces an outage

probability around 0.22 (or equivalently, 0.78 availability) and decreases to around 0.06 (0.94 availability) for diversity with an alternative link at 7 MHz, 0.08 (0.92 availability) with an alternative link at 14 MHz and 0.1 (0.9 availability) with an alternative that uses 21 MHz. Whereas according to Fig. 4, without diversity the outage probability reaches 0.7 (0.3 availability), while the outage probability is 0.43 for the diversity system with an alternative link at 7 MHz (0.57 availability), 0.5 (0.5 availability) with an alternative link at 14 MHz and 0.25 (availability 0.75) with an alternative link at 21 MHz. From these results it can be seen that the outage probability can be reduced, or in other words the availability is improved, by using the joint space-frequency diversity techniques. The results above indicate that the increase in availability can be more than double that of the single link for the 10 dB SNR threshold with diversity using an alternative link at 21 MHz. The diurnal characteristics of the main link have to be studied in order to find the frequency that is most suitable for the alternative link. This possibility can be inferred from Fig. 5 and Fig. 6 where the SNR of each link is shown to vary with time. The 7 MHz Surabaya-Merauke link which serves as the main link might perform well from 00:00 to 05:00 LT, while in the following hours an alternative link is used with a frequency of 21 MHz or 14 MHz. This is due to the fact that after 05:00, the SNR for 7 MHz link drops to -40 dB.

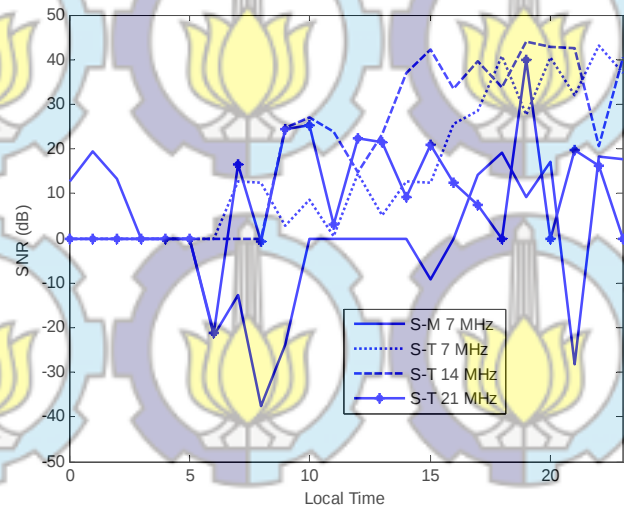


Fig. 5. SNR per hour at the main link and diversity branch obtained from ray tracing on 11 May 2015

IV.3. Discussion

The results in III-B shows that the S-M link has a low correlation with the S-T link at all specified frequencies.

As mentioned in previous studies [14], the phase shifts on certain paths or modes are random with uniform distribution and independent of the phase shift on other paths. The randomness and independence of this phase shift cause the total voltage on the two links to have a low correlation. This is verified by the results of the PropLab simulation at a frequency of 10.145 MHz

carried out for November 15-17, 2016 and the direct measurement results obtained on November 13-17, 2017.

The low link-to-link correlations indicate the potential benefits of site diversity to increase the availability and obtain greater SNR statistics due to the diversity gain.

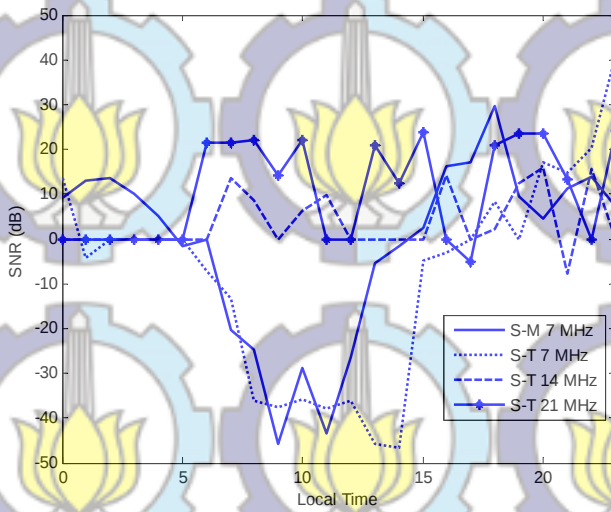


Fig. 6. SNR per hour at the main link and diversity branch obtained from ray tracing on 11 September 2015

The Surabaya-Merauke link with a frequency of 7 MHz is applied as the main link because based on the MUF graph this frequency is below MUF for 24 hours, which means the HF wave is bent down by the ionosphere. However, during the day the 7 MHz frequency falls below the LUF (lowest usable frequency) and the SNR decreases to -40 dB as shown in Figs. 5 and 6. The frequency returns higher than LUF at night. To maximize the benefit of site diversity, the frequency chosen in the alternative link must have different characteristics from the one used on the primary link, which is the essence of joint space-frequency diversity scheme.

Therefore, a frequency that is greater than LUF during the day, which in this case can be 14 MHz or 21 MHz, is used on the alternative link. The 7 MHz is also below LUF on the S-T link during the day so it does not provide maximum benefit if it is used on an alternative link. In addition, the *t*-test shows that the SNR from site diversity with 7 MHz S-T as an alternative link is smaller than the SNR of the diversity system with a frequency of 14 MHz on the same link.

The *t*-test also shows that SNRs produced by adopting 14 and 21 MHz on the alternative link of the diversity system are not significantly different, which means that either of the two frequencies can be selected as alternative links to the Surabaya-Merauke 7 MHz main link.

These results support recommendations for superior site diversity implementation strategies for HF skywave communication systems, that is, the space-frequency diversity, using two frequencies which have different or opposite diurnal characteristics on the main link and alternative links.

V. Conclusion

Since the phase shift of an HF skywave path is random and independent between different paths, while the HF link can have multiple paths, the voltage correlation coefficient between two HF links is low. This low spatial correlation has been proven by measurements on two real links and ray-tracing simulations. The low correlation promotes the benefits of site diversity for the HF skywave communication systems. This study demonstrates that site diversity with selection combining can increase the diversity gain and reduce the probability of outage significantly. To increase further the advantage of site diversity in long-distance HF skywave communications, the frequency selection for each of the primary and alternative link can be made by finding frequencies that have diurnally reversed characteristics.

As typically shown in this study, the site diversity that adopts 7 MHz for the main link and 14 or 21 MHz for an alternative link can provide a 16-20 dB diversity gain for the outage probability of 0.3 and increase the availability by more than twice the value of a single link system with a 10 dB SNR threshold. The use of joint space-frequency diversity is therefore recommendable in the implementation of long-range HF communications.

Acknowledgements

This study was partially supported by the Indonesian Ministry of Research, Technology and Higher Education through BPPDN scholarship awarded to the first author and the PUPT research grants received by the second author, and also by JICA Japan through the PREDICT2 grant. The ionosonde data from Kupang is made available by LAPAN, Indonesia.

References

- [1] C. Vilella, D. Miralles, J. L. Pijoan, An Antarctica-to-Spain HF ionospheric radio link : Sounding Results, *Radio Science*, Volume 43, RS4008. <https://doi.org/10.1029/2007RS003812>
- [2] Isabona, J., Srivastava, V., Radio Channel Propagation Characterization and Link Reliability Estimation in Shadowed Suburban Macrocells, (2017) *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*, 7 (1), pp. 57-63. doi:<https://doi.org/10.15866/irecap.v7i1.10343>
- [3] Rajesh, R., Mallick, P., Thiruvengadam, S., Outage Performance of Optimal Relay Selection and Adaptive Antenna Configuration in Bidirectional Full-Duplex Amplify-and-Forward Relay Network, (2016) *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*, 6 (3), pp. 169-174. doi: <https://doi.org/10.15866/irecap.v6i3.8112>
- [4] Afolayan, B., Afullo, T., Alonge, A., Seasonal and Annual Analysis of Slant Path Attenuation Over a 12 GHz Earth-Satellite Link in Subtropical Africa, (2017) *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*, 7 (7), pp. 572-580. doi: <https://doi.org/10.15866/irecap.v7i7.12668>
- [5] G. Hendrantoro, Indrabayu, T. Suryani, A. Mauludiyanto, A Multivariate Autoregressive Model of Rain Attenuation on Multiple Short Radio Links, *IEEE Antenna Wireless and Propagation Letters*, March 06, 2006, Volume 5, Pages 54-57. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2006.870362>

- [6] T. Rappaport, *Wireless Communication* (Prentice-Hall, 2002).
- [7] P. Baker, Spatial Correlation Measurements on One-Hop HF Radio Waves, *IEEE Transactions on Antenna and Propagations*, November 1971, Volume 19 (Issue 6), Pages 793 – 794 <https://doi.org/10.1109/TAP.1971.1140047>
- [8] M. Balser, W.B. Smith, Some Statistical Properties of Pulsed Oblique HF Ionospheric Transmission, *Journal of Research of the National Bureau of Standard – D. Radio Propagation*, Volume 66D, No. 6, November – December 1962, Pages 721 – 730.
- [9] A.J. Gibson, U.M. Yilmaz, Y. Tulunay, C.B. Erol, A. Ozguc, T. Ata, Characteristics of Fading of HF Signal and Noise, Intensities on Three Paths Between The United Kingdom and Turkey, *Radio Science*, Volume 30, Number 3, May – June 1995, Pages 649 – 658 <https://doi.org/10.1029/94RS03174>
- [10] L. McNamara, *The Ionosphere : Communications, Surveillance, and Direction Finding* (Krieger Publishing Company, 1991)
- [11] A. Vastberg, B. Lundborg, Superposition of Signals in Ionospheric Multipath Channels, *Radio Science*, Volume 32, Number 5, September – October 1997, Pages 2083 – 2090. <https://doi.org/10.1029/97RS00320>
- [12] I. Kurniawati, G. Hendrantoro, Wirawan, M. Taufik, Statistical Modeling of Low-Latitude Long-Distance HF Ionospheric Multi-Mode Channels, *Progress in Electromagnetics Research M*, Volume 64, 23-33, 2018, Pages 77–86. [doi:10.2528/PIERM17101603](https://doi.org/10.2528/PIERM17101603)
- [13] *Solar Terrestrial Dispatch*, Proplab-Pro Version 3, 2010.
- [14] R. Mitran, M. Stanic, Delay Spread Evaluation of HF Channels based on Ray Tracing, *IEEE International Black Sea Conf. On Communication and Networking (BlackSeaComm)*, pp. 1-5, Varna, 2016. <https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom.2016.7901553>
- [15] R. Jones. And J. Stephenson, *Versatile Three Dimensional Ray Tracing Computer Program For Radio Wave in The Ionosphere* (US Gov. Printing Office, 1975).
- [16] Australian Government Beureau of Meteorology, *Monthly Sunspot Number*. [Online]. Available : www.sws.bom.gov.au/Solar/1/6
- [17] E. Williams, *Aviation Formulary V1.43* [Online]. Available: williams.best.vwh.net/avform.html, 2007
- [18] I. Kurniawati, P. H. Mukti, R. Corputty and G. Hendrantoro, Preliminary Study on HF Channel Complex Impulse Response and Power Delay profile characteristics in low latitude region, *XXXI URSI General Assembly and Scientific Symposium*, GP1.58, Beijing, China, August 16 – 23, 2014. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929765>
- [19] *Low Noise Amplifier ZFL-500LN+*. <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZFL-500LN.pdf>, accessed August 20, 2018

Latitude Long-Distance HF Ionospheric Multi-Mode Channel which is published by *Progress in Electromagnetics Research M* in 2018. Ms. Kurniawati received the URSI Young Scientist Award in XXXI URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), Beijing, China in 2014.

E-mail: kurniawati12@mhs.ee.its.ac.id



Gamantyo Hendrantoro was born in Jombang, Indonesia in November 11, 1970. He received the B.Eng. degree from the Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, Indonesia, in 1992, and the M.Eng. and Ph.D. degrees from Carleton University, Ottawa, ON, Canada, in 1997 and 2001, respectively, all in electrical engineering. He has been engaged in various studies, including investigation into millimeter-wave propagation and wireless systems for tropical areas, studies on HF skywave channels and communications in equatorial regions, and the development of radar array and signal processing. He is currently a Professor with the Department of Electrical Engineering, ITS. His current research interests include radio propagation channel modeling and wireless communications. Dr. Hendrantoro was ranked third in the 2005 Selection of University Lecturers with Best Achievement by the Indonesian Ministry of Education, and received the URSI Young Scientist Award in 2005 and the ITS Laboratory-Based Education Award in 2014. He is a Senior Member of IEEE.



Wirawan was born in Pasuruan, Indonesia in November 9, 1963. He received the B.Eng. degree in electrical engineering from Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, Indonesia in 1987, the D.E.A degree in signal and image processing from the Ecole Supérieure en Sciences Informatiques, Sophia Antipolis, France, in 1996, and the Ph.D degree in image processing from Telecom ParisTech, Paris, France, in 2003. He has been with the Department of Electrical Engineering, ITS, as a Lecturer since 1989. His current research interests include statistical signal processing, underwater acoustic communication, and various aspects of wireless sensor networks.



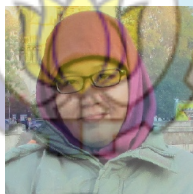
Muhammad Taufik was born in Bangkalan, Indonesia, in September 19, 1955. He received the B.Eng. degree in geodetics engineering from Institut Teknologi Bandung (ITB) Indonesia in 1983 and Ph.D in Geosciences from Universite de Nice, Sophia Antipolis, France in 1994. He has been with the Department of Geomatics Engineering, ITS, as a lecturer since 1986. His current research interest include geodetics, remote sensing and GIS, geodynamic and environment

Authors' information

¹Department of Electrical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.

²Department of Geomatics Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.

³Department of Electrical Engineering, Universitas Muhammadiyah Surabaya, Indonesia.



Indah Kurniawati born in Tulungagung, Indonesia in June 16, 1981. She received the B.Eng degree and the M.Eng degree from Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, in 2004 and 2008, respectively, all in electrical engineering. She has been with the Department of Electrical Engineering, Universitas Muhammadiyah

Surabaya, Indonesia since 2006, and currently pursuing the Ph.D degree in HF Skywave Channels and Communication System in low-latitude area with the Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia. Her previous publication is Statistical Modeling of Low-



DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Indah Kurniawati dilahirkan di Tulungagung pada tanggal 16 Juni 1981. Penulis mendapatkan gelar Sarjana Teknik (ST) pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Tahun 2004. Pada tahun 2008 penulis mendapatkan gelar Magister Teknik (MT) di Bidang Keahlian Telekomunikasi Multimedia, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Saat ini penulis bekerja sebagai Dosen di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Surabaya. Melalui Beasiswa Pendidikan Pascasarjana bagi Dosen Dalam Negeri (BPPDN), penulis mengambil Program Doktor (S3) pada Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Publikasi yang dihasilkan selama menempuh pendidikan Doktor :

Seminar

1. Kurniawati, I., P.E.W Lestari, G. Hendrantoro, "Wideband HF Channel Characteristics Measurement Design in Low Latitude Area", *8th International Student Conference on Advanced Science and Technology (ICAST)*, Kumamoto, 2013
2. Kurniawati, I., P. H. Mukti, R. Corputty and G. Hendrantoro, "Preliminary Study on HF Channel Complex Impulse Response and Power Delay," *XXXI URSI General Assembly and Scientific Symposium*, Beijing, 2014
3. Kurniawati, I., P.E.W. Lestari, R. Corputty, G. Hendrantoro, A. Mauludiyanto, Wirawan, M. Taufik, "A Spatial Modelling Effort of Ionospheric HF Channels in Low-Latitude Region, " *10th International Student Conference on Advanced Science and Technology (ICAST)*, Surabaya, 2015

Jurnal Internasional Terindeks Scopus

1. Kurniawati, I., G. Hendrantoro, Wirawan, M. Taufik, "Statistical Modeling of Low-Latitude Long-Distance HF Ionospheric Multi-Mode Channels",



Progress in Electromagnetics Research M, Volume 64, 23-33, 2018, Pages 77 – 86

2. Kurniawati, I., G. Hendrantoro, Wirawan, M. Taufik, “Spatial Correlation and Diversity of Low-Latitude Multipath Multimode HF Skywave Radio Channels”, diterima dan akan diterbitkan pada *International Journal on Communications Antenna and Propagation* (IRECAP) edisi April 2019

Capaian Lainnya :

1. JASSO Scholarship Recipient for 8th *International Student Conference on Advanced Science and Technology* (ICAST), Kumamoto University, Japan, 2013
2. Penerima Young Scientist Award pada XXXI URSI General Assembly and Scientific Symposium (GASS) Beijing, Cina, 2014
3. Penerima beasiswa Program Peningkatan Kualitas Publikasi Internasional (PKPI) Kemenristekdikti di Universite de Rennes I, Prancis, 2015