

**PENGARUH *STRAY CAPACITANCE* PADA MODEL CCVT TERHADAP  
PENENTUAN LOKASI GANGGUAN SALURAN TRANSMISI 150 kV  
MENGUNAKAN METODA TRANSFORMASI WAVELET DISKRIT**

UNIVERSITAS ANDALAS

Karya Ilmiah sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan jenjang strata dua (S-2)  
di Departement Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas

Oleh

Tesya Uldira Septiyeni

NIM. 2120952008

Dosen Pembimbing

Novizon, Ph. D

NIP. 19661108 199702 1 001



UNTUK

K

N

BANGSA

**Program Studi Magister  
Teknik Elektro Fakultas Teknik  
Universitas Andalas  
2023**

# LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**Pengaruh Stray Capacitance Pada Model CCVT Terhadap  
Penentuan Lokasi Gangguan Saluran Transmisi 150 kV  
Menggunakan Metoda Transformasi Wavelet Diskrit**

Oleh:

**Tesya Uldira Septiyeni  
2120952008**

**Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas**

**Disetujui pada Tanggal : 09, 05, 2023**

**Pembimbing Tugas Akhir**



**Novizon, Ph.D**

**NIP. 19661108 199702 1 001**

**Mengetahui,**

**Ketua Departemen Teknik Elektro**

**Dr. Eng. Muhammad Ilhamdi Rusydi  
NIP. 198205222005011002**

# LEMBAR PENGESAHAN

## TESIS

**Pengaruh Stray Capacitance Pada Model CCVT Terhadap  
Penentuan Lokasi Gangguan Saluran Transmisi 150 kV  
Menggunakan Metoda Transformasi Wavelet Diskrit**

Oleh:

**Tesya Uldira Septiyeni  
2120952008**

**Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas**

**Disetujui pada Tanggal : 09, 05, 2023**

**Pembimbing Tesis**



**Novizon, Ph.D**

**NIP. 19661108 199702 1 001**

**Mengetahui,**

**Ketua Departemen Teknik Elektro**

**Dr. Eng. Muhammad Ilhamdi Rusydi**

**NIP. 198205222005011002**

## HALAMAN PENGHARGAAN

Alhamdulillah puji beserta syukur kepada Allah swt. Yang telah memberikan berkah, rahmat, kesehatan, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini. Penyusunan Tesis ini telah melibatkan banyak pihak yang sangat membantu dalam berbagai hal, baik berupa bimbingan, bantuan, serta dorongan yang bersifat moral maupun material. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua terkasih dan tersayang yakni Ayahanda Khulmasri dan Ibunda Iriani, S.Pd.SD yang senantiasa memberikan penulis dukungan, perhatian, semangat, serta doa yang tiada tara demi kelancaran dan keberhasilan penulis dalam menyelesaikan Tesis ini.
2. Saudara/i penulis yaitu Isma Ultria Rahmayeni, S.Pd dan Rendi Yenzia Ulfa, S.Pd yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis.
3. Bapak Novizon, Ph.D selaku dosen pembimbing Tesis yang telah memberikan arahan, ilmu, saran, dan motivasi kepada penulis selama proses penyusunan Tesis ini.
4. Bapak Prof. Dr. Eng Ariadi Hazmi, MT dan Bapak Aulia, Ph.D selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, tanggapan, dan masukan dalam penyusunan Tesis ini.
5. Bapak Dr. Eng Muhammad Ilhamdi Rusydi, S.T, M.T selaku Ketua Departement Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas.
6. Seluruh dosen, staff ,dan karyawan/i yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan, serta membantu penulis dalam proses administrasi selama masa perkuliahan.
7. Rijalul Muhardi, S.Pt yang selalu memberikan motivasi, perhatian, dan semangat yang tiada henti-hentinya serta menjadi *support system* terbaik bagi penulis selama penyusunan Tesis ini.
8. Teman-teman seperjuangan BP 2021 pascasarjana teknik elektro unand yang telah bekerja sama serta memberikan bantuan selama masa studi.

## LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya menyatakan dengan sungguh-sungguh bahwa Tesis ini berjudul :

**“PENGARUH *STRAY CAPACITANCE* PADA MODEL CCVT TERHADAP  
PENENTUAN LOKASI GANGGUAN SALURAN TRANSMISI 150 kV  
MENGUNAKAN METODA TRANSFORMASI WAVELET DISKRIT”**

Ditulis untuk melengkapi sebagian pernyataan menjadi Magister Teknik pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas. Tesis ini bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari Tesis yang telah dipublikasikan atau pernah digunakan untuk mendapatkan gelar magister di lingkungan Universitas Andalas maupun di perguruan tinggi atau instansi lainnya.

Padang, Mei 2023



Tesya Uldira Septiyeni  
NIM. 2120952008



## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama lengkap penulis yaitu Tesya Uldira Septiyeni, lahir di Bukittinggi pada tanggal 26 september 1998 yang merupakan anak ketiga atau bungsu dari pasangan Bapak Khulmasri dan Ibu Iriani. Penulis menempuh jenjang pendidikan di SD Islam Ibnu Syam, Kecamatan Banuhampu, Kabupaten Agam dan selesai pada tahun 2010. Lalu penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 7 Bukittinggi dan tamat pada tahun 2013. Selanjutnya penulis sekolah menengah di SMA Negeri 5 Bukittinggi dan lulus pada tahun 2016, serta di tahun yang sama penulis diterima sebagai mahasiswa pada program studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas. Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi penulis mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HMTE-FT UNAND), selain itu penulis juga mengikuti organisasi kampus yaitu Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Pandekar. Lalu penulis menyelesaikan Kerja Praktek di GIS Simpang Haru, Padang. Selanjutnya penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di nagari Sasak Ranah Pasisia, Kabupaten Pasaman Barat pada tahun 2019. Penulis menyelesaikan studi sarjana pada tahun 2021 dan di tahun yang sama diterima sebagai mahasiswa pascasarjana pada program studi S-2 Teknik Elektro Universitas Andalas.



Judul	PENGARUH <i>STRAY CAPACITANCE</i> PADA MODEL CCVT TERHADAP PENENTUAN LOKASI GANGGUAN SALURAN TRANSMISI 150 kV MENGGUNAKAN METODA TRANSFORMASI WAVELET DISKRIT	Tesya Uldira Septiyeni
Program Studi	Magister Teknik Elektro	2120952008
Fakultas Teknik Universitas Andalas		
<b>Abstrak</b>		
<p>Sistem transmisi yang panjang dan terletak di daerah terbuka sering mengalami gangguan. Alokasi gangguan cukup sulit karena untuk mendeteksi lokasi gangguan membutuhkan waktu yang cukup lama dan sering tidak akurat. Ketidakakuratan tersebut disebabkan oleh model sensor tegangan berupa CCVT yang kurang tepat. Pada penelitian ini, dianalisa model CCVT yang memperhitungkan pengaruh stray capacitance. Stray capacitance yang diperhitungkan dibandingkan dengan model tanpa memperhitungkan stray capacitance. Nilai stray capacitance dimasukkan kedalam model CCVT dan digunakan sebagai sensor tegangan pada penentuan lokasi gangguan. Hasil dari penentuan lokasi tersebut dibandingkan dengan CCVT tanpa stray capacitance. Adapun data sistem transmisi yang digunakan yaitu sistem transmisi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Maninjau hingga Gardu Induk (GI) Pauh Limo. Pemodelan sistem transmisi menggunakan perangkat lunak <i>alternative transient program</i> (ATP), dimana memiliki komponen seperti saluran transmisi, sumber tegangan, dan CCVT. Adapun CCVT digunakan untuk pengukuran yang memerlukan parameter kecepatan rambat gelombang, panjang saluran, dan selisih waktu kedatangan gelombang. Sistem yang dimodelkan diberikan gangguan satu fasa tanah, dua fasa tanah, tiga fasa, dua fasa, tiga fasa tanah, dan surja petir. Penentuan lokasi gangguan menggunakan metode ujung tunggal dengan jumlah sampling 1 MHz dengan jenis wavelet Daubechies 4. Hasil yang diperoleh berdasarkan variasi model CCVT maka model CCVT dengan stray <i>capacitance</i> memiliki error yang lebih kecil sehingga tingkat akurasi lebih tinggi dibandingkan dengan model CCVT tanpa stray <i>capacitance</i>. Selain itu untuk variasi jumlah sampling yang digunakan, jumlah sampling 1 MHz memberikan nilai error yang lebih kecil sehingga nilai akurasinya lebih tinggi dibandingkan dengan jumlah sampling 10 kHz dan 500 kHz.</p> <p>Kata Kunci : Sistem Transmisi, Gelombang Berjalan, Transformasi Wavelet Diskrit, <i>Coupling Capacitor Voltage Transformer</i>, <i>Stray Capacitance</i>.</p>		

<i>Title</i>	<b>THE INFLUENCE OF STRAY CAPACITANCE IN THE CCVT MODEL TO DETERMINING THE LOCATION OF TRANSMISSION LINE 150 kV INTERFERENCE USING DISCRETE WAVELET TRANSFORM METHOD</b>	<i>Tesya Uldira Septiyeni</i>
<i>Major</i>	<i>Master Of Electrical Engineering</i>	2120952008
<i>Faculty of Engineering Andalas University</i>		
<b>Abstract</b>		
<p><i>Transmission systems that are long and located in open areas often experience interference. Fault allocation is quite difficult because detecting fault locations takes a long time and is often inaccurate. This inaccuracy is caused by an inaccurate CCVT voltage sensor model. In this study, the CCVT model is analyzed which takes into account the effect of stray capacitance. The calculated stray capacitance is compared with the model without calculating the stray capacitance. The stray capacitance value is entered into the CCVT model and used as a voltage sensor in determining fault locations. The results of determining the location are compared with CCVT without stray capacitance. The transmission system data used is the Maninjau Hydroelectric Power Plant (PLTA) transmission system to the Pauh Limo Substation (GI). Transmission system modeling uses alternative transient program (ATP) software, which has components such as transmission lines, voltage sources, and CCVT. The CCVT is used for measurements that require parameters of wave propagation speed, channel length, and wave arrival time difference. The system being modeled is given one-phase ground, two-phase ground, three-phase, two-phase, three-phase ground faults, and a lightning surge. Determination of the location of the disturbance using the single end method with a sampling rate of 1 MHz with the Daubechies 4 wavelet type. The results obtained are based on variations in the CCVT model, the CCVT model with stray capacitance has a smaller error so that the level of accuracy is higher than the CCVT model without stray capacitance. In addition, for the variation of the sampling rate used, the 1 MHz sampling rate gives a smaller error value so that the accuracy value is higher than the 10 kHz and 500 kHz sampling rates.</i></p>		
<p><i>Keywords : Transmission Systems, Travelling Wave, Discrete Wavelet Transformer, Coupling Capacitor Wavelet Transformer, Stray Capacitance</i></p>		



## PRAKATA

Segala puji bagi Allah swt. atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga Tesis yang berjudul “Pengaruh Stray *Capacitance* Pada Model CCVT Terhadap Penentuan Lokasi Gangguan Saluran Transmisi 150 kV Menggunakan Metoda Transformasi Wavelet Diskrit” ini dapat terselesaikan. Penulis Tesis ini guna memenuhi salah satu syarat bisa menempuh tujuan magister Teknik Elektro pada Fakultas Teknik, Universitas Andalas. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Allah swt. yang telah memberikan kesehatan dan rahmatnya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini.
2. Kedua orang tua dan saudara/i atas doa, dukungan, dan semangat yang tiada tara demi kelancaran penyusunan Tesis ini.
3. Bapak Dr. Eng Ilhamdi Rusydi selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas.
4. Bapak Novizon, Ph.D selaku dosen pembimbing Tesis yang telah memberikan arahan, ilmu, saran, dan motivasi kepada penulis selama penyusunan Tesis ini.
5. Bapak Prof. Dr. Eng Ariadi Hazmi, MT dan Bapak Aulia, Ph.D selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, tanggapan, dan masukan dalam penyusunan Tesis ini.
6. Rijalul Muhardi, S.Pt selaku *support system* terbaik bagi penulis dalam penyusunan Tesis ini.
7. Seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tesis ini, yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih terdapat kekurangan baik dari segi penyampaian maupun penulisan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan dan saran yang membangun demi perbaikan Tesis ini. Untuk penyampaian kritik dan saran dapat disampaikan melalui *e-mail* penulis [tesyauldira@gmail.com](mailto:tesyauldira@gmail.com). Penulis berharap semoga Tesis ini bermanfaat, menambah pengetahuan serta wawasan bagi semua pihak terutama bagi penulis sendiri.

Padang, Mei 2023

Tesya Uldira Septiyeni

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGHARGAAN.....	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN.....	v
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	vi
Abstrak.....	vii
<i>Abstract</i> .....	viii
PRAKATA.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xviii
DAFTAR SIMBOL.....	xxi
DAFTAR ISTILAH.....	xxii
DAFTAR SINGKATAN.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. 1 Latar Belakang.....	1
1. 2 Kontribusi.....	3
1. 3 Rumusan Masalah.....	3
1. 4 Tujuan.....	3
1. 5 Manfaat Penelitian.....	4
1. 6 Batasan Masalah.....	4
1. 7 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2. 1 Pendahuluan.....	6
2. 2 Saluran Transmisi.....	6
2. 3 Saluran Transmisi Tanpa Rugi-Rugi.....	14

2.4	Sensor Tegangan dan Sensor Arus .....	16
2.4.1	Coupling Capacitor Voltage Transformer.....	16
2.4.2	Current Transformer.....	22
2.5	Tegangan Lebih .....	23
2.5.1	Tegangan Lebih Petir .....	23
2.5.2	Tegangan Lebih Hubung.....	24
2.5.3	Tegangan Lebih Sementara.....	25
2.6	Travelling Wave .....	25
2.7	Pengolahan Sinyal pada Travelling Wave.....	26
2.7.1	Wavelet .....	27
2.7.2	Transformasi Wavelet.....	27
2.7.3	Tranformasi Clarke .....	29
2.7.4	Sampling Rate .....	30
2.7.5	Matlab Function .....	30
2.8	Penentuan Lokasi Gangguan .....	31
2.8.1	Single-ended Method .....	31
2.8.2	Double-ended Method.....	32
2.9	Gangguan pada Saluran Transmisi.....	33
2.9.1	Gangguan Internal .....	33
2.9.2	Gangguan Eksternal .....	35
2.10	Perangkat Lunak <i>Alternative Transient Program</i> .....	36
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>		<b>37</b>
3.1	Pendahuluan .....	37
3.2	Gambaran Umum Penelitian .....	37
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>42</b>
4.1	Pendahuluan .....	42
4.2	Pengumpulan Data Sistem Transmisi.....	42
4.3	Pemodelan Sistem Transmisi .....	43
4.3.1	Saluran Transimi .....	44
4.3.2	Sumber Tegangan.....	46

4. 3. 3	<i>Coupling Capacitor Voltage Transformer</i> .....	47
4. 4	Model Gangguan pada Saluran Transmisi Menggunakan Perangkat Lunak ATP 49	
4. 4. 1	Gangguan dari dalam sistem .....	49
4. 4. 2	Gangguan dari luar sistem.....	51
4. 5	Transformasi Clarke .....	52
4. 6	<i>Discrete Wavelet Transform</i> .....	52
4. 7	Penentuan Lokasi Gangguan Saluran Transmisi .....	52
4. 7. 1	Gangguan Satu Fasa Tanah.....	52
4. 7. 2	Gangguan Dua Fasa .....	62
4. 7. 3	Gangguan Dua Fasa Tanah .....	73
4. 7. 4	Gangguan Tiga Fasa.....	83
4. 7. 5	Gangguan Tiga Fasa Tanah.....	93
4. 7. 6	Gangguan Surja Petir .....	103
BAB V	PENUTUP.....	114
5. 1	Kesimpulan.....	114
5. 2	Saran .....	114
DAFTAR	PUSTAKA .....	116
LAMPIRAN	.....	120



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Parameter Saluran Transmisi Sepanjang Saluran.....	9
Gambar 2. 2 Model Saluran Transmisi Pendek .....	9
Gambar 2. 3 Saluran Transmisi model - $\pi$ .....	10
Gambar 2. 4 Saluran Transmisi Model - T .....	11
Gambar 2. 5 Model Saluran Transmisi Satu Fasa.....	12
Gambar 2. 6 Model Elemen Saluran Transmisi .....	12
Gambar 2. 7 Struktur Coupling Capacitor Voltage Transformer.....	17
Gambar 2. 8 Rangkaian Ekivalen CCVT Tanpa Stray Capacitance .....	18
Gambar 2. 9 Diagram Ekivalen Coupling Capacitor Voltage Transformer.....	19
Gambar 2. 10 Rangkaian Ekivalen CCVT dengan Stray Capacitance .....	20
Gambar 2. 11 Rangkaian Dasar CT .....	22
Gambar 2. 12 Bentuk Gelombang Petir .....	24
Gambar 2. 13 Ilustrasi Gelombang Datang, Gelombang Pantul, dan Gelombang Terusan.....	25
Gambar 2. 14 Transformasi Wavelet Daubechies ‘db4’ .....	27
Gambar 2. 15 Transformasi Wavelet Coiflets ‘coif4’ .....	27
Gambar 2. 16 Transformasi Wavelet Symlets ‘sym4’ .....	27
Gambar 2. 17 Tingkatan Penguraian Sinyal Menggunakan DWT .....	29
Gambar 2. 18 Diagram Tangga Bewley untuk Gangguan Pada Setengah Saluran Pertama <i>Single-ended Method</i> .....	31

Gambar 2. 19 Diagram Tangga Bewley untuk Gangguan pada Setengah Saluran Kedua pada <i>Single-ended Method</i> .....	32
Gambar 2. 20 Diagram Tangga Bewley Gangguan Pada <i>Double-ended Method</i> .....	33
Gambar 2. 21 Rangkaian Ekuivalen Gangguan 1-Fasa Tanah .....	34
Gambar 2. 22 Rangkaian Ekuivalen Gangguan 2-Fasa Tanah .....	34
Gambar 2. 23 Rangkaian Ekuivalen Gangguan 2-Fasa .....	34
Gambar 2. 24 Rangkaian Ekuivalen Gangguan 3-Fasa .....	34
Gambar 2. 25 Kilat Sambaran Petir .....	35
Gambar 2. 26 Model Heidler Menggunakan ATP .....	35
Gambar 2. 27 <i>Interface</i> Perangkat Lunak ATP.....	36
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian Secara Umum.....	37
Gambar 3. 2 Diagram Alir <i>Single-ended Method</i> .....	39
Gambar 3. 3 Diagram Alir Transformasi Wavelet Diskrit.....	40
Gambar 4. 1 Single Line Diagram Sistem Kelistrikan Sumatera.....	43
Gambar 4. 2 Komponen Cable Lumped Transposed Line (Clarke) Tiga Fasa.....	44
Gambar 4. 3 Parameter Komponen Cable Lumped Transposed Line (Clarke) Tiga Fasa .....	46
Gambar 4. 4 Komponen AC <i>Source</i> Tiga Fasa.....	46
Gambar 4. 5 Parameter Komponen AC <i>Source</i> Tiga Fasa.....	47
Gambar 4. 6 Model <i>Coupling Capacitor Voltage Transformer</i> Tanpa Stray <i>Capacitance</i> .....	48
Gambar 4. 7 Model <i>Coupling Capacitor Voltage Transformer</i> Dengan Stray <i>Capacitance</i> .....	49
Gambar 4. 8 Model Gangguan Satu Fasa Tanah.....	49

Gambar 4. 9 Model Gangguan Dua fasa.....	50
Gambar 4. 10 Model Gangguan Dua Fasa Tanah.....	50
Gambar 4. 11 Model Gangguan Tiga Fasa.....	50
Gambar 4. 12 Model Gangguan Tiga Fasa Tanah.....	51
Gambar 4. 13 Model Gangguan Surja Petir.....	51
Gambar 4. 14 Parameter Model Gangguan Petir.....	51
Gambar 4. 15 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	53
Gambar 4. 16 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	54
Gambar 4. 17 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance.....	57
Gambar 4. 18 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance.....	59
Gambar 4. 19 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	63
Gambar 4. 20 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	64
Gambar 4. 21 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance.....	68
Gambar 4. 22 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance.....	69
Gambar 4. 23 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	73
Gambar 4. 24 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	75

Gambar 4. 25 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance.....	78
Gambar 4. 26 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance .....	79
Gambar 4. 27 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance .....	83
Gambar 4. 28 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	85
Gambar 4. 29 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance .....	88
Gambar 4. 30 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance .....	89
Gambar 4. 31 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance .....	93
Gambar 4. 32 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance .....	95
Gambar 4. 33 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance .....	98
Gambar 4. 34 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance .....	99
Gambar 4. 35 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance .....	103
Gambar 4. 36 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	105
Gambar 4. 37 Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance .....	108
Gambar 4. 38 Contoh Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance .....	109



## DAFTAR TABEL

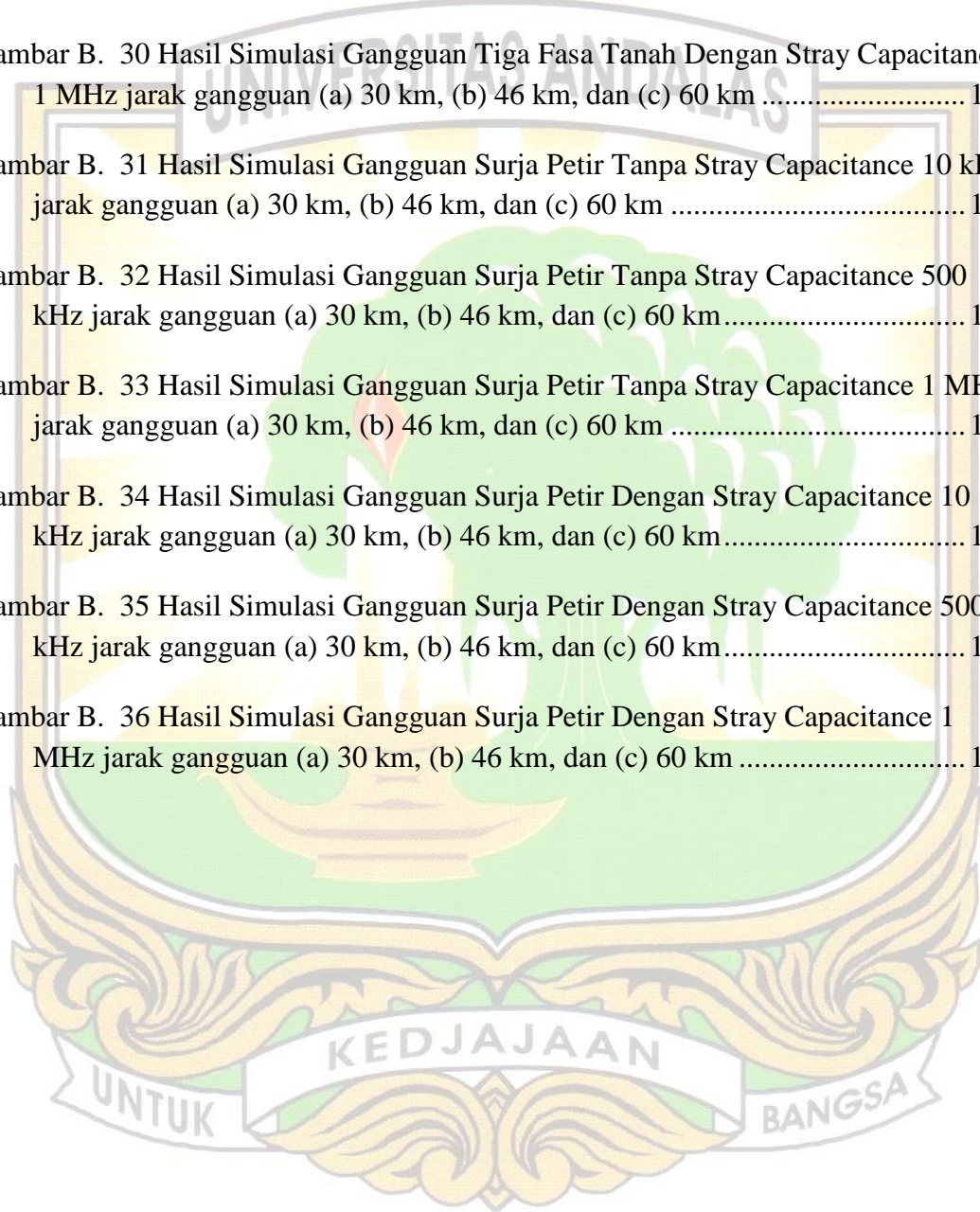
Tabel 4. 1 Data Saluran Transmisi PLTA Maninjau hingga Gardu Induk Pauh Limo (Data PT PLN Pembangkitan dan Penyaluran Sumatera.....	42
Tabel 4. 2 Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	56
Tabel 4. 3 Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance.....	61
Tabel 4. 4 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance .....	66
Tabel 4. 5 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance .....	71
Tabel 4. 6 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	77
Tabel 4. 7 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance.....	81
Tabel 4. 8 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance .....	87
Tabel 4. 9 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance .....	91
Tabel 4. 10 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	97
Tabel 4. 11 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance.....	101
Tabel 4. 12 Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance .....	107
Tabel 4. 13 Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance.....	111

## DAFTAR LAMPIRAN






Gambar B. 1 Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	122
Gambar B. 2 Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	123
Gambar B. 3 Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	124
Gambar B. 4 Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	125
Gambar B. 5 Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	126
Gambar B. 6 Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	127
Gambar B. 7 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	128
Gambar B. 8 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	129
Gambar B. 9 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	130
Gambar B. 10 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	131
Gambar B. 11 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	132
Gambar B. 12 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	133
Gambar B. 13 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	135

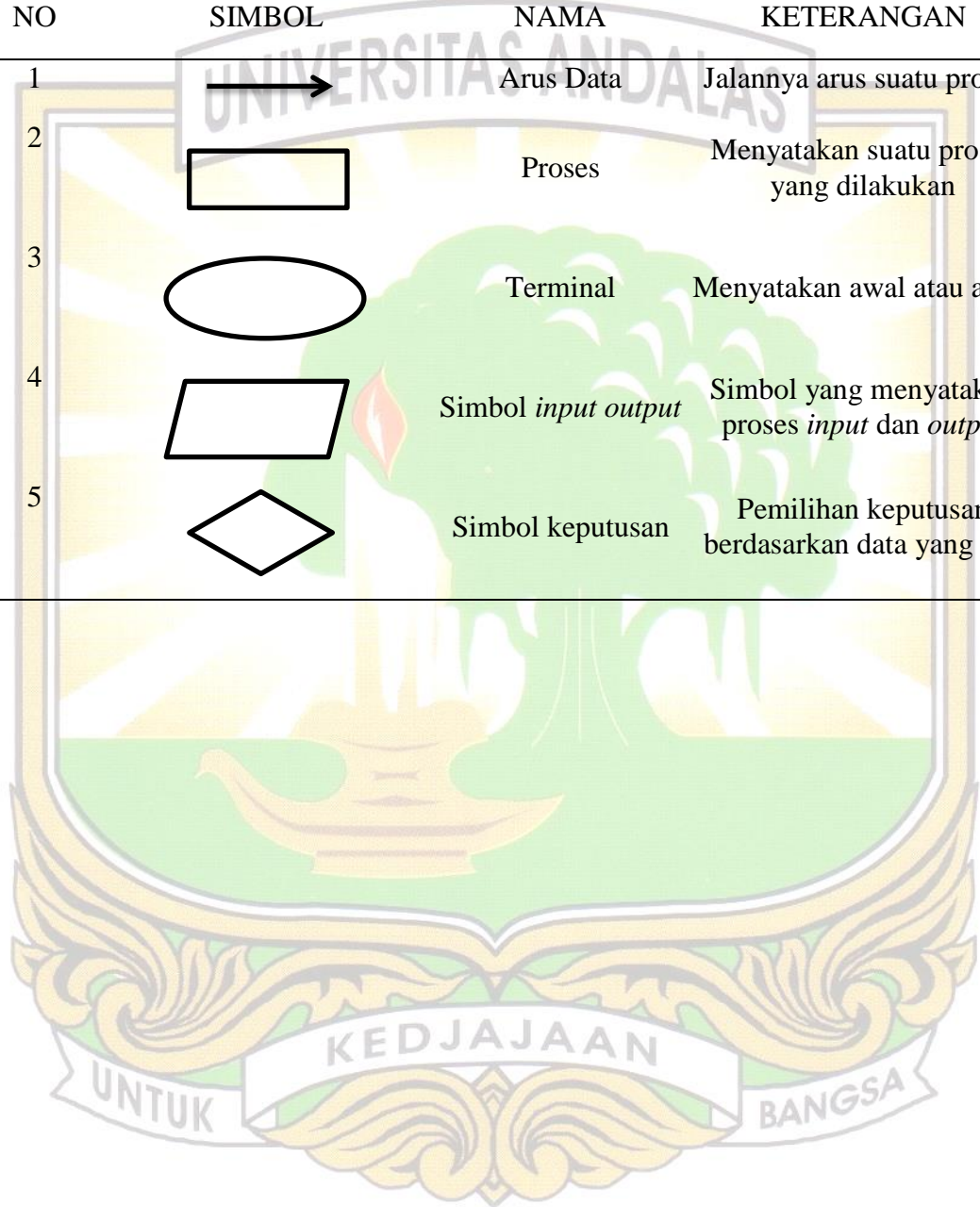
Gambar B. 14 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	135
Gambar B. 15 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	136
Gambar B. 16 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	138
Gambar B. 17 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	138
Gambar B. 18 Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	139
Gambar B. 19 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	141
Gambar B. 20 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	141
Gambar B. 21 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	142
Gambar B. 22 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	144
Gambar B. 23 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	144
Gambar B. 24 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	145
Gambar B. 25 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	147
Gambar B. 26 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	147
Gambar B. 27 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	148

Gambar B. 28 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	150
Gambar B. 29 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	151
Gambar B. 30 Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	152
Gambar B. 31 Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	153
Gambar B. 32 Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	154
Gambar B. 33 Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	155
Gambar B. 34 Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	156
Gambar B. 35 Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km.....	157
Gambar B. 36 Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km .....	158



## DAFTAR SIMBOL

NO	SIMBOL	NAMA	KETERANGAN
1		Arus Data	Jalannya arus suatu proses
2		Proses	Menyatakan suatu proses yang dilakukan
3		Terminal	Menyatakan awal atau akhir
4		Simbol <i>input output</i>	Simbol yang menyatakan proses <i>input</i> dan <i>output</i>
5		Simbol keputusan	Pemilihan keputusan berdasarkan data yang ada



## DAFTAR ISTILAH

Wavelet : Suatu metode pengolahan sinyal dimana sebuah sinyal dipecah menjadi beberapa bagian yang merujuk pada frekuensi yang berbeda-beda yang dapat digunakan untuk menyusun, menganalisis, dan mensintesis data numeris hasil pengukuran atau pengamatan suatu fenomena fisis tertentu.

Algoritma : Sekumpulan langkah-langkah yang dituliskan secara sistematis dan digunakan untuk menyelesaikan masalah.



## DAFTAR SINGKATAN

*WT* : Wavelet Transform

*DWT* : Discrete Wavelet Transform

*CWT* : Continuous Wavelet Transform

*V* : Volt

*kV* : Kilo Volt

*km* : kilo meter

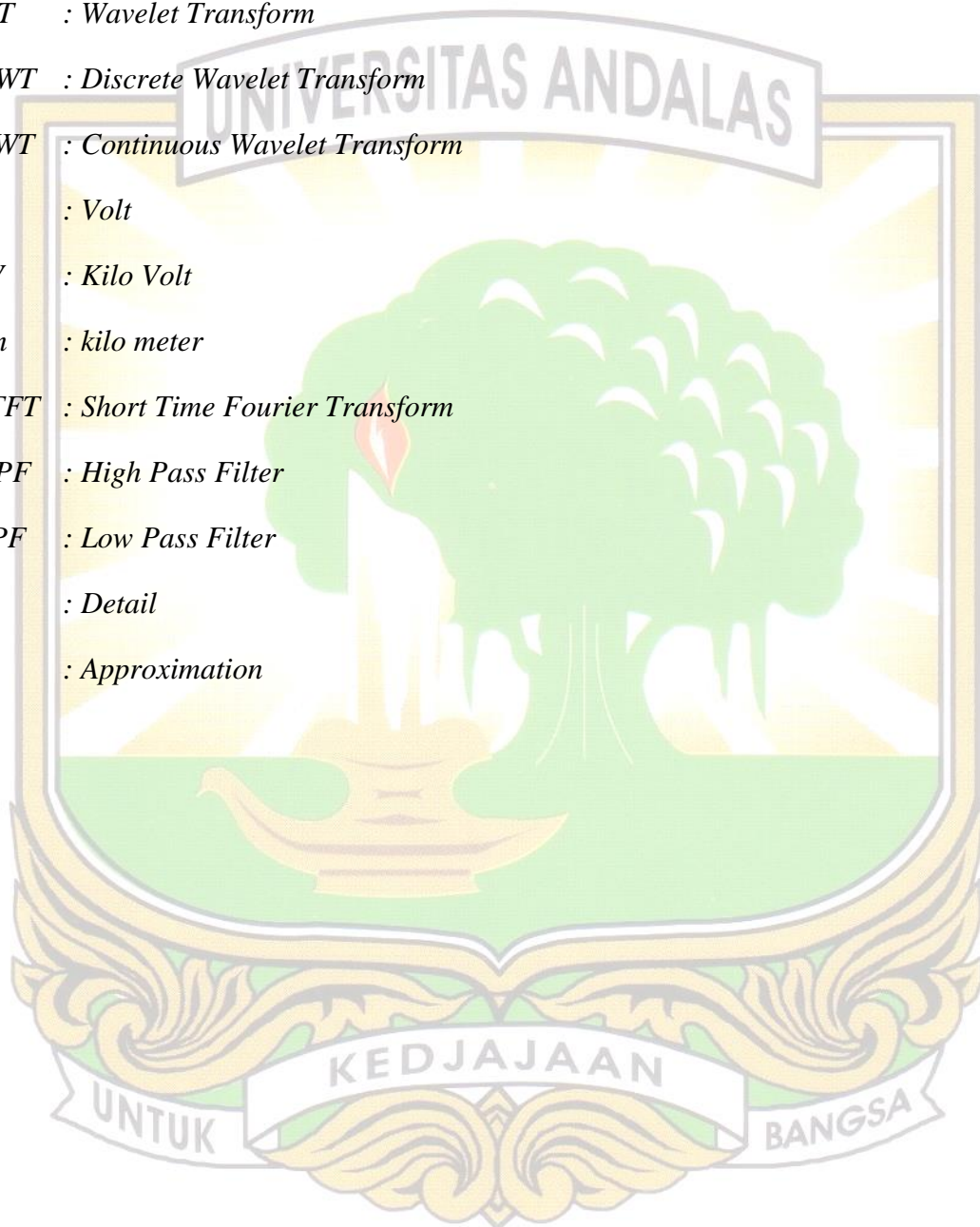
*STFT* : Short Time Fourier Transform

*HPF* : High Pass Filter

*LPF* : Low Pass Filter

*D* : Detail

*A* : Approximation



# BAB I PENDAHULUAN

## 1. 1 Latar Belakang

Pembangkitan menghasilkan daya listrik yang akan digunakan oleh konsumen atau beban. Saluran transmisi juga tidak kalah penting dalam memberikan kualitas daya yang bagus dan efisien. Sistematika penyaluran listrik dimulai dari pembangkit yang biasanya terletak jauh dari beban, sehingga dibutuhkan suatu penghubung yaitu saluran transmisi. Saluran transmisi ini menghantarkan daya listrik dengan tegangan tinggi menuju pusat beban. Sistem akan semakin kompleks dengan banyaknya pembangkit dan beban sehingga saluran transmisi maupun distribusi juga semakin panjang. Sejalan dengan pertambahan tersebut maka peningkatan resiko terhadap gangguan juga akan semakin bertambah pada saluran transmisi.

Gangguan yang terjadi pada saluran transmisi dapat berupa gangguan dari dalam sistem dan luar sistem. Gangguan yang terjadi dari dalam sistem dapat berupa gangguan hubung singkat pada saluran, dan gangguan dari luar sistem memiliki banyak kemungkinan antara lain : sambaran petir, pohon yang tersangkut dan banyak kemungkinan lainnya. Semua jenis gangguan yang berpotensi terjadi tentunya akan mengganggu sistem penyaluran listrik ke beban (konsumen). Selain mengganggu sistem akan berpotensi membahayakan individu atau bahkan menyebabkan kerusakan peralatan listrik yang tersedia. Untuk mencegah hal tersebut terjadi, pada saluran transmisi maka sangat penting untuk mengatasi dan memperbaiki gangguan dengan cepat dan tepat agar kualitas daya listrik mampu dikirimkan dengan baik dan maksimal kepada pelanggan. Oleh sebab itu perlu tindakan yang cepat dan akurat dalam mengatasi gangguan agar sistem yang terkena gangguan dapat dengan cepat diatasi, salah satunya adalah penentuan lokasi gangguan dari titik pengukuran.

Penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi system tenaga listrik berbasis gelombang berjalan (*traveling wave*) adalah salah satu metode paling baik untuk memperkirakan jarak gangguan. Meskipun teori ini sudah cukup lama [1], dengan menggunakan teknik ini dan didorong dengan kemajuan teknologi, seperti sensor untuk pengambilan data sampel gelombang gangguan dalam MHz. Pada dasarnya alat monitoring berbasis TW pada saluran transmisi (*transmission line*) secara praktis sudah ada menggunakan sinyal arus dan tegangan sebagai input data. Dengan menggunakan tegangan sebagai input data untuk penentuan lokasi gangguan berbasis TW, pengaplikasiannya diutamakan berfokus pada pendekatan ujung ganda, karena penentuan lokasi gangguan ini pada dasarnya bergantung pada deteksi gelombang gangguan yang diinduksi di ujung saluran transmisi. Namun, jika



tegangan gelombang berjalan yang dipantulkan dan dibiarkan diukur dengan benar, penentuan lokasi gangguan berbasis TW dapat ditingkatkan keakurasiannya, karena proses ini akan memungkinkan identifikasi yang baik untuk sinyal gangguan.

Affijulla dan Tripathy membahas mengenai teknik deteksi gangguan dengan robust fault detection and discrimination (RFDD) untuk saluran transmisi menggunakan perangkat lunak Siemens PSS/Sincal, namun metode ini hanya akurat digunakan dengan relay jarak, lalu hanya efektif untuk deteksi gangguan seperti power swing [2]. Majd dkk juga membahas mengenai metode deteksi dan klasifikasi gangguan berbasis K-NN (k-Nearest Neighbor) untuk sistem transmisi daya yang disimulasikan pada suatu perangkat lunak MATLAB Simulink, dimana resistansi, sudut awal gangguan, lokasi gangguan, level hubung singkat, rasio X/R, sudut beban sumber disimulasikan namun memberikan hasil yang kurang akurat [3]. Tirupathi dkk membahas mengenai deteksi gangguan menggunakan logika fuzzy pada 6 fasa pada saluran transmisi, dimana hasil yang didapatkan akurat hanya untuk gangguan yang bersifat seri saja [4]. Zhu Xiaoguang dkk membahas mengenai deteksi gangguan menggunakan Hilbert-Huang Transformer (HHT) pada lokasi dan resistansi yang berbeda dan menunjukkan presisi dan ketahanan yang signifikan namun belum memberikan hasil yang akurat [5]. Zhao Jianwen dan Duan Jiabin membahas mengenai deteksi gangguan menggunakan metode travelling wave dengan transformasi wavelet empiris yang menguraikan sinyal gelombang dan dikalibrasi menggunakan EMF2 frekuensi tinggi, hanya saja terdapat masalah aliasing [6]

Penggunaan *coupling capacitor voltage transformer* (CCVT) sebagai sensor untuk pengukuran tegangan gangguan dalam penentuan lokasi gangguan berbasis gelombang berjalan metode ujung ganda telah banyak diteliti oleh beberapa peneliti [7]. Meskipun penggunaan CCVT untuk mengukur tegangan gangguan banyak digunakan dan meningkatnya jumlah perangkat proteksi berbasis gelombang berjalan, maka ada kebutuhan untuk lebih memahami kinerja peralatan pada frekuensi yang lebih tinggi, terutama dalam mengukur gelombang pantulan dan gelombang refraksi berikutnya setelah transien awal. Pengukuran gelombang pantulan dan refraksi yang akurat sangat diperlukan untuk menganalisa dan menentukan lokasi gangguan dengan error yang mendekati nol [8]. Namun karena keterbatasan peralatan secara praktis sehingga pengujian respon frekuensi biasanya dibatasi hingga 10 kHz [9], yang tidak merepresentasikan dan sesuai dengan frekuensi tinggi gelombang yang diinduksikan oleh gangguan. Akibatnya, untuk estimasi model digital CCVT tidak memperhitungkan efek dari stray capacitance sepanjang rangkaian CCVT yang dapat timbul selama terjadinya gangguan, sehingga secara tipikal model CCVT mempresentasikan topologi yang dapat diterima oleh software [9], tetapi model ini tidak akurat dalam mereproduksi gelombang gangguan dengan frekuensi yang lebih tinggi dari batas frekuensi referensi.

Seperti yang dilaporkan oleh beberapa jurnal sebelumnya, model CCVT yang digunakan memperhitungkan *stray capacitance* pada spektrum frekuensi terbatas 10kHz sehingga menghasilkan pengukuran dan deteksi gelombang pantulan awal menjadi kurang akurat dalam hal waktu kedatangannya [8], [10]. Penelitian yang menggunakan model CCVT dengan memperhitungkan *stray capacitance* untuk spektrum frekuensi yang lebih tinggi dari spectrum terbatas 10kHz dengan metode gelombang berjalan pada ujung tunggal belum ada dilaporkan oleh jurnal-jurnal sebelumnya. Oleh karena itu, penelitian yang memperhitungkan efek *stray capacitance* pada spectrum frekuensi tinggi untuk CCVT dengan metode gelombang berjalan pada ujung tunggal menarik bagi industry, dimana dapat mengarah pada pengembangan model CCVT baru atau strategi rekonstruksi CCVT yang inovatif. Oleh karena itu, untuk memenuhi gap atau celah yang dijelaskan dalam studi literature di atas dan memperkenalkan aspek-aspek penting dalam menganalisa perilaku induksi CCVT pada frekuensi lebih tinggi maka penelitian pada tesis ini menganalisa sensitivitas dan respon model CCVT yang memperhitungkan efek *stray capacitance* untuk spectrum frekuensi tinggi. Dampak ini di analisa pada penentuan lokasi gangguan berbasis gelombang berjalan.

## **1. 2 Kontribusi**

Adapun kontribusi dari penelitian ini adalah model digital CCVT yang memperhitungkan *stray capacitance* untuk analisa penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi menggunakan metode gelombang berjalan ujung tunggal. Model CCVT yang dipropos ini akan bermanfaat bagi industri peralatan proteksi system tenaga untuk pengembangan model CCVT baru atau mengembangkan konstruksi CCVT yang inovatif.

## **1. 3 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini meliputi :

1. Bagaimana memodelkan dan menentukan *stray capacitance* pada *coupling capacitor voltage transformer* untuk penentuan lokasi gangguan?
2. Bagaimana tingkat akurasi penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi menggunakan *coupling capacitor voltage transformer* (CCVT) yang mempertimbangkan *stray capacitance*?

## **1. 4 Tujuan**

Untuk menyelesaikan permasalahan pada rumusan masalah di atas, maka terdapat beberapa tujuan penelitian untuk mengukur capaian penelitian. Adapun tujuan penelitian yaitu :

1. Untuk memodelkan, menentukan, dan mensimulasikan *coupling capacitor voltage transformer* (CCVT) dalam penentuan lokasi gangguan saluran transmisi dengan dan tanpa stray capacitance.
2. Untuk menganalisa perbandingan antara CCVT sebelumnya dan CCVT yang mempertimbangkan nilai stray capacitance dalam penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi.

### **1. 5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah model CCVT yang memperhitungkan efek stray capacitance untuk spectrum frekuensi tinggi dalam penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi. Model ini menarik bagi industry, dimana dapat mengarah pada perkembangan model CCVT baru atau strategi rekonstruksi CCVT yang inovatif.

### **1. 6 Batasan Masalah**

Saluran transmisi memiliki jalur yang rumit dan sangat kompleks, maka diperlukan batasan dalam melakukan penelitian ini, yaitu :

1. Saluran transmisi yang digunakan hanya saluran tunggal.
2. Gangguan yang diberikan yaitu gangguan dari dalam sistem dan dari luar sistem.
3. Jenis *wavelet* yang digunakan yaitu Diskrit Wavelet Transform dengan mother wavelet Daubechies 4 atau db'4.
4. Metode penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi yang digunakan hanya metode *single ended*.

### **1. 7 Sistematika Penulisan**

Penelitian ini disusun dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah serta sistematika penulisan.

#### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini membahas tentang teori-teori pendukung yang digunakan dalam perencanaan dan pembuatan laporan penelitian.

#### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Membahas proses atau langkah-langkah pengukuran dan pengolahan data hasil pengukuran.

#### **BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini akan dilakukan pengolahan data dan mengidentifikasinya sesuai dengan variabel yang di bahas.

#### **BAB V PENUTUP**

Berisi kesimpulan yang diperoleh dari pengolahan data dan pengidentifikasiannya pada tesis ini, serta saran yang dapat digunakan untuk penyempurnaan tesis ini.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pendahuluan

Bab ini memaparkan teori yang digunakan dalam penelitian ini, seperti teori yang mencakup saluran transmisi, tegangan lebih pada saluran transmisi beserta pemodelannya, teori mengenai *travelling wave* beserta pengolahan sinyal, serta perangkat lunak ATP yang digunakan secara singkat.

### 2.2 Saluran Transmisi

Pusat pembangkit tenaga listrik biasanya terletak jauh dari pusat beban, tenaga listrik yang dibangkitkan tersebut akan disalurkan melalui penghantar-penghantar dari pusat pembangkit ke beban. Saluran transmisi memiliki tugas utama yaitu menyalurkan daya aktif dari pusat pembangkit menuju pusat beban ataupun dari satu titik ke titik lainnya. Selain itu, saluran transmisi menyalurkan daya reaktif namun relatif kecil. Pada saluran transmisi terdapat rugi daya yang nilainya sebanding dengan panjang saluran. Oleh sebab itu, agar daya yang dikirimkan terjaga maka digunakan tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi untuk meminimalisir rugi-rugi saluran. Saluran transmisi yang digunakan di Indonesia yaitu 70 kV, 150 kV, 275 kV, dan 500 kV. Tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator sebelum memasuki saluran transmisi harus melalui trafo step up untuk menaikkan tegangan sehingga sama dengan saluran transmisi.

Saluran transmisi memiliki beberapa karakteristik, diantaranya :

- Pada kondisi beban nol hingga beban *full* tegangan harus tetap konstan.
- Efisiensi saluran harus tinggi, sehingga rugi-rugi daya pada saluran harus dijaga agar sekecil mungkin.
- Konduktor harus tetap terjaga dari panas akibat rugi-rugi daya saluran.

Saluran transmisi memiliki dua kategori yang membedakannya, yaitu : saluran udara (*overhead line*) dan saluran bawah tanah (*underground*) [11]. Sistem saluran udara menyalurkan tenaga listrik melalui penghantar-penghantar yang digantung pada tiang transmisi dengan pengantaran isolator, sedangkan sistem saluran bawah tanah menyalurkan tenaga listrik melalui kabel-kabel bawah tanah. Tenaga listrik ini dapat disalurkan dengan beberapa tegangan nominal. Berdasarkan dokumen IEC (International Electrotechnical Commission) 60038, tegangan transmisi dapat dikelompokkan menjadi: tegangan menengah (1 kV-35 kV), tegangan tinggi (35 kV-230 kV), tegangan ekstra tinggi (diatas 800 kV).

Saluran transmisi memiliki empat parameter yang mempengaruhi kemampuannya untuk berfungsi sebagai bagian dari sistem tenaga, yaitu resistansi, induktansi, capacitance dan konduktansi. Parameter-parameter ini merupakan salah satu pertimbangan utama dalam perencanaan saluran transmisi. Impedansi seri dibentuk oleh resistansi dan induktansi yang terbagi rata di sepanjang saluran. Konduktansi dan capacitance yang terdapat diantara penghantar-penghantar dari suatu saluran fasa tunggal atau diantara sebuah penghantar dan netral dari suatu saluran tiga fasa membentuk admitansi paralel. Dalam sebuah perhitungan, rangkaian saluran ekuivalen yang dibentuk dari parameter-parameter dijadikan satu meskipun resistansi, induktansi dan capacitance tersebut terbagi rata disepanjang saluran.

### 1. Resistansi

Resistansi dari suatu penghantar yaitu:

$$R = \frac{P}{|I|^2} \quad (2.1)$$

$P$  merupakan rugi daya pada penghantar (*Watt*) dan  $I$  merupakan arus yang mengalir (*Ampere*). Resistansi efektif sama dengan resistansi dari saluran jika terdapat distribusi arus yang merata di seluruh penampang suatu penghantar hanya terdapat pada arus searah, sedangkan tidak pada arus bolak-balik. Resistansi dc dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$R_0 = \frac{\rho l}{A} \quad (2.2)$$

dimana:

$\rho$  = Resistivitas penghantar ( $\Omega\text{m}$ )

$l$  = Panjang penghantar (m)

$A$  = Luas penampang ( $\text{m}^2$ )

Perhitungan resistansi total suatu saluran transmisi ditentukan oleh jenis penghantar buatan pabrik, biasanya pabrik akan memberikan tabel karakteristik listrik dari penghantar yang dibuatnya, termasuk diantaranya nilai resistansi ac penghantar dalam satuan  $\Omega/\text{km}$  (Standar Internasional) atau  $\Omega/\text{mi}$  (Standar Amerika).

### 2. Induktansi

Induktansi adalah sifat rangkaian yang menghubungkan tegangan yang diimbaskan oleh perubahan fluks dengan kecepatan perubahan arus. Persamaan awal yang dapat menjelaskan induktansi adalah menghubungkan tegangan imbas dengan kecepatan perubahan fluks yang meliputi suatu rangkaian. Tegangan imbas adalah:

$$e = \frac{d\tau}{dt} \quad (2.3)$$

dimana :

$e$  = tegangan imbas (Volt)

$\tau$  = banyaknya fluks gandeng rangkaian (Weber-Turns)

### 3. Capacitance

Capacitance suatu saluran transmisi adalah jumlah muatan listrik listrik yang disimpan untuk sebuah potensial listrik antara penghantar, baik antara penghantar-penghantar maupun antara penghantar-tanah. Capacitance menyebabkan penghantar tersebut bermuatan seperti yang terjadi pada pelat kapasitor bila terjadi beda potensial di antaranya. Suatu tegangan bolak-balik yang terpasang pada saluran transmisi akan menyebabkan muatan pada penghantarnya disetiap titik bertambah atau berkurang sesuai dengan kenaikan dan penurunan nilai sesaat tegangan antara penghantar-penghantar pada titik tersebut. Hal ini mempengaruhi jatuh tegangan disepanjang saluran, efisiensi, faktor daya saluran dan kestabilan sistem dimana saluran tersebut merupakan salah satu bagiannya. Hal ini dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$C = \frac{q}{v} \quad (2.4)$$

dimana:

$C$  = Capacitance rangkaian (F)

$q$  = Muatan pada saluran (C)

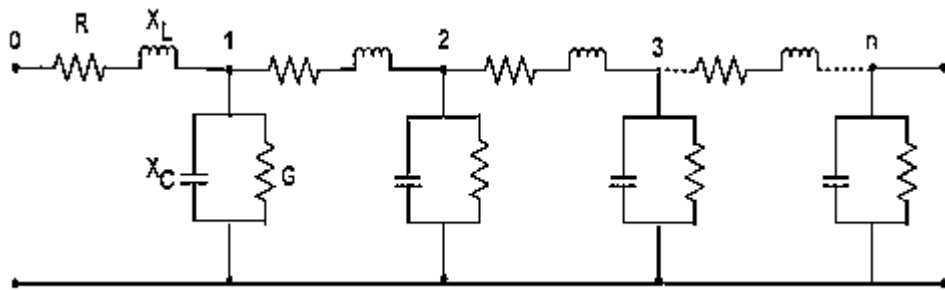
$v$  = Beda potensial antara penghantar (Volt)

Sedangkan untuk menentukan nilai capacitance antara penghantarpenghantar ditentukan dengan persamaan:

$$C_{ab} = \frac{\pi k}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \left(\frac{F}{m}\right) \quad (2.5)$$

Tanah (bumi) mempengaruhi capacitance saluran transmisi karena kehadirannya akan mengubah medan listrik saluran tersebut. Jika diandalkan, tanah merupakan suatu penghantar sempurna dalam bentuk bidang mendatar dengan luas tak terhingga.

Parameter saluran transmisi terdiri dari impedansi seri dan impedansi paralel. Impedansi seri terdiri dari tahanan  $R$  dan reaktansi induktif  $X_L$ , sedangkan impedansi paralel terdiri dari konduktansi  $G$  dan capacitance  $X_C$ . Impedansi- impedansi tersebut terdistribusi sepanjang saluran seperti gambar 2.1. Satu bagian saluran dari titik nol sampai titik satu terdiri dari elemen  $R$ ,  $L$ ,  $C$  dan  $G$  yang dinyatakan dengan persatuan panjang.

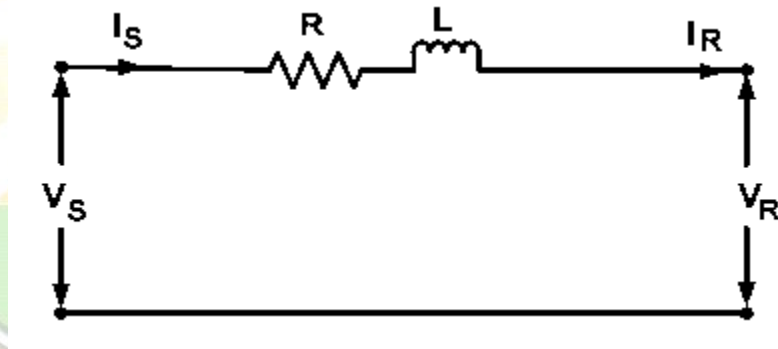


**Gambar 2. 1** Parameter Saluran Transmisi Sepanjang Saluran

Rangkaian gambar 2.1 dapat disederhanakan dengan mengumpulkan (lumped) tiap-tiap elemen, sehingga diperoleh tahanan total  $R$ , reaktansi induktif total dan reaktansi kapasitif total dalam hubungan paralel. Berdasarkan panjangnya rangkaian ekuivalen saluran transmisi dapat digolongkan menjadi tiga, yaitu:

- a. Saluran Transmisi Pendek ( $l = < 80 \text{ km}$ )

Pada saluran model ini besar capacitance ke tanah sangat kecil, dengan demikian besar arus bocor ke tanah kecil terhadap arus beban, maka dalam hal ini capacitance ke tanah dapat diabaikan. Model dari saluran transmisi pendek hanya terdiri dari impedansi seri total seperti ditunjukkan Gambar 2.2.



**Gambar 2. 2** Model Saluran Transmisi Pendek

dimana:

$V_S$  = Tegangan ujung pengirim, *line to neutral*

$V_R$  = Tegangan ujung penerima, *line to neutral*

$I_S$  = Arus ujung pengirim

$I_R$  = Arus ujung penerima

Tegangan dan arus ujung pengirim adalah :

$$V_S = V_R + ZI_R \tag{2.6}$$

Arus ujung pengirim sama besar dengan arus ujung penerima yaitu :

$$I_S = I_R \tag{2.7}$$



dimana :

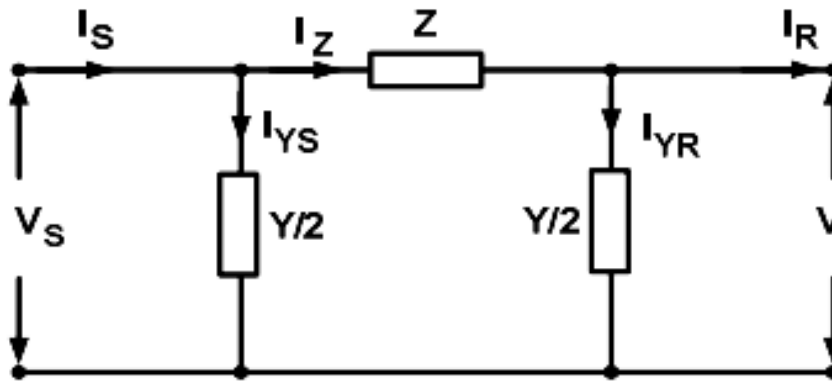
$$Z = R + j\omega L = R + jX_L \quad (2.8)$$

b. Saluran Transmisi Menengah ( $l = 80 - 250 \text{ km}$ )

Saluran transmisi yang panjangnya dari 80-250 km, reaktansi kapasitif parallel akan bertambah kecil dibandingkan dengan saluran transmisi pendek, sehingga menyebabkan adanya arus bocor. Model dari saluran transmisi menengah dapat digambarkan menjadi dua model, yang pertama model -  $\pi$  seperti gambar 2.3 dan yang kedua model - T seperti gambar 2.4. Pada model -  $\pi$  impedansi seri total Z dikumpulkan ditengah-tengah saluran dan reaktansi kapasitif paralel XC total 14 sebagian dikumpulkan diujung pengirim dan sebagian dikumpulkan diujung penerima.

- Saluran Transmisi model -  $\pi$

Saluran model ini dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Saluran Transmisi model -  $\pi$

Arus yang mengalir melalui admitansi pada ujung penerima adalah :

$$I_{YR} = \frac{Y}{2} V_R \quad (2.9)$$

Arus yang mengalir melalui impedansi Z adalah :

$$I_Z = I_{YR} + I_R \quad (2.10)$$

Substitusi persamaan di atas, maka diperoleh :

$$I_Z = \frac{Y}{2} V_R + I_R \quad (2.11)$$

Tegangan ujung pengirim adalah :

$$V_s = Z I_Z + V_R \quad (2.12)$$

Arus yang mengalir melalui admitansi pada ujung pengirim adalah :

$$I_{YS} = \frac{Y}{2} V_S \quad (2.13)$$

Sedangkan arus ujung pengirim adalah :

$$I_S = I_{YS} + I_Z \quad (2.14)$$

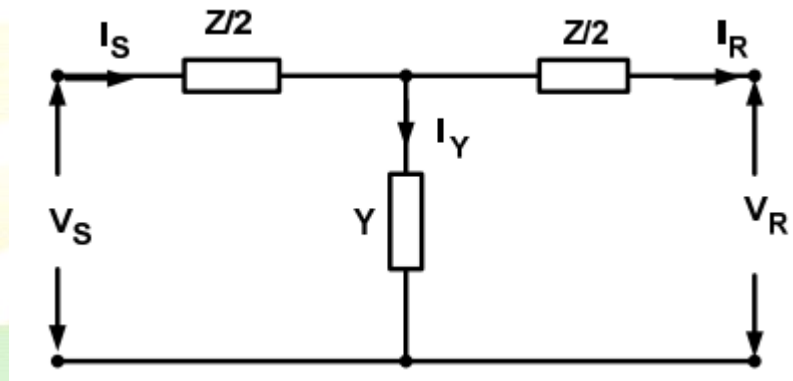
Setelah beberapa persamaan disubstitusi, maka persamaan tegangan dan arus pada ujung pengirim adalah :

$$V_S = \left( \frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + Z I_R \quad (2.15)$$

$$I_S = Y \left( \frac{ZY}{4} + 1 \right) V_R + \left( \frac{ZY}{2} + 1 \right) I_R \quad (2.16)$$

- Saluran Transmisi model – T

Saluran model ini dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Saluran Transmisi Model - T

Tegangan pada admitansi Y adalah :

$$V_Y = V_R + \frac{Z}{2} I_R \quad (2.17)$$

Arus yang mengalir melalui admitansi Y adalah :

$$I_Y = Y V_Y \quad (2.18)$$

Substitusi persamaan dua persamaan di atas, maka diperoleh :

$$I_Y = Y V_R + \frac{ZY}{2} I_R \quad (2.19)$$

Arus ujung pengirim adalah :

$$I_S = I_Y + I_R \quad (2.20)$$

Sedangkan tegangan ujung pengirim adalah :

$$V_S = V_Y + \frac{Z}{2} I_S \quad (2.21)$$

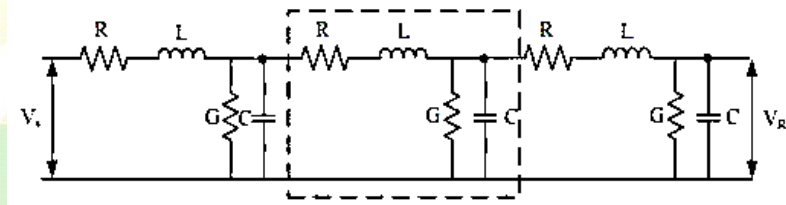
Setelah beberapa persamaan disubstitusi, maka persamaan tegangan dan arus pada ujung pengirim adalah :

$$V_S = \left(\frac{Z}{2} + 1\right) V_R + \left(\frac{ZY}{4} + 1\right) I_R \quad (2.22)$$

$$I_S = YV_R + \left(\frac{ZY}{2} + 1\right) I_R \quad (2.23)$$

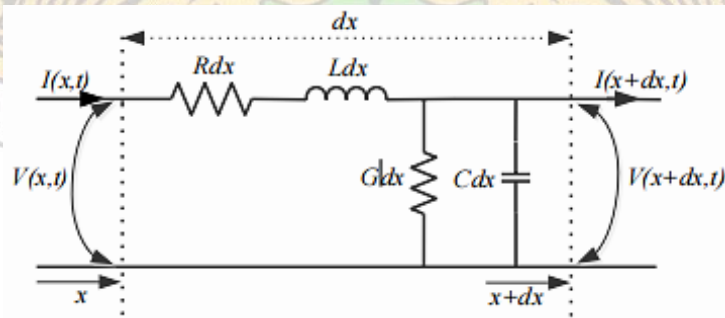
c. Saluran Transmisi Panjang ( $l = > 250$  km )

Saluran transmisi yang panjangnya lebih besar dari 250 km digolongkan pada transmisi panjang, besarnya reaktansi kapasitif paralel dan konduktansi semakin kecil sehingga arus bocor semakin besar. Jadi pada saluran panjang ini semua parameter R, L, C dan G diperhitungkan secara terdistribusi sepanjang saluran. Saluran transmisi panjang ditunjukkan seperti gambar 2.5, dalam hal ini ditinjau bagian yang terpendek dari saluran yaitu elemen dx yang berjarak x dari sisi beban. Elemen saluran yang panjangnya dx terdiri dari impedansi seri Z dan admitansi Y dalam persatuan panjang. Tegangan V dan arus I adalah besar tegangan dan arus pada sembarang titik yang berjarak x dari beban.



Gambar 2. 5 Model Saluran Transmisi Satu Fasa

Elemen yang terpendek dx dari saluran transmisi panjang, terdiri dari impedansi seri Z dan admitansi paralel Y dalam persatuan panjang seperti ditunjukkan dalam gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Model Elemen Saluran Transmisi

Saluran transmisi daya memiliki parameter resistansi, konduktansi, induktansi dan capacitance per satuan panjang saluran seperti pada gambar 2.5. Bagian kecil dari saluran ini yaitu  $dx$  mempunyai parameter konstan  $Rdx$ ,  $Ldx$ ,  $Gdx$  dan  $Cdx$ . Gambar 2.6 menunjukkan mode sederhana dari saluran transmisi satu fasa untuk dianalisa. Fluks listrik ( $\psi$ ) dan fluks magnetic ( $\phi$ ) yang terjadi akibat gelombang berjalan yang merambat disepanjang saluran transmisi menghasilkan tegangan sesaat  $V(x,t)$  dan arus sesaat  $I(x,t)$ . Persamaan fluks listrik dan fluks magnetik adalah :

$$d\psi(t) = V(x,t)C dx \quad (2.24)$$

$$d\phi(t) = I(x,t)L dx \quad (2.25)$$

Menggunakan *Kirchhoffs Voltage Law* dan *Kirchhoffs Current Law* jatuh tegangan pada arah positif  $x$  dari total jarak  $dx$  dan arus sesaat dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\frac{dV(x)}{dx} = ZI(x) \quad (2.26)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -YV(x) \quad (2.27)$$

dimana:

$$Z = R + j\omega L \quad (2.28)$$

$$Y = G + j\omega C \quad (2.29)$$

Dengan menurunkan persamaan (2.26) dan mensubstitusikan ke persamaan (2.27), dan sebaliknya menurunkan persamaan (2.27) dan mensubstitusikan ke persamaan (2.26) menghasilkan persamaan baru sebagai berikut :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = ZYV(x) \quad (2.30)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = YZI(x) \quad (2.31)$$

Persamaan ini dapat disederhanakan dengan mendefinisikan bentuk baru  $\gamma$  dan mensubstitusikannya sehingga menghasilkan :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = \gamma^2 V(x) \quad (2.32)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = \gamma^2 I(x) \quad (2.33)$$

Gamma ( $\gamma$ ) dalam persamaan ini merepresentasikan nilai kompleks yang disebut dengan konstanta propagasi gelombang.

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta \quad (2.34)$$

Alpha ( $\alpha$ ) merepresentasikan bagian nyata dari persamaan konstanta propagasi dan dirujuk sebagai konstanta atenuasi, sebagai amplitudo dari gelombang berjalan. Beta ( $\beta$ ) merepresentasikan bagian imajiner dari konstanta propagasi dan dirujuk sebagai fasa tetap. Hal ini mempengaruhi pergeseran fasa dari gelombang berjalan. Persamaan (2.32) dan (2.33) dapat diselesaikan dalam bentuk dua fungsi persamaan differensial parsial dan dibentuk dalam domain waktu, sehingga diperoleh :

$$V(x, t) = A_1(t)e^{\gamma x} + A_2(t)e^{-\gamma x} \quad (2.35)$$

$$I(x, t) = \frac{1}{Z} [A_1(t)e^{\gamma x} - A_2(t)e^{-\gamma x}] \quad (2.36)$$

Dimana Z adalah impedansi karakteristik dari persamaan saluran dan dihitung dengan persamaan (2.37).

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.37)$$

$A_1$  dan  $A_2$  adalah fungsi yang tidak tergantung pada jarak. Gelombang berjalan maju diidentifikasi oleh  $e^{-\gamma x}$  dan gelombang berjalan mundur diidentifikasi oleh  $e^{\gamma x}$ . Impedansi karakteristik dari saluran tanpa rugi-rugi adalah kompleks. Sedangkan persamaan untuk menghitung efisiensi dari sebuah saluran transmisi adalah :

$$\eta = \left( \frac{P_R}{P_S} \right) \times 100\% \quad (2.38)$$

dan

$$P_R = \sqrt{3V_R I_R \cos\phi} \quad (2.39)$$

$$P_S = \sqrt{3V_S I_S \cos\phi} \quad (2.40)$$

dimana :

$P_S$  = Daya *input* atau daya ujung pengirim (Watt)

$P_R$  = Daya *output* atau daya ujung penerima (Watt)

$\cos\phi$  = Faktor daya ujung penerima

$\phi$  = Sudut antara tegangan  $V_R$  dan arus  $I_R$

$\cos\phi_S$  = Sudut antara tegangan  $V_S$  dan arus  $I_S$

### 2.3 Saluran Transmisi Tanpa Rugi-Rugi

Saluran transmisi tanpa rugi-rugi adalah saluran transmisi yang tidak memiliki resitansi saluran dan tidak memiliki rugi-rugi dielektrik, yang mana konduktor dan dielektriknya tidak sempurna [12]. Suatu saluran tanpa rugi-rugi adalah representasi

yang baik dari saluran-saluran frekuensi tinggi dimana  $\omega L$  dan  $\omega C$  menjadi sangat besar dibandingkan dengan nilai  $R$  dan  $G$ . Untuk saluran transmisi tanpa rugi-rugi memiliki  $R$  dan  $G$  yang bernilai nol. Pada saluran panjang, pendekatan ini dipilih untuk menurunkan hubungan-hubungan tegangan dan arus dalam keadaan *steady state*. Tegangan  $V$  dan  $I$  adalah fungsi  $x$  dan  $t$ , sehingga perlu menggunakan turunan sebagian. Persamaan jatuh tegangan seri di sepanjang elemen saluran adalah:

$$\frac{\partial V}{\partial x} \Delta x = \left( RI + L \frac{\partial I}{\partial t} \right) \Delta x \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} \Delta x = \left( GV + C \frac{\partial I}{\partial t} \right) \Delta x \quad (2.42)$$

Persamaan diatas dapat dibagi dengan  $\Delta x$ , karena  $R$  dan  $G$  bernilai nol sehingga didapatkan:

$$\frac{\partial V}{\partial x} \Delta x = \left( L \frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} \Delta x = \left( C \frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (2.44)$$

Selanjutnya variable  $I$  dapat dihilangkan dengan menghitung turunan sebagian kedua suku dalam persamaan (2.43) terhadap  $x$  dan turunan sebagian kedua suku dalam persamaan (2.44) terhadap  $t$ . Langkah ini menghasilkan  $\partial^2 I / dxdt$  pada kedua persamaan yang dihasilkan, dan dengan mengeliminasi turunan sebagian kedua dari variable  $I$  dari kedua persaman tersebut didapatkan:

$$\frac{1}{LC} = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (2.45)$$

Persamaan (2.45) inilah yang dinamakan persamaan gelombang berjalan saluran tanpa rugi-rugi. Penyelesaian persamaan ini adalah fungsi dari  $(x-vt)$ , dan tegangannya dinyatakan dengan :

$$V = f_1(x - V_t) + f_2(x + V_t) \quad (2.46)$$

Yang merupakan suatu penyelesaian untuk terjadinya komponen-komponen ke depan dan ke belakang sebuah gelombang berjalan secara bersamaan pada sebuah saluran tanpa rugi-rugi. Variable  $v$  yang menyatakan kecepatan gelombang berjalan dapat dinyatakan dengan :

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.47)$$

dimana :

$v$  = Kecepatan rambat gelombang (m/s)

$L$  = Induktansi saluran (H/m)

$C$  = Capacitance saluran (F/m)

Jika gelombang yang berjalan ke depan, yang disebut juga dengan gelombang datang, dinyatakan dengan :

$$V^+ = f(x - vt) \quad (2.48)$$

Maka gelombang arus akan ditimbulkan oleh muatan-muatan yang bergerak dan dapat dinyatakan dengan :

$$i^+ = \frac{1}{\sqrt{LC}} f_1(x - vt) \quad (2.49)$$

Dari persamaan (2.48) dan (2.49) didapatkan bahwa :

$$\frac{V^+}{i^+} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.50)$$

Perbandingan antara  $V$  dan  $I$  dinamakan impedansi karakteristik atau impedansi surja ( $Z_0$ ) dari saluran tanpa rugi-rugi. Pada saat suatu tegangan  $V(t)$  diterapkan pada salah satu ujung saluran transmisi tanpa rugi-rugi, maka unit kapasitansi  $C$  pertama dimuati pada tegangan  $V(t)$ . Capacitance ini kemudian meluahkan kedalam unit capacitance berikutnya melalui induktansi  $L$ . Proses bermuatanpeluahan (*charge discharge*) ini berlanjut hingga ujung saluran dan energi gelombang dialihkan dari bentuk elektronik (dalam capacitance) ke bentuk magnetik (dalam induktansi). Jadi, gelombang tegangan bergerak maju secara gradual ke ujung saluran dengan menimbulkan gelombang arus ekuivalen. Propagasi gelombang tegangan dan arus ini disebut gelombang berjalan (*travelling wave*) dan gelombang ini kelihatan seolah-olah tegangan dan arus berjalan sepanjang saluran transmisi dengan kecepatan tertentu.

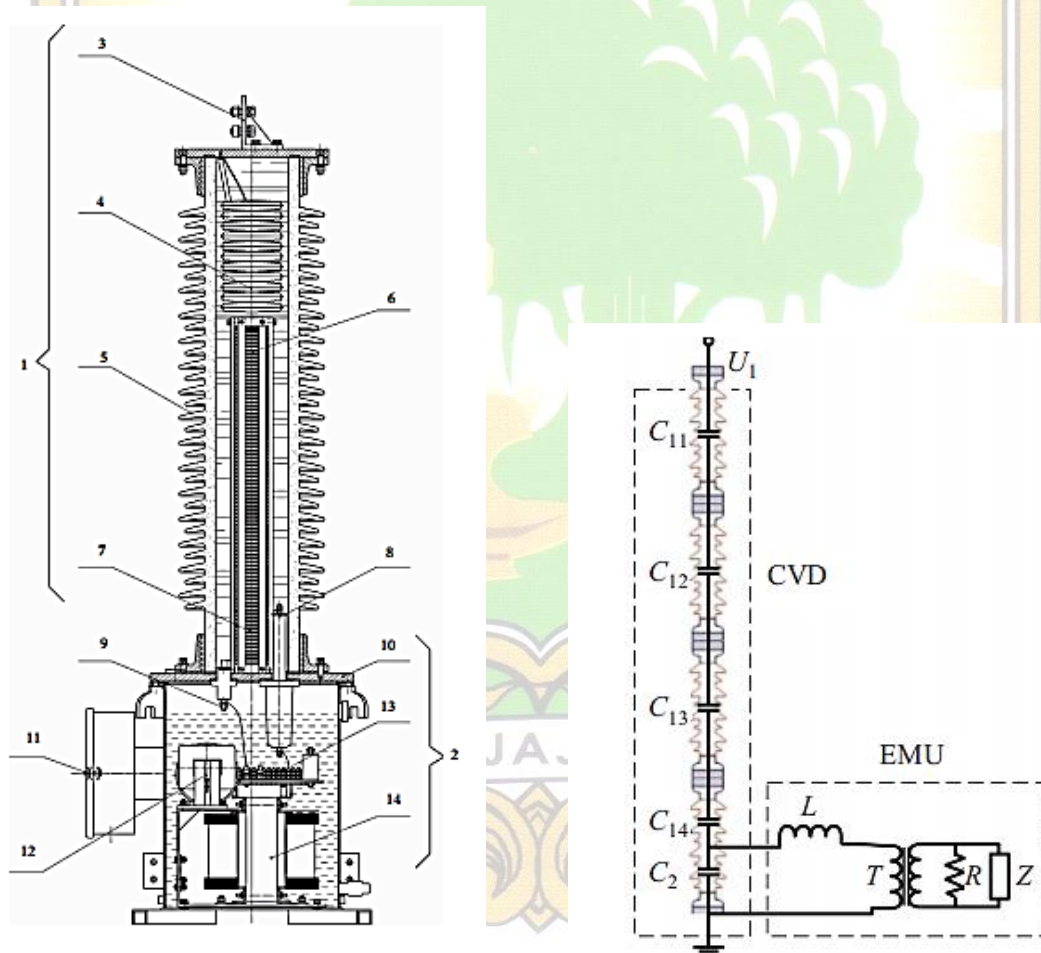
## 2. 4 Sensor Tegangan dan Sensor Arus

Pada pengukuran tegangan tinggi umumnya menggunakan sensor tegangan berupa Potensial Transformer (PT) untuk mengukur tegangan. Sedangkan, untuk pengukuran arus menggunakan Current Transformer (CT). Untuk menghindari *stress* tegangan berlebih pada transformator maka digunakan pembagi tegangan yang dikenal dengan pembagi kapasitif atau kapasitif *divider*.

### 2. 4. 1 Coupling Capacitor Voltage Transformer

Saat ini, CCVT paling banyak diaplikasikan di *Power System* memiliki struktur kolom seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Terdiri dari dua bagian:

*Capacitive Voltage Divider* (CVD) dan *Electromagnetic Unit* (EMU). CVD terdiri dari kapasitor tegangan tinggi, kapasitor tegangan menengah, eksternal metal expander, dan isolator porselen. Baik dari tinggi dan kapasitor tegangan menengah terdiri dari puluhan atau ratusan unit capacitance secara seri. Setiap unit capacitance terbuat dari aluminium foil dan isolasi film yang ditumpuk menjadi satu dan direndam dalam minyak isolasi [13]. CVD mengubah tegangan tinggi primer menjadi tegangan menengah mulai dari 10-25 kV sebagai tegangan input EMU. EMU terdiri dari reaktor kompensasi, transformator tegangan menengah, dan peredam. Ini digunakan untuk mengubah tegangan menengah, yaitu tegangan keluaran CVD, menjadi *standard secondary voltage* sebagai input *power meters* dan perangkat proteksi relai. Secara umum, total *Voltage Different Ratio* CCVT bergantung pada CVD, EMU, pergeseran suhu, variasi frekuensi daya, dan efek kedekatan.



**Gambar 2. 7** Struktur Coupling Capacitor Voltage Transformer

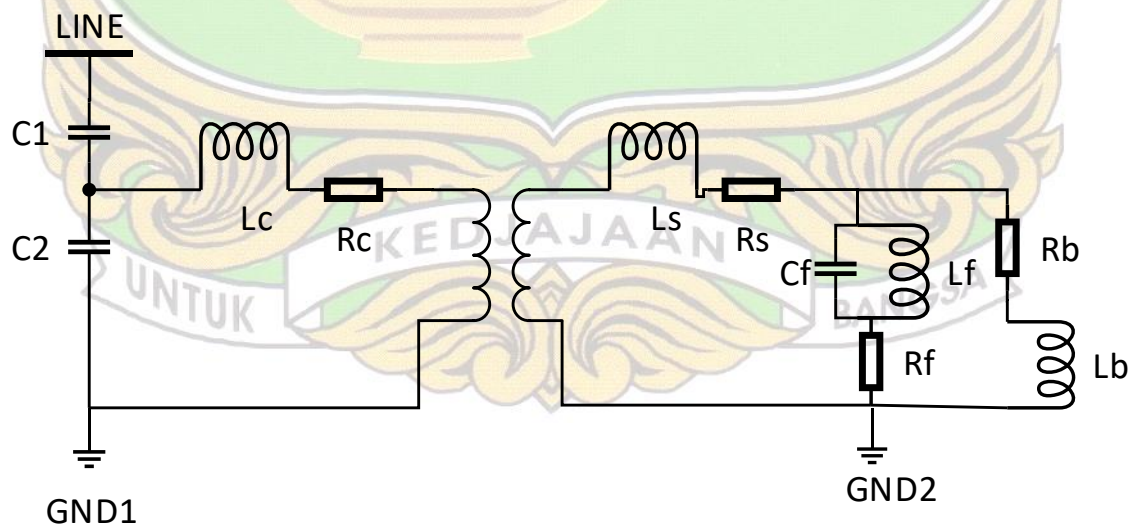


Struktur Kolom dari *Coupling Capacitor Voltage Transformer* yaitu :

1. *Capacitive Voltage Divider*
2. *Electromagnetic Unit*
3. *Terminal High Voltage*
4. *Metal Expander*
5. Isolator Porselin
6. Kapasitor *high voltage*
7. Kapasitor *medium voltage*
8. *Medium Voltage Tap*
9. *Terminal low voltage*
10. *Electromagnetic Unit Box*
11. *Secondary Terminal Box*
12. *Compensation reactor*
13. *Damper*
14. *Medium voltage transformer*

### 1. Tanpa Stray Capacitance

Model rangkaian ekuivalen CCVT lengkap memperhitungkan sepenuhnya faktor-faktor yang relevan, seperti *stray capacitance*, *dielectric loss of voltage divider capacitor*, beban listrik dan sebagainya [14]. Model rangkaian ekuivalen CCVT ditunjukkan pada Gambar 2.8.  $R_c$  merupakan resistansi reactor;  $L_c$  merupakan induktansi reactor;  $L_s$  merupakan inductor sekunder,  $R_s$  merupakan resistansi sekunder, ferroresonance suppression circuit (FSC) meliputi capacitance ( $C_f$ ), induktansi ( $L_f$ ), dan resistansi ( $R_f$ );  $R_b$  merupakan resistansi beban, dan  $L_b$  merupakan Inductor beban.

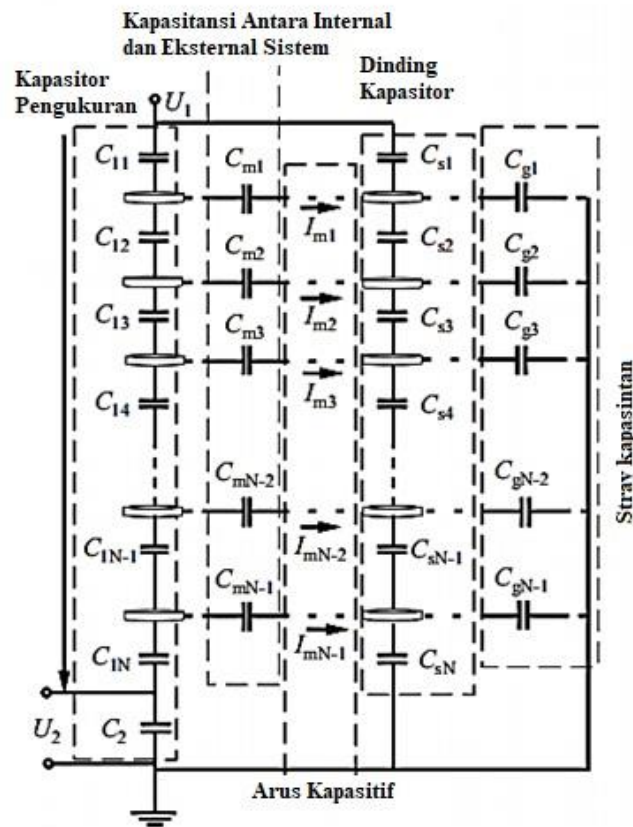


Gambar 2. 8 Rangkaian Ekuivalen CCVT Tanpa Stray Capacitance

## 2. Dengan Stray Capacitance

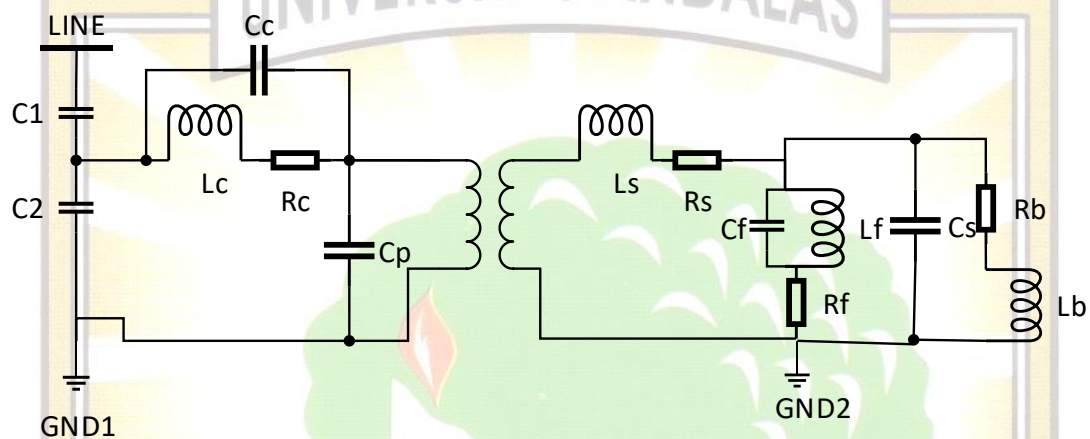
Capacitance stray (stray capacitance) atau capacitance parasit (parasitic capacitance) adalah capacitance yang tidak diinginkan dalam suatu rangkaian. Jadi, jika capacitance kapasitor itu memang diinginkan sehingga perlu adanya komponen tersebut. Namun, yang menjadi masalah di sini adalah adanya capacitance stray atau yang tidak diinginkan terjadi. Capacitance stray terjadi saat setiap dua permukaan pada potensial listrik yang berbeda, dan yang cukup berdekatan untuk menghasilkan medan listrik memiliki capacitance dan dengan demikian bertindak seperti layaknya kapasitor. Efek stray capacitance ini tidak sepenuhnya dapat dieleminasi sehingga akan menyebabkan penurunan kinerja dari detector [15].

Gambar 2.9 merupakan rangkaian ekuivalen CCVT dengan memperhitungkan *stray capacitance*. Pada rangkaian ini *stray capacitance* adalah capacitance antara kapasitor ukur dengan dinding pembatas yang dikenal dengan internal *stray capacitance* dan capacitance pada dinding itu sendiri yang dikenal dengan eksternal *stray capacitance*.



**Gambar 2. 9** Diagram Ekuivalen Coupling Capacitor Voltage Transformer

Efek stray capacitance yang ada antara konduktor dan konduktor atau antara konduktor dan tanah harus dipertimbangkan ketika kita mempelajari model rangkaian ekuivalen CCVT [16]. Model rangkaian ekuivalen CCVT ditunjukkan pada Gambar 2.10.  $C_c$  adalah stray capacitance yang ada antara reaktor kompensasi dan sisi primer trafo;  $C_p$  merupakan stray capacitance yang ada antara sisi primer transformator tengah dan dinding pembatas CCVT;  $C_s$  merupakan stray capacitance yang ada antara sisi sekunder trafo tengah dan dinding pembatas CCVT.



**Gambar 2. 10** Rangkaian Ekuivalen CCVT dengan Stray Capacitance

Kapasitor pembagi tegangan (CVD) dibagi menjadi  $n$  unit capacitance, potensial listrik dan jumlah muatan permukaan pada unit  $i$  yang ditetapkan sebagai  $\phi_i$  dan  $Q_i$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ . Terminal tegangan rendah CVD biasanya dihubungkan ke ground secara langsung, atau melalui kumparan dengan impedansi yang dapat diabaikan. Jadi, diasumsikan bahwa *reference ground* memiliki potensial listrik 0 V. Muatan permukaan, potensial listrik, dan capacitance semua unit memenuhi hubungan berikut :

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & -C_{12} & \dots & -C_{1n} \\ -C_{21} & C_{22} & \dots & -C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -C_{n1} & -C_{n2} & \dots & -C_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

Berdasarkan persamaan di atas  $Q = C\Phi$ , dimana  $Q$  dan  $\Phi$  adalah vector kolom muatan permukaan dan potensial listrik dari semua unit.  $C$  adalah matriks koefisien capacitance dari kapasitor pembagi tegangan. Elemen *off-diagonal*  $C_{ij}$  atau  $C_{ji}$  ( $i, j = 1, \dots, n$ , dan  $i \neq j$ ) adalah capacitance mutual dari unit  $i$  ke unit  $j$ . Diagonal elemen  $C_{ii}$  adalah jumlah stray capacitance unit  $i$  ke *ground*  $C_{ig}$  dan capacitance mutual unit ke unit lainnya. Sehingga :

$$C_{ig} = C_{ii} - \sum_{j=1}^n C_{ij} (i \neq j) \quad (2.52)$$

Nilai absolut dari elemen di kolom pertama matriks C, yaitu  $C_{i1}$  ( $i=2, 3, \dots, n, i \neq 1$ ), dimana stray capacitance dari unit  $i$  ke terminal tegangan tinggi.

Potensial listrik unit  $i$  dan unit lainnya masing-masing diasumsikan 1 V dan 0 V, dari persamaan 2.51, jika jumlah total muatan permukaan pada setiap satuan diketahui, maka dapat diperoleh unsur-unsur pada kolom  $i$  dari C, sehingga :

$$C_{ji} = Q_j, j = 1, 2, \dots, n. \quad (2.53)$$

Selanjutnya, permukaan lateral semua unit capacitance dibagi menjadi  $m$  bagian. Muatan total pada setiap unit diasumsikan tersebar secara homogen pada setiap bagiannya. Oleh karena itu, potensial listrik  $\phi_k$  pada pusat  $X_k$  dari setiap bagian  $k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) adalah sebagai berikut :

$$\phi_k = \phi_{kl} + \phi_{k0} \quad (2.54)$$

Dimana  $\phi_{k0}$  dan  $\phi_{kl}$  adalah potensial listrik di titik  $X_k$  yang dihasilkan oleh muatan pada setiap bagian  $l$  ( $l = 1, 2, \dots, m$  dan  $l \neq k$ ), sehingga :

$$\phi_{k0} = \frac{0.2821 \sigma_k}{\epsilon_0} \sqrt{A_k} = \frac{0.2821}{\epsilon_0 \sqrt{A_k}} q_k \quad (2.55)$$

Dimana  $\epsilon_0$  adalah permitivitas vakum,  $A_k$  adalah luas sambungan  $k$ , dan  $q_k$  masing-masing adalah densitas dan jumlah muatan pada sambungan  $k$ .

$$\begin{aligned} \phi_{k0} &= \sum_{l=1, l \neq k}^m \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma_l}{s_l r k_l} ds_l = \sum_{l=1, l \neq k}^m \frac{q_l}{4\pi\epsilon_0 A_l} \int \frac{1}{s_l r k_l} ds_l \\ &= \sum_{l=1, l \neq k}^m P_{kl} q_l \end{aligned} \quad (2.56)$$

Dimana  $r k_l$  adalah jarak antara posisi pusat sambungan  $l$  dan sambungan  $k$ ,  $A_l$  adalah luas sambungan  $l$ , dan  $\sigma_l$  adalah densitas muatan pada sambungan  $l$ . Untuk semua sambungan, persamaan di atas dapat ditulis ulang dalam bentuk matriks, meliputi :

$$pq = \phi \quad (2.57)$$

Dimana  $P$  adalah matriks parameter ( $m \times m$ ),  $q$  adalah vector kolom ( $m \times 1$ ) dari jumlah muatan pada semua sambungan, dan  $\phi$  adalah vector kolom ( $m \times 1$ ) dari potensial listrik semua sambungan.

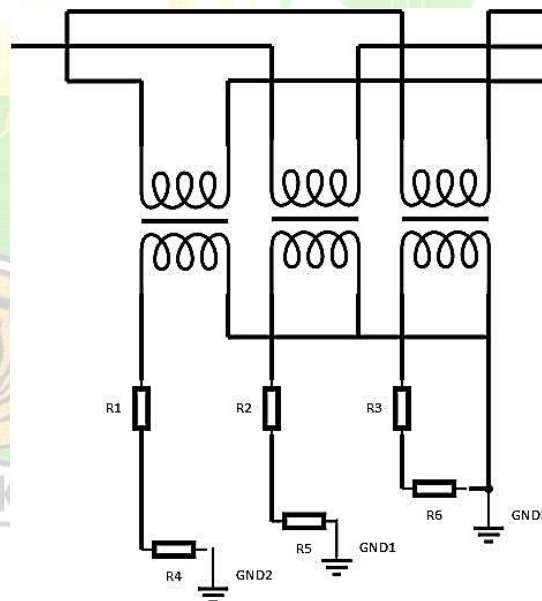
Potensial listrik dari semua sambungan unit  $i$  dan unit lainnya ditetapkan masing-masing 1 V dan 0 V. Mengacu pada persamaan 2.57, muatan pada setiap sambungan  $q_k$  dapat diperoleh. Selanjutnya substitusikan  $q_k$  ke dalam persamaan 2.53, diperoleh unsur-unsur pada kolom  $i$  dari  $C$  sebagai berikut :

$$C_{ji} = Q_j = \sum_{k \in j} q_k, j = 1, 2, \dots, n. \quad (2.58)$$

Dengan mengulangi proses di atas, matriks koefisien capacitance  $C$  dapat diselesaikan, unit stray capacitance ke ground dan terminal tegangan tinggi diperoleh secara bersamaan.

#### 2. 4. 2 Current Transformer

*Current transformer* (CT) merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengurangi arus tegangan bolak-balik (AC) dari ratusan ataupun ribuan ampere menjadi lebih rendah dan dapat digunakan. Fungsi utamanya adalah untuk menaikkan dan menurunkan tegangan. Untuk keperluan pengukuran, transformator instrumen digunakan karena transformator ini mengukur arus, tegangan, *energy* meter. Ini digunakan dalam instrumen yang berbeda dengan konjungsi seperti *voltmeter*, *ammeter*, *wattmeter* & meter energi. Gambar 2.11 merupakan rangkaian dasar dari *current transformer*.



Gambar 2. 11 Rangkaian Dasar CT

## 2. 5 Tegangan Lebih

Tegangan lebih adalah tegangan yang melebihi tegangan nominal dan hanya dapat ditahan untuk waktu yang terbatas [17], sedangkan tegangan lebih transien merupakan peristiwa yang disebabkan oleh gangguan dari dalam dan luar sistem seperti proses surja petir pada saluran transmisi dengan besar tegangan yang berbeda-beda untuk tiap titik pengukuran di sepanjang saluran dan berlangsung sangat singkat [18]. Magnitud tegangan lebih transien tersebut dapat merusak bahan isolasi pada sistem tenaga khususnya peralatan transmisi jika nilainya melebihi BIL (*basic insulation level*) dan SIL (*switch insulation level*) dari bahan isolasi itu, oleh sebab itu perlu dilakukan upaya untuk meredam tegangan lebih transien [19].

Tegangan lebih transien pada sistem tenaga terdiri dari tegangan lebih petir, tegangan lebih hubung dan tegangan lebih sementara [20]. Tegangan lebih petir disebabkan oleh gangguan diluar sistem, sedangkan tegangan lebih hubung dan tegangan lebih sementara terjadi akibat gangguan didalam sistem tenaga itu sendiri [21]. Suatu sistem tenaga listrik bisa mengalami gangguan yang dapat mengakibatkan terhentinya penyaluran daya listrik. Salah satu penyebab gangguan yang mungkin terjadi adalah rusaknya sistem isolasi karena pengaruh tegangan lebih akibat surja petir. Oleh karena itu, dalam pengoperasian sistem tenaga listrik perlu perhatian khusus pada sistem proteksi terhadap tegangan lebih.

### 2. 5. 1 Tegangan Lebih Petir

Fenomena petir terjadi akibat pelapasan muatan diawan ke bumi. Petir ini dapat mengakibatkan tegangan lebih pada sistem tenaga [22]. Tegangan lebih yang menyambar saluran transmisi dapat mengganggu sistem penyaluran tenaga listrik. Gangguan akibat petir pada saluran transmisi dapat mengakibatkan tegangan lebih induksi, tegangan lebih akibat kegagalan proteksi atau sambaran langsung dan tegangan lebih akibat *back flashover* [23]. Tegangan lebih induksi terjadi akibat sambaran petir ke tanah atau objek yang disambar dekat dengan saluran transmisi yang menimbulkan tegangan transien di saluran transmisi akibat medan elektromagnetik. Tegangan lebih akibat kegagalan proteksi yaitu tegangan lebih petir yang langsung menyambar kawat fasa. Tegangan lebih akibat *back flashover* adalah tegangan lebih yang diakibatkan oleh sambaran petir pada kawat tanah atau menara yang mengakibatkan gangguan fasa tanah pada isolator [24]. Diantara ketiga jenis tegangan lebih tersebut, maka tegangan lebih akibat kegagalan proteksi yang mempunyai dampak paling parah karena sambaran petir langsung ke kawat fasa.

Bentuk gelombang surja petir dapat didefinisikan sebagai tegangan impuls yaitu, tegangan yang naik dalam waktu singkat sekali disusul dengan penurunan yang lambat menuju nol, yang dinyatakan dalam bentuk persamaan [25] :

$$v = v_0(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2.59)$$

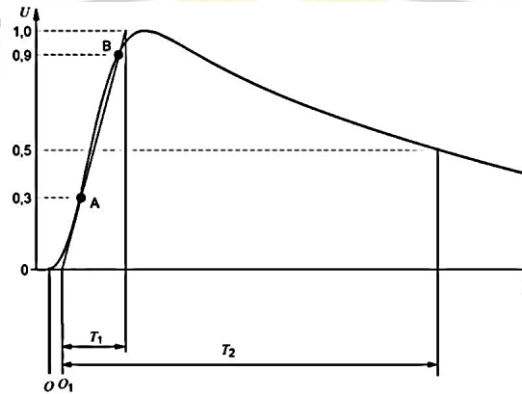
dimana:

$V$  = Tegangan osilasi

$V_0$  = Tegangan sistem

$a$  dan  $b$  = Konstanta yang diperoleh dari rangkaian

Tegangan lebih petir memiliki karakteristik waktu muka dan waktu ekor. Waktu muka pada gelombang arus petir menyatakan lamanya muka gelombang dan kecuraman arus, sedangkan waktu ekor menyatakan lamanya durasi gelombang petir.



**Gambar 2.12** Bentuk Gelombang Petir

Pada gambar 2.12 yang menggambarkan bentuk gelombang petir yang terdiri dari waktu muka dan waktu ekor. Muka gelombang didefinisikan sebagai bagian dari gelombang yang dimulai dari titik nol nominal sampai ke titik puncak, sedangkan sisanya disebut ekor gelombang. Tegangan lebih transien yang terjadi akibat proses pemberian tenaga pada sebuah saluran transmisi dalam keadaan tanpa beban bisa mencapai 1,5-2,5 kali tegangan nominal pada ujung penerima, tergantung karakteristik saluran transmisi yang dipakai.

### 2.5.2 Tegangan Lebih Hubung

Tegangan lebih hubung adalah tegangan lebih transien akibat operasi pensaklaran [26]. Peristiwa tegangan lebih hubung salah satunya disebabkan oleh proses pemberian tenaga (*energized*), yaitu proses mengalir sebuah saluran transmisi dalam keadaan tanpa beban dengan sumber tegangan, melalui operasi penutupan saklar. Operasi pensaklaran dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- Pemberian energi atau daya ke sistem
- Penutupan dan pembukaan saklar
- Pemutusan gangguan

Dalam teknologi tegangan tinggi, suatu pulsa tegangan dengan polaritas tunggal dikatakan sebagai impuls.

### 2. 5. 3 Tegangan Lebih Sementara

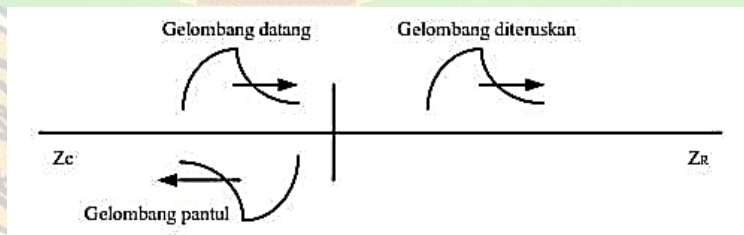
Tegangan lebih sementara yaitu tegangan lebih yang dapat hilang dengan sendirinya dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya [27]. Gangguan yang bersifat sementara, sesaat setelah arus gangguannya terputus misalnya karena terbukanya *circuit breaker* oleh rele pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali.

Dari ketiga gangguan yang menjadi penyebab gangguan transien maka mengakibatkan:

- Rusaknya peralatan listrik yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan oleh arus yang besar.
- Berkurangnya stabilitas daya sistem tersebut.
- Terhentinya kontinuitas pelayanan listrik kepada konsumen apabila terjadi gangguan tegangan lebih.

### 2. 6 Travelling Wave

Saat *travelling wave* pada suatu saluran transmisi mencapai titik transisi, seperti suatu rangkaian terbuka, rangkaian hubungan singkat, suatu sambungan dengan saluran lain atau kabel, belitan mesin dan lain-lain, maka pada titik itu terjadi perubahan parameter saluran. Akibatnya sebagian dari gelombang berjalan bergerak melewati bagian lain dari rangkaian. Pada titik transisi, tegangan atau arus dapat bernilai nol sampai dua kali harga semula tergantung pada karakteristik teminalnya. Gelombang berjalan awal (*impinging wave*) disebut gelombang datang (*incident wave*) dan dua macam gelombang lain yang muncul pada titik transisi disebut dengan gelombang pantul (*reflected wave*) dan gelombang yang diteruskan (*transmitted wave*).



**Gambar 2. 13** Ilustrasi Gelombang Datang, Gelombang Pantul, dan Gelombang Terusan

Koefisien pantul untuk tegangan pada ujung penerima saluran didefinisikan:

$$\rho_R = \frac{Z_R - Z_C}{Z_R + Z_C} \quad (2.60)$$



Dimana  $\rho_R$  adalah koefisien pantulan pada ujung penerima,  $Z_R$  impedansi ujung penerima dan  $Z_C$  impedansi karakteristik saluran. Jika saluran ditutup dengan impedansi karakteristiknya  $Z_C$  terlihat bahwa koefisien pantulan sama dengan nol, sehingga tidak ada gelombang pantulan, dan saluran berlaku seakan-akan panjangnya tidak terhingga. Jika ujung saluran merupakan suatu rangkaian terbuka  $Z_R$  adalah tak terhingga dan didapatkan harga  $\rho_R$  sama dengan satu. Dengan demikian tegangan yang terjadi pada ujung penerima menjadi dua kalinya tegangan pada sumber tegangan atau pada ujung pengirim.

Dari uraian di atas bisa disimpulkan bahwa besar tegangan lebih transien sangat tergantung pada impedansi karakteristik  $Z_C$ , dimana impedansi karakteristik tersebut sangat berpengaruh terhadap koefisien pantul  $\rho_R$ . Semakin besar nilai capacitance saluran maka akan semakin besar juga tegangan lebih transien yang ditimbulkan. Tetapi tegangan lebih transien tersebut dapat diperkecil dengan cara menambahkan nilai  $L$  (induktansi) ke dalam saluran transmisi, sehingga  $Z_C$  akan menjadi lebih besar yang pada akhirnya akan memperkecil koefisien pantulan  $\rho_R$ . Harus diperhatikan bahwa gelombang-gelombang yang berjalan kembali ke arah ujung pengirim akan menyebabkan pantulan-pantulan baru yang ditentukan oleh koefisien pantulan pada ujung pengirim  $\rho_S$  dan impedansi ujung pengirim  $Z_S$ . Koefisien dari arus gelombang berjalan yang diteruskan dapat dihitung sebagai:

$$\rho_S = \frac{Z_S - Z_C}{Z_S + Z_C} \quad (2.61)$$

## 2.7 Pengolahan Sinyal pada Travelling Wave

*Travelling wave* adalah gelombang yang amplitudonya tetap pada titik yang dilewatinya. *Travelling wave* bisa juga disebut sebagai gelombang yang amplitudo dan fasanya sama di setiap titik yang dilalui gelombang [18]. Persamaan untuk *Travelling wave* adalah sebagai berikut:

$$y = A \sin \pi \left( \frac{1}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \quad (2.62)$$

dimana :

A= Amplitudo gelombang (m)

T = Periode gelombang (s)

t = Lamanya titik 0 (sumber getar) bergetar (s)

y = Simpangan (m)

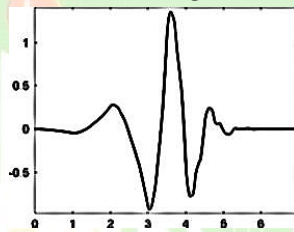
$\pi = 22/7$  atau 3,14

Penentuan gangguan pada *travelling wave* menggunakan komponen sinyal yang berfrekuensi tinggi [28]. Transformasi *Fourier* dan transformasi *Fourier* diskrit

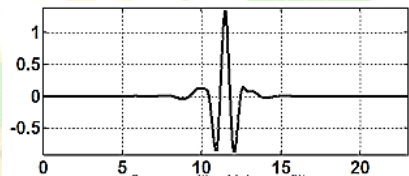
(DWT) umumnya menggunakan analisa domain frekuensi dari gelombang. Namun, analisa domain frekuensi tidak memberikan informasi tentang perubahan frekuensi terhadap waktu. Transformasi *Fourier* waktu singkat (STFT) dan transformasi *wavelet* dibuat untuk merepresentasikan gelombang dalam dua domain waktu dan frekuensi. Penelitian ini menggunakan transformasi *wavelet* diskrit untuk menganalisa gelombang.

### 2. 7. 1 Wavelet

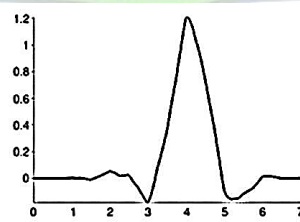
*Wavelet* adalah suatu metode pengolahan sinyal dimana sebuah sinyal dipecah menjadi beberapa bagian yang merujuk pada frekuensi yang berbeda-beda yang dapat digunakan untuk menyusun, menganalisis dan mensintesis data numeris hasil pengukuran atau pengamatan suatu fenomena fisis tertentu dan dapat diaplikasikan pada pengenalan objek, *smoothing* dan kompresi [29]. *Wavelet* memiliki tiga jenis yaitu *Daubechies* ('db4'), *Symlets* ('sym4'), dan *Coiflets* ('coif4') [30]. *Daubechies* sering digunakan untuk menganalisa *travelling wave* dari gelombang transien.



Gambar 2. 14 Transformasi Wavelet Daubechies 'db4'



Gambar 2. 15 Transformasi Wavelet Coiflets 'coif4'



Gambar 2. 16 Transformasi Wavelet Symlets 'sym4'

### 2. 7. 2 Transformasi Wavelet

Transformasi *wavelet* merupakan suatu transformasi linear yang hampir mirip dengan transformasi *Fourier*, dengan satu perbedaan penting yaitu pada transformasi *wavelet* membolehkan penempatan waktu dalam komponen-komponen frekuensi

yang berbeda dari sinyal yang diberikan [31]. Transformasi *Fourier* waktu singkat (*short time Fourier transform*), merupakan pengembangan dari transformasi *Fourier*. STFT menggunakan jendela modulasi yang besarnya tetap, ini menyebabkan dilema karena jendela yang lebar akan menyebabkan resolusi waktu yang buruk. Hingga saat ini transformasi *Fourier* masih menjadi transformasi yang paling populer di area pengolahan sinyal digital. Transformasi *Fourier* memberikan informasi frekuensi dari sebuah sinyal, tapi tidak informasi waktu (kapan frekuensi itu terjadi). Oleh karena itu transformasi *Fourier* hanya cocok untuk sinyal *stationary* (sinyal informasi yang frekuensinya tidak berubah menurut waktu).

Untuk menganalisa sinyal yang frekuensinya bervariasi terhadap waktu, diperlukan suatu transformasi yang dapat memberikan resolusi frekuensi dan waktu disaat yang bersamaan, biasa disebut analisis multi resolusi (AMR) [32]. AMR dirancang untuk memberikan resolusi waktu yang baik dan resolusi frekuensi yang buruk pada frekuensi tinggi suatu sinyal, serta resolusi frekuensi yang baik dan resolusi waktu yang buruk pada frekuensi rendah suatu sinyal. Transformasi wavelet memiliki beberapa keistimewaan unik yang membuatnya sangat cocok untuk aplikasi khusus ini. Tidak seperti fungsi-fungsi dasar yang digunakan dalam analisa *Fourier*, wavelet tidak hanya dibatasi pada frekuensi tetapi juga pada waktu. Penempatan ini juga memperhitungkan deteksi waktu dari kejadian gangguan yang terjadi secara tiba-tiba, seperti gangguan transien. Aturan dari multi resolusi ini sangat berguna untuk menganalisa gangguan transien yang mengandung komponen-komponen frekuensi tinggi yang dilokasir pada gelombang frekuensi daya. Secara garis besar, transformasi wavelet terbagi dua yaitu transformasi wavelet kontinu (CWT) dan transformasi wavelet diskrit (DWT) [33].

#### 1. Transformasi *Wavelet* kontinu

Cara kerja transformasi *wavelet* kontinu adalah dengan menghitung konvolusi sebuah gelombang dengan sebuah jendela modulasi pada setiap waktu dengan setiap skala yang diinginkan. Jendela modulasi yang mempunyai skala fleksibel inilah yang disebut dengan induk *wavelet* atau fungsi dasar *wavelet*. Persamaan umum dari transformasi *wavelet* kontinu yaitu :

$$CWT(f, a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{|a|}\right) dt \quad (2.63)$$

Dimana  $\psi$  adalah induk *wavelet*, parameter  $a$  dan  $b$  ditentukan dengan frekuensi osilasi dimana  $a$  adalah panjang *wavelet* dan  $b$  adalah pergeseran posisi.

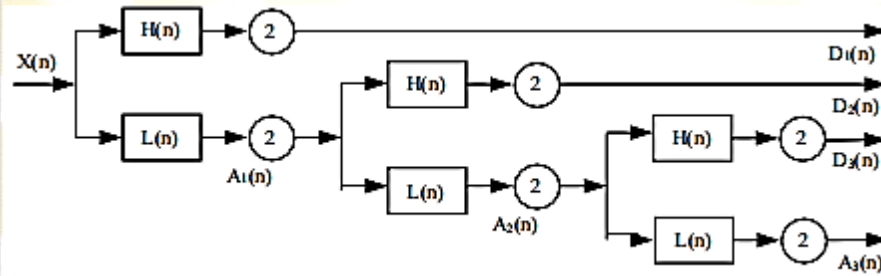
#### 2. Transformasi *Wavelet* Diskrit

Dibandingkan dengan transformasi wavelet kontinu, transformasi wavelet diskrit dianggap relatif lebih mudah mengimplementasikannya. Prinsip dasar dari transformasi wavelet ini bagaimana cara mendapatkan representasi waktu dari skala

sebuah sinyal menggunakan teknik pemfilteran digital dan operasi sub-sampling. Persamaan umum dari transformasi wavelet diskrit yaitu :

$$DWT(k, n, m) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum x[n] \psi\left(\frac{k_0 - n_0 b a^m}{a_0^m}\right) \quad (2.64)$$

Pada DWT, gelombang sinyal transien dapat dianalisa secara efisien dengan analisa multi resolusi dan diurai dengan dua filter, yaitu dengan *high pass filter* (HPF) dan *low pass filter* (LPF). HPF diturunkan dari fungsi induk *wavelet* dan diukur secara rinci dalam input tertentu. LPF menghaluskan input sinyal dan diturunkan dari fungsi skala yang berhubungan dengan induk *wavelet* [12].



**Gambar 2. 17** Tingkatan Penguraian Sinyal Menggunakan DWT

Berdasarkan gambar 2.17, pertama, gelombang menuju HPF  $H(n)$  dan LPH  $L(n)$ , keluaran dari kedua filter tersebut dipecah menjadi dua artinya *sampling rate* dari gelombang dikurangi menjadi setengah, kemudian didapatkan koefisien lengkap dan koefisien perkiraan pada level 1 ( $D_1$  dan  $A_1$ ). Setelah itu, koefisien perkiraan pada level 1 ( $A_1$ ) diteruskan ke proses kedua untuk diuraikan sama seperti proses sebelumnya. Akhirnya, penguraian gelombang pada level yang diinginkan diperoleh dengan mengulang proses yang sama.

### 2. 7. 3 Transformasi Clarke

Transformasi *Clarke* adalah metode yang sangat berguna untuk menganalisa saluran sistem tenaga yang sepenuhnya ditransposkan [34]. Transformasi *Clarke* mentransformasikan tiga fasa *abc* ke dalam bentuk tiga fasa  $\alpha$ ,  $\beta$  dan 0. Transformasi *Clarke* mempunyai tujuan untuk menguraikan sistem tiga fasa tidak seimbang menjadi fasa seimbang sehingga dapat diselesaikan secara langsung dengan menggunakan rangkaian secara fasa tunggal. Transformasi *Clarke* mempunyai prinsip sama dengan metode komponen simetris bahwa untuk rangkaian tiga fasa setiap kelompok fasor dapat diuraikan menjadi tiga kelompok fasor yang seimbang. Sehingga sumbu  $\alpha$  dan  $\beta$  pada transformasi *Clarke* adalah sama dengan rangkaian urutan positif dan negatif pada komponen simetris. Persamaan (2.57) adalah bentuk transformasi *Clarke*.

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

Setelah mengaplikasikan transformasi Clarke, maka gelombang tiga fasa *abc* berubah menjadi gelombang fasa  $\alpha$ ,  $\beta$  dan 0 dimana  $\alpha$  dan  $\beta$  masing-masing  $90^\circ$  dan fasa nol tetap bernilai nol. Fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  dikenal dengan istilah mode *aerial* dan fasa nol dikenal dengan istilah mode *ground*. Mode *aerial* dan transformasi *wavelet* diskrit (DWT) digunakan untuk menganalisa gangguan pada saluran transmisi.

#### 2. 7. 4 Sampling Rate

*Sampling rate* atau jumlah sampling dari gelombang yang diukur sangat mempengaruhi ke akuratan dari penentuan lokasi gangguan dengan metode gelombang berjalan. *Sampling rate* yang rendah memerlukan sedikit perhitungan tetapi hasilnya memiliki kesalahan yang besar dibandingkan dengan *sampling rate* yang tinggi. *Sampling rate* yang digunakan pada penelitian ini adalah 1 MHz dengan jarak gangguan yang bervariasi.

#### 2. 7. 5 Matlab Function

Untuk menganalisa gelombang tegangan menggunakan analisa *wavelet* diskrit dapat menggunakan *wavelet toolbox* yang ada pada *software* Matlab. Fungsi *wavedec* adalah fungsi *wavelet* untuk menguraikan gelombang  $x$  pada level  $n$  menggunakan *syntax* '*wname*' seperti pada persamaan (2.58):

$$[c, l] = \text{wavedec}(x, n, 'wname') \quad (2.66)$$

Parameter  $c$  dan  $l$  mengandung vektor dekomposisi dan vektor *bookkeeper*. Fungsi *detcoef* digunakan untuk mengembalikan koefisien  $c$  dan  $l$  yang telah terurai kedalam bentuk koefisien *detail*. Fungsi *detcoef* pada *wavelet toolbox* bisa dilihat pada persamaan :

$$D = \text{detcoef}(c, l, n) \quad (2.67)$$

Koefisien *detail* dapat digambarkan dalam bentuk grafik waktu-frekuensi yang dapat digunakan untuk mengukur lokasi gangguan. Fungsi *appcoef* digunakan untuk mengembalikan koefisien  $c$  dan  $l$  yang telah terurai kedalam bentuk koefisien aproksimasi. Fungsi *appcoef* pada *wavelet toolbox* bisa dilihat pada persamaan :

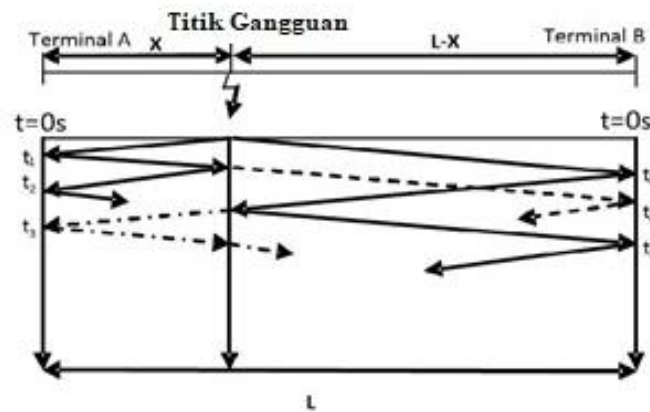
$$A = \text{appcoef}(c, l, n) \quad (2.68)$$

## 2. 8 Penentuan Lokasi Gangguan

Penentuan lokasi gangguan dengan analisa gelombang berjalan dimana gelombang elektromagnetik merambat ke saluran transmisi menghasilkan tegangan dan arus akibat adanya impedansi karakteristik saluran. Ketika gelombang sampai pada rangkaian terbuka, rangkaian tertutup atau perubahan impedansi maka sebagian energi dari gelombang tersebut diteruskan (transmitted) dan sebagiannya lagi dipantulkan kembali. Gelombang yang dipantulkan dan diteruskan inilah yang menjadi acuan dalam penentuan lokasi gangguan yang terjadi pada saluran transmisi.

### 2. 8. 1 Single-ended Method

*Single-ended method* untuk menentukan lokasi gangguan menggunakan gelombang berjalan yang memerlukan satu titik pengukuran di ujung saluran [35]. Metode ini tidak membutuhkan komunikasi antara terminal dan lebih murah dibandingkan dengan metode ujung ganda. *Single-ended method* memerlukan penentuan kedatangan gelombang berjalan yang dihasilkan dari gangguan pada saluran dan juga penentuan gelombang pantulan dari titik gangguan itu sendiri. Waktu antara gelombang datang dan gelombang pantul dapat digunakan sebagai parameter dalam menentukan lokasi gangguan.



**Gambar 2. 18** Diagram Tangga Bewley untuk Gangguan Pada Setengah Saluran Pertama *Single-ended Method*

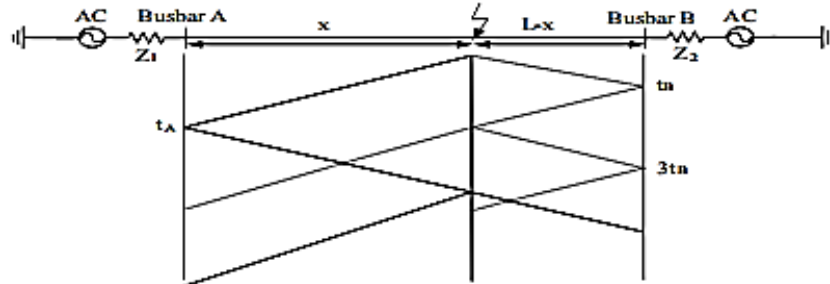
Pada gambar 2.18 dapat dilihat diagram tangga Bewley untuk menentukan lokasi gangguan setengah saluran pertama. Untuk gangguan yang kurang dari setengah panjang saluran, lokasi gangguan dapat dihitung dengan persamaan :

$$\tau = 2x(t_b - t_a) \quad (2.69)$$

Dan jarak lokasi gangguan dapat dihitung dengan persamaan :

$$x = \frac{v\tau}{2} \quad (2.70)$$

Dimana  $x$  adalah jarak lokasi gangguan,  $v$  adalah kecepatan gelombang,  $\tau$  adalah interval waktu antara dua puncak pertama dari gelombang pada terminal A.



**Gambar 2. 19** Diagram Tangga Bewley untuk Gangguan pada Setengah Saluran Kedua pada *Single-ended Method*

Gambar 2.19 menggambarkan lokasi gangguan di setengah saluran kedua dari saluran transmisi, dari diagram tangga Bewley maka lokasi gangguan dapat dihitung yaitu:

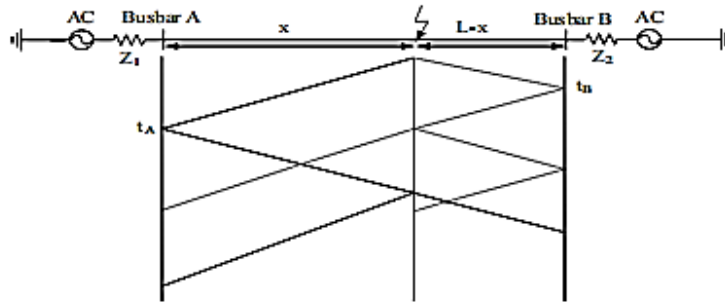
$$x = L - \frac{v\tau}{2} \quad (2.71)$$

Dimana  $\tau$  adalah interval waktu antara dua puncak yang berturutan pada terminal B. Interval waktu tersebut dibandingkan dengan interval waktu ketika gangguan terjadi pada jarak setengah panjang saluran ( $1/2$ ). Untuk menentukan area dimana gangguan itu berada. Setelah perkiraan area tersebut ditentukan, maka dengan menggunakan persamaan (2.62) lokasi gangguan dapat dihitung berdasarkan transformasi gelombang diskrit (DWT) dari gelombang yang terukur.

- Jika  $t_a \leq t_{a/2}$ , gangguan diperkirakan berada di setengah pertama panjang saluran
- Jika  $t_a > t_{a/2}$ , gangguan diperkirakan berada di setengah kedua panjang saluran.

### 2. 8. 2 Double-ended Method

*Double-ended Method* untuk menentukan lokasi gangguan menggunakan gelombang berjalan yang memerlukan dua titik pengukuran di setiap ujung saluran. Metode ini memerlukan dua peralatan sinkronisasi waktu seperti GPS yang dipasang pada kedua ujung saluran. Peralatan tersebut digunakan untuk menentukan waktu gelombang datang pada terminal A dan terminal B kemudian kedua waktu tersebut digunakan untuk menentukan jarak gangguan.



**Gambar 2. 20** Diagram Tangga Bewley Gangguan Pada *Double-ended Method*

Gambar 2.20 adalah diagram tangga Bewley untuk menghitung jarak gangguan dengan metode ujung ganda. Jarak lokasi gangguan dari terminal A ditentukan dengan persamaan :

$$x = \frac{L + (t_a - t_b)v}{2} \quad (2.72)$$

Dimana  $t_a$  adalah waktu dimana gelombang gangguan pertama mencapai terminal A dan  $t_b$  adalah waktu dimana gelombang gangguan pertama mencapai terminal B.

## 2. 9 Gangguan pada Saluran Transmisi

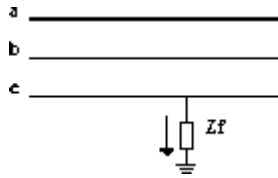
Saluran transmisi adalah penghubung penting antara pembangkit dan gardu distribusi, yang merupakan bagian yang sangat penting dalam sistem tenaga. Oleh karena itu penting untuk mempelajari, memahami, dan menganalisis gangguan yang terjadi pada saluran transmisi. Isolasi saluran yang mengalami gangguan merupakan aspek penting dari perlindungan sistem tenaga, karena tidak hanya mencegah situasi bencana tetapi juga melindungi peralatan dan peningkatan masa manfaatnya. Ada dua tipe gangguan pada sistem tenaga, yaitu gangguan *internal* dan *eksternal*. Untuk kasus *internal*, gangguannya berupa gangguan 1-fasa ke tanah (*single line to ground*), 2-fasa ke tanah (*double line to ground*), 2-fasa (*line to line*), dan gangguan 3-fasa simetris (*three-phase simetrical*). Untuk kasus *eksternal*, petir dianggap sebagai sumber utama yang dapat merusak sistem tenaga.

### 2. 9. 1 Gangguan Internal

#### 1. Gangguan 1-fasa ke tanah

Gangguan 1-fasa ke tanah merupakan jenis gangguan yang paling umum terjadi pada saluran transmisi [36]. Gangguan ini terjadi ketika konduktor terhubung ke tanah selama gangguan, dimana arus yang mengalir sangat besar. Rangkaian gangguan ini dapat dilihat seperti gambar 2.21, dimana fasa A terhubung ke tanah melalui resistansi saluran sebesar R sehingga terjadi gangguan satu fasa ke tanah di fasa A melalui resistansi gangguan.

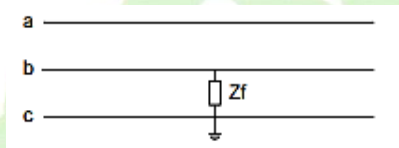




**Gambar 2. 21** Rangkaian Ekivalen Gangguan 1-Fasa Tanah

2. Gangguan 2-fasa ke tanah

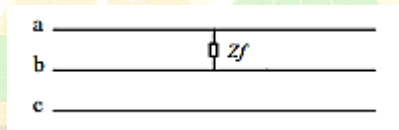
Gangguan ini terjadi ketika dua konduktor terhubung ke tanah selama gangguan, dimana arus yang mengalir besar. Rangkaian pada gangguan ini dapat dilihat seperti gambar 2.22, dimana fasa b dan c terhubung ke tanah melalui impedansi saluran sebesar  $Z_f$  sehingga terjadi gangguan dua fasa tanah di fasa b dan c melalui impedansi gangguan.



**Gambar 2. 22** Rangkaian Ekivalen Gangguan 2-Fasa Tanah

3. Gangguan 2-fasa

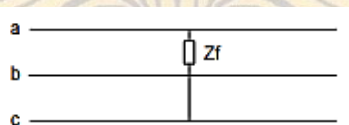
Gangguan ini terjadi ketika dua konduktor terhubung satu sama lain selama gangguan, dimana arus yang mengalir besar. Rangkaian pada gangguan ini dapat dilihat seperti gambar 2.23, dimana fasa a dan b terhubung melalui impedansi saluran sebesar  $Z_f$  sehingga terjadi gangguan dua fasa di fasa a dan b melalui impedansi gangguan.



**Gambar 2. 23** Rangkaian Ekivalen Gangguan 2-Fasa

4. Gangguan 3-fasa

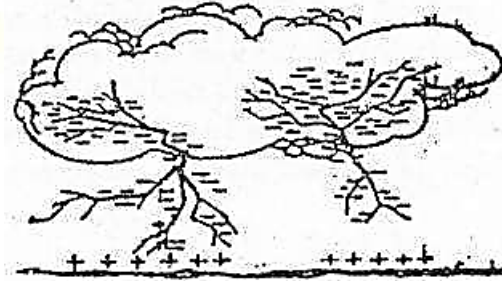
Gangguan ini terjadi ketika tiga konduktor terhubung satu sama lain selama gangguan, dimana arus yang mengalir besar. Rangkaian pada gangguan ini dapat dilihat seperti gambar 2.24, dimana fasa a,b dan c terhubung melalui impedansi saluran sebesar  $Z_f$  sehingga terjadi gangguan tiga fasa di fasa a,b dan c melalui impedansi gangguan.



**Gambar 2. 24** Rangkaian Ekivalen Gangguan 3-Fasa

## 2. 9. 2 Gangguan Eksternal

Gangguan di luar sistem biasanya terjadi karena adanya sambaran petir. Petir merupakan suatu peristiwa peluahan muatan listrik di atmosfer. Teori umum yang dapat diterima tentang petir yaitu awan terdiri dari muatan positif dan negatif. Muatan ini akan menginduksi muatan yang memiliki polaritas berlawanan ke awan terdekat atau ke bumi. Petir mempengaruhi kinerja saluran listrik dengan efek langsung dan tidak langsung dimana tegangan tinggi transien dapat menyebabkan gangguan flashover pada peralatan listrik di saluran transmisi [37].

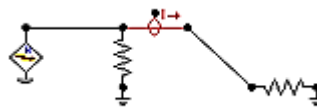


Gambar 2. 25 Kilat Sambaran Petir

Pada software ATP sambaran petir direpresentasikan sebagai sumber arus dengan impedansi petir. Nilai impedansi petir diasumsikan 400 ohm oleh Heidler. Model petir yang digunakan adalah model petir Heidler yang direkomendasikan oleh CIGRE. Model yang digunakan dapat merepresentasikan arus petir dengan waktu yang bervariasi dengan kecuraman arus petir yang dapat diatur. Model Heidler dapat dilihat dengan persamaan :

$$i(t) = \frac{I_0}{h} \cdot \frac{\left(\frac{1}{\tau_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{1}{\tau_1}\right)^{10}} e^{1/\tau_2} \quad (2.73)$$

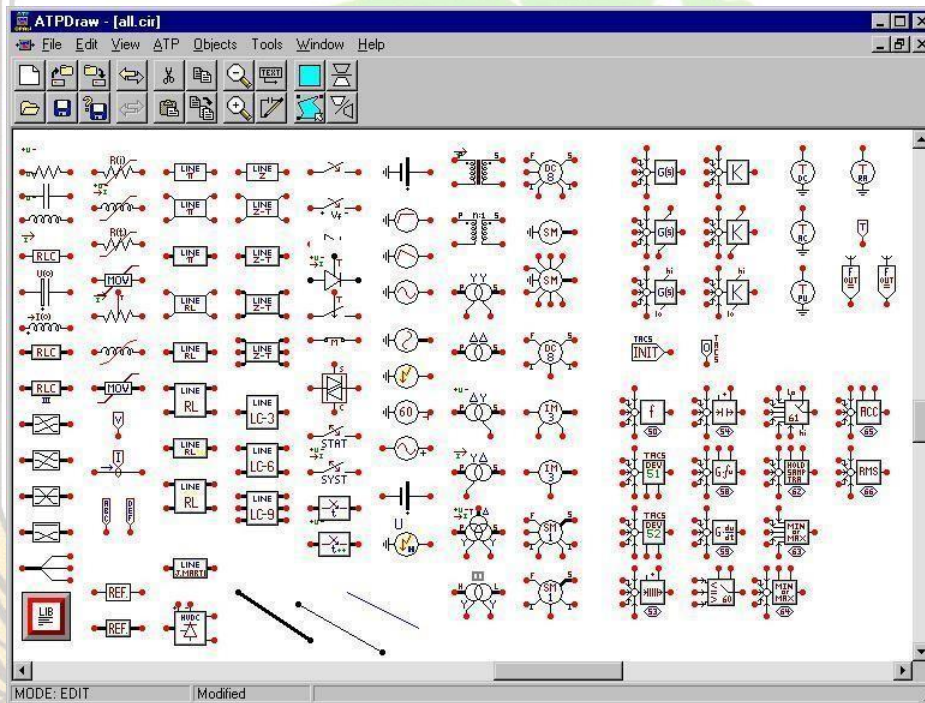
Dimana  $I_0$  adalah nilai puncak arus,  $h$  adalah faktor koreksi (2~10),  $\tau_1$  adalah konstanta waktu muka pada gelombang,  $\tau_2$  adalah konstanta waktu pada ekor gelombang. Model Heidler bisa dilihat pada gambar 2.26 menggunakan ATP.



Gambar 2. 26 Model Heidler Menggunakan ATP

## 2.10 Perangkat Lunak *Alternative Transient Program*

*Alternative transient program* (ATP) adalah perangkat lunak simulasi transien yang digunakan untuk memodelkan sistem tenaga dan gangguan transien. Program ini digunakan secara luas untuk menganalisa elektromagnetik akibat gangguan transien pada sistem tenaga. Perangkat lunak ini mempunyai kemampuan untuk memodelkan saluran transmisi, kabel, circuit breaker, beban, converter, peralatan proteksi, elemen non linear, kopling elektromagnetik dan peralatan elektronika daya lainnya. Selain itu memiliki berbagai program pendukung, file untuk menginisialisasi data dan program penyelesaian masalah. Program ATP mempunyai interface yang dikenal dengan *ATP-Draw* untuk membuat dan mengedit model dari jaringan sistem tenaga agar dapat disimulasikan secara interaktif seperti yang terlihat pada gambar 2.27.



Gambar 2. 27 Interface Perangkat Lunak ATP

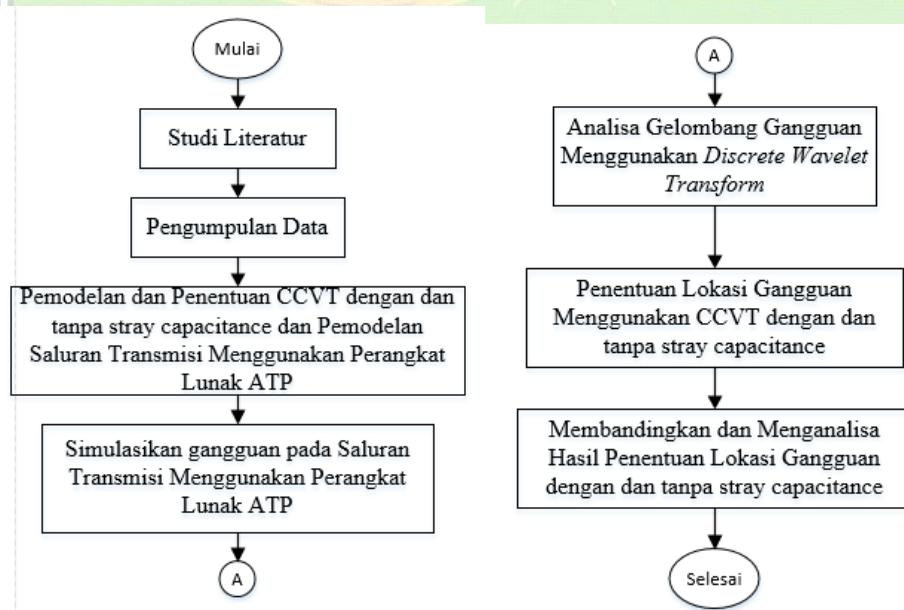
## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan secara rinci gambaran umum penelitian, tahapan penelitian, pengambilan data, diagram alir penelitian, serta rencana jadwal penelitian.

### 3.2 Gambaran Umum Penelitian

Penelitian ini akan menganalisa dan menentukan perbandingan lokasi gangguan pada saluran transmisi dengan sensor tegangan (CCVT) yang dengan dan tanpa mempertimbangkan stray capacitance. Kasus yang digunakan yaitu pada Unit Pelayanan Transmisi (UPT) PLN Padang terkhusus saluran dari pembangkit listrik tenaga air (PLTA) Maninjau hingga gardu induk (GI) Pauh Limo sepanjang 92 km. Metode yang digunakan pada penelitian ini merupakan simulasi dengan menetapkan beberapa lokasi dan jenis gangguan, serta menggunakan jenis sensor yaitu sensor tegangan (CCVT) yang akan disimulasikan menggunakan perangkat lunak *Alternative Transient Program* (ATP). Selanjutnya untuk menentukan lokasi gangguan digunakan perangkat lunak Matlab. Hasil yang didapatkan akan dibandingkan dan dianalisa keakuratannya. Metode penentuan lokasi gangguan menggunakan metode gelombang berjalan dan *discrete wavelet transform* (DWT), dengan metode pengujian yaitu *single-ended method*. Diagram alir secara umum dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Secara Umum

Diagram alir di atas menjelaskan tahapan dalam penelitian, diuraikan sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dipelajari beberapa penelitian yang telah pernah dilakukan sebelumnya yang berkaitan dengan metode penentuan lokasi gangguan. Beberapa metode deteksi lokasi gangguan yaitu metode impedansi, metode dengan pemakaian GPS, metode konvensional, metode *neural network* dan lain sebagainya. Namun metode penelitian yang digunakan yaitu gabungan antara metode *travelling wave* dan pengolahan sinyal digital.

2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian berupa data saluran transmisi yang terdiri dari resistansi urutan positif, resistansi urutan nol, induktansi urutan positif, induktansi urutan nol, capacitance urutan positif, capacitance urutan nol. Data saluran transmisi berupa panjang saluran, jenis dan diameter penghantar.

3. Pemodelan Saluran Transmisi dan CCVT Menggunakan Perangkat Lunak ATP

Pemodelan saluran transmisi dimodelkan dalam perangkat lunak ATP. Sumber tenaga dimodelkan dengan generator.

4. Simulasi Gangguan Pada Saluran Transmisi Menggunakan Perangkat Lunak ATP

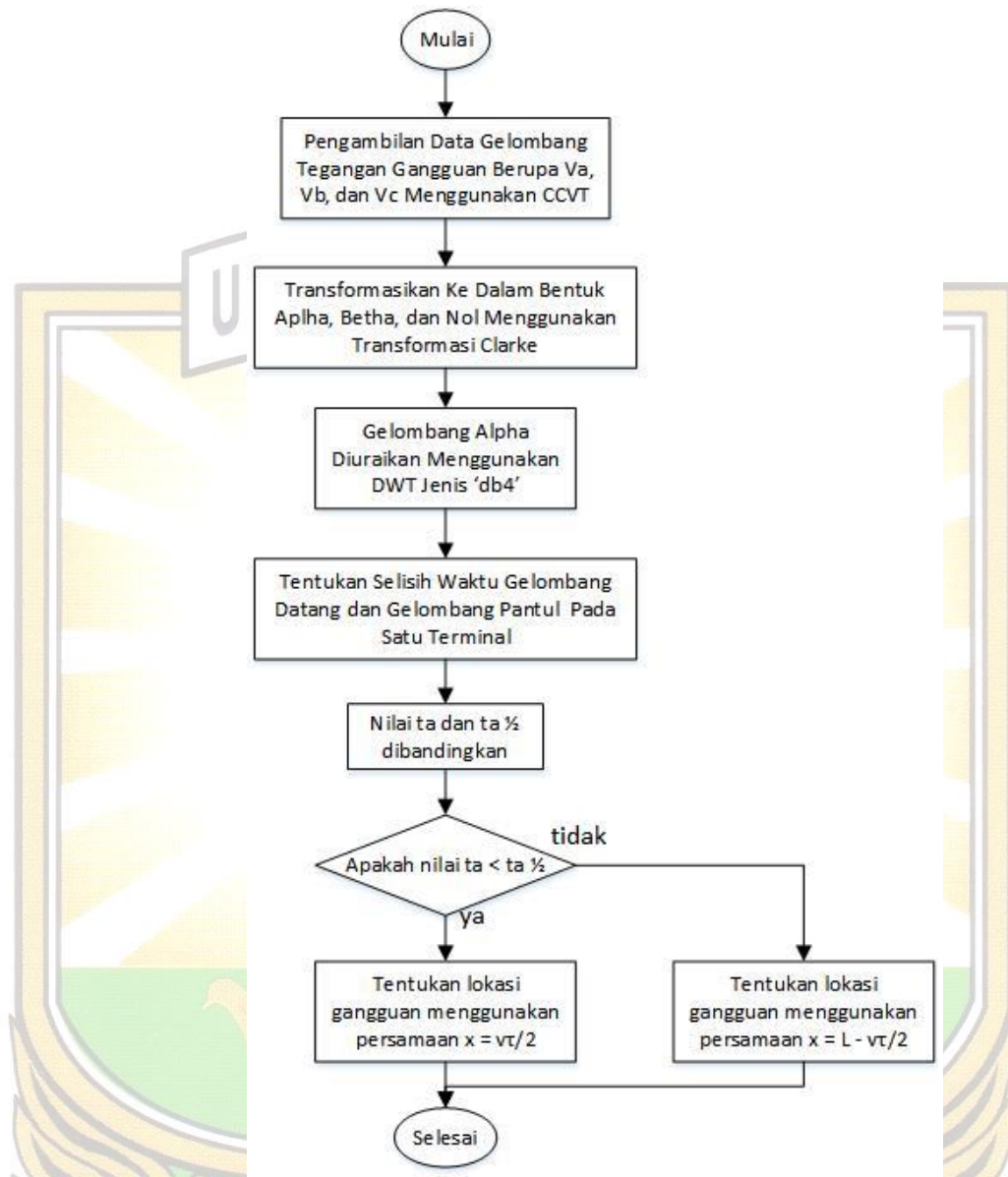
Pada saluran transmisi yang dimodelkan akan diberikan gangguan baik itu gangguan dari dalam sistem ataupun dari luar sistem. Setelah disimulasikan maka akan didapatkan suatu gelombang sinyal yang nantinya akan diolah menggunakan metode *travelling wave* dan *discrete wavelet transform (DWT)*, sehingga dapat dianalisa dan ditentukan lokasi gangguan yang terjadi.

5. Analisa Gelombang Gangguan Menggunakan *Discrete Wavelet Transform*

Gelombang gangguan akan diolah menggunakan perangkat lunak Matlab. Hasil dari sinyal gangguan yang didapatkan akan diubah terlebih dahulu menggunakan transformasi Clarke, dimana fasa A, fasa B, dan fasa C akan diubah menjadi fasa  $\alpha$ , fasa  $\beta$ , dan fasa 0. Gelombang tersebut akan diolah menggunakan transformasi wavelet diskrit jenis Daubechies ('db4). Pengolahan gelombang ini bertujuan untuk mendapatkan selisih waktu gelombang datang dan gelombang pantul ( $\tau$ ).

6. Penentuan Lokasi Gangguan Menggunakan CCVT

Metode penentuan lokasi gangguan dengan *single ended method*. Tahapan penentuan lokasi gangguan menggunakan *single-ended method travelling wave* dapat dilihat pada gambar 3.2.

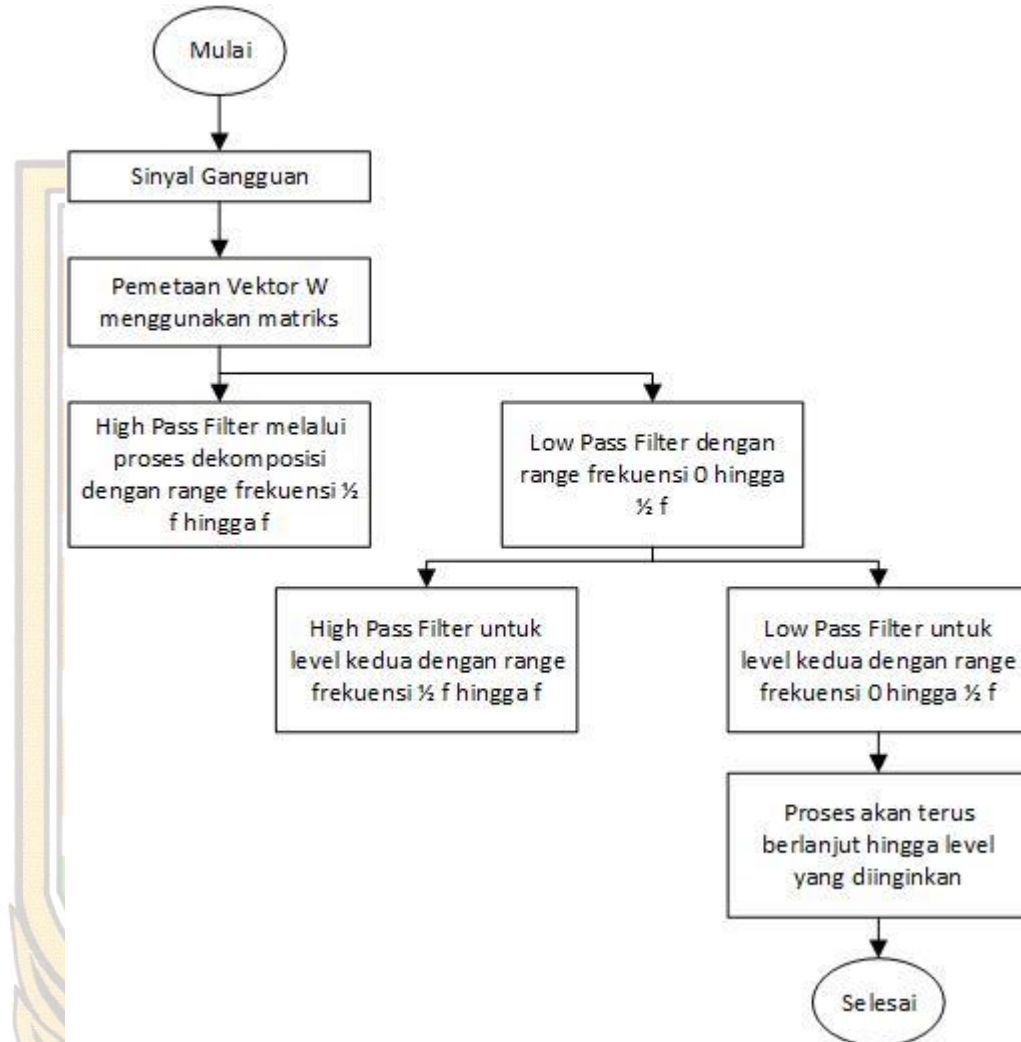


**Gambar 3. 2** Diagram Alir *Single-ended Method*

Diagram alir single-ended method diuraikan sebagai berikut :

- Data gelombang yang diambil ketika gangguan terjadi menggunakan jenis sensor tegangan. Gelombang tegangan yang diambil adalah  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  menggunakan CCVT. Gelombang ini didapatkan dari model saluran transmisi yang disimulasikan menggunakan perangkat lunak ATP.
- Gelombang tegangan yang dihasilkan ditransformasikan dari dalam bentuk fasa abc ke dalam bentuk fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan 0 menggunakan transformasi Clarke.
- Gelombang  $\alpha$  hasil dari transformasi Clarke diurai dalam domain waktu dan frekuensi menggunakan *discrete wavelet transform* (DWT) jenis ('db4'). Jenis

wavelet tersebut digunakan untuk menentukan selisih gelombang datang dan gelombang pantul pada salah satu terminal. Tahapan transformasi wavelet dapat dilihat pada gambar 3.3 sebagai berikut :



**Gambar 3. 3** Diagram Alir Transformasi Wavelet Diskrit

Diagram alir transformasi wavelet diskrit diuraikan sebagai berikut :

- ❖ Sinyal gangguan hasil transformasi Clarke berupa tegangan  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  akan dipetakan menggunakan matriks wavelet.
- ❖ Hasil pemetaan matriks tersebut akan diuraikan dengan dua jenis filter yaitu high pass filter dan low pass filter.
- ❖ Yang pertama high pass filter akan dihasilkan koefisien wavelet melalui proses dekomposisi yang disebut dengan detail, dimana range frekuensi HPF yaitu  $\frac{1}{2}$  frekuensi hingga frekuensi maksimum.

- ❖ Selanjutnya low pass filter akan menghasilkan sinyal yang akan diolah lagi menggunakan dua jenis filter, dimana range frekuensi LPF yaitu 0 hingga  $\frac{1}{2}$  frekuensi.
- ❖ Proses tersebut akan terus berlanjut hingga level yang diinginkan.
- Nilai  $\tau$  merupakan selisih waktu gelombang datang dan pantul ketika gangguan terjadi. Sedangkan nilai  $\tau/2$  merupakan selisih waktu gelombang datang dan pantul ketika gangguan tepat ditengah-tengah saluran.
- Setelah dilakukan perhitungan dalam masing-masing kondisi maka jarak gangguan dapat diketahui.

#### 7. Menganalisa Hasil Perhitungan Lokasi Gangguan

Lokasi gangguan yang telah didapat dari hasil simulasi dan perhitungan dibandingkan dengan nilai yang ditetapkan untuk menganalisa besar kesalahan simulasi. Selanjutnya akan dianalisa perbandingan hasil menggunakan sensor tegangan (CCVT).

#### 8. Pengambilan Kesimpulan

Tahapan akhir dari penelitian ini adalah pembuatan kesimpulan yang dihasilkan dari penelitian ini dan perumusan saran yang nantinya dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya. Kemudian dilakukan pelaporan akhir penelitian dalam bentuk dokumentasi tertulis.





## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan secara rinci hasil yang didapatkan beserta pembahasan mengenai penelitian pengaruh stray capacitance pada model CCVT pada penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi menggunakan metoda gelombang berjalan dan transformasi wavelet.

### 4.2 Pengumpulan Data Sistem Transmisi

Data saluran transmisi yang digunakan yaitu saluran transmisi dari pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Maninjau sampai Gardu Induk Pauh Limo. Data spesifikasi saluran transmisi diuraikan pada tabel 4.1 sebagai berikut.

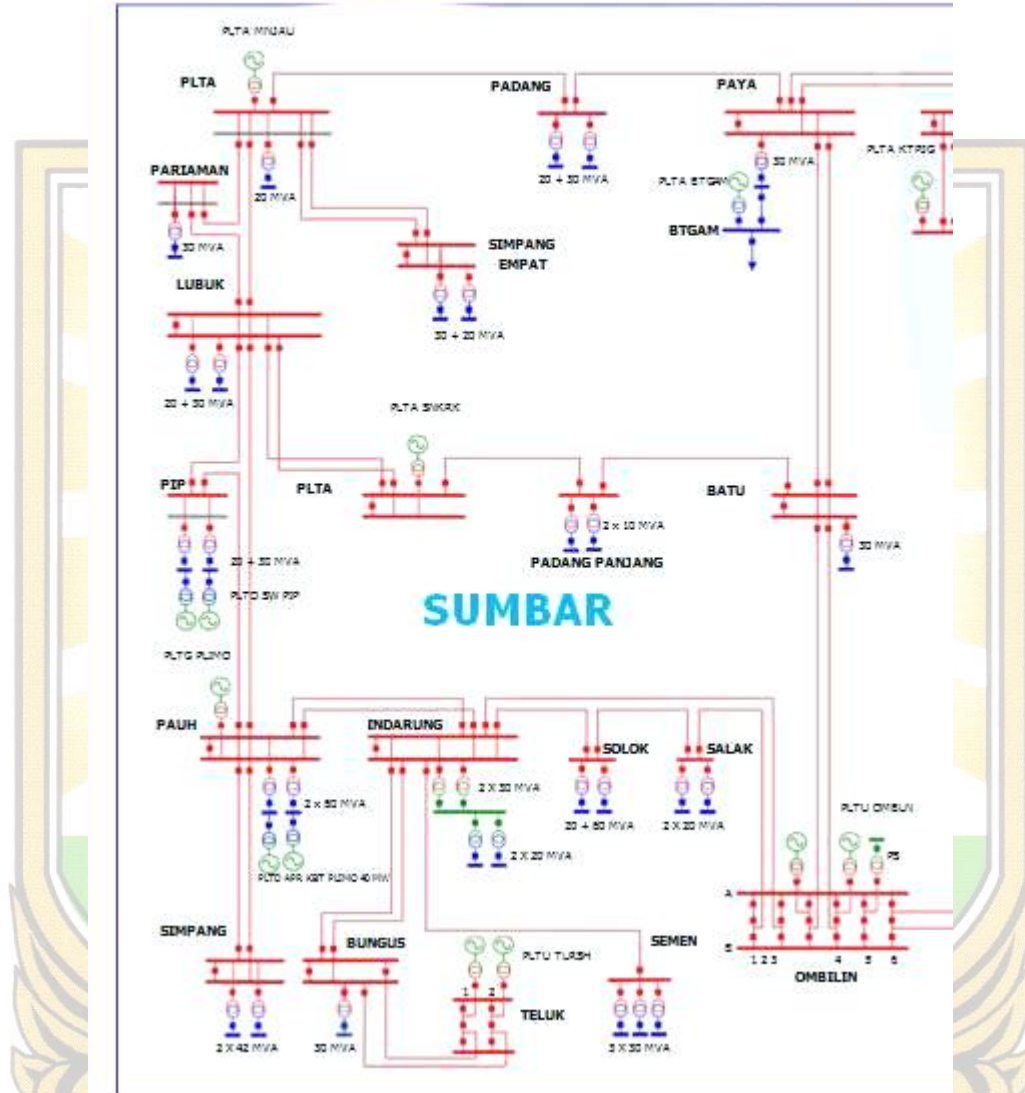
**Tabel 4.1** Data Saluran Transmisi PLTA Maninjau hingga Gardu Induk Pauh Limo (Data PT PLN Pembangkitan dan Penyaluran Sumatera)

No	Data	Spesifikasi
1	Tegangan Sistem	150 kV
2	Arus Nominal	645 A
3	Panjang Saluran	92 km
4	Jumlah Sirkuit	2
5	Jenis Konduktor	HAWK
6	Diameter Konduktor	240 mm <sup>2</sup>
7	Daya Rata-Rata	167,58 MVA
8	Impedansi Urutan Positif	R = 0,117 Ω/km
		X = 0,401 Ω/km
		B = 2,859 Ω/km
9	Impedansi Urutan Nol	R = 0,614 Ω/km
		X = 1,793 Ω/km
		B = 1,223 Ω/km

Adapun *single line diagram* kelistrikan Sumatera Barat ditunjukkan pada gambar 4.1 sebagai berikut.



## SISTEM TENAGALISTRIK SUMBAGTENG



Gambar 4. 1 Single Line Diagram Sistem Kelistrikan Sumatera Barat

### 4.3 Pemodelan Sistem Transmisi

Pemodelan sistem transmisi dari objek penelitian yaitu menggunakan perangkat lunak *alternative transient program* (ATP), dimana komponen yang digunakan terdiri dari saluran transmisi, sumber tegangan, dan *coupling capacitor voltage transformer* (CCVT).

### 4.3.1 Saluran Transmisi

Saluran transmisi menengah model- $\pi$  ditransposkan digunakan untuk model saluran transmisi. Pada perangkat lunak *alternative transient program* digunakan komponen *line/cable lumped transposed line (Clarke)* tiga fasa untuk model saluran transmisi dimana ditunjukkan pada gambar 4.2.



**Gambar 4. 2** Komponen Cable Lumped Transposed Line (Clarke) Tiga Fasa

Diperlukan data-data tahanan urutan positif dan urutan nol, induktansi urutan positif dan urutan nol, serta kapasitansi urutan positif dan urutan nol pada komponen *cable lumped transposed line (Clarke)* tiga fasa. Tahanan urutan positif dan urutan nol dapat diambil pada data secara langsung, tetapi dengan mengubah satuan tahanan menjadi  $\Omega/m$ . Sedangkan untuk nilai induktansi dan kapasitansi baik itu urutan positif dan urutan nol dapat dihitung menggunakan data reaktansi induktif dan kapasitif yang tersedia pada tabel 4.1.

a. Induktansi

a) Urutan Positif

$$L_1 = \frac{XL_1}{2\pi f}$$

$$L_1 = \frac{0,401 \cdot 10^{-3} \Omega/km}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Hz}}$$

$$L_1 = 1,277 \cdot 10^6 H/m$$

$$L_1 = 0,001277 \text{ mH/m}$$

b) Urutan Nol

$$L_0 = \frac{XL_0}{2\pi f}$$

$$L_0 = \frac{1,793 \cdot 10^{-3} \Omega/km}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Hz}}$$

$$L_0 = 5,71 \cdot 10^6 H/m$$

$$L_0 = 0,0057 \text{ mH/m}$$

b. Kapasitansi

a) Urutan Positif

$$XC_1 = \frac{1}{B_1}$$

$$XC_1 = \frac{1}{2,859 \mu s/km}$$

$$XC_1 = 0,3497 \Omega/km$$

$$XC_1 = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$C = \frac{1}{2\pi fXC_1}$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,3497 \Omega/km}$$

$$C = 9,10 \cdot 10^{-3} \mu F/km$$

$$C = 9 \cdot 10^{-6} \mu F/m$$

b) Urutan Nol

$$XC_0 = \frac{1}{B_0}$$

$$XC_0 = \frac{1}{1,233 \mu s/km}$$

$$XC_0 = 0,817 \Omega/km$$

$$XC_0 = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$C = \frac{1}{2\pi fXC_0}$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,817 \Omega/km}$$

$$C = 3,89 \cdot 10^{-3} \mu F/km$$

$$C = 3,89 \cdot 10^{-6} \mu F/m$$

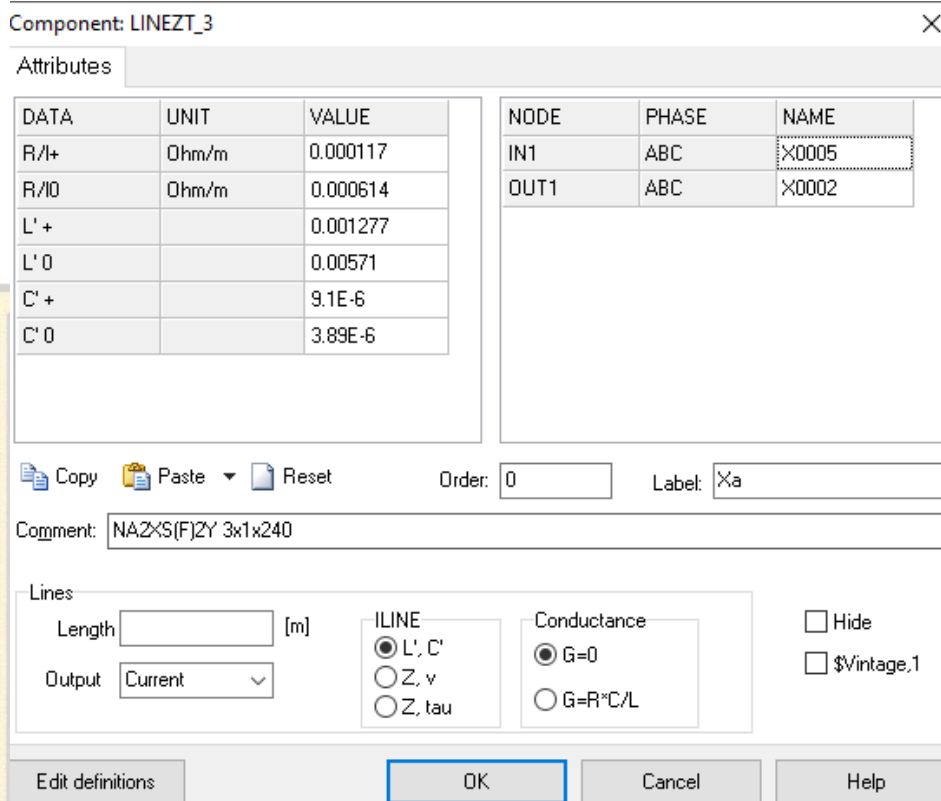
Setelah didapatkan hasil masing-masing induktansi dan kapasitansi pada urutan positif dan urutan nol, maka dihitung kecepatan rambat gelombang, yaitu :

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{1,277 \cdot \frac{10^{-3} mH}{m} \cdot 9 \cdot \frac{10^{-6} \mu F}{m}}}$$

$$v = 294.973,7006 \text{ km/s}$$

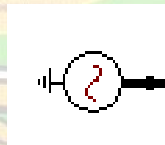
Nilai tahanan dari urutan positif dan urutan nol, nilai induktansi urutan positif dan urutan nol, serta kapasitansi urutan positif dan urutan nol selanjutnya diinput dalam parameter komponen saluran pada perangkat lunak ATP yang ditunjukkan pada gambar 4.3.



**Gambar 4. 3** Parameter Komponen Cable Lumped Transposed Line (Clarke) Tiga Fasa

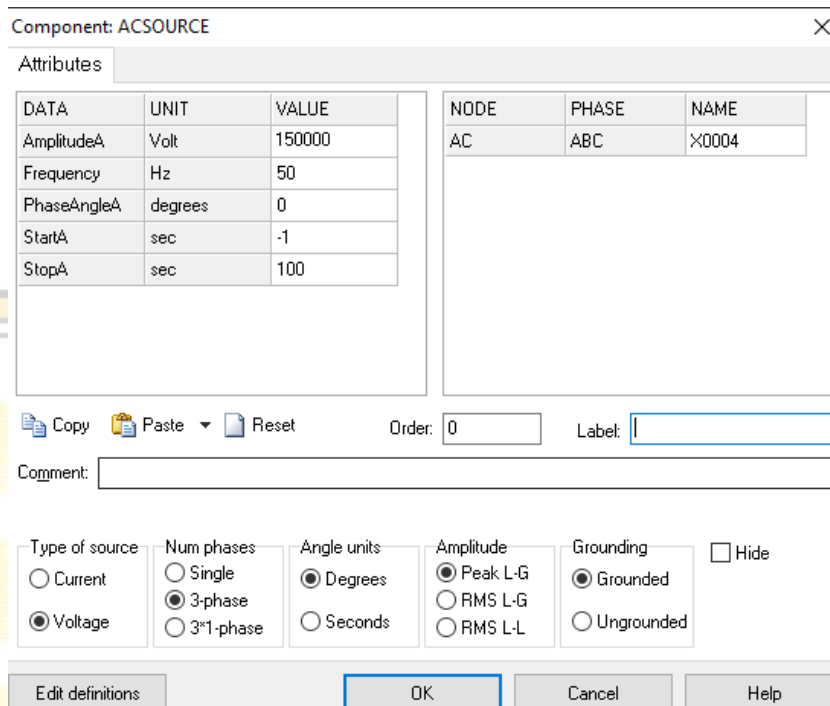
#### 4. 3. 2 Sumber Tegangan

Komponen AC *source* tiga fasa digunakan untuk sumber tegangan pada perangkat lunak *alternative transient program* (ATP), dimana untuk saluran transmisi juga merupakan saluran dengan sumber AC atau bolak-balik. Komponen tersebut ditunjukkan pada gambar 4.4.



**Gambar 4. 4** Komponen AC *Source* Tiga Fasa

Parameter sumber tegangan yang digunakan pada perangkat lunak ATP dapat dilihat pada gambar 4.5.



**Gambar 4. 5** Parameter Komponen AC Source Tiga Fasa

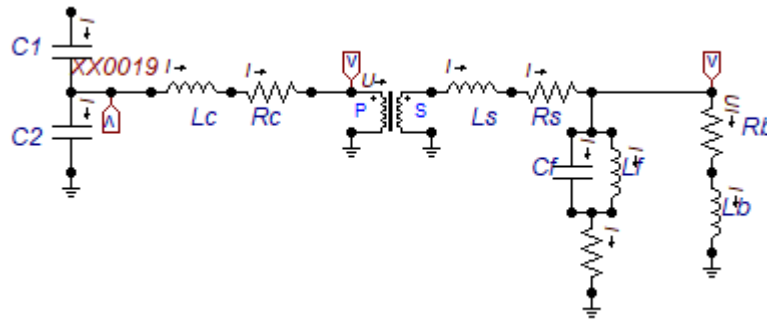
#### 4. 3. 3 Coupling Capacitor Voltage Transformer

Pada sisi pengukuran dipasang suatu sensor yang berguna untuk membaca dan menangkap gelombang berjalan dari titik gangguan, dimana sensor yang digunakan yaitu *coupling capacitor voltage transformer* (CCVT). CCVT ini terdiri dari dua kapasitor yang terhubung seri yang berguna menjadi pembagi tegangan, lalu dihubungkan dengan sebuah trafo tegangan yang dilalui oleh tahanan kompensasi, selanjutnya tegangan gangguan akan diukur pada sisi sekunder trafo tegangan. Adapun parameter CCVT tanpa *stray capacitance* dapat dilihat pada tabel 4.2 sebagai berikut.

**Tabel 4. 2** Parameter CCVT tanpa *stray capacitance*

No	Komponen	Parameter
1	C1 (Coupling Capacitor 1)	$1,26 \times 10^{-5} \mu\text{F}$
2	C2 (Coupling Capacitor 2)	$36,54 \times 10^{-5} \mu\text{F}$
3	Lp (Impedansi Primer)	1,745 H
4	Rp (Resistor Primer)	220 $\Omega$
5	Ls (Impedansi Sekunder)	0,007 mH
6	Rs (Resistansi Sekunder)	0,04 $\Omega$
7	Cf (Capacitor Fero-resonance)	10,25 $\mu\text{F}$
8	Lf (Impedansi Fero-resonance)	715 mH
9	Rb (Resistansi Burden)	75 $\Omega$
10	Lb (Impedansi Burden)	280 mH

Model CCVT tanpa stray *capacitance* ditunjukkan pada gambar 4.6.



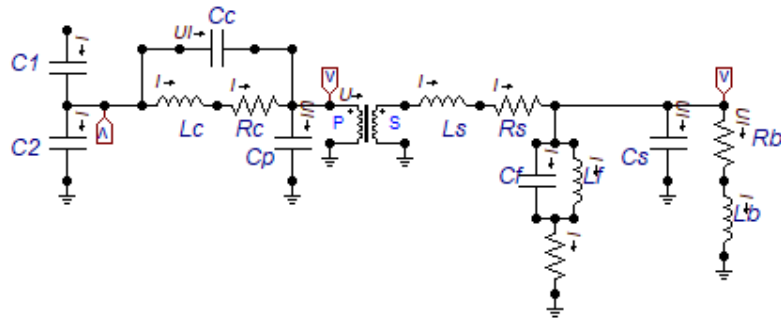
**Gambar 4. 6** Model *Coupling Capacitor Voltage Transformer* Tanpa Stray *Capacitance*

Selanjutnya digunakan model CCVT menggunakan stray *capacitance*, dimana nilai stray *capacitance* didapatkan berdasarkan referensi yang ada. Parameter yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.3 sebagai berikut [38].

**Tabel 4. 3** Parameter CCVT dengan stray *capacitance*

No	Komponen	Parameter
1	C1 (Coupling Capacitor 1)	$1,26 \times 10^{-5} \mu\text{F}$
2	C2 (Coupling Capacitor 2)	$36,54 \times 10^{-5} \mu\text{F}$
3	Lp (Impedansi Primer)	1,745 H
4	Rp (Resistor Primer)	220 $\Omega$
5	Ls (Impedansi Sekunder)	0,007 mH
6	Rs (Resistansi Sekunder)	0,04 $\Omega$
7	Cf (Capacitor Fero-resonance)	10,25 $\mu\text{F}$
8	Lf (Impedansi Fero-resonance)	715 mH
9	Rb (Resistansi Burden)	75 $\Omega$
10	Lb (Impedansi Burden)	280 mH
11	Cp (Stray <i>Capacitance</i> Primer)	$15 \times 10^{-5} \mu\text{F}$
12	Cs (Stray <i>Capacitance</i> Sekunder)	$15 \times 10^{-5} \mu\text{F}$
13	Cc (Stray <i>Capacitance</i> Coupling Capacitor dan Trafo Primer)	$20 \times 10^{-5} \mu\text{F}$

Model CCVT dengan stray *capacitance* yang ditunjukkan pada gambar 4.7.



**Gambar 4. 7** Model *Coupling Capacitor Voltage Transformer* Dengan *Stray Capacitance*

Untuk menganalisa kinerja CCVT tanpa dan dengan *stray capacitance* disimulasikan beberapa gangguan dengan jarak yang bervariasi menggunakan software ATP Draw.

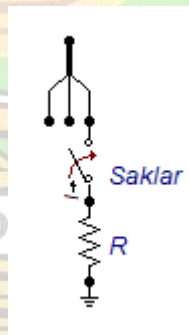
#### 4. 4 Model Gangguan pada Saluran Transmisi Menggunakan Perangkat Lunak ATP

Jenis gangguan yang digunakan yaitu gangguan dari dalam sistem yaitu gangguan satu fasa tanah, gangguan dua fasa, gangguan dua fasa tanah, gangguan tiga fasa, dan gangguan tiga fasa tanah, dan gangguan dari luar sistem yaitu gangguan surja petir.

##### 4. 4. 1 Gangguan dari dalam sistem

###### 1. Gangguan satu fasa tanah

Secara sederhana gangguan satu fasa tanah dimodelkan dengan saklar yang dikendalikan dengan waktu, lalu diserikan dengan satu impedansi gangguan menuju tanah. Gangguan satu fasa tanah ditunjukkan pada gambar 4.8.

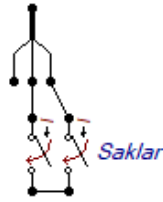


**Gambar 4. 8** Model Gangguan Satu Fasa Tanah

###### 2. Gangguan dua fasa

Gangguan dua fasa dimodelkan menggunakan satu saklar yang pada ujung masing-masing saklar terhubung pada masing-masing fasa sistem transmisi yang dikontrol dengan waktu. Gangguan dua fasa ditunjukkan pada gambar 4.9.

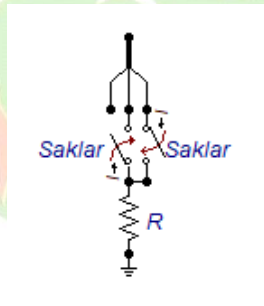




**Gambar 4. 9** Model Gangguan Dua fasa

3. Gangguan dua fasa tanah

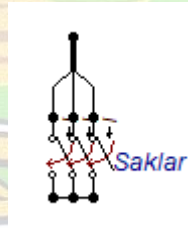
Pemodelan gangguan dua fasa tanah menggunakan dua saklar yang akan dikontrol dengan waktu dan terhubung pada masing-masing fasa dan dihubungkan dengan impedansi gangguan sebelum menuju tanah. Gangguan dua fasa tanah ditunjukkan pada gambar 4.10.



**Gambar 4. 10** Model Gangguan Dua Fasa Tanah

4. Gangguan tiga fasa

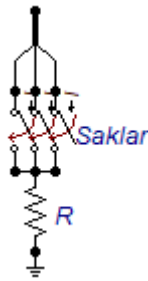
Pada masing-masing fasa dipasang saklar yang dikontrol berdasarkan waktu, dimana masing-masing saklar saling terhubung. Gangguan tiga fasa dapat dilihat pada gambar 4.11.



**Gambar 4. 11** Model Gangguan Tiga Fasa

5. Gangguan tiga fasa tanah

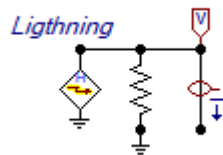
Untuk gangguan tiga fasa tanah tidak jauh beda dengan gangguan tiga fasa, hanya saja pada ujung saklar akan ditambahkan impedansi sebelum menuju ke tanah. Gangguan tiga fasa tanah dapat dilihat pada gambar 4.12.



**Gambar 4. 12** Model Gangguan Tiga Fasa Tanah

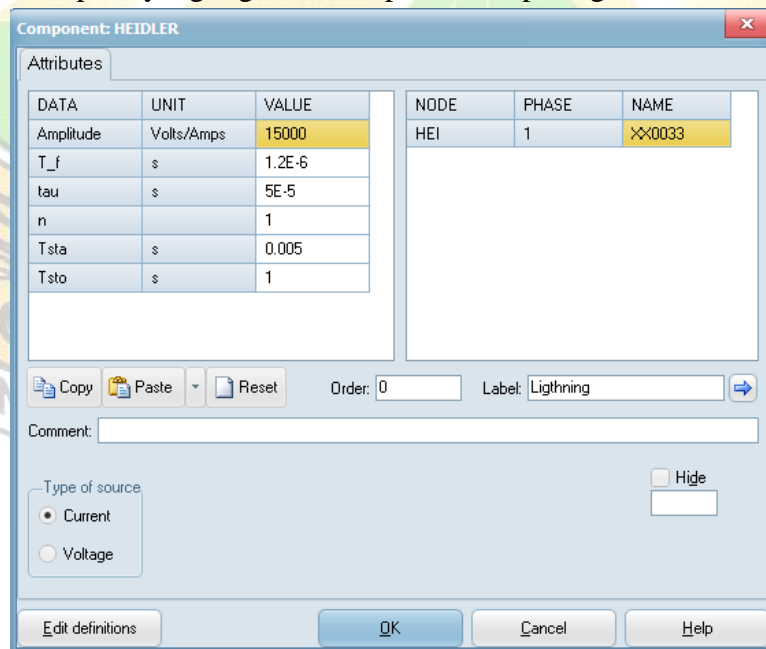
#### 4. 4. 2 Gangguan dari luar sistem

Gangguan dari luar sistem yang digunakan yaitu gangguan surja petir, dimana dimodelkan secara paralel dengan impedansi. Fungsi tahanan yaitu sebagai impedansi jalur petir dengan nilai  $400 \Omega$  yang diturunkan dari Bewley [39]. Waktu muka dan waktu ekor petir yang digunakan yaitu  $1,2/50 \mu s$ . Model gangguan petir yang digunakan ditunjukkan pada gambar 4.13.



**Gambar 4. 13** Model Gangguan Surja Petir

Parameter petir yang digunakan dapat dilihat pada gambar 4.14.



**Gambar 4. 14** Parameter Model Gangguan Petir

#### 4.5 Transformasi Clarke

Gangguan yang terjadi biasanya terdiri dari dua yaitu gangguan simetris dan gangguan yang tidak simetris. Jika terjadi gangguan tidak simetris maka ditransformasikan terlebih dahulu menjadi simetris menggunakan transformasi *Clarke*. Fasa a, b, dan c akan diubah menjadi fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan 0. Matriks transformasi *Clarke* diselesaikan menggunakan perangkat lunak Matlab, dimana *syntax* transformasi *Clarke* tersebut dapat dilihat pada lampiran.

#### 4.6 Discrete Wavelet Transform

Pada umumnya untuk mentransformasikan gelombang gangguan yang digunakan yaitu fasa  $\alpha$ . Fasa  $\alpha$  dihasilkan dari gelombang gangguan yang ditransformasikan menggunakan transformasi *Clarke*. Fasa ini dapat menentukan semua gangguan baik dari dalam ataupun dari luar sistem saluran transmisi. *Syntax* dari transformasi *wavelet* diskrit menggunakan perangkat lunak Matlab dapat dilihat pada lampiran.

#### 4.7 Penentuan Lokasi Gangguan Saluran Transmisi

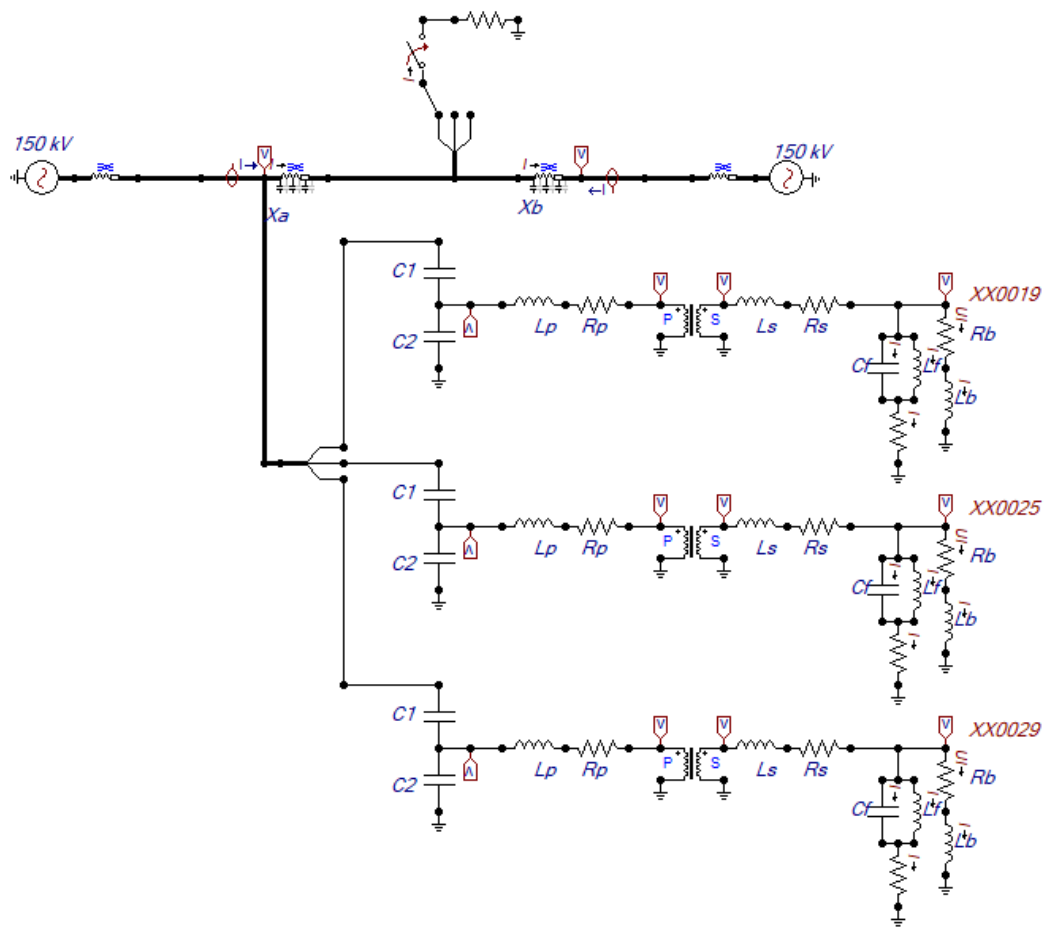
Gangguan yang disimulasikan menggunakan perangkat lunak *alternative transient program* dengan lokasi gangguan serta frekuensi *sampling* yang berbeda-beda. Lokasi gangguan yang digunakan yaitu 30 km, 46 km, dan 60 km, serta frekuensi *sampling* 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz. Gangguan setengah panjang saluran yaitu 46 km merupakan acuan untuk perhitungan untuk setengah saluran pertama dan setengah saluran kedua yang merupakan waktu datang gelombang pertama. Gangguan yang diujikan yaitu gangguan satu fasa tanah, gangguan dua fasa, gangguan dua fasa tanah, gangguan tiga fasa, gangguan tiga fasa tanah, dan gangguan surja petir. Sinyal gangguan yang didapatkan akan ditransformasikan menggunakan transformasi *wavelet* diskrit dengan jenis *mother wavelet Daubechies 4* atau db4.

##### 4.7.1 Gangguan Satu Fasa Tanah

Gangguan satu fasa dimodelkan dengan metode ujung tunggal atau *single ended* untuk penentuan lokasi gangguan, serta menggunakan tiga jenis jumlah *sampling* yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz.

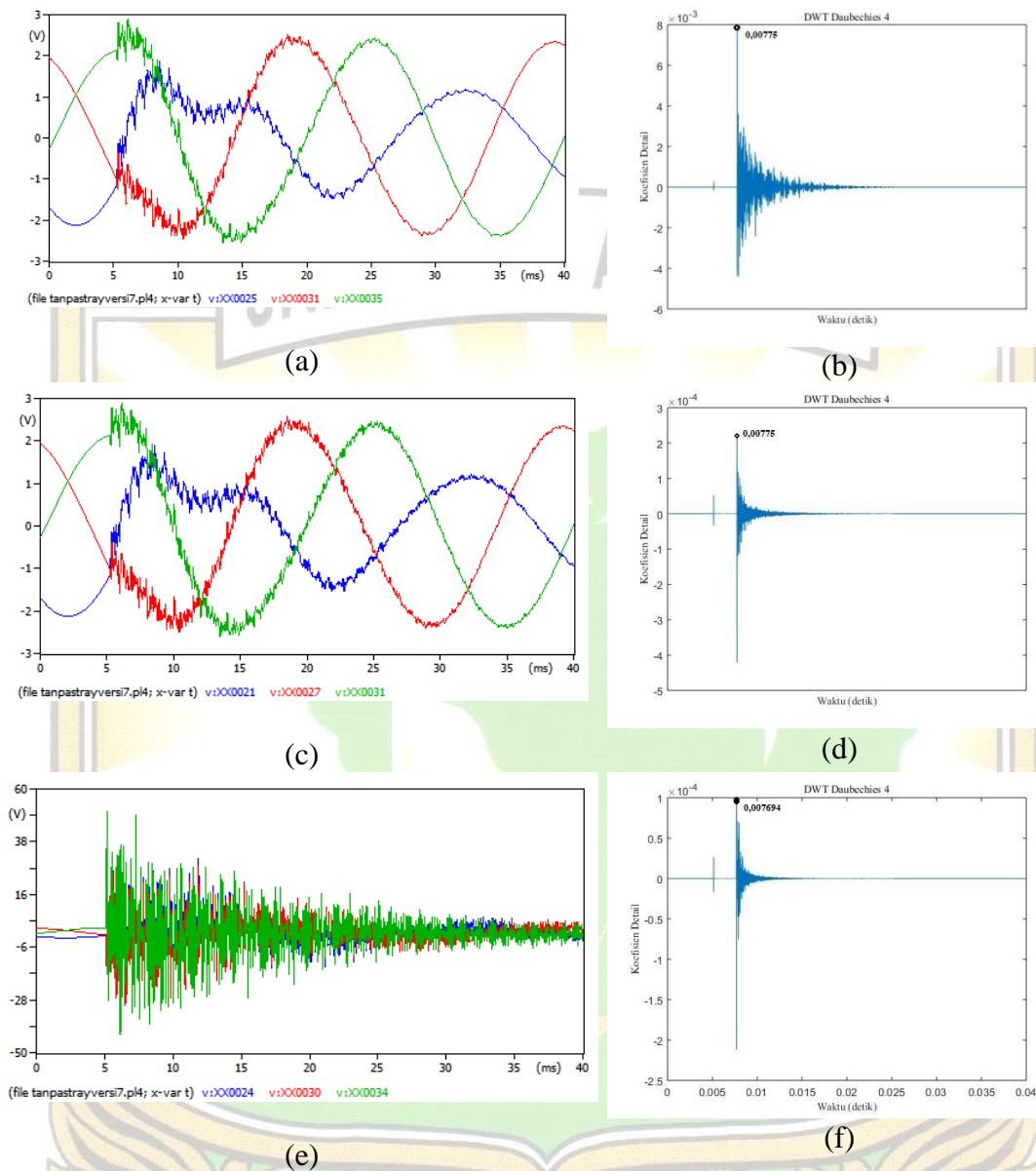
##### 1. Tanpa Stray Capacitance

Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan tanpa *stray capacitance* satu fasa tanah dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.15 berikut.



**Gambar 4. 15** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

Gambar 4.15 merupakan rangkaian simulasi gangguan satu fasa tanah metode ujung tunggal tanpa stray *capacitance* yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATP. Gangguan satu fasa dimodelkan menggunakan satu saklar yang terhubung ke satu fasa yang dikontrol dengan waktu 0,01 detik dan dihubungkan ke tanah melalui impedansi gangguan ke tanah sebesar 1 ohm. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan metode ujung tunggal tanpa stray *capacitance* dapat dilihat pada gambar 4.16 berikut.



**Gambar 4. 16** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

Gambar 4.16 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 60 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 60 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 60 km, (d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 60 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 30

km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan satu fasa tanah untuk lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

**1. Jumlah sampling 10 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00788 \text{ s} - 0,00775 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00026 \text{ s}$$

$$x = L - \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = 92 - \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00026}{2}$$

$$x = 53,653 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 6,347 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|53,653 \text{ km} - 60 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 6,9 \%$$

**2. Jumlah sampling 500 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00786 \text{ s} - 0,00775 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00022 \text{ s}$$

$$x = L - \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = 92 - \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00022}{2}$$

$$x = 59,55 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,45 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|59,55 \text{ km} - 60 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,48 \%$$

### 3. Jumlah sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007695 \text{ s} - 0,007798 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000208 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000208}{2}$$

$$x = 30,677 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,677 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|30,677 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,73 \%$$

Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan satu fasa tanah tanpa stray capacitance menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.4 berikut.

**Tabel 4. 4** Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

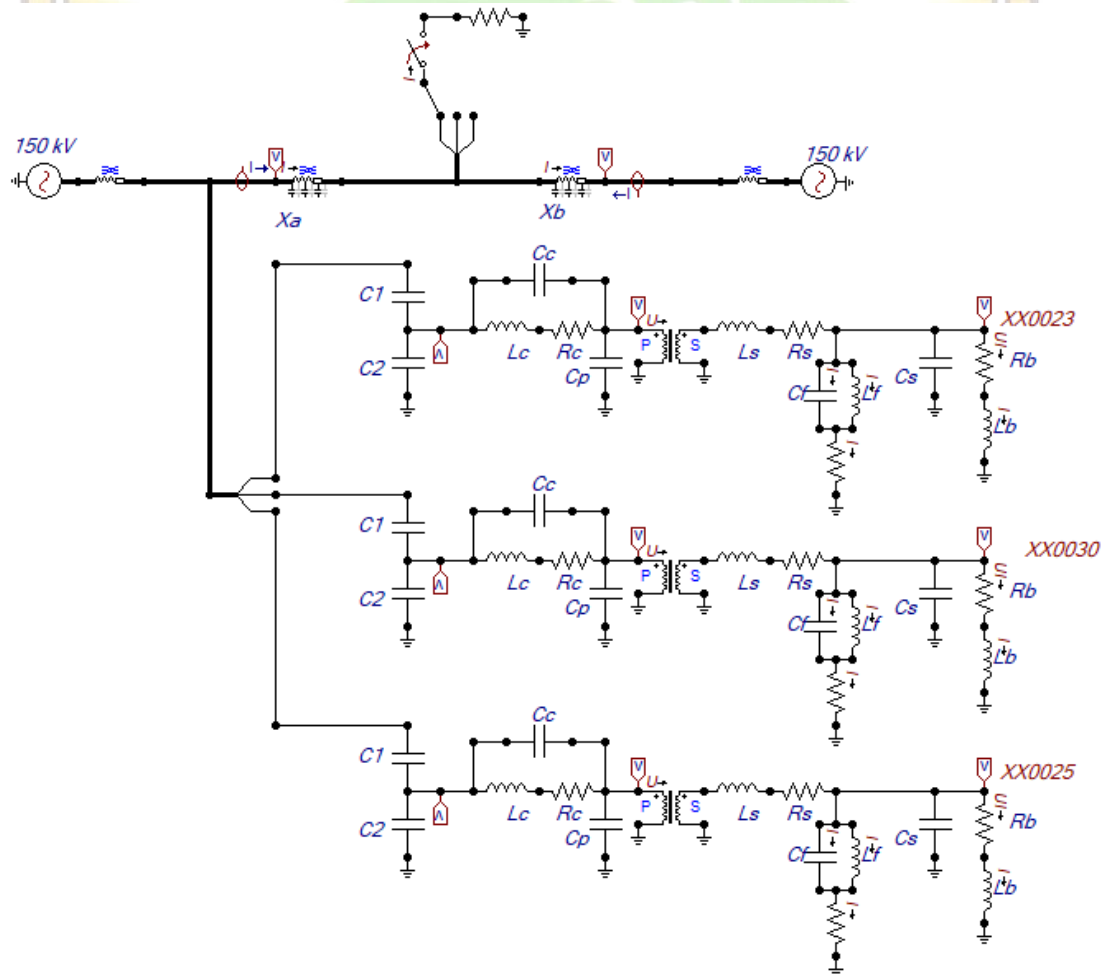
No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan (km)	$t_a$ (s)	$t_b$ (s)	$\tau$ (s)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	0,00772	0,00781	0,00018	26,547	3,75
		46	0,00775	0,0079	0,0003	44,246	1,9
		60	0,00775	0,00788	0,00026	53,653	6,9
2	500 kHz	30	0,007701	0,007806	0,00021	30,97	1,06
		46	0,007726	0,007884	0,000316	46,6	0,65
		60	0,00775	0,00786	0,00022	59,55	0,48

3	1 MHz	30	0,007695	0,007798	0,000208	30,677	0,73
		46	0,007724	0,007881	0,000314	46,31	0,33
		60	0,007748	0,007857	0,000218	59,84	0,16

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 6,9 % yang terjadi pada jarak gangguan 60 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,16 % terjadi pada jarak 60 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

## 2. Dengan Stray Capacitance

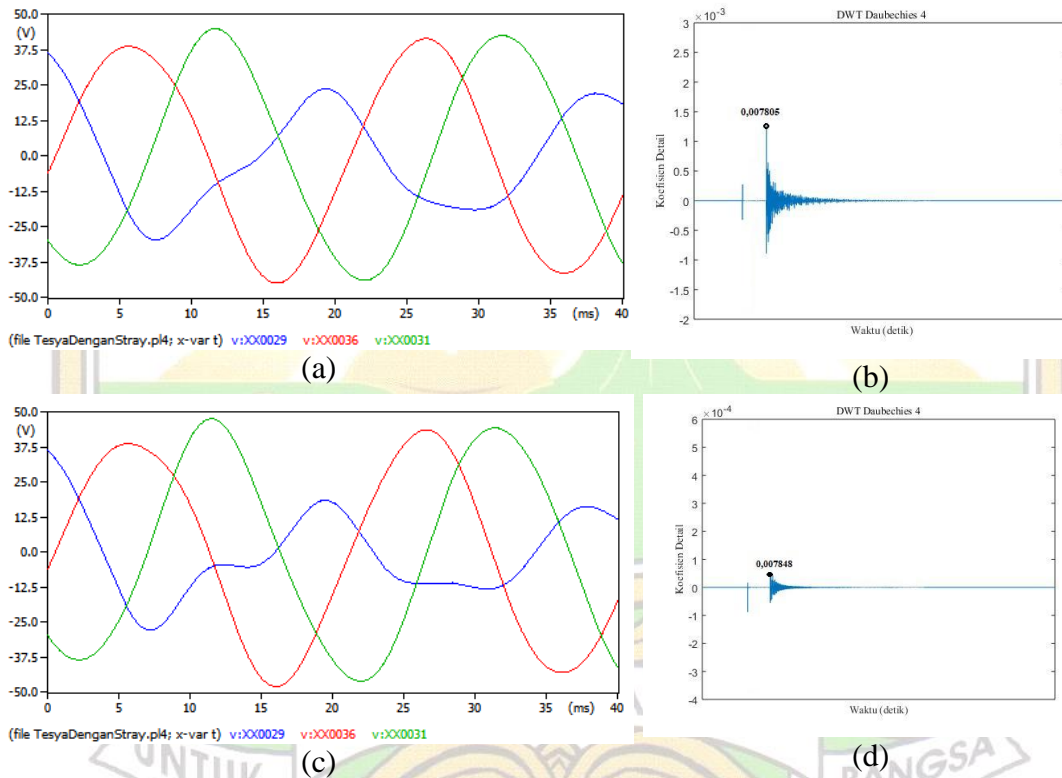
Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan dengan *stray capacitance* satu fasa tanah dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.17 berikut.

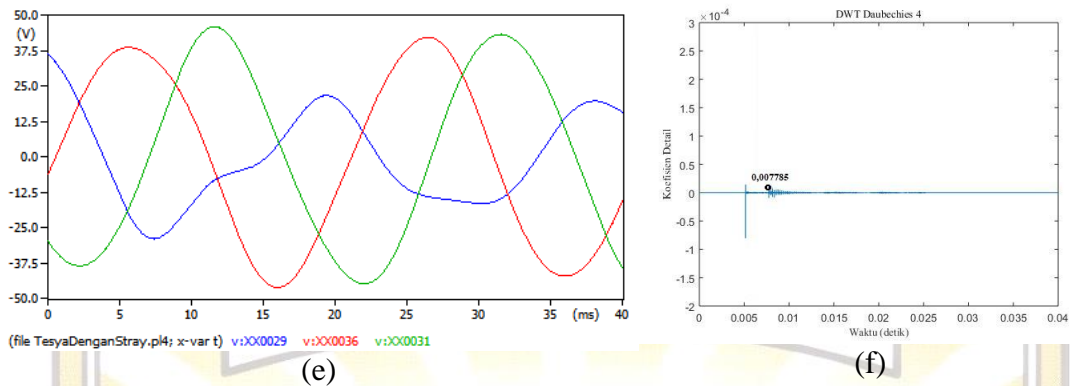


**Gambar 4. 17** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance



Gambar 4.17 merupakan rangkaian simulasi gangguan satu fasa tanah metode ujung tunggal dengan stray *capacitance* yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATP. Gangguan satu fasa dimodelkan menggunakan satu saklar yang terhubung ke satu fasa yang dikontrol dengan waktu 0,01 detik dan dihubungkan ke tanah melalui impedansi gangguan ke tanah sebesar 1 ohm. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan metode ujung tunggal tanpa stray *capacitance* dapat dilihat pada gambar 4.18 berikut.





**Gambar 4. 18** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

Gambar 4.18 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 60 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 60 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 30 km, (d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 46 km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 46 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan satu fasa tanah untuk lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

**1. Jumlah sampling 10 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00791 \text{ s} - 0,007805 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00021 \text{ s}$$

$$x = 92 - \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = 92 - \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00021}{2}$$

$$x = 61,03 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 1,03 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|61,03\text{km} - 60\text{ km}|}{92\text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 1,12\%$$

### 2. Jumlah sampling 500 kHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007948\text{ s} - 0,007848\text{ s})$$

$$\tau = 0,0002\text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,0002}{2}$$

$$x = 29,5\text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,5 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|29,5\text{km} - 30\text{ km}|}{92\text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,55\%$$

### 3. Jumlah Sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00794\text{ s} - 0,007785\text{ s})$$

$$\tau = 0,00031\text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00031}{2}$$

$$x = 45,72\text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,28 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|45,72\text{km} - 46 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,3 \%$$

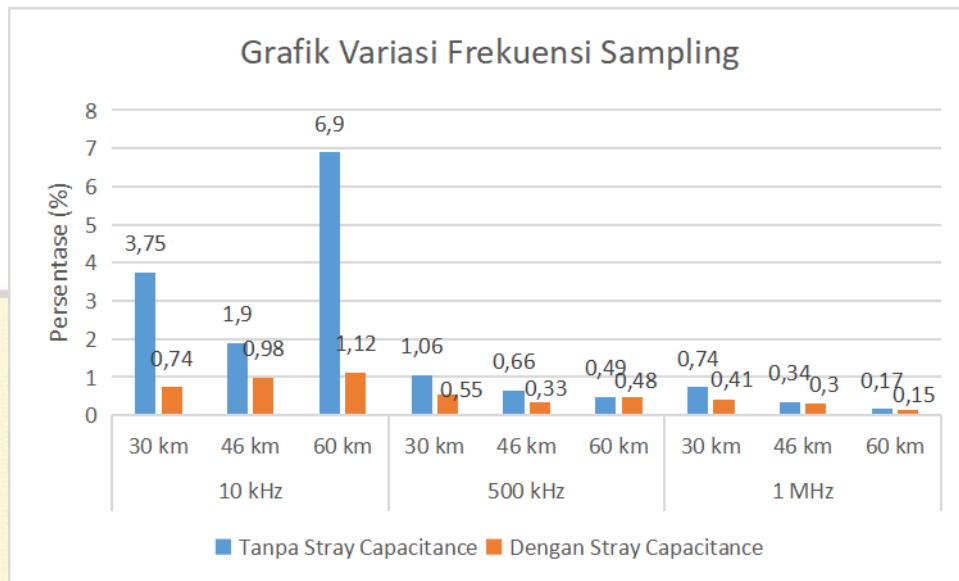
Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan satu fasa tanah dengan stray *capacitance* menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.5 berikut.

**Tabel 4. 5** Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan (km)	$t_a$ (s)	$t_b$ (s)	$\tau$ (s)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	0,007716	0,00782	0,000208	30,67	0,74
		46	0,007791	0,00795	0,000318	46,9	0,98
		60	0,007805	0,00791	0,00021	61,03	1,12
2	500 kHz	30	0,007848	0,007948	0,0002	29,5	0,55
		46	0,007865	0,008022	0,000314	46,3	0,33
		60	0,007809	0,007919	0,00022	59,6	0,48
3	1 MHz	30	0,007761	0,007864	0,000206	30,38	0,41
		46	0,007785	0,00794	0,00031	45,72	0,3
		60	0,007709	0,007817	0,000216	60,14	0,15

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 1,12 % yang terjadi pada jarak gangguan 60 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,15 % terjadi pada jarak 60 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

Tingkat keakuratan yang dihitung dari persentase rata-rata error dari kondisi tanpa stray *capacitance* dan dengan stray *capacitance* untuk menentukan lokasi gangguan satu fasa tanah dengan memvariasikan frekuensi sampling yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz dapat dilihat pada gambar 4.19 berikut:



**Gambar 4. 19** Grafik Variasi Frekuensi Sampling Gangguan Satu Fasa Tanah Tanpa dan Dengan Stray Capacitance

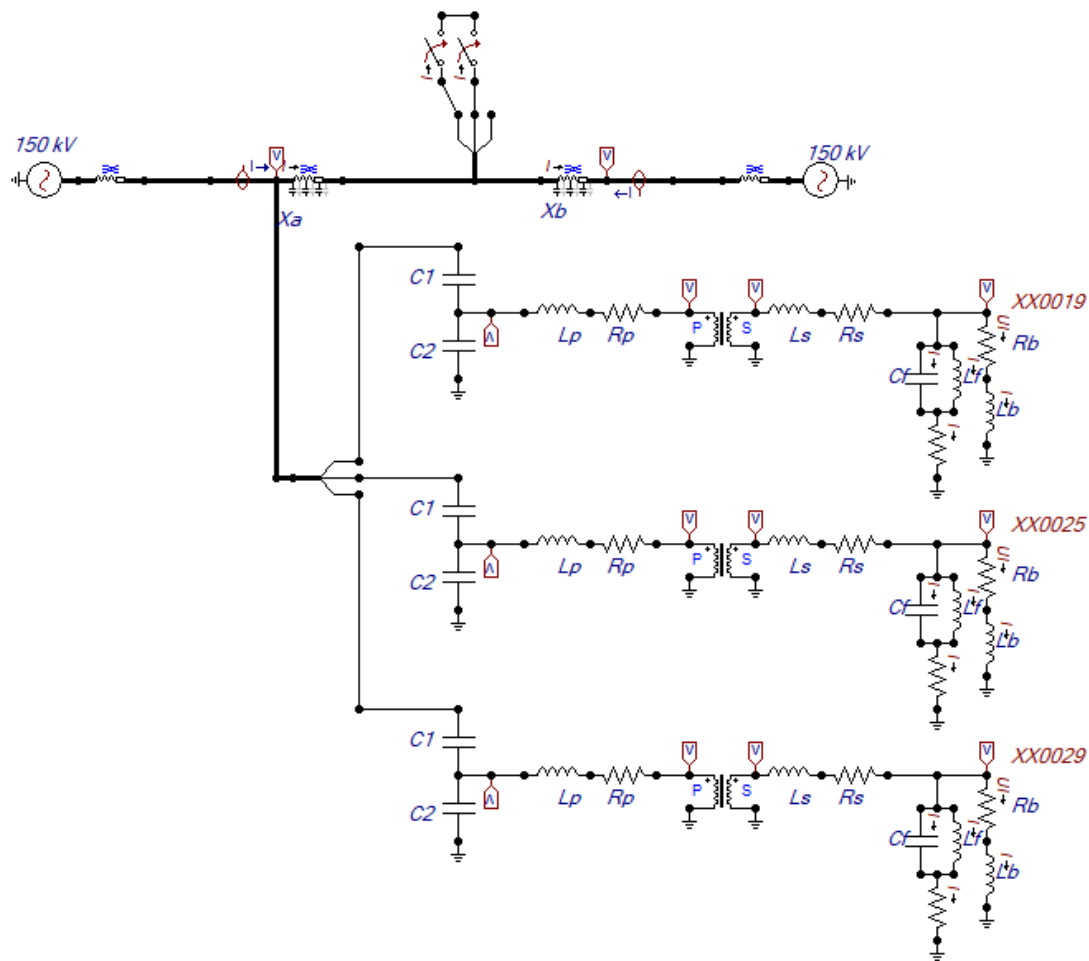
Gambar 4.19 merupakan grafik presentase error antara pengukuran tanpa stray capacitance dan dengan stray capacitance. Pada gangguan satu fasa tanah dapat dilihat bahwa pengukuran menggunakan stray capacitance memberikan hasil tingkat keakuratan yang lebih baik atau tinggi dibandingkan tanpa stray capacitance yang mana hal tersebut dapat dilihat pada nilai persentase error yang didapatkan. Selain itu variasi frekuensi sampling juga mempengaruhi tingkat keakuratan pengukuran, dapat dilihat bahwa semakin tinggi frekuensi sampling yang digunakan hasil yang didapatkan juga semakin baik.

#### 4. 7. 2 Gangguan Dua Fasa

Gangguan dua fasa dimodelkan dengan metode ujung tunggal atau *single ended* untuk penentuan lokasi gangguan, serta menggunakan tiga jenis jumlah sampling yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz.

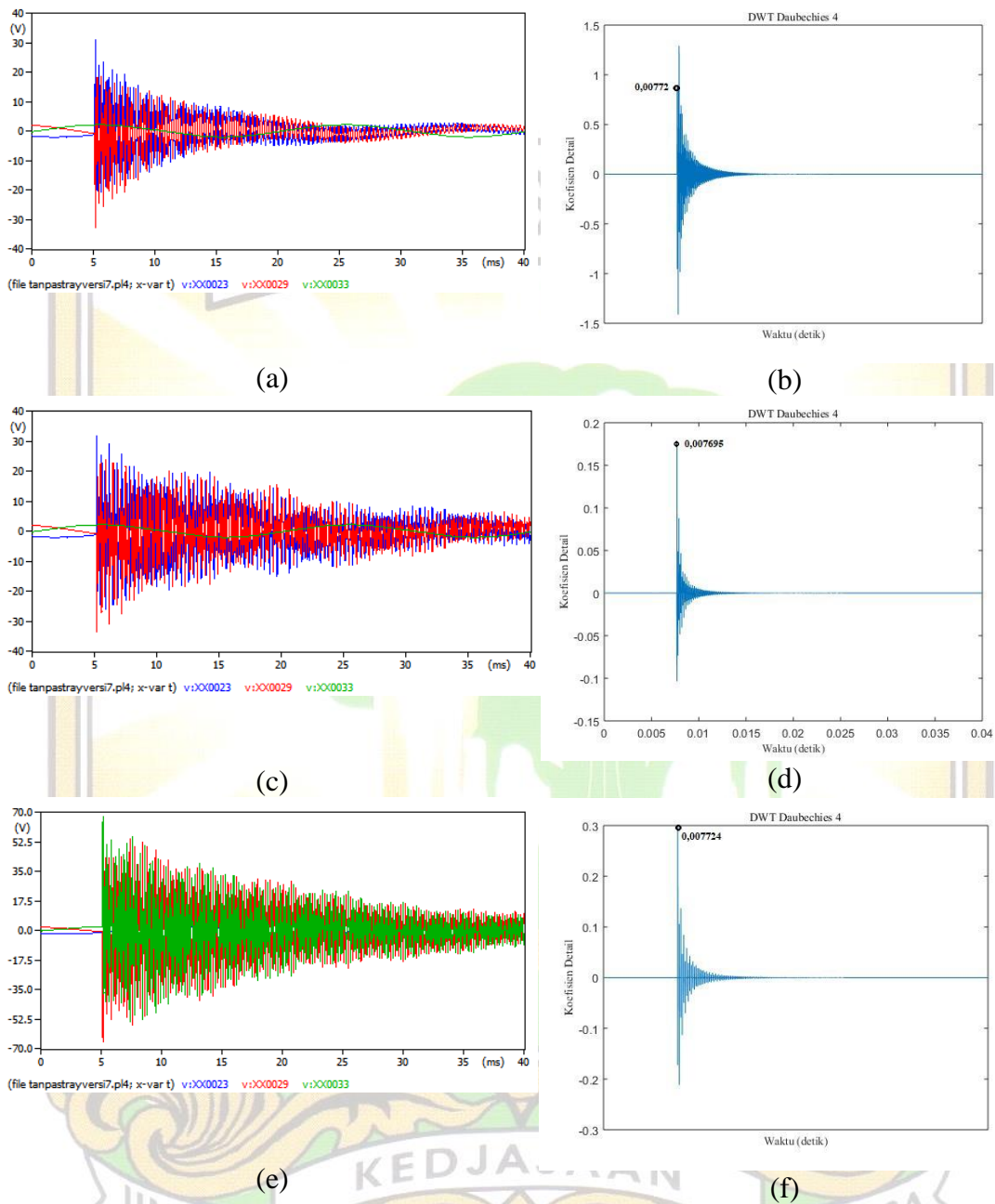
##### 1. Tanpa Stray Capacitance

Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan tanpa stray capacitance dua fasa dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.20 berikut.



**Gambar 4. 20** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

Gambar 4.20 merupakan rangkaian simulasi gangguan dua fasa metode ujung tunggal tanpa stray *capacitance* yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATP. Gangguan dua fasa dimodelkan menggunakan dua saklar yang masing-masing saling terhubung ke kedua fasa yang dikontrol dengan waktu 0,01 detik. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan dua fasa dengan metode ujung tunggal tanpa stray *capacitance* dapat dilihat pada gambar 4.21 berikut.



**Gambar 4. 21** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

Gambar 4.21 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 30 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi

gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 46 km, (d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 46 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 30 km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan dua fasa untuk lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

**1. Jumlah sampling 10 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00783 \text{ s} - 0,00772 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00022 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00022}{2}$$

$$x = 32,4471 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 2,4471 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|32,4471 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 2,66 \%$$

**2. Jumlah sampling 500 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007884 \text{ s} - 0,007724 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00032 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$



$$x = \frac{294973,7006 \frac{km}{s} \times 0,00032}{2}$$

$$x = 47,196 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 1,196 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|47,196 \text{ km} - 46 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 1,3 \%$$

### 3. Jumlah sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007799 \text{ s} - 0,007695 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000208 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{km}{s} \times 0,000208}{2}$$

$$x = 30,677 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,677 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|30,677 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,74 \%$$

Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan dua fasa tanpa stray capacitance menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut.

**Tabel 4. 6** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

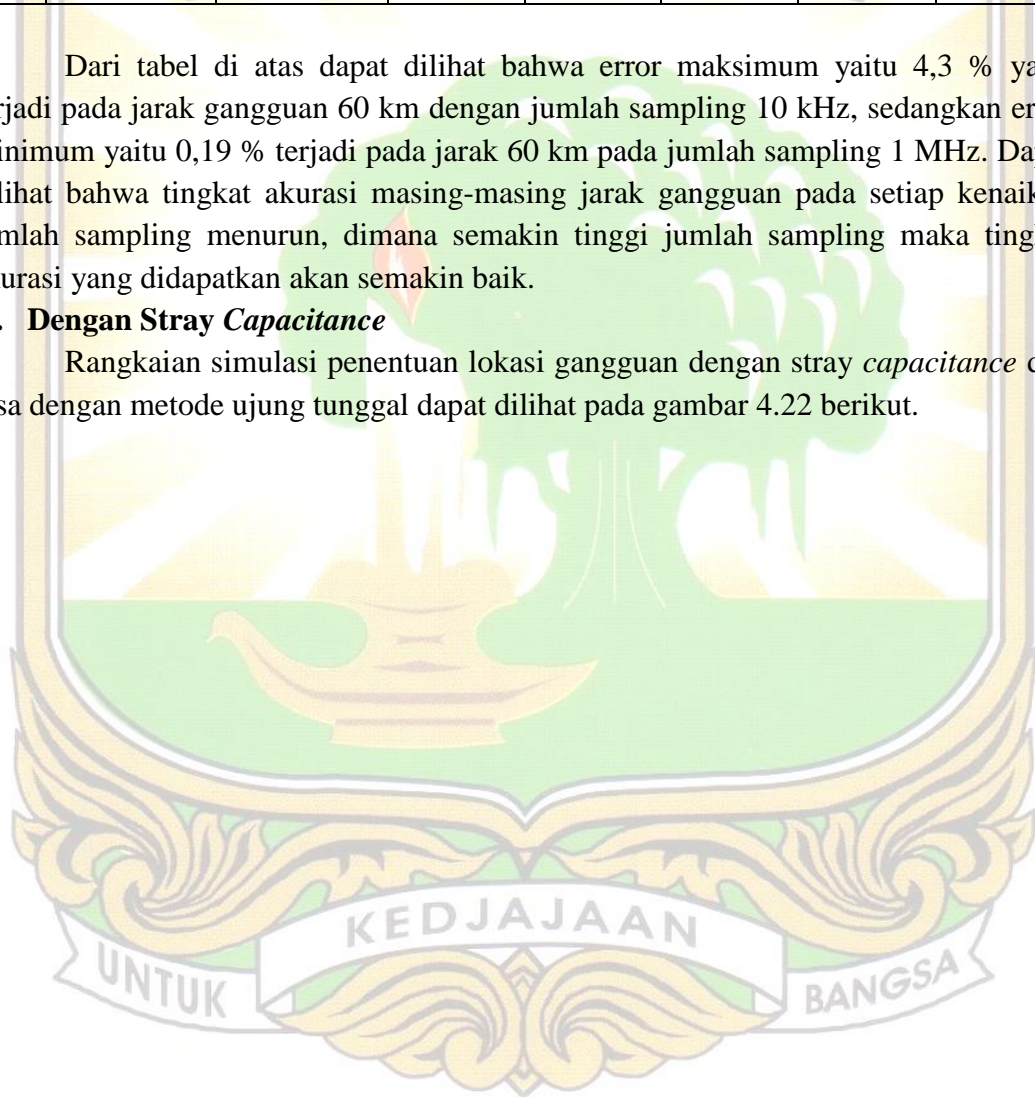
No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan	$t_a$ (s)	$t_b$ (s)	$\tau$ (s)	X (km)	Error (%)
----	-----------------	----------------	-----------	-----------	------------	--------	-----------

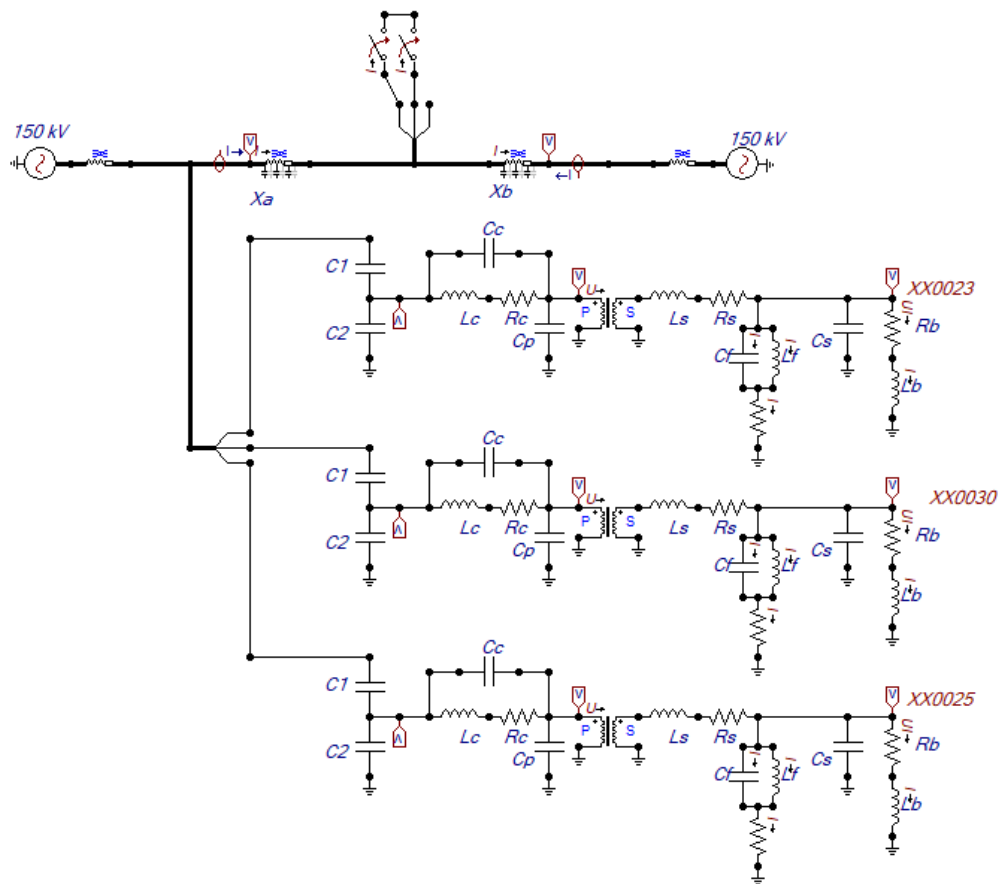
		(km)					
1	10 kHz	30	0,00772	0,00783	0,00022	32,447	2,66
		46	0,00774	0,00789	0,0003	44,246	1,91
		60	0,00777	0,00796	0,00038	56,045	4,3
2	500 kHz	30	0,007698	0,007802	0,000208	30,677	0,74
		46	0,007724	0,007884	0,00032	47,196	1,3
		60	0,007748	0,007956	0,000416	61,354	1,47
3	1 MHz	30	0,007695	0,007799	0,000208	30,677	0,74
		46	0,007723	0,007881	0,000316	46,605	0,66
		60	0,007746	0,00795	0,000408	60,175	0,19

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 4,3 % yang terjadi pada jarak gangguan 60 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,19 % terjadi pada jarak 60 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

## 2. Dengan Stray Capacitance

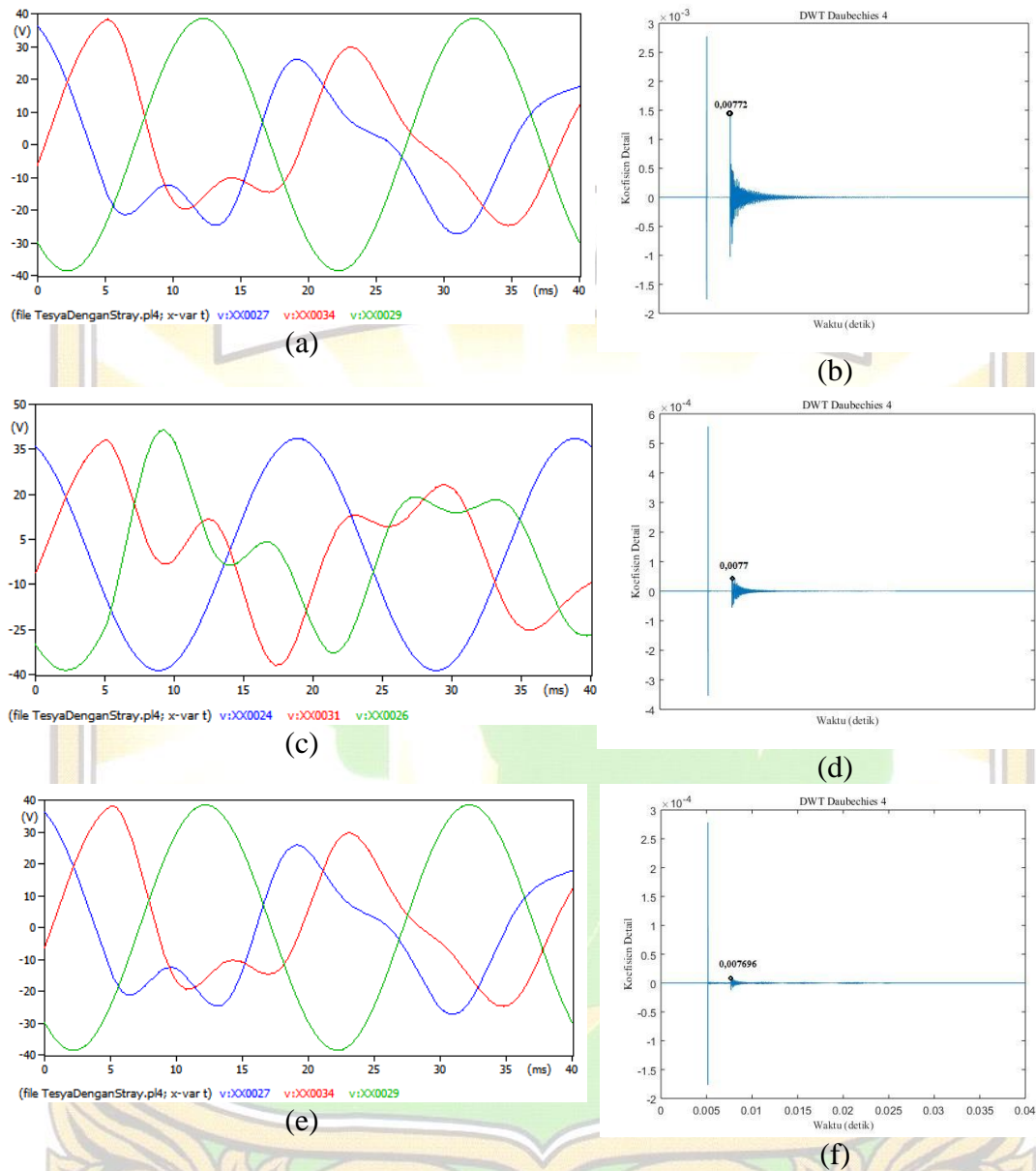
Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan dengan stray capacitance dua fasa dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.22 berikut.





**Gambar 4. 22** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

Gambar 4.22 merupakan rangkaian simulasi gangguan dua fasa metode ujung tunggal dengan *stray capacitance* yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATP. Gangguan dua fasa dimodelkan menggunakan dua saklar yang masing-masing saling terhubung ke kedua fasa yang dikontrol dengan waktu 0,01 detik. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan dua fasa dengan *stray capacitance* menggunakan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.23 berikut.



**Gambar 4. 23** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

Gambar 4.23 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 30 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 30 km, (d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil

simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 30 km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan dua fasa untuk lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

**1. Jumlah sampling 10 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007815 \text{ s} - 0,00772 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00019 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00019}{2}$$

$$x = 28,023 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 1,977 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|28,023 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 2,15 \%$$

**2. Jumlah sampling 500 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,0078 \text{ s} - 0,0077 \text{ s})$$

$$\tau = 0,0002 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,0002}{2}$$

$$x = 29,497 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,503 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|29,497 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,55 \%$$

### 3. Jumlah sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007799 \text{ s} - 0,007696 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000206 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000206}{2}$$

$$x = 30,38 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,38 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|30,38 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,42 \%$$

Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan dua fasa dengan stray capacitance menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.7 berikut.

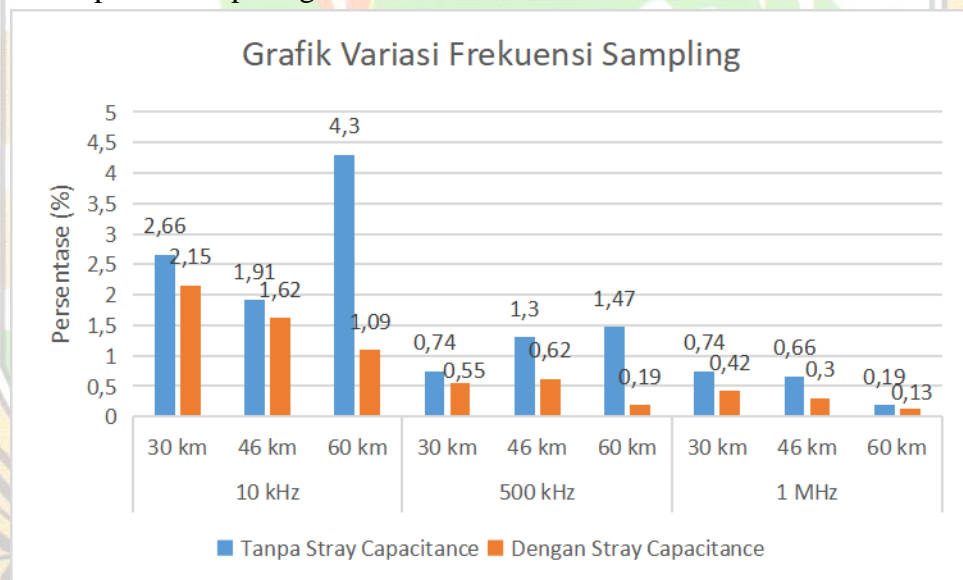
**Tabel 4. 7** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan (km)	$t_a$ (s)	$t_b$ (s)	$\tau$ (s)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	0,00772	0,007815	0,00019	28,023	2,15
		46	0,00775	0,007911	0,00032	47,49	1,62
		60	0,00777	0,00797	0,0004	58,99	1,09
2	500 kHz	30	0,0077	0,0078	0,0002	29,497	0,55

		46	0,007726	0,00788	0,000312	46,016	0,62
		60	0,00775	0,007954	0,000408	60,175	0,19
3	1 MHz	30	0,007696	0,007799	0,000206	30,38	0,42
		46	0,007726	0,007881	0,00031	45,72	0,3
		60	0,007749	0,007952	0,000406	59,88	0,13

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 2,15 % yang terjadi pada jarak gangguan 30 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,13 % terjadi pada jarak 60 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

Tingkat keakuratan yang dihitung dari persentase rata-rata error dari kondisi tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance* untuk menentukan lokasi gangguan dua fasa dengan memvariasikan frekuensi sampling yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz dapat dilihat pada gambar 4.24 berikut:



**Gambar 4. 24** Grafik Variasi Frekuensi Sampling Gangguan Dua Fasa Tanpa dan Dengan Stray Capacitance

Gambar 4.24 merupakan grafik presentase error antara pengukuran tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance*. Pada gangguan dua fasa dapat dilihat bahwa pengukuran menggunakan *stray capacitance* memberikan hasil tingkat keakuratan yang lebih baik atau tinggi dibandingkan tanpa *stray capacitance* yang mana hal tersebut dapat dilihat pada nilai persentase error yang didapatkan. Selain itu variasi frekuensi sampling juga mempengaruhi tingkat keakuratan pengukuran, dapat

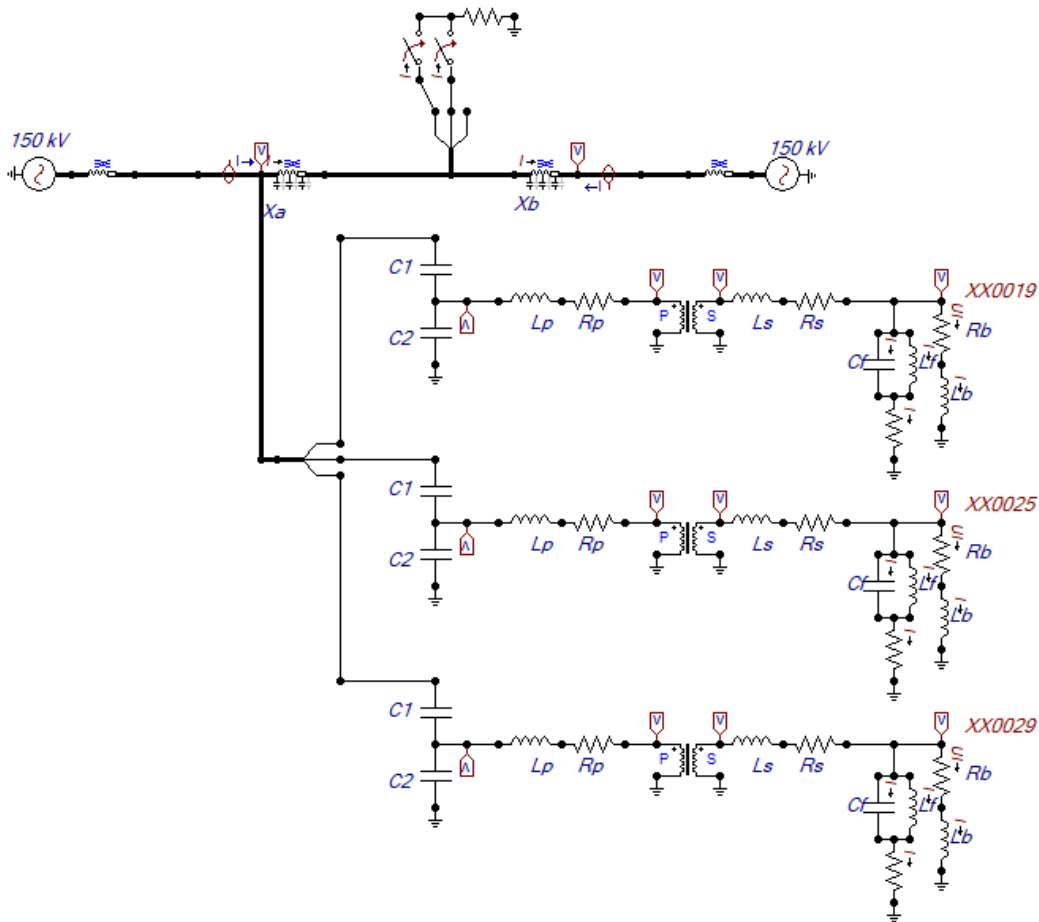
dilihat bahwa semakin tinggi frekuensi sampling yang digunakan hasil yang didapatkan juga semakin baik.

#### 4.7.3 Gangguan Dua Fasa Tanah

Gangguan dua fasa tanah dimodelkan dengan metode ujung tunggal atau *single ended* untuk penentuan lokasi gangguan, serta menggunakan tiga jenis jumlah sampling yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz.

##### 1. Tanpa Stray Capacitance

Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan tanpa stray capacitance dua fasa tanah dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.25 berikut.

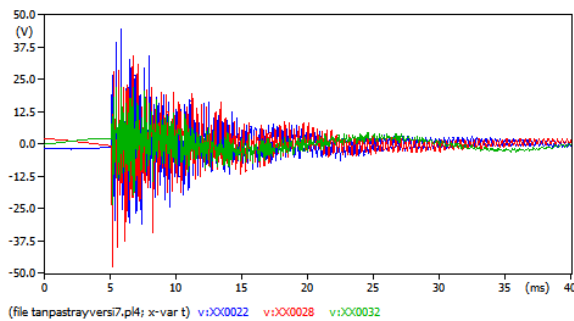


**Gambar 4. 25** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

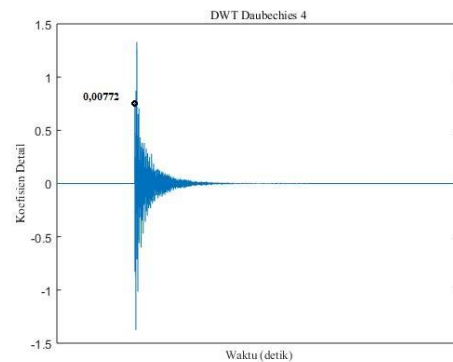
Gambar 4.25 merupakan rangkaian simulasi gangguan dua fasa tanah metode ujung tunggal tanpa stray capacitance yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATP. Gangguan dua fasa dimodelkan menggunakan dua saklar yang masing-masing saling terhubung ke kedua fasa yang dikontrol dengan waktu 0,01 detik dan



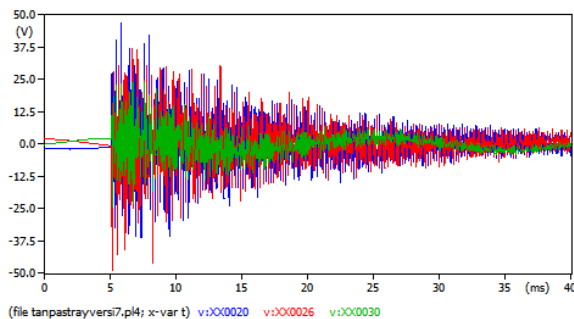
dihubungkan ke tanah melalui impedansi gangguan ke tanah sebesar 1 ohm. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan dua fasa tanah dengan metode ujung tunggal tanpa stray *capacitance* dapat dilihat pada gambar 4.26 berikut.



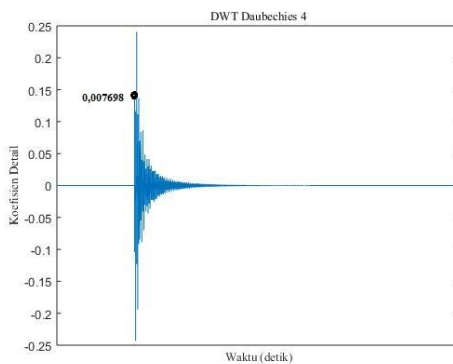
(a)



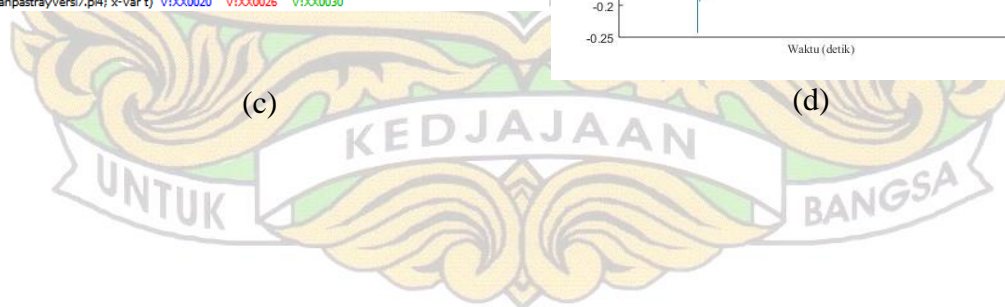
(b)

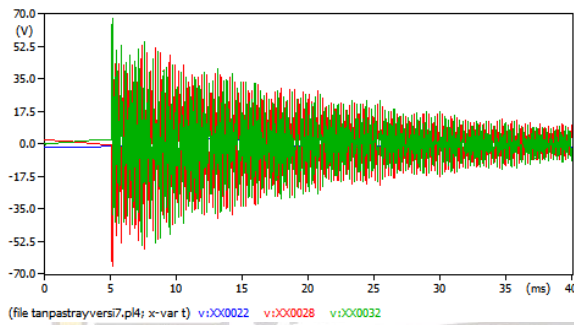


(c)

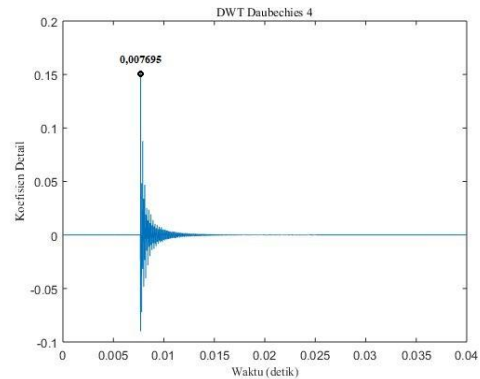


(d)





(e)



(f)

**Gambar 4. 26** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

Gambar 4.26 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 30 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 30 km, (d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 30 km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan dua fasa tanah untuk lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

#### 1. Jumlah sampling 10 kHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00781 \text{ s} - 0,00772 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00018 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00018}{2}$$

$$x = 26,547 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 3,453 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|26,547 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 3,75 \%$$

## 2. Jumlah sampling 500 kHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007802 \text{ s} - 0,007698 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000208 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000208}{2}$$

$$x = 30,677 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,677 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|30,677 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,7 \%$$

## 3. Jumlah sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007799 \text{ s} - 0,007695 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000208 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000208}{2}$$

$$x = 30,677 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,677 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|30,677 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,7 \%$$

Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan dua fasa tanah tanpa stray capacitance menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.8 berikut.

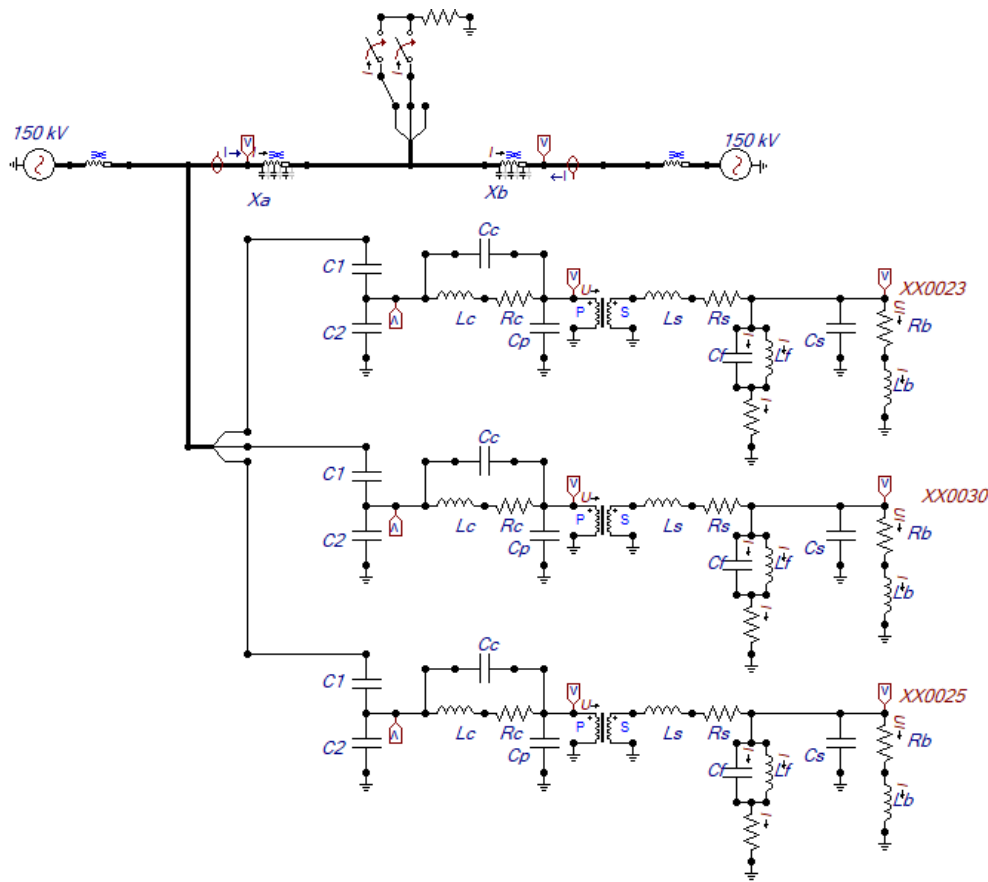
**Tabel 4. 8** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan (km)	$t_a$ (s)	$t_b$ (s)	$\tau$ (s)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	0,00772	0,00781	0,00018	26,547	2,66
		46	0,00774	0,00789	0,0003	44,246	1,9
		60	0,00777	0,00796	0,00038	56,045	4,3
2	500 kHz	30	0,007698	0,007802	0,000208	30,677	0,7
		46	0,007724	0,007884	0,00032	47,196	1,3
		60	0,007748	0,007956	0,000416	61,354	1,47
3	1 MHz	30	0,007695	0,007799	0,000208	30,677	0,7
		46	0,007723	0,007881	0,000316	46,605	0,66
		60	0,007746	0,00795	0,000408	60,175	0,19

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 2,66 % yang terjadi pada jarak gangguan 30 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,19 % terjadi pada jarak 60 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

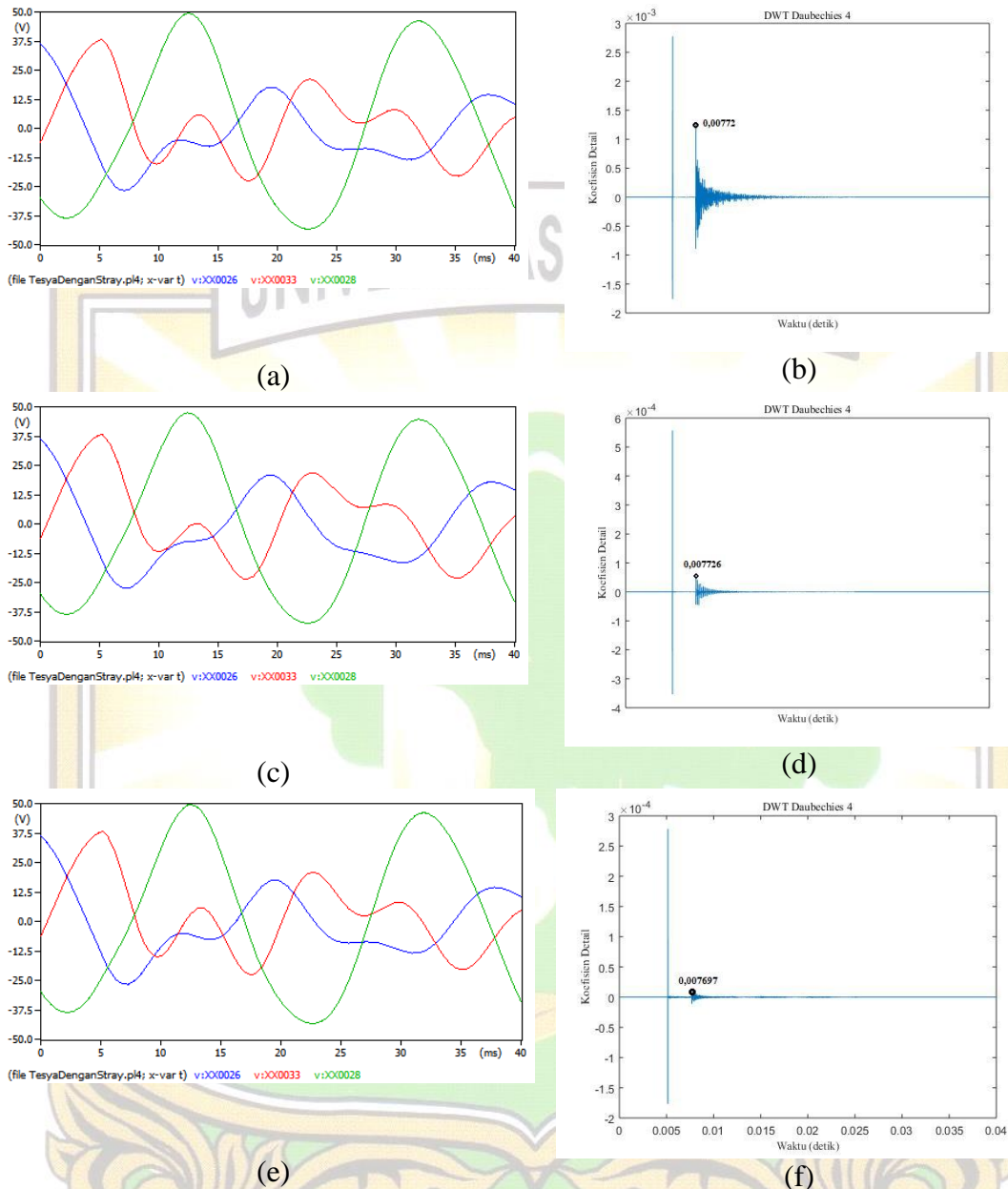
## 2. Dengan Stray Capacitance

Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan dengan stray capacitance dua fasa tanah dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.27 berikut.



**Gambar 4. 27** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

Gambar 4.27 merupakan rangkaian simulasi gangguan dua fasa tanah metode ujung tunggal dengan stray capacitance yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATP. Gangguan dua fasa tanah dimodelkan menggunakan dua saklar yang masing-masing saling terhubung ke kedua fasa yang dikontrol dengan waktu 0,01 detik dan dihubungkan ke tanah melalui impedansi gangguan ke tanah sebesar 1 ohm. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan dua fasa dengan stray capacitance menggunakan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4. 28 berikut.



**Gambar 4. 28** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

Gambar 4.28 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 30 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 46 km, (d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 46 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil

simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 30 km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan dua fasa untuk seluruh lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

**1. Jumlah sampling 10 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007816 \text{ s} - 0,00772 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000192 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000192}{2}$$

$$x = 28,317 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 1,683 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|28,317 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 1,83 \%$$

**2. Jumlah sampling 500 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007881 \text{ s} - 0,007726 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00031 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00031}{2}$$

$$x = 45,72 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,28 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|45,72 \text{ km} - 46 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,3 \%$$

### 3. Jumlah sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007799 \text{ s} - 0,007697 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000204 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000204}{2}$$

$$x = 30,08 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,08 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|30,08 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,09 \%$$

Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan dua fasa tanpa stray capacitance menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.9 berikut.

**Tabel 4. 9** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

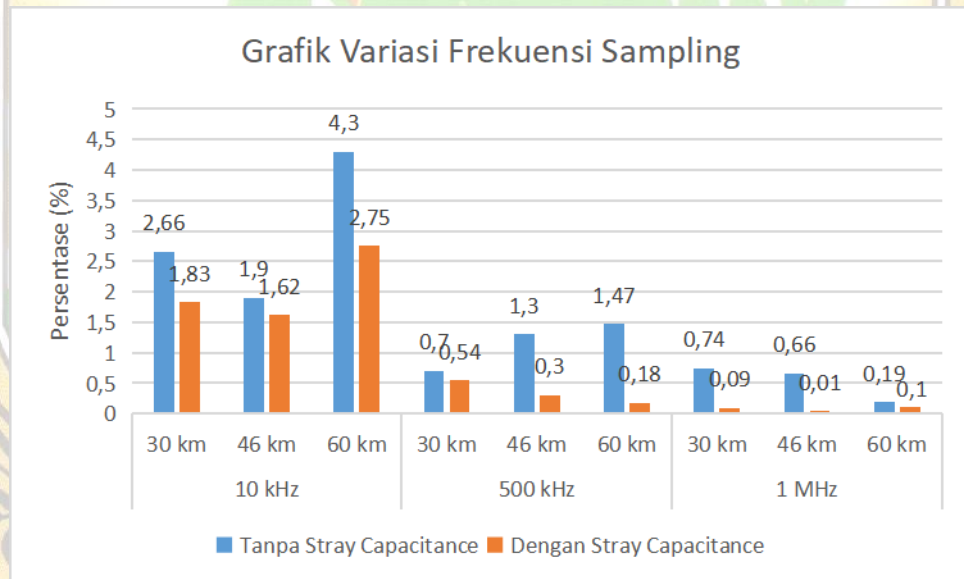
No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan (km)	$t_a$ (s)	$t_b$ (s)	$\tau$ (s)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	0,00772	0,007816	0,000192	28,317	1,83
		46	0,00775	0,007911	0,000322	47,49	1,62
		60	0,0078	0,008012	0,000424	62,534	2,75



2	500 kHz	30	0,0077	0,0078	0,0002	29,497	0,54
		46	0,007726	0,007881	0,00031	45,72	0,3
		60	0,00775	0,007954	0,000408	60,175	0,18
3	1 MHz	30	0,007697	0,007799	0,000204	30,08	0,09
		46	0,007724	0,00788	0,000312	46,02	0,01
		60	0,007748	0,007951	0,000406	59,88	0,1

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 2,75 % yang terjadi pada jarak gangguan 60 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,01 % terjadi pada jarak 46 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

Tingkat keakuratan yang dihitung dari persentase rata-rata error dari kondisi tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance* untuk menentukan lokasi gangguan dua fasa tanah dengan memvariasikan frekuensi sampling yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz dapat dilihat pada gambar 4.29 berikut:



**Gambar 4. 29** Grafik Variasi Frekuensi Sampling Gangguan Dua Fasa Tanah Tanpa dan Dengan *Stray Capacitance*

Gambar 4.29 merupakan grafik presentase error antara pengukuran tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance*. Pada gangguan dua fasa tanah dapat dilihat bahwa pengukuran menggunakan *stray capacitance* memberikan hasil tingkat keakuratan yang lebih baik atau tinggi dibandingkan tanpa *stray capacitance* yang mana hal tersebut dapat dilihat pada nilai persentase error yang didapatkan. Selain itu variasi frekuensi sampling juga mempengaruhi tingkat keakuratan pengukuran, dapat

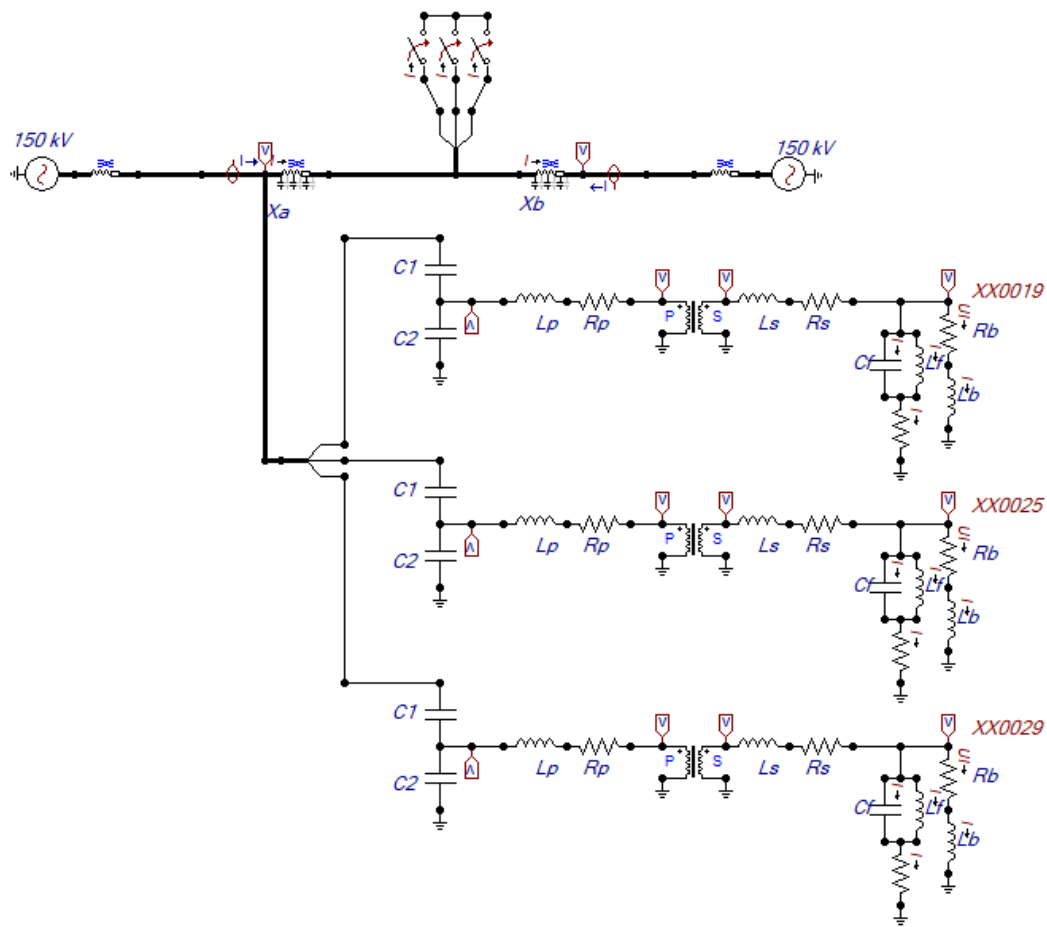
dilihat bahwa semakin tinggi frekuensi sampling yang digunakan hasil yang didapatkan juga semakin baik.

#### 4.7.4 Gangguan Tiga Fasa

Gangguan tiga fasa dimodelkan dengan metode ujung tunggal atau *single ended* untuk penentuan lokasi gangguan, serta menggunakan tiga jenis jumlah sampling yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz.

##### 1. Tanpa Stray Capacitance

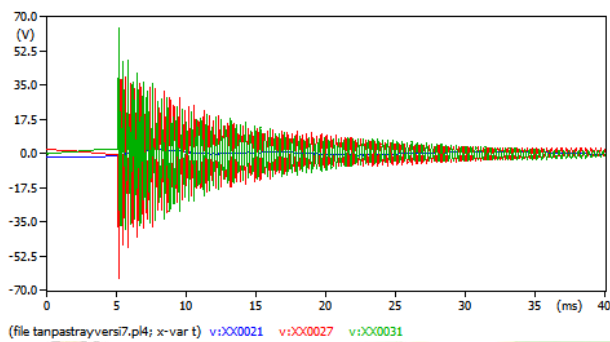
Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan tanpa stray capacitance tiga fasa dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.30 berikut.



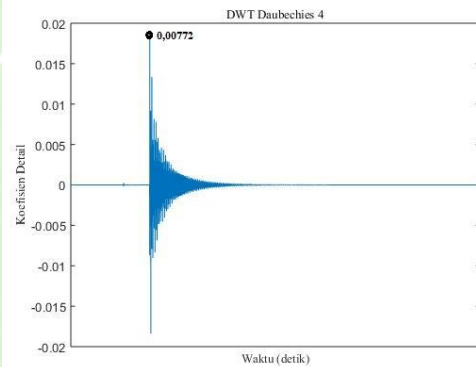
**Gambar 4. 30** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

Gambar 4.30 merupakan rangkaian simulasi gangguan tiga fasa metode ujung tunggal tanpa stray capacitance yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATP. Gangguan tiga fasa dimodelkan menggunakan tiga saklar yang masing-masing

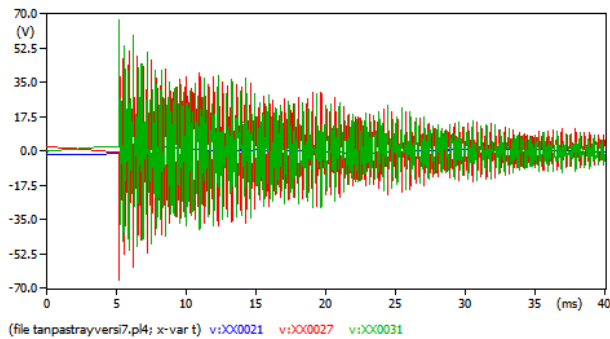
saling terhubung ke ketiga fasa yang dikontrol dengan waktu 0,01 detik. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan tiga fasa dengan metode ujung tunggal tanpa stray *capacitance* dapat dilihat pada gambar 4.31 berikut.



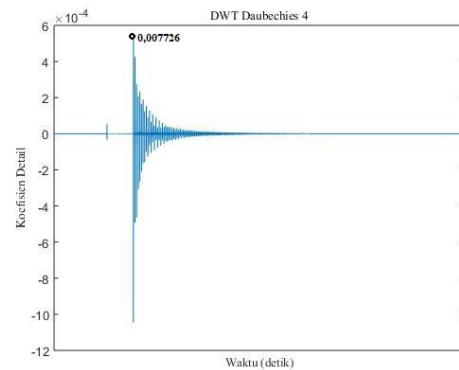
(a)



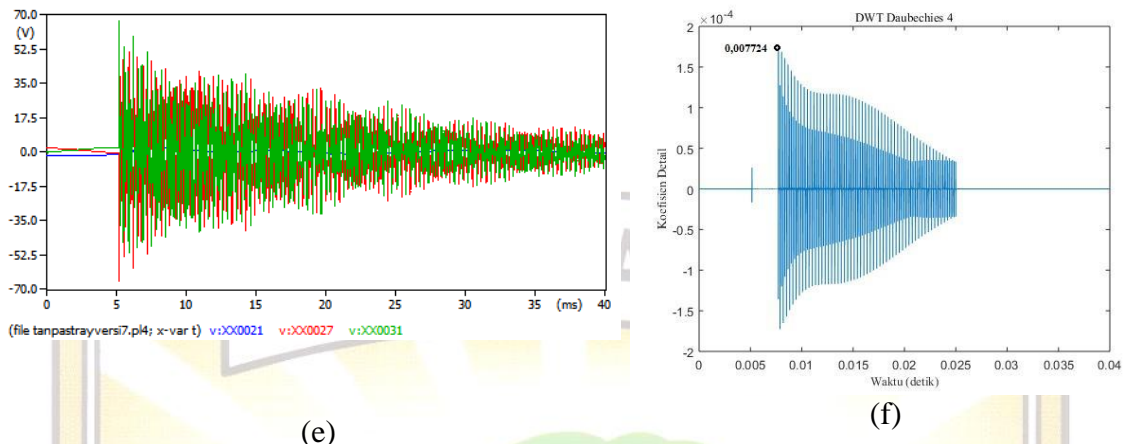
(b)



(c)



(d)



**Gambar 4. 31** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

Gambar 4.31 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 30 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 46 km, (d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 46 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 46 km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 46 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan tiga fasa untuk lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

**1. Jumlah sampling 10 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00781 \text{ s} - 0,00772 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00018 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{km}{s} \times 0,00018}{2}$$

$$x = 26,547 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 3,453 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|26,547 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 3,75 \%$$

## 2. Jumlah sampling 500 kHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00788 \text{ s} - 0,007726 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000308 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000308}{2}$$

$$x = 45,425 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,575 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|45,425 \text{ km} - 46 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,6 \%$$

## 3. Jumlah sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007724 \text{ s} - 0,007879 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00031 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00031}{2}$$

$$x = 45,72 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,28 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$Error (\%) = \frac{|hasil\ perhitungan - jarak\ gangguan|}{panjang\ saluran} \times 100\%$$

$$Error (\%) = \frac{|45,72\ km - 46\ km|}{92\ km} \times 100\%$$

$$Error (\%) = 0,3\ \%$$

Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan tiga fasa tanpa stray capacitance menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.10 berikut.

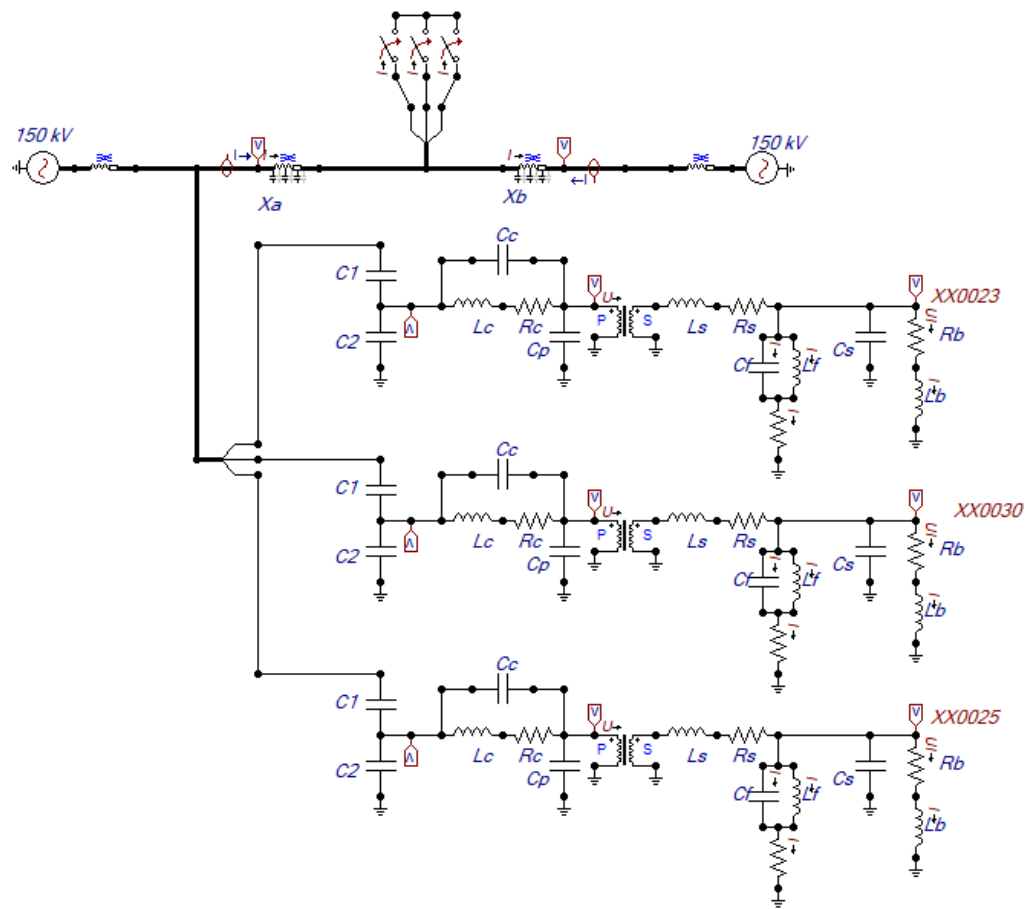
**Tabel 4. 10** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan (km)	$t_a$ (s)	$t_b$ (s)	$\tau$ (s)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	0,00772	0,00781	0,00018	26,547	3,75
		46	0,00775	0,00789	0,00028	41,296	5,11
		60	0,00777	0,00796	0,00038	56,045	4,29
2	500 kHz	30	0,007706	0,007812	0,000212	31,27	1,37
		46	0,007726	0,00788	0,000308	45,425	0,6
		60	0,00775	0,007952	0,000404	59,584	0,45
3	1 MHz	30	0,007694	0,007798	0,000208	30,67	0,73
		46	0,007724	0,007879	0,00031	45,72	0,3
		60	0,007748	0,007857	0,000218	59,85	0,17

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 5,11 % yang terjadi pada jarak gangguan 46 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,17 % terjadi pada jarak 60 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

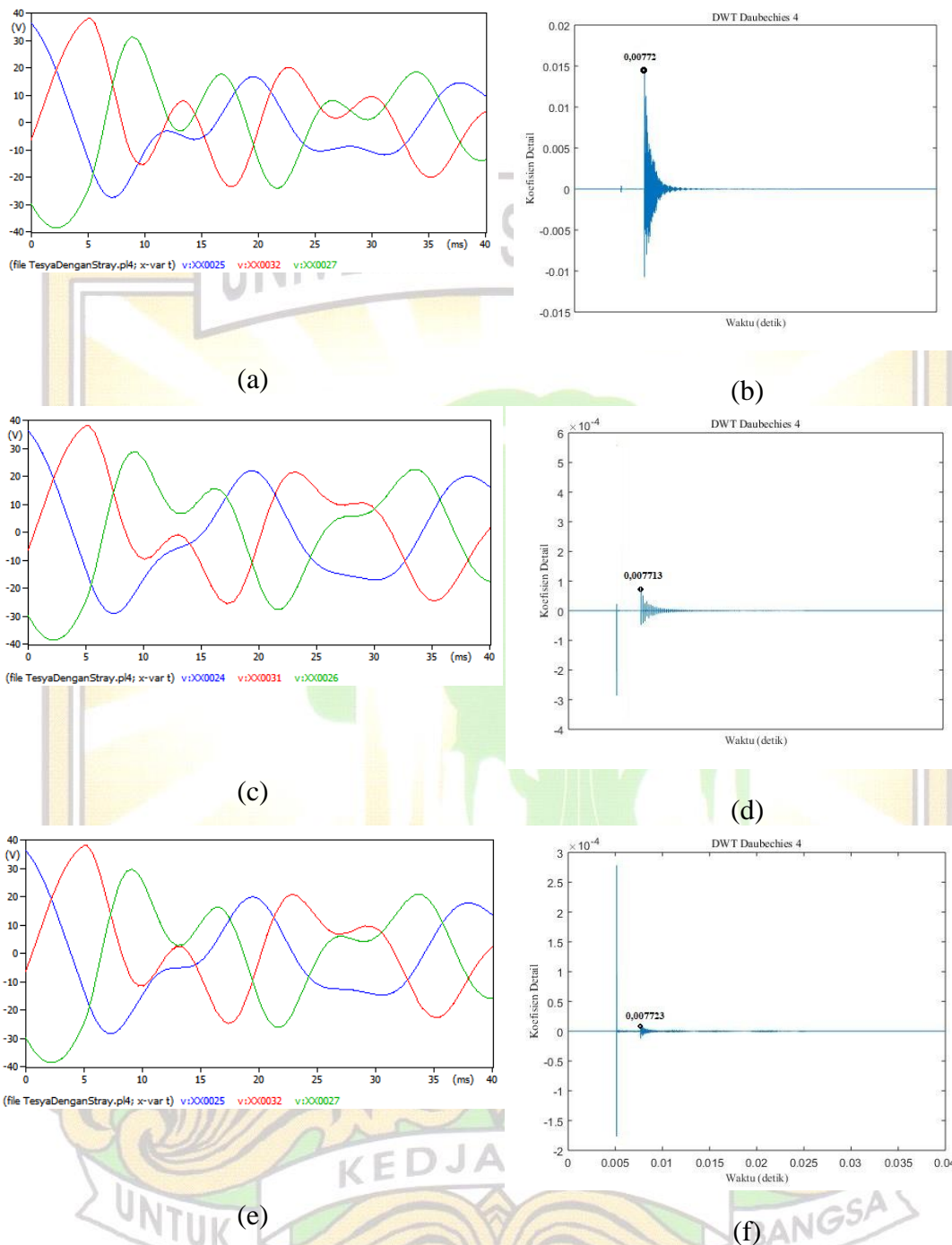
## 2. Dengan Stray Capacitance

Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan dengan stray capacitance tiga fasa dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.32 berikut.



**Gambar 4. 32** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

Gambar 4.32 merupakan rangkaian simulasi gangguan tiga fasa metode ujung tunggal dengan stray *capacitance* yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATP. Gangguan tiga fasa dimodelkan menggunakan tiga saklar yang masing-masing saling terhubung ke ketiga fasa yang dikontrol dengan waktu 0,01 detik. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan tiga fasa dengan metode ujung tunggal dengan stray *capacitance* dapat dilihat pada gambar 4.33 berikut.



**Gambar 4. 33** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

Gambar 4.33 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 30 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi



gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 60 km, (d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 60 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 46 km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 46 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan tiga fasa untuk lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

**1. Jumlah sampling 10 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00782 \text{ s} - 0,00772 \text{ s})$$

$$\tau = 0,0002 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,0002}{2}$$

$$x = 29,5 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,5 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|29,5 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,54 \%$$

**2. Jumlah sampling 500 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007822 \text{ s} - 0,007713 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000218 \text{ s}$$

$$x = 92 - \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = 92 - \frac{294973,7006 \frac{km}{s} \times 0,000218}{2}$$

$$x = 59,85 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,15 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$Error (\%) = \frac{|hasil \text{ perhitungan} - jarak \text{ gangguan}|}{panjang \text{ saluran}} \times 100\%$$

$$Error (\%) = \frac{|59,85 \text{ km} - 60 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$Error (\%) = 0,16 \%$$

### 3. Jumlah sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007879 \text{ s} - 0,007723 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000312 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{km}{s} \times 0,000312}{2}$$

$$x = 46,01 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,01 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$Error (\%) = \frac{|hasil \text{ perhitungan} - jarak \text{ gangguan}|}{panjang \text{ saluran}} \times 100\%$$

$$Error (\%) = \frac{|46,01 \text{ km} - 46 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$Error (\%) = 0,01 \%$$

Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan tiga fasa dengan stray capacitance menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.11 berikut.

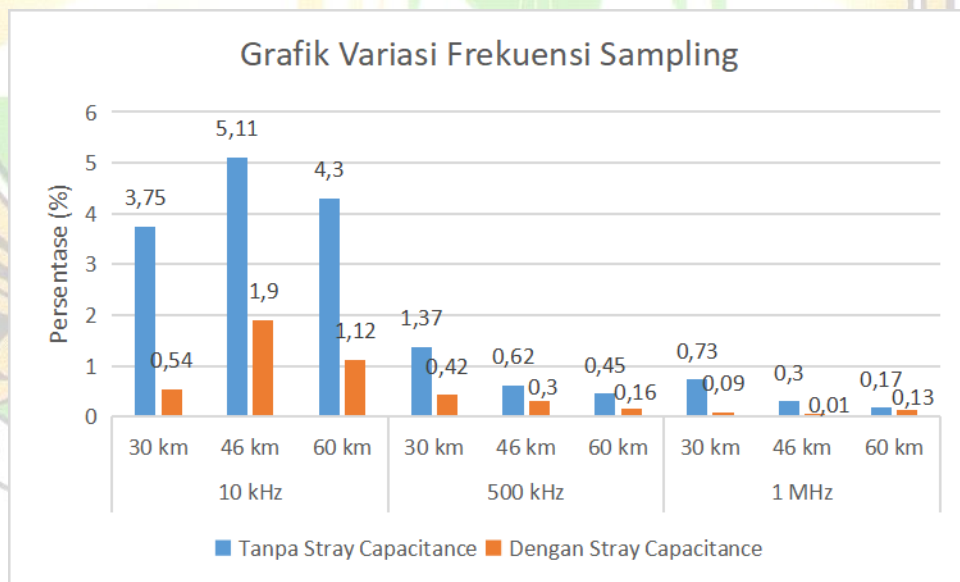
**Tabel 4. 11** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan	$t_a$ (s)	$t_b$ (s)	$\tau$ (s)	X (km)	Error (%)
----	-----------------	----------------	-----------	-----------	------------	--------	-----------

		(km)					
1	10 kHz	30	0,00772	0,00782	0,0002	29,5	0,54
		46	0,00775	0,0079	0,0003	44,25	1,9
		60	0,007808	0,00792	0,000224	58,96	1,12
2	500 kHz	30	0,007768	0,007871	0,000206	30,38	0,42
		46	0,007726	0,007881	0,00031	45,72	0,3
		60	0,007713	0,007822	0,000218	59,84	0,16
3	1 MHz	30	0,007695	0,007797	0,000204	30,08	0,09
		46	0,007723	0,007879	0,000312	46,01	0,01
		60	0,007748	0,007951	0,000406	59,88	0,13

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 1,9 % yang terjadi pada jarak gangguan 60 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,01 % terjadi pada jarak 46 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

Tingkat keakuratan yang dihitung dari persentase rata-rata error dari kondisi tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance* untuk menentukan lokasi gangguan tiga fasa dengan memvariasikan frekuensi sampling yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz dapat dilihat pada gambar 4.34 berikut:



**Gambar 4. 34** Grafik Variasi Frekuensi Sampling Gangguan Tiga Fasa Tanpa dan Dengan *Stray Capacitance*

Gambar 4.34 merupakan grafik presentase error antara pengukuran tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance*. Pada gangguan tiga fasa dapat dilihat

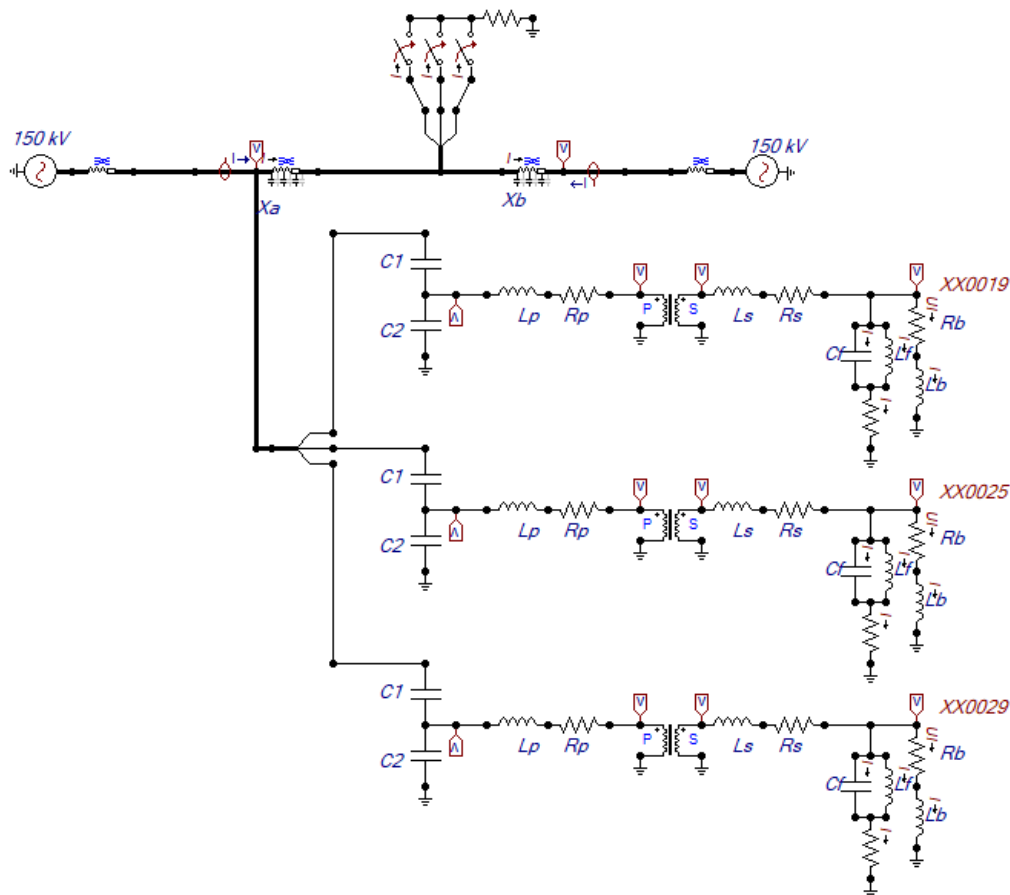
bahwa pengukuran menggunakan *stray capacitance* memberikan hasil tingkat keakuratan yang lebih baik atau tinggi dibandingkan tanpa *stray capacitance* yang mana hal tersebut dapat dilihat pada nilai persentase error yang didapatkan. Selain itu variasi frekuensi sampling juga mempengaruhi tingkat keakuratan pengukuran, dapat dilihat bahwa semakin tinggi frekuensi sampling yang digunakan hasil yang didapatkan juga semakin baik.

#### 4.7.5 Gangguan Tiga Fasa Tanah

Gangguan tiga fasa tanah dimodelkan dengan metode ujung tunggal atau *single ended* untuk penentuan lokasi gangguan, serta menggunakan tiga jenis jumlah sampling yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz.

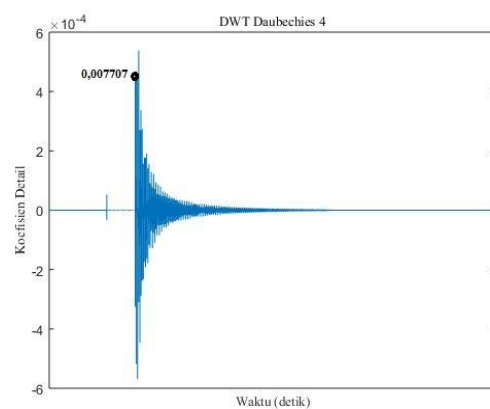
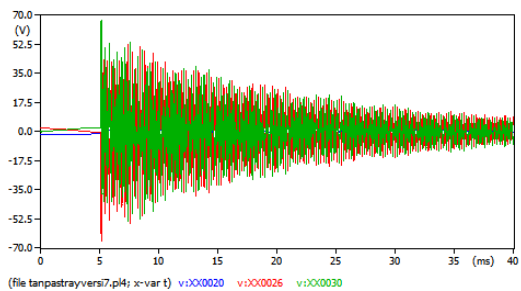
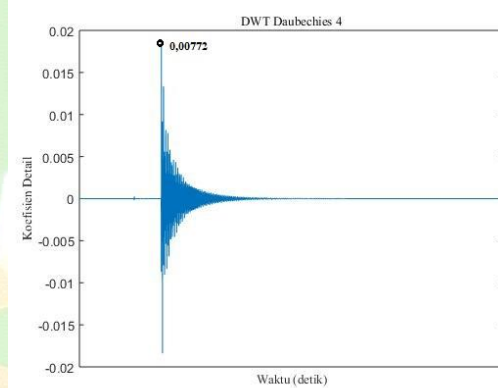
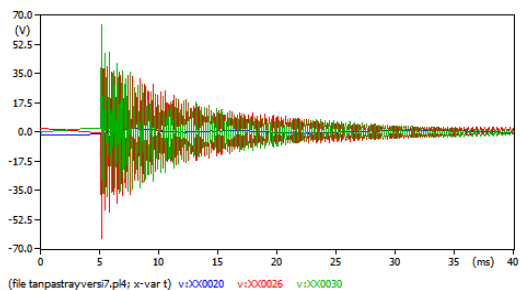
##### 1. Tanpa Stray Capacitance

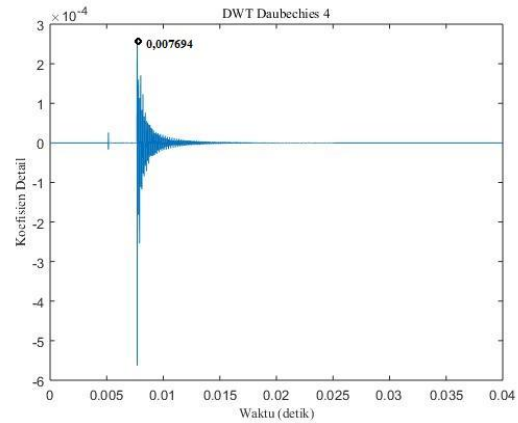
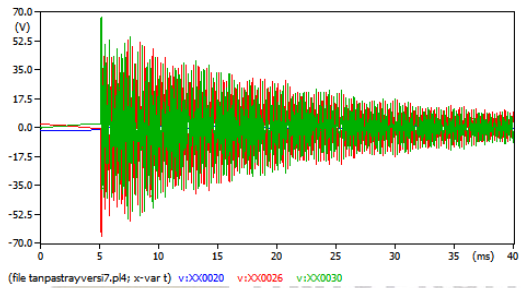
Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan tanpa *stray capacitance* tiga fasa tanah dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.35 berikut.



**Gambar 4. 35** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

Gambar 4.35 merupakan rangkaian simulasi gangguan tiga fasa tanah metode ujung tunggal tanpa stray *capacitance* yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATP. Gangguan tiga fasa tanah dimodelkan menggunakan tiga saklar yang masing-masing saling terhubung ke ketiga fasa yang dikontrol dengan waktu 0,01 detik dan terhubung ke tanah melalui impedansi sebesar 1 ohm. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan tiga fasa tanah dengan metode ujung tunggal tanpa stray *capacitance* dapat dilihat pada gambar 4.36 berikut.





(e)

(f)

**Gambar 4. 36** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

Gambar 4.36 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 30 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 30 km, (d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 30 km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan tiga fasa tanah untuk lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

**1. Jumlah sampling 10 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00772 \text{ s} - 0,00781 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00018 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00018}{2}$$

$$x = 26,547 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 3,453 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|26,547 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 3,75 \%$$

### 2. Jumlah sampling 500 kHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007812 \text{ s} - 0,007707 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00021 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00021}{2}$$

$$x = 30,97 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,97 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|30,97 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 1,05 \%$$

### 3. Jumlah sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007798 \text{ s} - 0,007694 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000208 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000208}{2}$$

$$x = 30,67 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,67 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|30,67 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,73 \%$$

Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan tiga fasa tanah tanpa stray capacitance menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.12 berikut.

**Tabel 4. 12** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

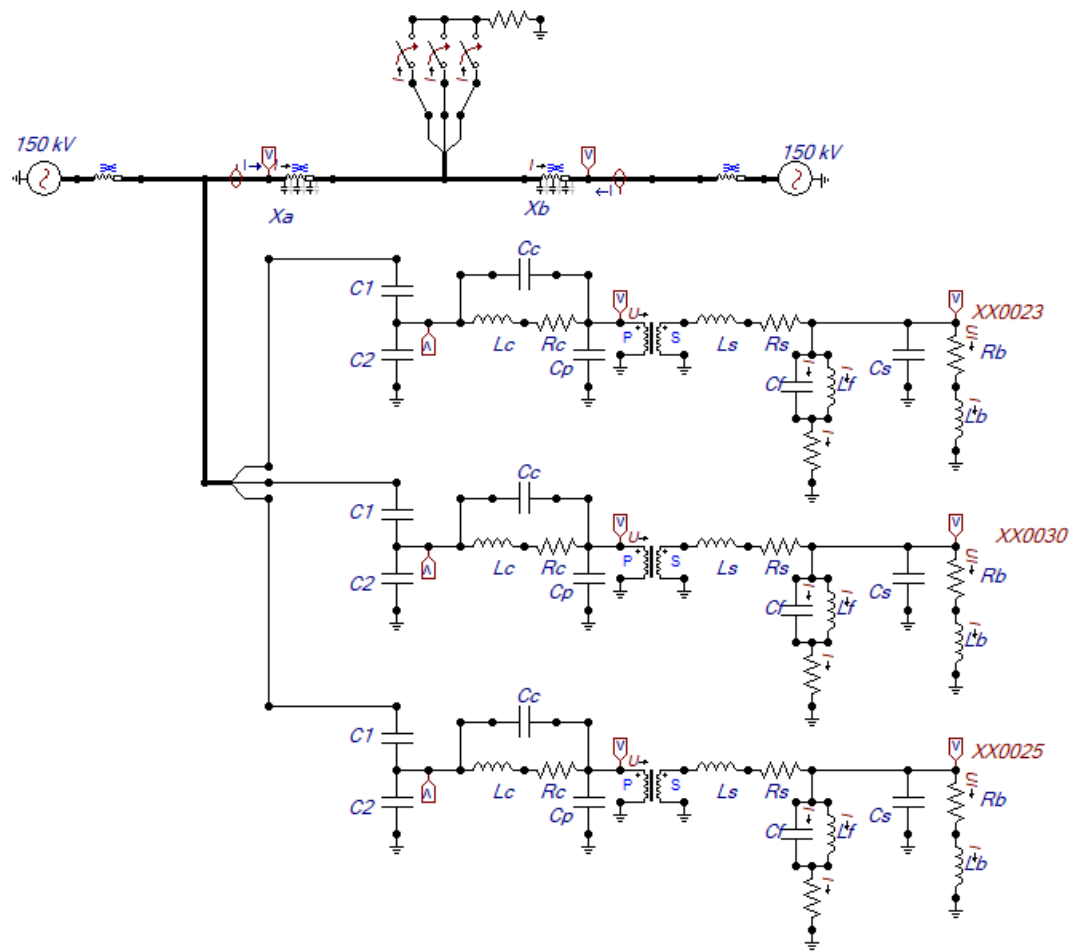
No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan (km)	$t_a$ (s)	$t_b$ (s)	$\tau$ (s)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	0,00772	0,00781	0,00018	26,547	3,75
		46	0,00775	0,00789	0,00028	41,296	5,11
		60	0,00777	0,00796	0,00038	56,045	4,29
2	500 kHz	30	0,007707	0,007812	0,00021	30,97	1,05
		46	0,007726	0,00788	0,000308	45,425	0,6
		60	0,00775	0,007952	0,000404	59,584	0,45
3	1 MHz	30	0,007694	0,007798	0,000208	30,67	0,73
		46	0,007724	0,007879	0,00031	45,72	0,3
		60	0,007749	0,007951	0,000404	59,58	0,45

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 5,11 % yang terjadi pada jarak gangguan 46 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,3 % terjadi pada jarak 46 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

## 2. Dengan Stray Capacitance

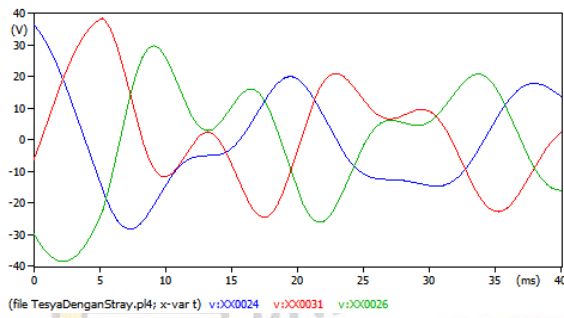
Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan dengan stray capacitance tiga fasa tanah dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.37 berikut.



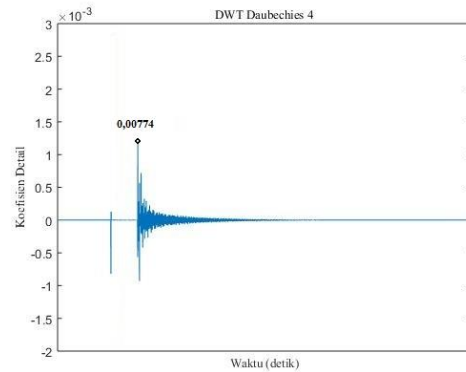


**Gambar 4. 37** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

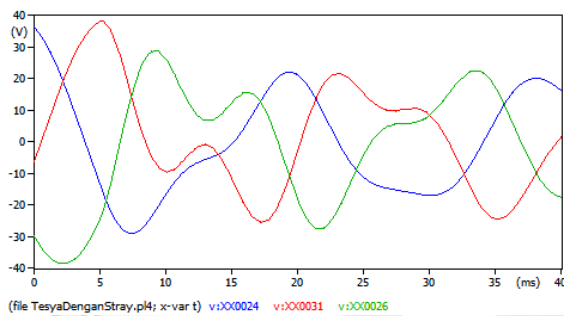
Gambar 4.37 merupakan rangkaian simulasi gangguan tiga fasa tanah metode ujung tunggal dengan stray *capacitance* yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATP. Gangguan tiga fasa tanah dimodelkan menggunakan tiga saklar yang masing-masing saling terhubung ke ketiga fasa yang dikontrol dengan waktu 0,01 detik dan terhubung ke tanah melalui impedansi sebesar 1 ohm. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan tiga fasa tanah dengan metode ujung tunggal dengan stray *capacitance* dapat dilihat pada gambar 4.38 berikut.



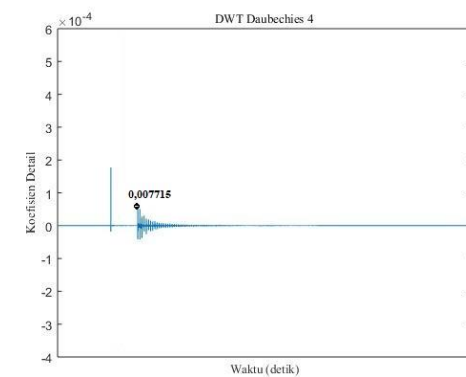
(a)



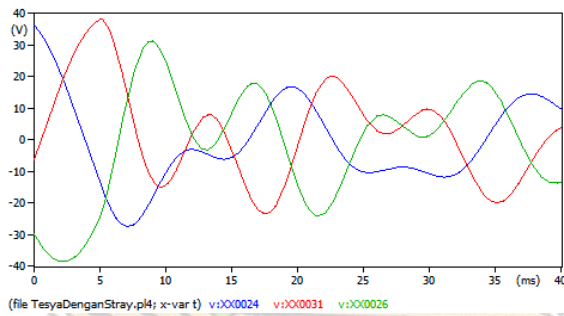
(b)



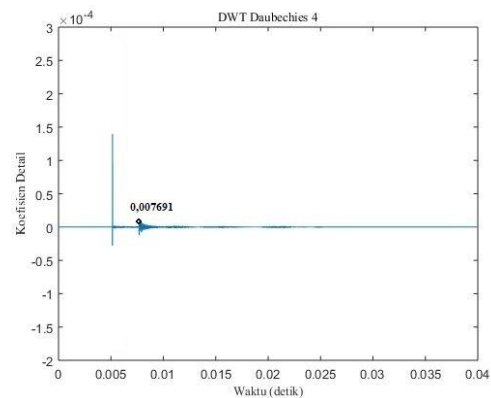
(c)



(d)



(e)



(f)

**Gambar 4. 38** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

Gambar 4.38 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 46 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 46 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 60 km,

(d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 60 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 30 km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan tiga fasa tanah untuk lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

**1. Jumlah sampling 10 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,0079 \text{ s} - 0,00774 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00032 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00032}{2}$$

$$x = 47,2 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 1,2 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|47,2 \text{ km} - 46 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 1,3 \%$$

**2. Jumlah sampling 500 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007824 \text{ s} - 0,007715 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000218 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000218}{2}$$

$$x = 59,85 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,15 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|59,85 \text{ km} - 60 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,16 \%$$

### 3. Jumlah sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007793 \text{ s} - 0,007691 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000204 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000204}{2}$$

$$x = 30,09 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,09 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|30,09 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,09 \%$$

Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan tiga fasa tanah dengan stray capacitance menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.13 berikut.

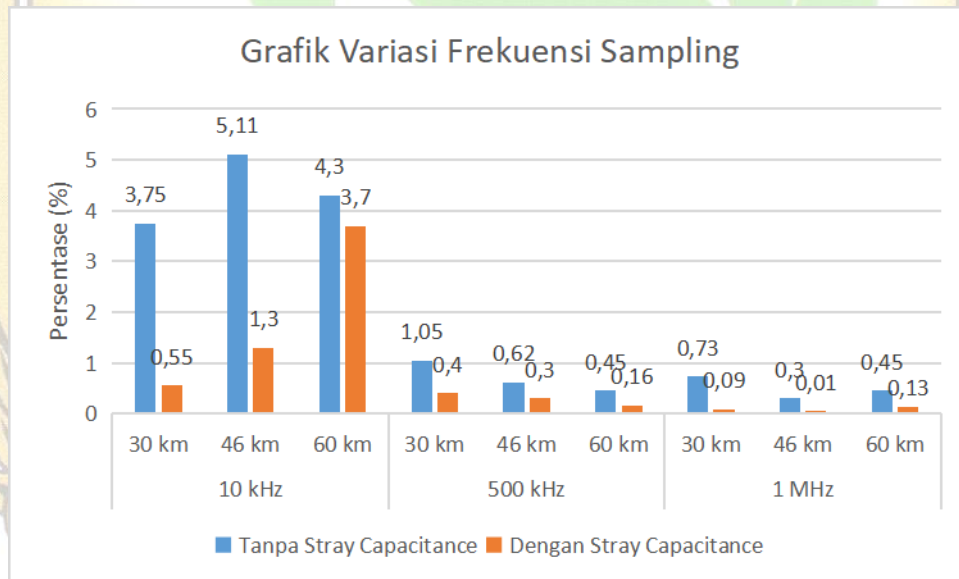
**Tabel 4. 13** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan (km)	$t_a$ (s)	$t_b$ (s)	$\tau$ (s)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	0,00772	0,00782	0,0002	29,5	0,55
		46	0,00774	0,0079	0,00032	47,2	1,3

		60	0,00777	0,00789	0,00024	56,6	3,7
2	500 kHz	30	0,007768	0,007871	0,000206	30,39	0,4
		46	0,007727	0,007882	0,00031	45,72	0,3
		60	0,007715	0,007824	0,000218	59,85	0,16
3	1 MHz	30	0,007671	0,007793	0,000204	30,09	0,09
		46	0,007719	0,007875	0,000312	46,02	0,01
		60	0,007755	0,007958	0,000406	59,88	0,13

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 3,7 % yang terjadi pada jarak gangguan 60 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,01 % terjadi pada jarak 46 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

Tingkat keakuratan yang dihitung dari persentase rata-rata error dari kondisi tanpa stray *capacitance* dan dengan stray *capacitance* untuk menentukan lokasi gangguan tiga fasa tanah dengan memvariasikan frekuensi sampling yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz dapat dilihat pada gambar 4.39 berikut:



**Gambar 4. 39** Grafik Variasi Frekuensi Sampling Gangguan Tiga Fasa Tanah Tanpa dan Dengan Stray *Capacitance*

Gambar 4.39 merupakan grafik presentase error antara pengukuran tanpa stray *capacitance* dan dengan stray *capacitance*. Pada gangguan tiga fasa tanah dapat dilihat bahwa pengukuran menggunakan stray *capacitance* memberikan hasil tingkat keakuratan yang lebih baik atau tinggi dibandingkan tanpa stray *capacitance* yang mana hal tersebut dapat dilihat pada nilai persentase error yang didapatkan. Selain itu

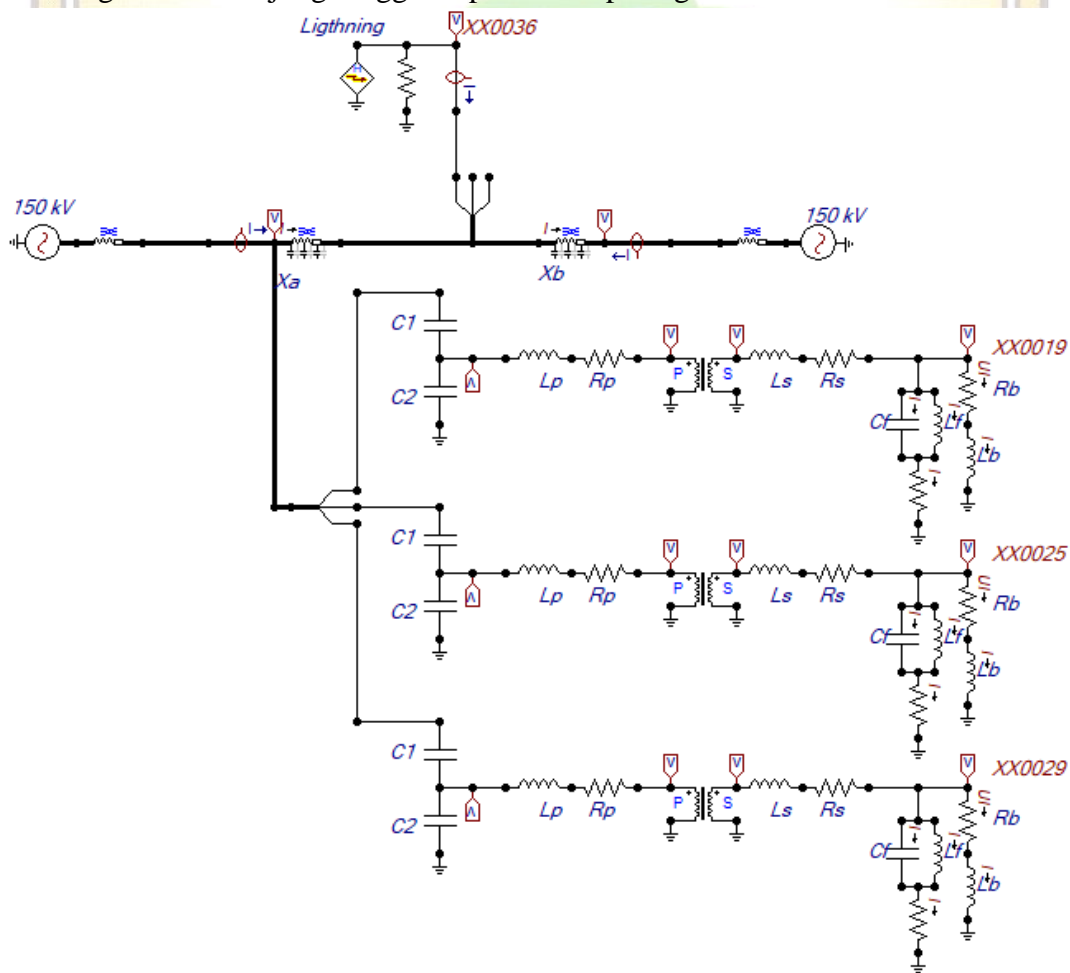
variasi frekuensi sampling juga mempengaruhi tingkat keakuratan pengukuran, dapat dilihat bahwa semakin tinggi frekuensi sampling yang digunakan hasil yang didapatkan juga semakin baik.

#### 4. 7. 6 Gangguan Surja Petir

Gangguan surja petir dimodelkan dengan metode ujung tunggal atau *single ended* untuk penentuan lokasi gangguan, serta menggunakan tiga jenis jumlah sampling yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz.

##### 1. Tanpa Stray Capacitance

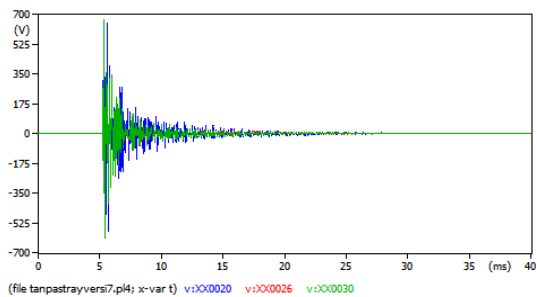
Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan tanpa *stray capacitance* surja petir dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.40 berikut.



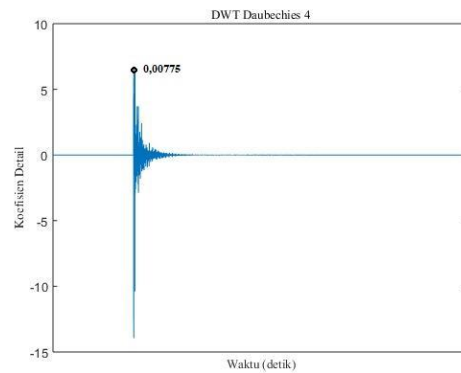
**Gambar 4. 40** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

Gambar 4.40 merupakan rangkaian simulasi gangguan surja petir metode ujung tunggal tanpa *stray capacitance* yang dimodelkan menggunakan perangkat

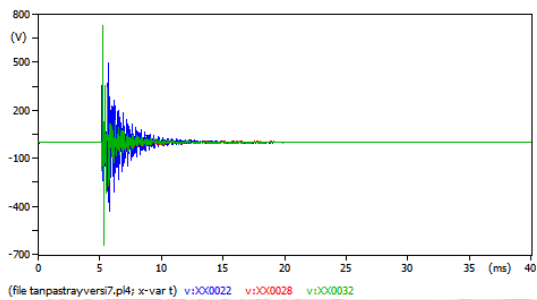
lunak ATP. Gangguan surja petir dimodelkan paralel dengan tahanan. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan surja petir dengan metode ujung tunggal tanpa stray *capacitance* dapat dilihat pada gambar 4.41 berikut.



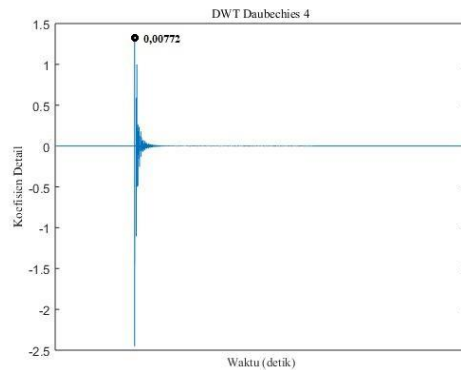
(a)



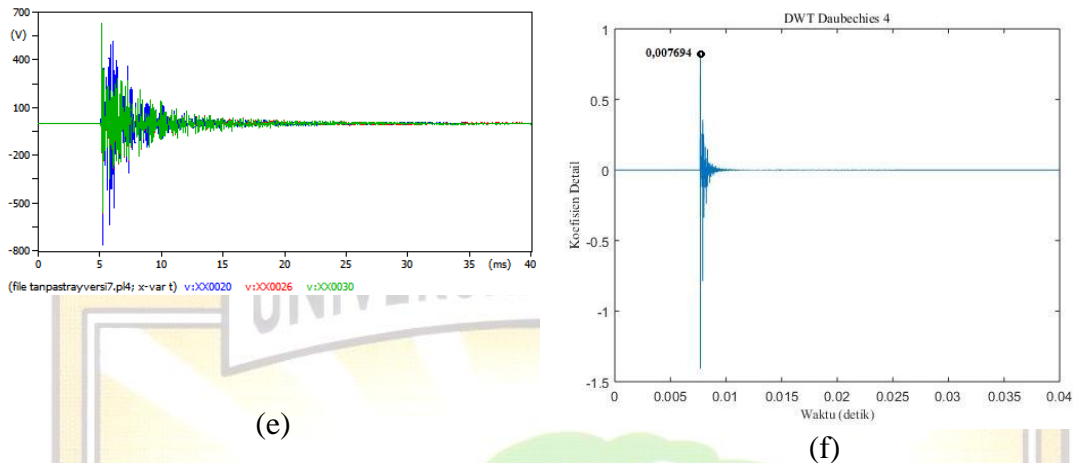
(b)



(c)



(d)



**Gambar 4. 41** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

Gambar 4.41 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 60 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 60 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 46 km, (d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 46 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 30 km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan dua fasa untuk lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

**1. Jumlah sampling 10 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00788 \text{ s} - 0,00775 \text{ s})$$

$$\tau = 0,00026 \text{ s}$$

$$x = L - \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = 92 - \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,00026}{2}$$

$$x = 53,653 \text{ km}$$



Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 6,347 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|53,653 \text{ km} - 60 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 6,89 \%$$

## 2. Jumlah sampling 500 kHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007878 \text{ s} - 0,00772 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000316 \text{ s}$$

$$x = L - \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = 92 - \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000316}{2}$$

$$x = 46,6 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,6 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|46,6 \text{ km} - 46 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,65 \%$$

## 3. Jumlah sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007798 \text{ s} - 0,007694 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000208 \text{ s}$$

$$x = L - \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = 92 - \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,000208}{2}$$

$$x = 30,677 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,677 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|30,677 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 0,7 \%$$

Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan surja petir tanpa stray *capacitance* menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.14 berikut.

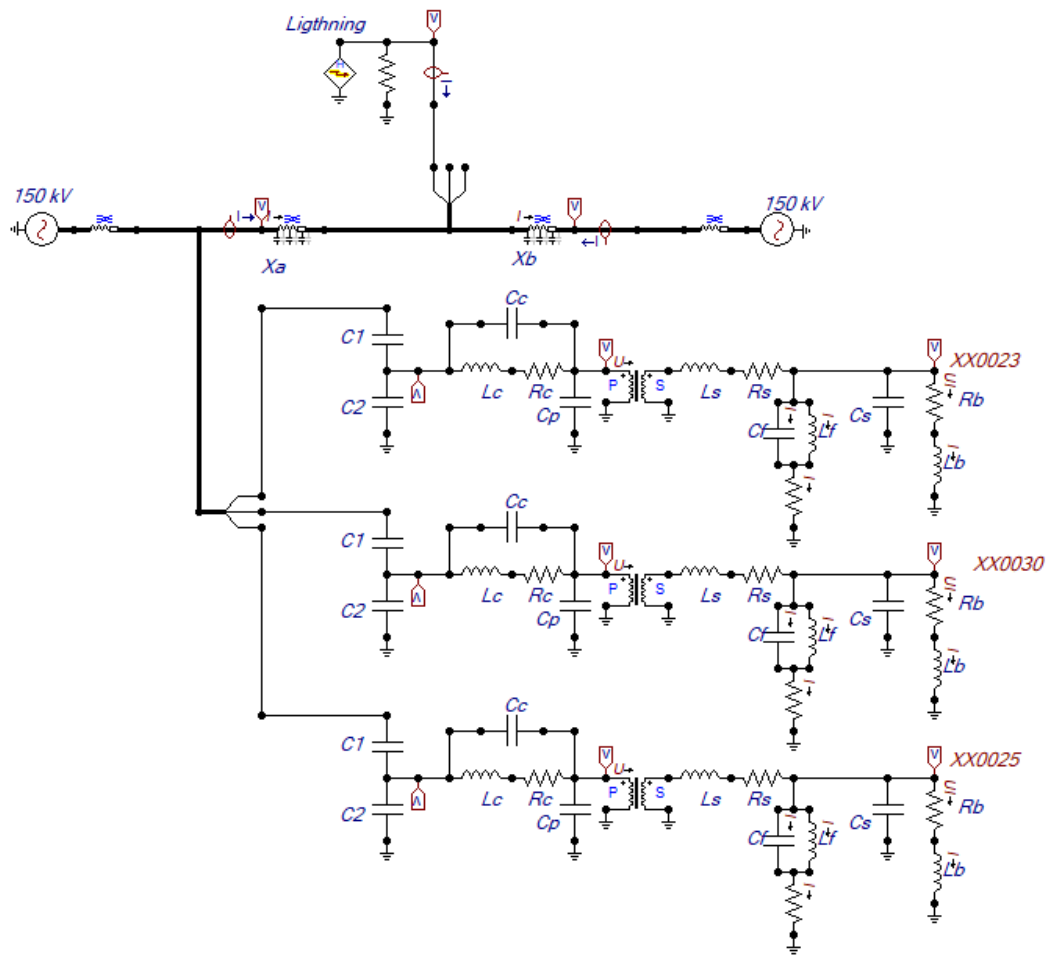
**Tabel 4. 14** Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Tanpa Stray Capacitance

No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan (km)	$t_a$ (s)	$t_b$ (s)	$\tau$ (s)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	0,0077	0,00781	0,00022	32,447	2,66
		46	0,00773	0,00788	0,0003	44,246	1,9
		60	0,00775	0,00788	0,00026	53,65	6,89
2	500 kHz	30	0,0077	0,0078	0,0002	29,497	0,54
		46	0,00772	0,007878	0,000316	46,6	0,65
		60	0,007746	0,00786	0,000228	58,37	1,76
3	1 MHz	30	0,007694	0,007798	0,000208	30,677	0,7
		46	0,007724	0,007881	0,000314	46,31	0,33
		60	0,007748	0,007857	0,000218	59,847	0,16

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 6,89 % yang terjadi pada jarak gangguan 60 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,16 % terjadi pada jarak 60 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

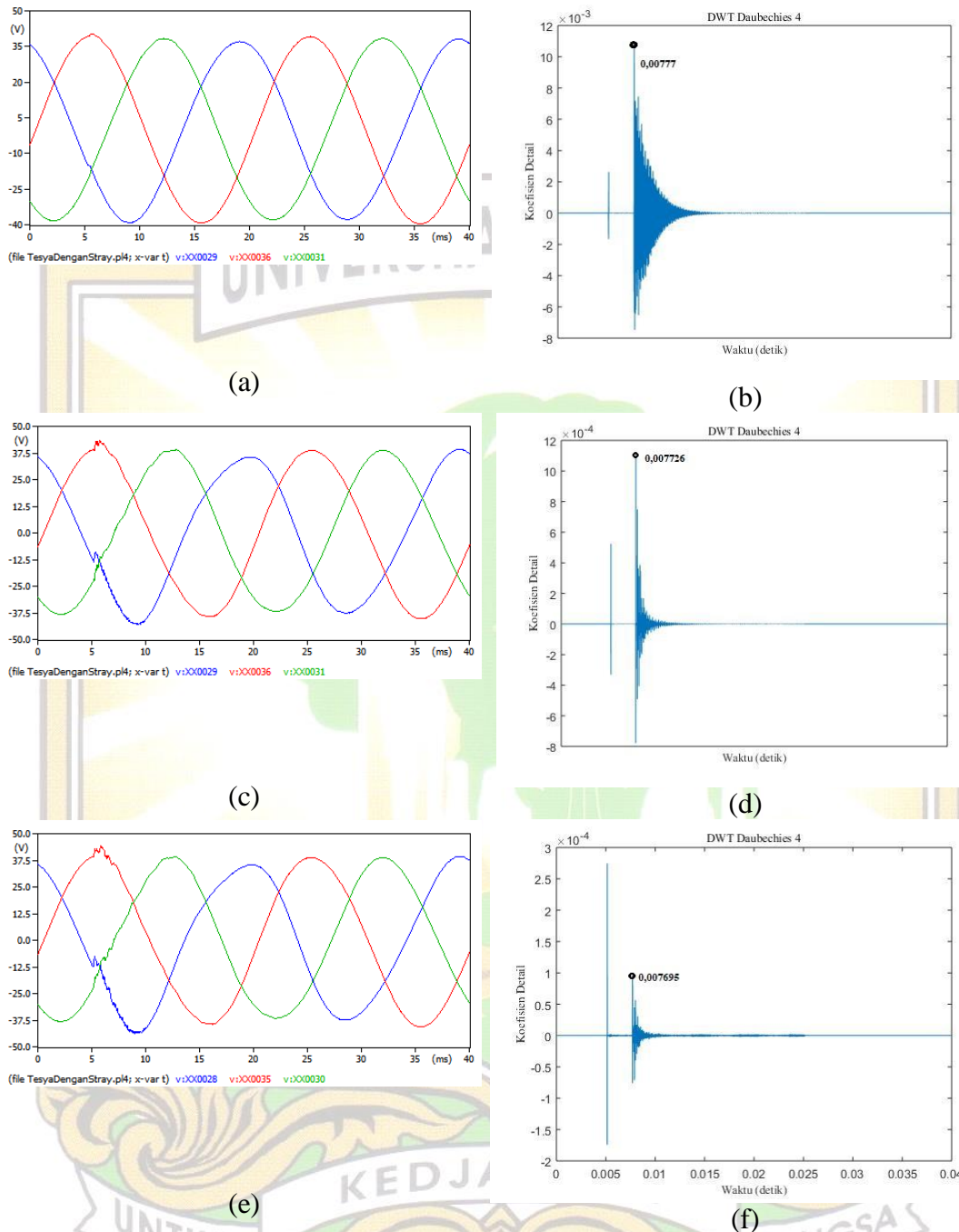
## 2. Dengan Stray Capacitance

Rangkaian simulasi penentuan lokasi gangguan dengan stray *capacitance* surja petir dengan metode ujung tunggal dapat dilihat pada gambar 4.42 berikut.



**Gambar 4. 42** Rangkaian Simulasi Penentuan Lokasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

Gambar 4.42 merupakan rangkaian simulasi gangguan surja petir metode ujung tunggal dengan stray *capacitance* yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ATP. Gangguan surja petir dimodelkan paralel dengan tahanan. Saluran sepanjang 92 km dan gangguan yang disimulasikan berjarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung saluran tempat pengukuran. Ketika terjadi gangguan maka tegangan transien yang dihasilkan akan merambat ke kedua arah menuju busbar A dan B. Pada busbar A terdapat CCVT yang berguna untuk mengukur tegangan transien yang datang, kemudian tegangan tersebut sebagian akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Gelombang yang dipantulkan oleh busbar A tersebut akan kembali menuju titik gangguan dan dipantulkan kembali ke busbar A. Hasil simulasi gangguan surja petir dengan metode ujung tunggal dengan stray *capacitance* dapat dilihat pada gambar 4.43 berikut.



**Gambar 4. 43** Contoh Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

Gambar 4.43 (a) merupakan gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 10 kHz jarak gangguan 60 km, (b) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 60 km pada jumlah sampling 10 kHz (c) gelombang hasil simulasi

gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 500 kHz jarak gangguan 46 km, (d) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 46 km pada jumlah sampling 500 kHz, (e) gelombang hasil simulasi gangguan satu fasa tanah dengan jumlah sampling 1 MHz jarak gangguan 30 km, (f) gelombang gangguan hasil transformasi wavelet jenis *mother wavelet* diskrit db 4 dengan jarak gangguan 30 km pada jumlah sampling 1 MHz. Untuk gambar hasil simulasi gangguan baik dari perangkat lunak ATP ataupun perangkat lunak matlab dapat dilihat pada lampiran. Lokasi gangguan dihitung menggunakan selisih waktu dua puncak pertama dari transformasi wavelet. Contoh perhitungan penentuan lokasi gangguan dua fasa untuk lokasi gangguan menggunakan jenis *mother wavelet* db4 sebagai berikut:

**1. Jumlah sampling 10 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,00777 \text{ s} - 0,00787 \text{ s})$$

$$\tau = 0,0002 \text{ s}$$

$$x = L - \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = 92 - \frac{294973,7006 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times 0,0002}{2}$$

$$x = 62,502 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 2,502 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{hasil perhitungan} - \text{jarak gangguan}|}{\text{panjang saluran}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|62,502 \text{ km} - 60 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = 2,72 \%$$

**2. Jumlah sampling 500 kHz**

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007883 \text{ s} - 0,007726 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000314 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{km}{s} \times 0,000314}{2}$$

$$x = 46,31 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,31 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$Error (\%) = \frac{|hasil \text{ perhitungan} - jarak \text{ gangguan}|}{panjang \text{ saluran}} \times 100\%$$

$$Error (\%) = \frac{|46,31 \text{ km} - 46 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$Error (\%) = 0,33 \%$$

### 3. Jumlah sampling 1 MHz

$$\tau = 2 \times (t_b - t_a)$$

$$\tau = 2 \times (0,007797 \text{ s} - 0,007695 \text{ s})$$

$$\tau = 0,000204 \text{ s}$$

$$x = \frac{v \times \tau}{2}$$

$$x = \frac{294973,7006 \frac{km}{s} \times 0,000204}{2}$$

$$x = 30,087 \text{ km}$$

Selisih antara nilai gangguan yang ditetapkan dengan hasil perhitungan sebesar 0,087 km dan persentase error didapatkan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$Error (\%) = \frac{|hasil \text{ perhitungan} - jarak \text{ gangguan}|}{panjang \text{ saluran}} \times 100\%$$

$$Error (\%) = \frac{|30,087 \text{ km} - 30 \text{ km}|}{92 \text{ km}} \times 100\%$$

$$Error (\%) = 0,09 \%$$

Hasil lengkap dari penentuan lokasi gangguan surja petir dengan stray capacitance menggunakan transformasi wavelet dapat dilihat pada tabel 4.15 berikut.

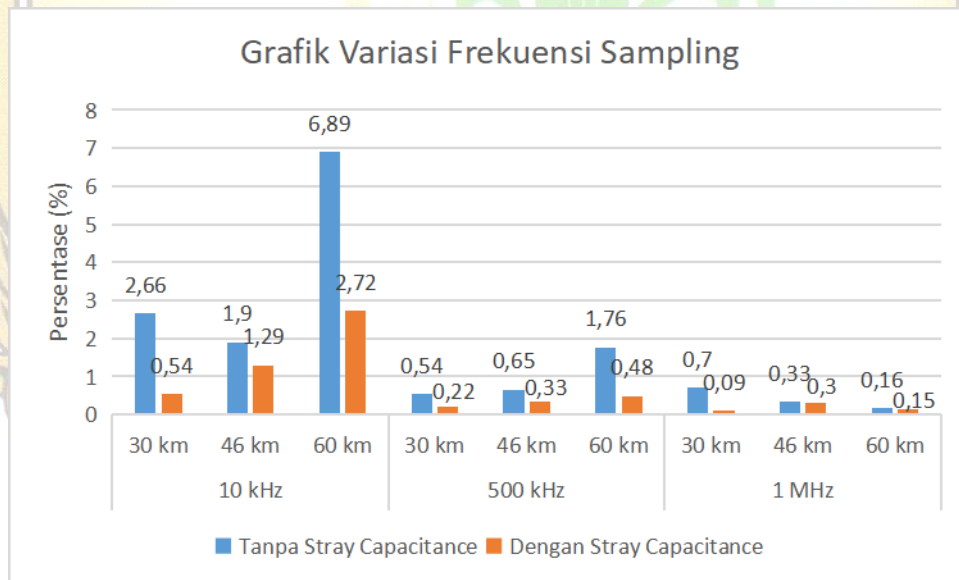
**Tabel 4. 15** Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal Dengan Stray Capacitance

No	Jumlah sampling	Jarak Gangguan (km)	t <sub>a</sub> (s)	t <sub>b</sub> (s)	τ (s)	X (km)	Error (%)

1	10 kHz	30	0,00771	0,00781	0,0002	29,497	0,54
		46	0,00774	0,0079	0,00032	47,195	1,29
		60	0,00777	0,00787	0,0002	62,5	2,72
2	500 kHz	30	0,00771	0,007811	0,000202	29,97	0,22
		46	0,007726	0,007883	0,000314	46,31	0,33
		60	0,00775	0,00786	0,00022	59,55	0,48
3	1 MHz	30	0,007695	0,007797	0,000204	30,087	0,09
		46	0,007722	0,007877	0,00031	45,72	0,3
		60	0,007746	0,007854	0,000216	60,143	0,15

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa error maksimum yaitu 2,72 % yang terjadi pada jarak gangguan 60 km dengan jumlah sampling 10 kHz, sedangkan error minimum yaitu 0,15 % terjadi pada jarak 60 km pada jumlah sampling 1 MHz. Dapat dilihat bahwa tingkat akurasi masing-masing jarak gangguan pada setiap kenaikan jumlah sampling menurun, dimana semakin tinggi jumlah sampling maka tingkat akurasi yang didapatkan akan semakin baik.

Tingkat keakuratan yang dihitung dari persentase rata-rata error dari kondisi tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance* untuk menentukan lokasi gangguan dua fasa dengan memvariasikan frekuensi sampling yaitu 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz dapat dilihat pada gambar 4.44 berikut:



**Gambar 4. 44** Grafik Variasi Frekuensi Sampling Gangguan Surja Petir Tanpa dan Dengan *Stray Capacitance*

Gambar 4.44 merupakan grafik presentase error antara pengukuran tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance*. Pada gangguan surja petir dapat dilihat bahwa pengukuran menggunakan *stray capacitance* memberikan hasil tingkat

keakuratan yang lebih baik atau tinggi dibandingkan tanpa stray *capacitance* yang mana hal tersebut dapat dilihat pada nilai persentase error yang didapatkan. Selain itu variasi frekuensi sampling juga mempengaruhi tingkat keakuratan pengukuran, dapat dilihat bahwa semakin tinggi frekuensi sampling yang digunakan hasil yang didapatkan juga semakin baik.





## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan sebelumnya yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Semua model komponen yang digunakan dalam simulasi baik itu tanpa stray *capacitance* dan dengan stray *capacitance* telah berhasil dimodelkan dan dijalankan sesuai dengan kebutuhan penelitian.
2. Variasi model CCVT yang menggunakan stray *capacitance* dan tanpa stray *capacitance* mempengaruhi nilai akurasi dalam penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi. Untuk gangguan dari dalam ataupun dari luar sistem, nilai akurasi yang didapatkan dengan model tanpa stray *capacitance* memberikan hasil yang rendah yaitu melebihi 2%, namun untuk model menggunakan stray *capacitance* memberikan hasil yang lebih bagus yaitu dibawah 1%. Berdasarkan dua jenis model CCVT yang digunakan dapat dilihat bahwa model CCVT menggunakan stray *capacitance* memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa stray *capacitance*.
3. Variasi jumlah sampling berpengaruh terhadap nilai akurasi penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi. Untuk gangguan dari dalam ataupun dari luar sistem, pada jumlah sampling 10 kHz memiliki nilai akurasi yang rendah bahkan lebih dari 2%, pada jumlah 500 kHz nilai akurasi yang didapatkan berkurang dibandingkan jumlah sampling 10 kHz, dan pada jumlah sampling 1 MHz memberikan nilai akurasi yang jauh lebih baik yaitu dibawah 1% bahkan dibawah 0,5%. Berdasarkan tiga jenis jumlah sampling yang digunakan dapat dilihat bahwa pada jumlah sampling 1 MHz memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan jumlah sampling 10 kHz dan 500 kHz.

### 5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas, penelitian ini masih bisa dikembangkan untuk penelitian selanjutnya. Adapun saran untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memvariasikan nilai stray *capacitance* untuk menganalisa pengaruh lebih lanjut dalam penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi.

2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan penelitian di Laboratorium untuk melihat apakah model CCVT ini dapat diaplikasikan dengan baik atau tidak secara praktek.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, no. 3. pp. 301–302, 1973. doi: 10.1109/TSMC.1973.4309230.
- [2] S. Affijulla and P. Tripathy, "A robust fault detection and discrimination technique for transmission lines," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6348–6358, 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2709546.
- [3] A. Asadi Majd, H. Samet, and T. Ghanbari, "k-NN based fault detection and classification methods for power transmission systems," *Prot. Control Mod. Power Syst.*, vol. 2, no. 1, 2017, doi: 10.1186/s41601-017-0063-z.
- [4] T. R. Althi, E. Koley, and S. Ghosh, "Fuzzy logic based fault detection and classification scheme for series faults in six phase transmission line," *Proc. 7th Int. Conf. Electr. Energy Syst. ICEES 2021*, pp. 479–483, 2021, doi: 10.1109/ICEES51510.2021.9383768.
- [5] Z. Xiaoguang, H. Chunying, D. Junbo, G. Yubo, and C. Xiaohui, "Research on a Highly Precise Fault Location Method for  $\pm 1$  100kV UHVDC Transmission Lines Based on Hilbert-Huang Transform," *APAP 2019 - 8th IEEE Int. Conf. Adv. Power Syst. Autom. Prot.*, pp. 850–854, 2019, doi: 10.1109/APAP47170.2019.9224892.
- [6] Z. Jianwen and D. Jiabin, "Traveling Wave Fault Location for Lines Combined with Overhead-Lines and Cables Based on Empirical Wavelet Transform," *2019 IEEE 2nd Int. Conf. Electron. Commun. Eng. ICECE 2019*, pp. 285–289, 2019, doi: 10.1109/ICECE48499.2019.9058522.
- [7] R. L. A. Reis, W. L. A. Neves, and D. Fernandes, "Influence of instrument transformers and anti-aliasing filters on the performance of fault locators," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 162, no. May, pp. 142–149, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.05.016.
- [8] A. Guzman, B. Kasztenny, Y. Tong, and M. V. Mynam, "Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications," *71st Annu. Conf. Prot. Relay Eng. CPRE 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 1–18, 2018, doi: 10.1109/CPRE.2018.8349768.
- [9] D. Fernandes, W. L. A. Neves, and J. C. A. Vasconcelos, "Coupling capacitor voltage transformer: A model for electromagnetic transient studies," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 2, pp. 125–134, 2007, doi: 10.1016/j.epsr.2006.02.007.
- [10] E. O. Schweitzer, B. Kasztenny, and M. V. Mynam, "Performance of time-domain line protection elements on real-world faults," *69th Annu. Conf. Prot. Relay Eng. CPRE 2016*, 2017, doi: 10.1109/CPRE.2016.7914904.
- [11] A. Nag and A. Yadav, "Nag2016.Pdf," pp. 1–4, 2016.
- [12] C. N. Obiozor and M. N. Sadiku, "Consideration of power in a lossless transmission line," *Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON*, no. 1, pp. 626–629,

- 1996, doi: 10.1109/secon.1996.510146.
- [13] C. Xiang, X. Chen, H. Zhao, Z. Ren, and G. Zhao, "Studying the Effect of Stray Capacitance on the Measurement Accuracy of the CVT Based on the Boundary Element Method," *Complexity*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/1155443.
- [14] I. Sule, U. O. Aliyu, and G. K. Venayagamoorthy, "Simulation model for assessing transient performance of capacitive voltage transformers," *2006 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet. PES*, no. September 2014, 2006, doi: 10.1109/pes.2006.1709533.
- [15] D. Irianto, "THE EFFECT OF STRAY CAPACITANCE ON CHARACTERISTICS OF END WINDOW GEIGER-," no. C, pp. 44–49, 2013.
- [16] F. Ghassemi, P. Gale, T. Cumming, and C. Coutts, "Harmonic voltage measurements using CVTs," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 1, pp. 443–449, 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.837675.
- [17] H. Seyedi, S. Golabi, and Z. Abam, "Limitation of transmission line switching overvoltages," *PECon2010 - 2010 IEEE Int. Conf. Power Energy*, pp. 363–368, 2010, doi: 10.1109/PECON.2010.5697610.
- [18] S. Wang and G. Xu, "Research on traveling wave fault technology based on ground potential," *AIP Adv.*, vol. 11, no. 11, 2021, doi: 10.1063/5.0069963.
- [19] Y. Tang, H. Chen, H. Wang, F. Dai, and S. Jiang, "Transmission line models used in travelling wave studies," *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2, pp. 797–803, 1999, doi: 10.1109/tdc.1999.756151.
- [20] V. F. Couto, S. H. L. Cabral, T. I. A. H. Mustafa, and L. H. B. Puchale, "Study of occurrence of overvoltage along power transmission lines with acceptable end voltage," *33rd Electr. Insul. Conf. EIC 2015*, no. June, pp. 29–32, 2014, doi: 10.1109/ICACACT.2014.7223503.
- [21] Z. Zhao *et al.*, "Simulation study on transient performance of lightning overvoltage of transmission lines," *2011 7th Asia-Pacific Int. Conf. Light. APL2011*, vol. 2, pp. 520–524, 2011, doi: 10.1109/APL.2011.6110180.
- [22] A. Hazmi, P. Emeraldi, M. Imran Hamid, F. Anugrah Utama, and N. Takagi, "Evolution of thunderstorm electrification before first lightning strike," *Int. Conf. High Volt. Eng. Power Syst. ICHVEPS 2017 - Proceeding*, vol. 2017-Janua, pp. 340–343, 2017, doi: 10.1109/ichveps.2017.8225867.
- [23] P. Chowdhuri, "Parameters of lightning strokes and their effects on power systems," *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2, no. i, pp. 1047–1051, 2001, doi: 10.1109/tdc.2001.971392.
- [24] M. Chanaka, K. Shanthi, and R. Perera, "Modeling of power transmission lines for lightning back flashover analysis (A case study: 220kV Biyagama-Kotmale transmission line)," *2011 6th Int. Conf. Ind. Inf. Syst. ICIIS 2011 - Conf. Proc.*, pp. 386–391, 2011, doi: 10.1109/ICIINFS.2011.6038099.
- [25] C. Advisory and S. A. Board, *IEEE Guide for Online Monitoring and Recording Systems for Transient Overvoltages in Electric Power Systems IEEE SA Board of Governors*. 2015.
- [26] A. H. Hamza, S. M. Ghania, A. M. Emam, and A. S. Shafy, "Statistical

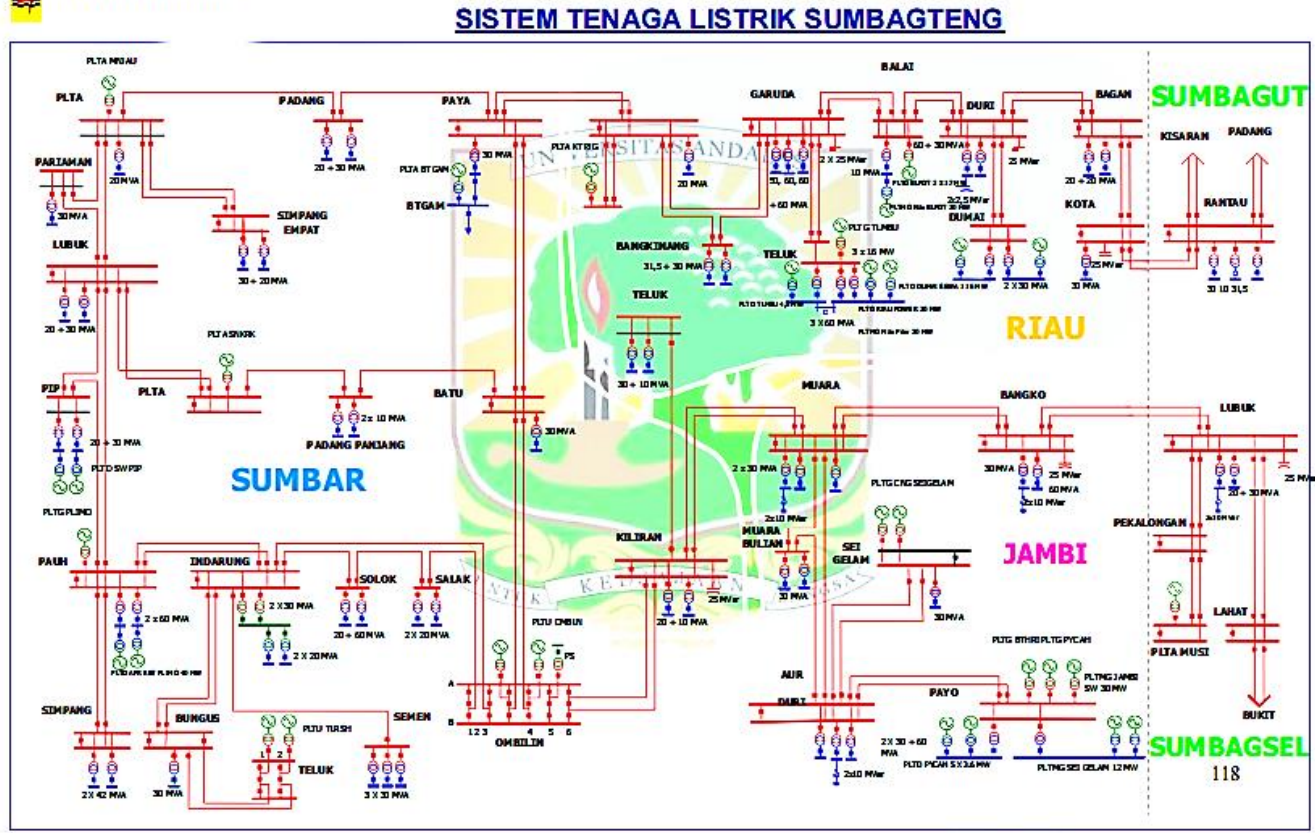
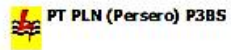
- analysis of switching overvoltages and insulation coordination for a 500 kV transmission line,” *2016 18th Int. Middle-East Power Syst. Conf. MEPCON 2016 - Proc.*, pp. 683–686, 2017, doi: 10.1109/MEPCON.2016.7836966.
- [27] T. T. Quoc, S. L. Du, D. P. Van, N. N. Khac, and L. D. Tran, “TEMPORARY OVERVOLTAGES IN THE VIETNAM 500 KV TRANSMISSION LINE \*\* HCM City Electricity Company,” pp. 225–230.
- [28] W. De Block, R. Pintelon, and Y. Rolain, “Identification of transmission lines: From time domain measurements to frequency domain models,” *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, vol. 2, no. May, pp. 1327–1331, 2002, doi: 10.1109/imtc.2002.1007149.
- [29] A. R. Adly, R. A. El Sehiemy, and A. Y. Abdelaziz, “A novel single end measuring system based fast identification scheme for transmission line faults,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 103, pp. 263–274, 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2017.02.041.
- [30] X. Tang, Z. Zhang, Q. Huang, and Y. Gong, “Fault Location and Fault Type Recognition of Power System Based on Wavelet Transform,” *2019 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Asia, ISGT 2019*, pp. 689–692, 2019, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881101.
- [31] P. Chiradeja and C. Pothisarn, “Identification of the fault location for three-terminal transmission lines using discrete wavelet transforms,” *Transm. Distrib. Conf. Expo. Asia Pacific, T D Asia 2009*, pp. 3–6, 2009, doi: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356924.
- [32] Y. Zheng, Y. Xu, and Z. Xiao, “A traveling wave fault location system based on wavelet transformation,” *2019 IEEE Green Energy Smart Syst. Conf. IGESSC 2019*, vol. 2019-Janua, 2019, doi: 10.1109/IGESSC47875.2019.9042397.
- [33] W. Fluty and Y. Liao, “Electric Transmission Fault Location Techniques Using Traveling Wave Method and Discrete Wavelet Transform,” *Clemson Univ. Power Syst. Conf. PSC 2020*, 2020, doi: 10.1109/PSC50246.2020.9131271.
- [34] E. Aboutanios, “An adaptive clarke transform based estimator for the frequency of balanced and unbalanced three-phase power systems,” *25th Eur. Signal Process. Conf. EUSIPCO 2017*, vol. 2017-Janua, no. 1, pp. 1001–1005, 2017, doi: 10.23919/EUSIPCO.2017.8081358.
- [35] N. E. Eng and K. Ramar, “Single-ended traveling wave based fault location on two terminal transmission lines,” *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, pp. 1–4, 2009, doi: 10.1109/TENCON.2009.5396141.
- [36] W. Zhang *et al.*, “SLG ( Single-Line-to-Ground ) Fault Location in NUGS ( Neutral Un-effectively Grounded System ) 2 The Characteristics of SLG Fault and 3 Review of SLG Fault Location Methods,” vol. 01009, pp. 1–6, 2018.
- [37] M. Izadi, M. S. Abd Rahman, M. Z. A. Ab-Kadir, C. Gomes, J. Jasni, and M. Hajikhani, “The influence of lightning induced voltage on the distribution power line polymer insulators,” *PLoS One*, vol. 12, no. 2, pp. 1–22, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0172118.
- [38] S. A. Khan, A. H. A. Bakar, N. A. Rahim, and C. Tan, “Analysis of

ferroresonance suppression and Transient response performances for various ferroresonance suppression circuits in Capacitive Voltage Transformers,” *IET Semin. Dig.*, vol. 2014, no. CP659, 2014, doi: 10.1049/cp.2014.1474.

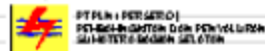
- [39] L. V Bewley, *Guideline for Numerical Electromagnetic Analysis Method and its Application to Surge Phenomena*, no. June. 2013. [Online]. Available: <http://www.e-cigre.org/Order/select.asp?ID=15891>



## B. 1 Sistem Tenaga Listrik SUMBAGTENG



## B. 2 Data Transmisi



Belum update  
Sudah update

### DATA TRANSMISI

	ROUTE	Tegangan	Jarak	NAMA KOND.	Jumlah Sirkuit	Diameter mm <sup>2</sup>	I.NOMINAL	Rate MVA	Z1 (ohm/km)		B1 (μS/km)	Z0 (ohm/km)		Bo (μS/km)
									R	X		R	X	
29	TELUK BETUNG - NATAR	150	16,6	HAWK	2	1 x 240	645	167,58	0,117	0,401	2,860	0,614	1,794	1,222
30	SUTAMI - NATAR	150	30,2	HAWK	2	1 x 240	645	167,58	0,117	0,401	2,860	0,614	1,794	1,222
31	TARAHAN - SUTAMI	150	15,9	HAWK	2	1 x 240	645	167,58	0,117	0,401	2,860	0,614	1,794	1,222
32	NEW TARAHAN - SUTAMI	150	17,0	ZEBRA	2	2 x 435/55	1780	462,46	0,039	0,298	3,803	0,483	1,611	1,208
33	MENGGALA - KOTABUMI	150	57,5	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,117	0,401	2,860	0,614	1,794	1,222
34	TEGINENENG - METRO	150	21,9	ACSR	1	1 x 240	645	167,58	0,085	0,415	1,224	0,555	1,823	1,815
35	METRO - SRIBAWONO	150	50,1	ACSR	1	1 x 240	645	167,58	0,085	0,415	1,224	0,555	1,823	1,815
36	NATAR - SUKARAME	150	12,5	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,117	0,401	2,860	0,614	1,794	1,222
37	SUKARAME - SUTAMI	150	18,5	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,117	0,401	2,860	0,614	1,794	1,222
38	BATURAJA - BLAMBANGAN UMPU	150	65,4	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,120	0,423	2,757	0,624	1,797	1,160
39	BUKIT KEMMUNING - BLAMBANGAN UMPU	150	33,1	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,120	0,423	2,757	0,624	1,797	1,160
40	SRIBAWONO - NEW TARAHAN	150	50,9	ZEBRA	2	2 x 435/55	1780	462,46	0,039	0,298	3,803	0,483	1,611	1,208
41	SRIBAWONO - SP. BANYAK	150	70,0	ACSR	2	1 x 240	645	167,58	0,085	0,415	1,224	0,555	1,823	1,815
42	MENGGALA - GUMAWANG	150	91,0	ACSR	1	2 x 435/55	900	233,83	0,117	0,401	2,860	0,614	1,794	1,222
43	OMBILIN - SALAK	150	2,3	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,119	0,396	2,898	0,624	1,797	1,160
44	SALAK - SOLOK	150	28,0	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,119	0,396	2,898	0,624	1,797	1,160
45	SOLOK - INDARUNG	150	34,1	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,119	0,341	2,791	0,414	1,234	1,551
46	INDARUNG - OMBILIN	150	64,4	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,120	0,414	2,794	0,367	1,138	1,611
47	OMBILIN - BATUSANGKAR	150	32,6		2	1 x 330/40	790	205,25	0,043	0,262	4,011	0,287	1,117	1,815
48	PAUH LIMO - INDARUNG	150	6,7	HAWK	2	1 x 240	645	167,58	0,117	0,401	2,860	0,614	1,794	1,222
49	SIMPANG HARU - PAUH LIMO	150	6,8	HAWK	2	1 x 240	645	167,58	0,119	0,396	2,898	0,624	1,797	1,160
50	LUBUK ALUNG - PAUH LIMO	150	33,9	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,119	0,396	2,898	0,624	1,797	1,160
51	PIP - LUBUK ALUNG	150	12,2	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,119	0,396	2,898	0,624	1,797	1,160
52	PAUH LIMO - PIP	150	22,7	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,119	0,396	2,898	0,624	1,797	1,160
53	MANINJAU - LUBUK ALUNG	150	56,8	HAWK	2	1 x 240	645	167,58	0,117	0,401	2,859	0,614	1,793	1,223
54	PADANG LUAR - MANINJAU	150	42,0	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,119	0,396	2,898	0,624	1,797	1,160
55	LUBUK ALUNG - SINGKARAK	150	11,3	ACSR	2	1 x 330/40	790	205,25	0,085	0,415	1,224	0,555	1,823	1,815
56	PAYAKUMBUH - PADANG LUAR	150	32,2	HAWK	1	1 x 240	645	167,58	0,119	0,396	2,898	0,624	1,797	1,160
57	PAYAKUMBUH - KOTO PANJANG	150	84,8	ACSR	2	1 x 330/40	790	205,25	0,085	0,412	1,173	0,552	1,830	1,815
58	PAYAKUMBUH - BATUSANGKAR	150	26,1	ACSR	1	1 x 330/40	790	205,25	0,085	0,412	1,173	0,552	1,830	1,815
59	OMBILIN - KILIRANJAO	150	75,2	ACSR	2	2 x 330/40	790	205,25	0,043	0,275	4,132	0,530	1,674	1,380
60	KILIRANJAO - MUARA BUNGO	150	117,0	ACSR	2	2 x 435/55	1800	467,65	0,039	0,298	3,803	0,483	1,611	1,208
61	MUARA BUNGO - BANGKO	150	78,6	ACSR	2	2 x 435/55	1800	467,65	0,039	0,298	3,803	0,483	1,611	1,208
62	MUARA BUNGO - AUR DURI / JAMBI	150	193,2	ACSR	2	2 x 330/40	740	192,26	0,043	0,275	4,132	0,530	1,674	1,380

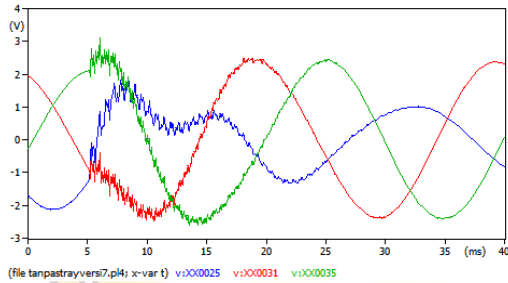




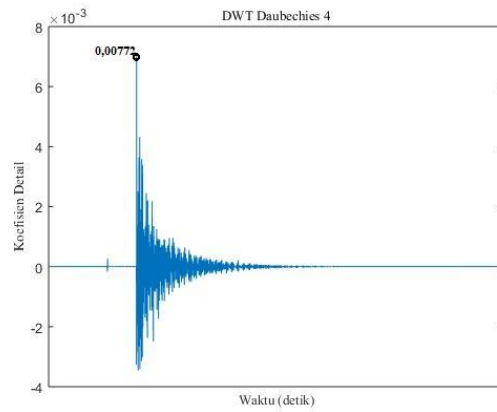
### B. 3 Gangguan Satu Fasa Tanah

#### 1. Tanpa Stray Capacitance

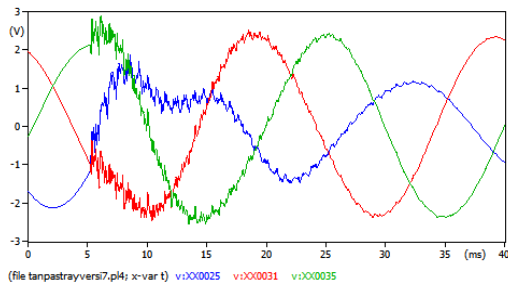
##### a. Jumlah sampling 10 kHz



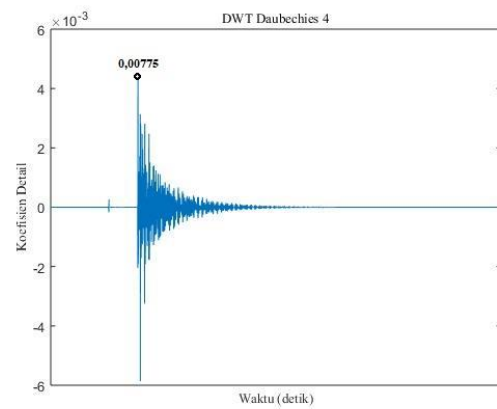
(a)



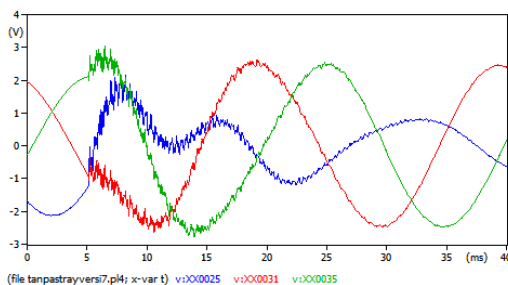
(b)



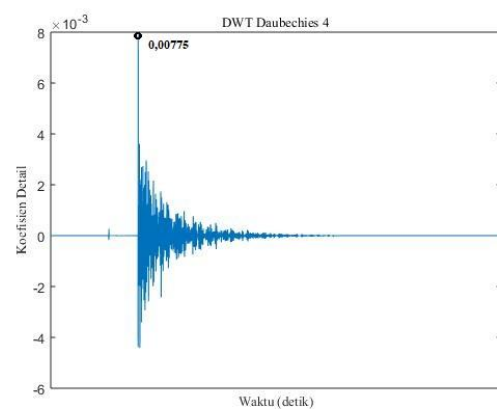
(c)



(d)



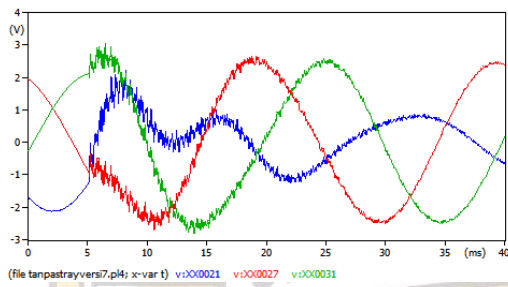
(e)



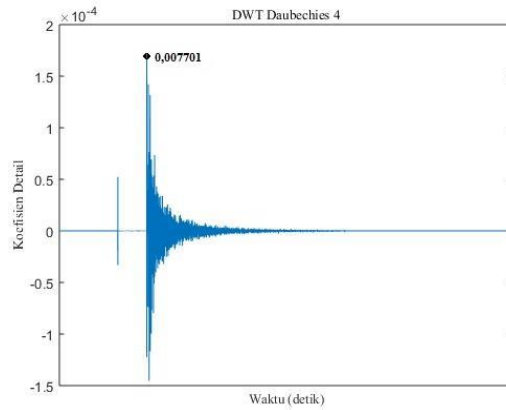
(f)

**Gambar B. 1** Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

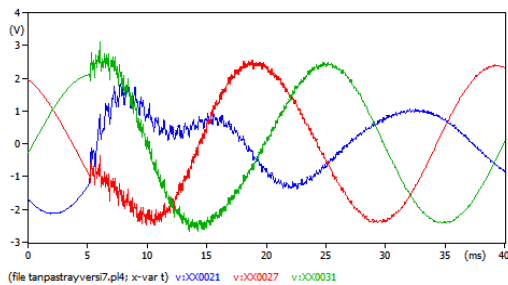
**b. Jumlah sampling 500 kHz**



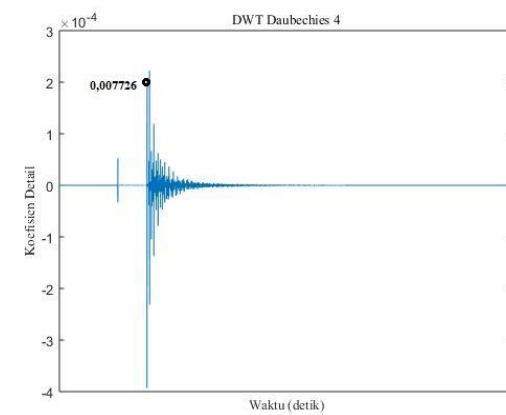
(a)



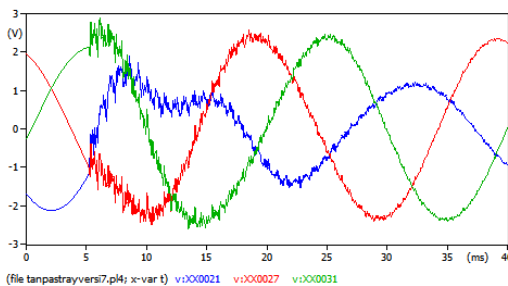
(b)



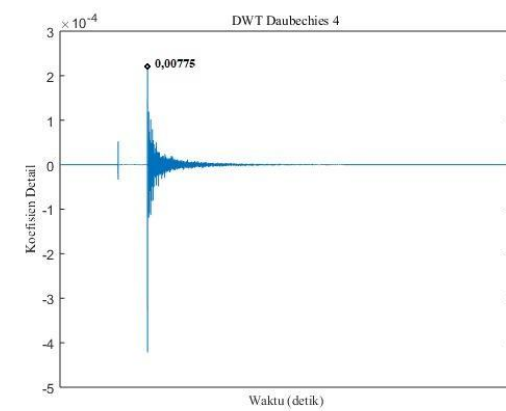
(c)



(d)



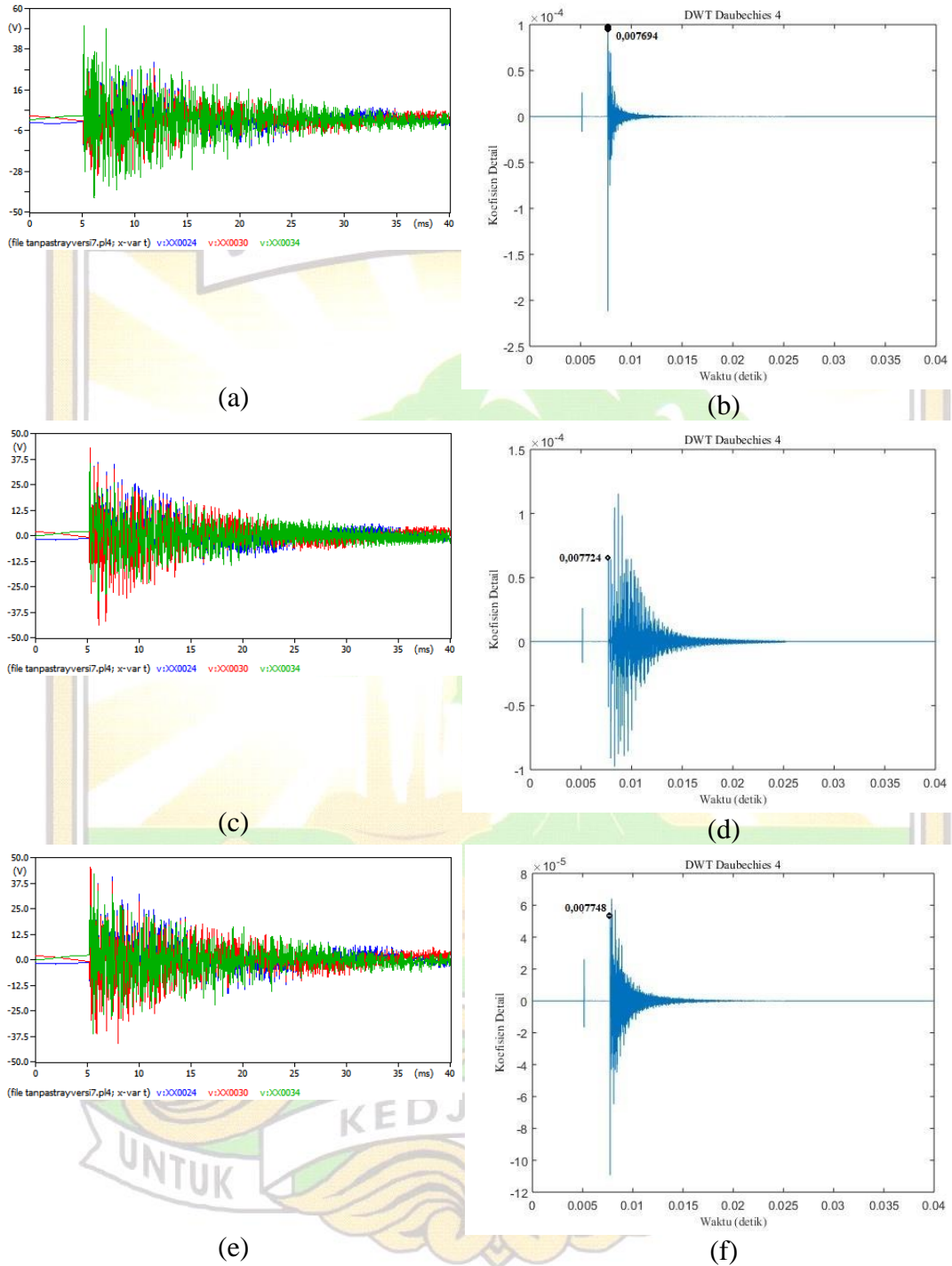
(e)



(f)

**Gambar B. 2** Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

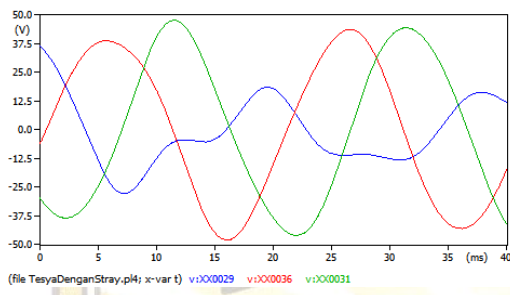
**c. Jumlah sampling 1 MHz**



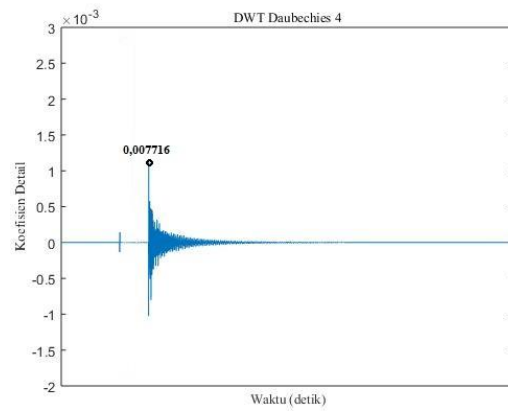
**Gambar B. 3** Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

## 2. Dengan Stray Capacitance

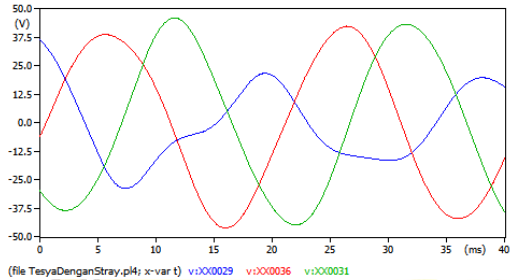
### a. Jumlah sampling 10 kHz



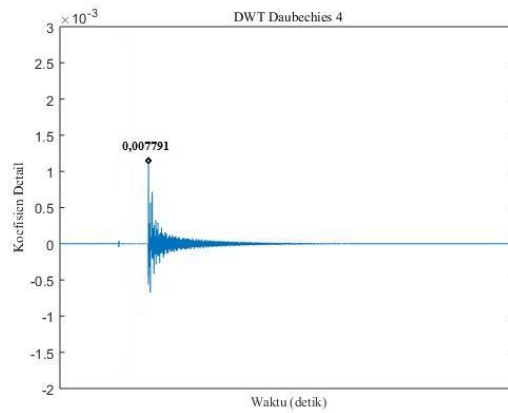
(a)



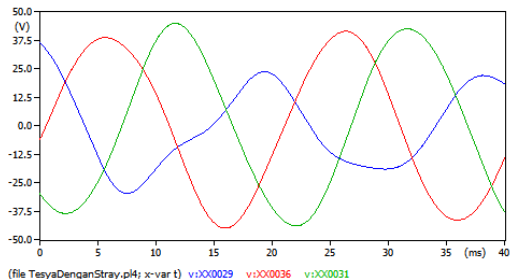
(b)



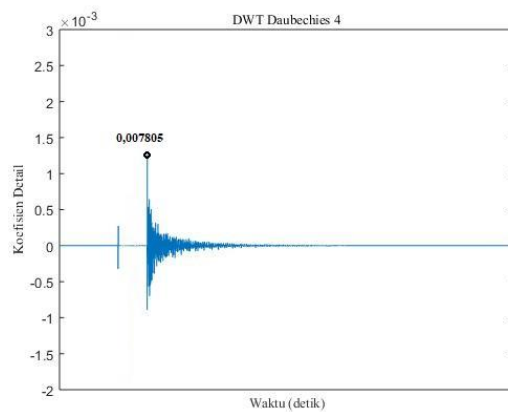
(c)



(d)



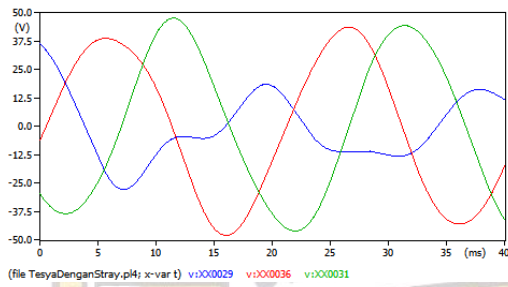
(e)



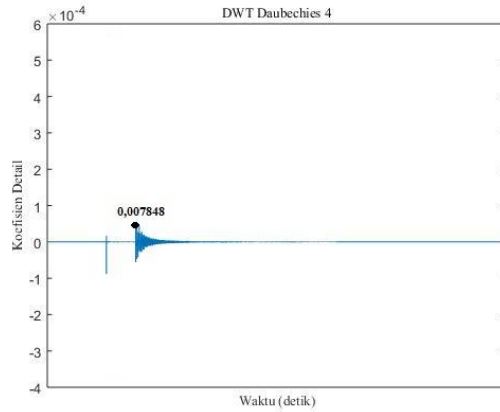
(f)

**Gambar B. 4** Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

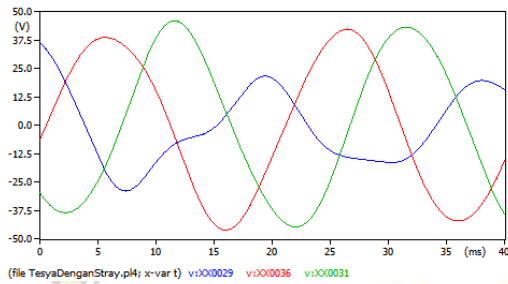
**b. Jumlah sampling 500 kHz**



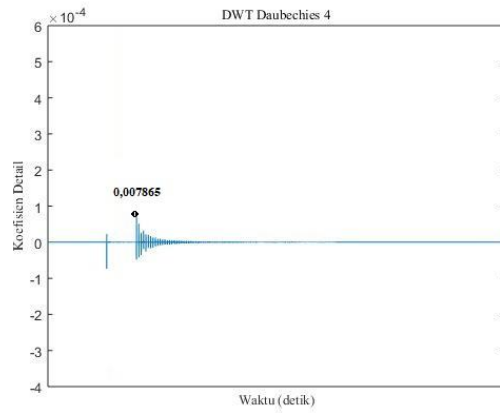
(a)



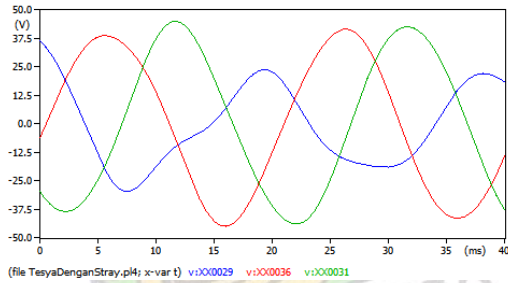
(b)



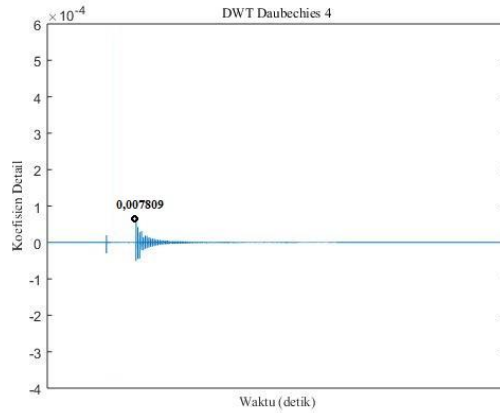
(c)



(d)



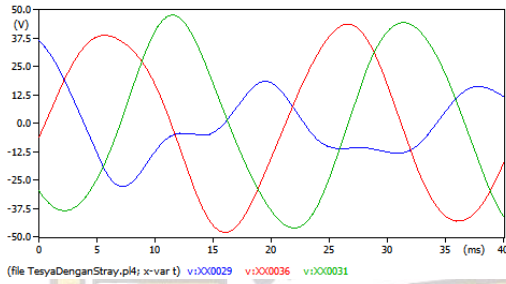
(e)



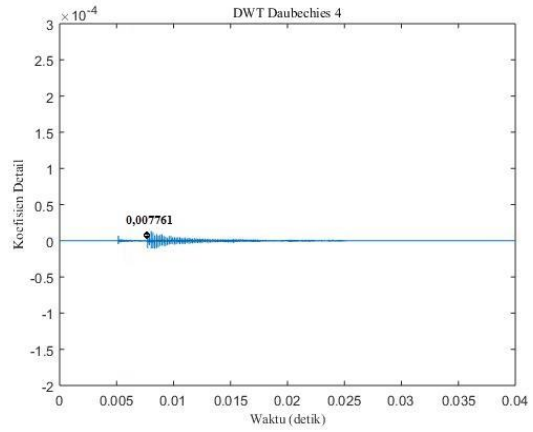
(f)

**Gambar B. 5** Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

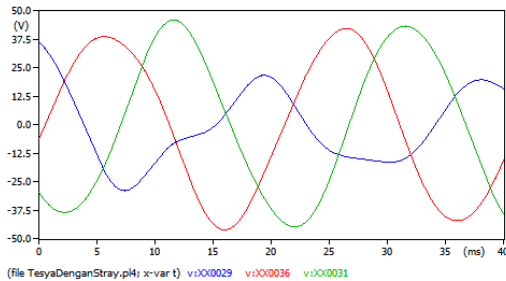
**c. Jumlah sampling 1 MHz**



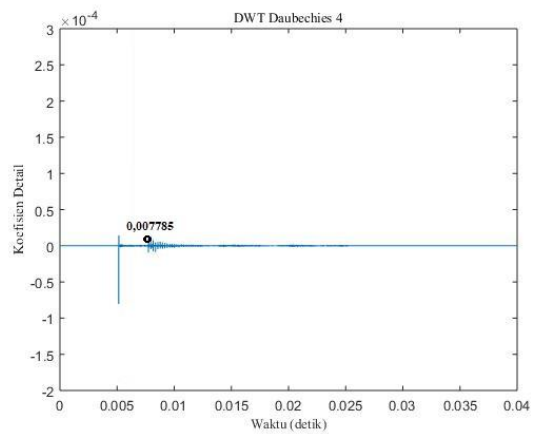
(a)



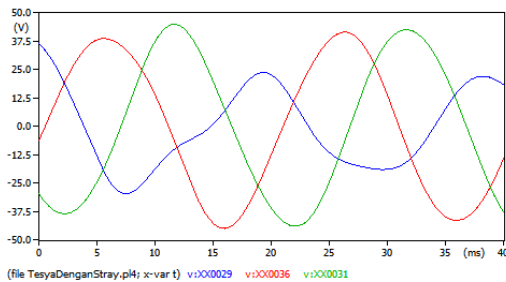
(b)



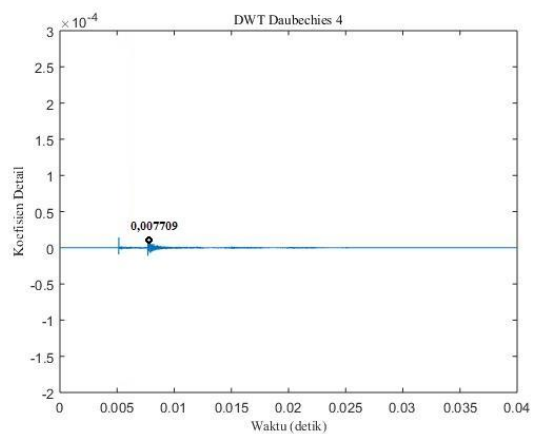
(c)



(d)



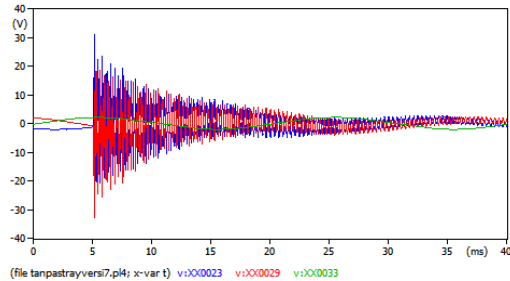
(e)



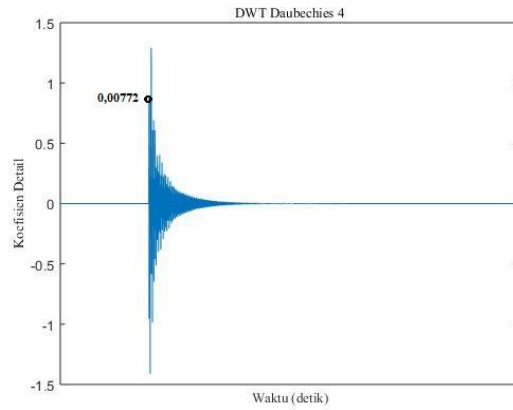
(f)

**Gambar B. 6** Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

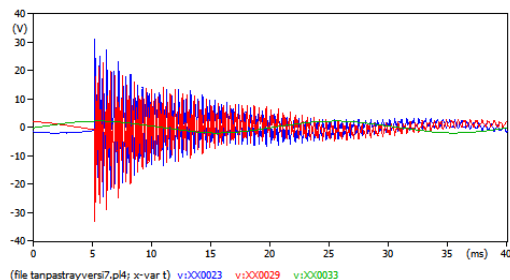
**B. 4 Gangguan Dua Fasa**  
**1. Tanpa Stray Capacitance**  
**a. Jumlah sampling 10 kHz**



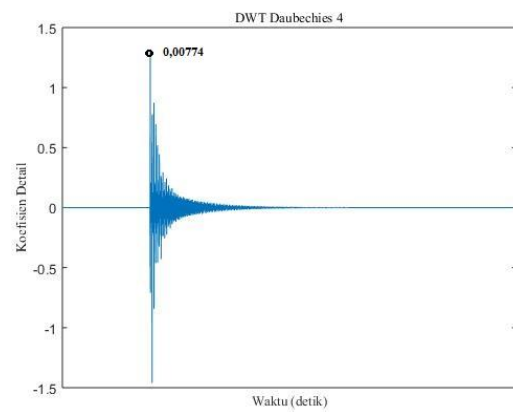
(a)



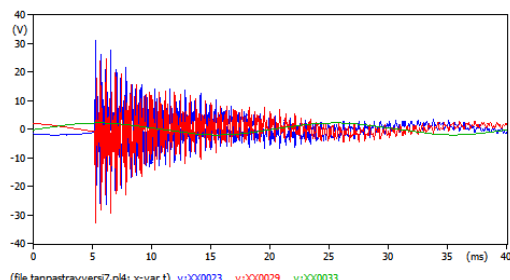
(b)



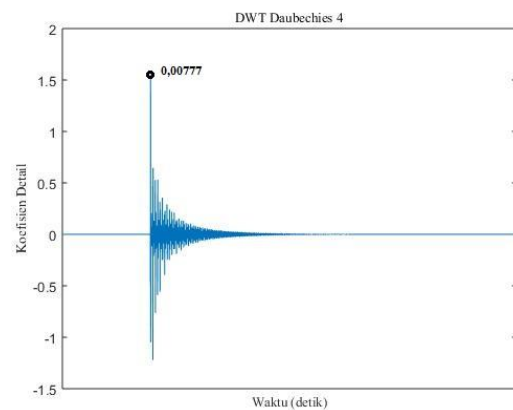
(c)



(d)



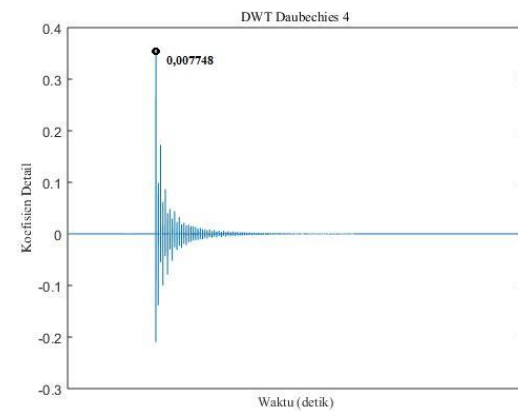
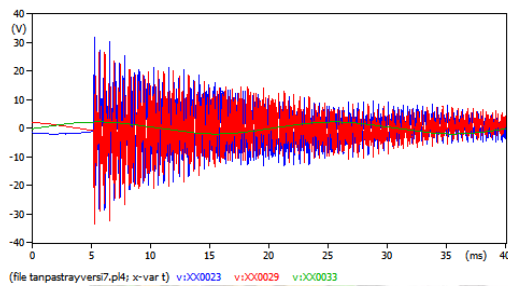
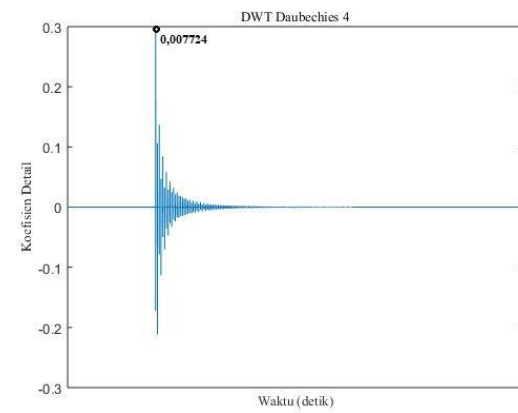
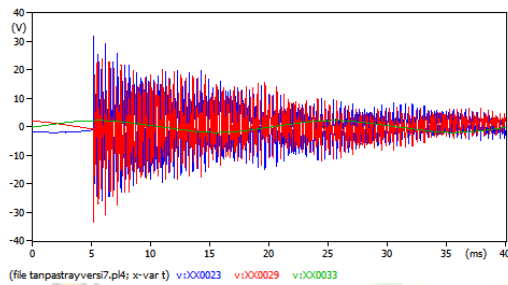
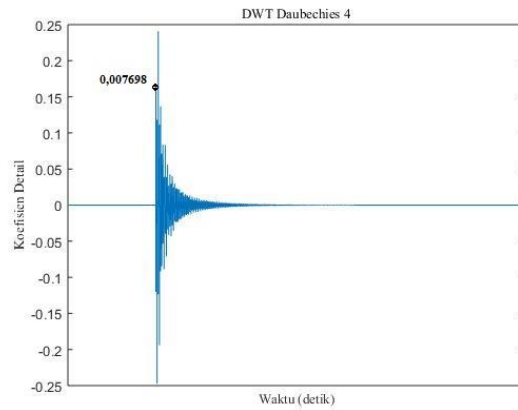
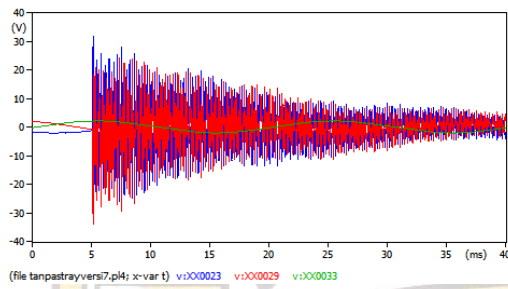
(e)



(f)

**Gambar B. 7** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

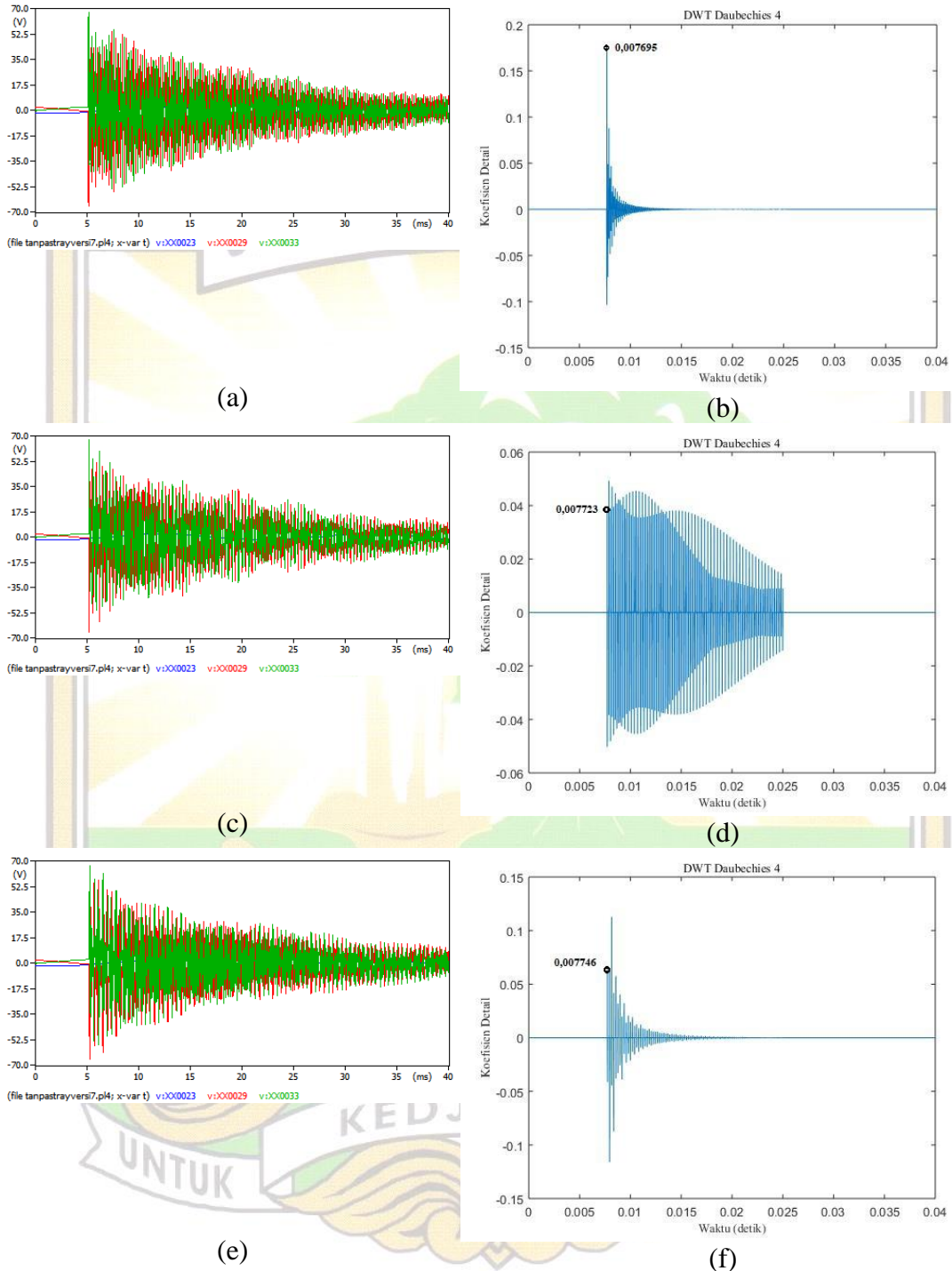
**b. Jumlah sampling 500 kHz**



**Gambar B. 8** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km



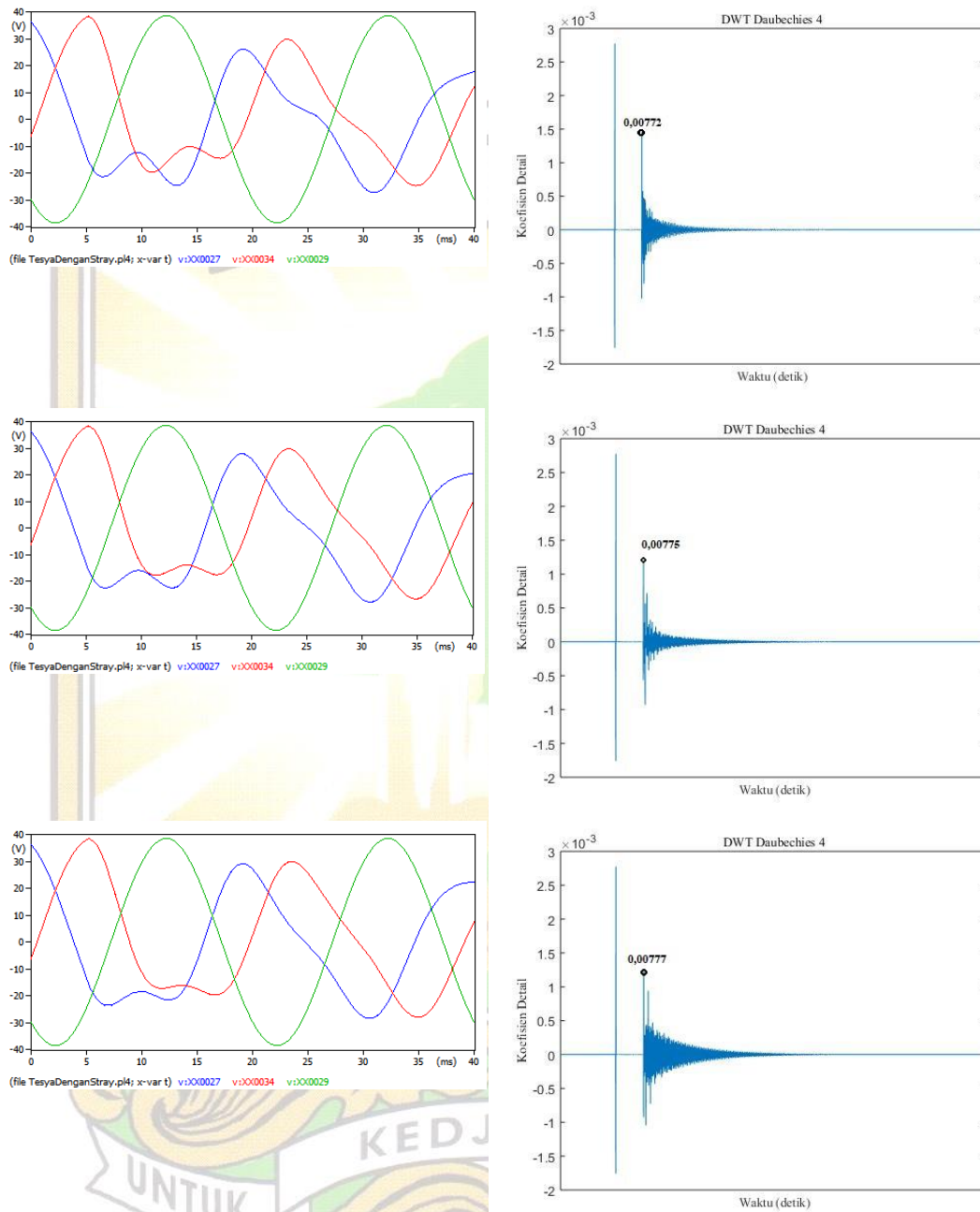
**c. Jumlah sampling 1 MHz**



**Gambar B. 9** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

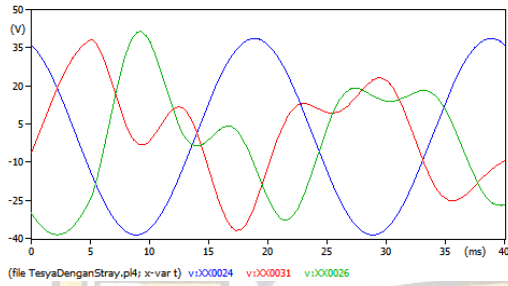
## 2. Dengan Stray Capacitance

### a. Jumlah sampling 10 kHz

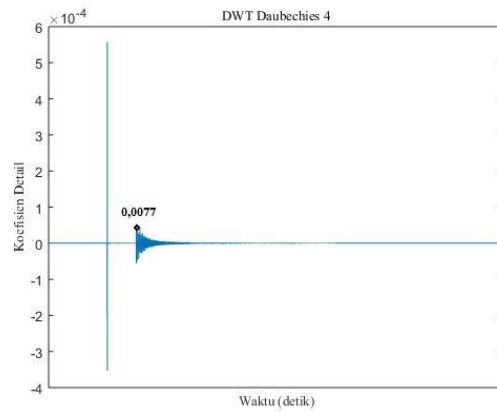


**Gambar B. 10** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

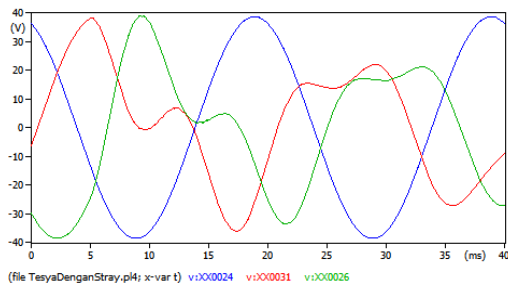
**b. Jumlah sampling 500 kHz**



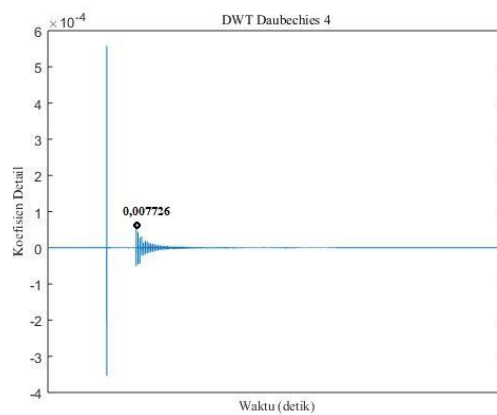
(a)



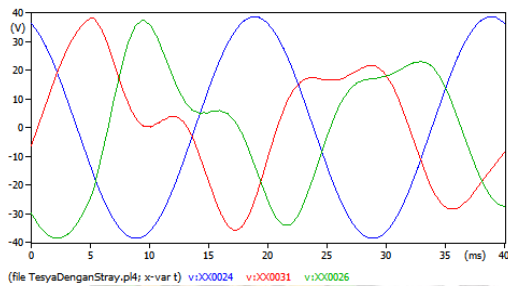
(b)



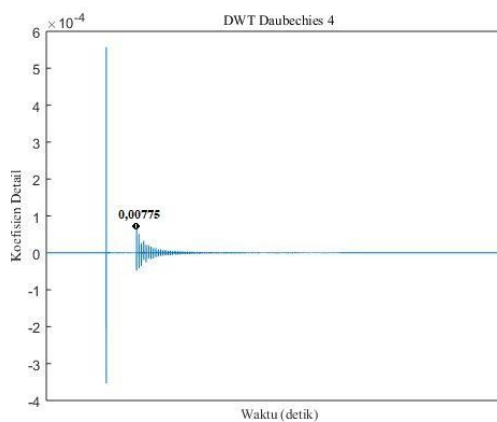
(c)



(d)



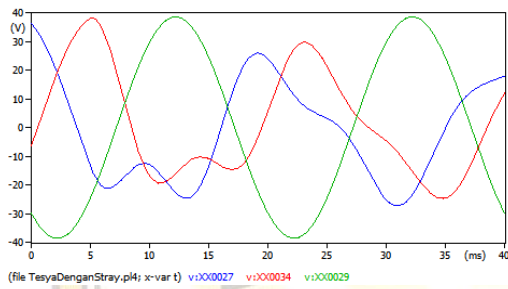
(e)



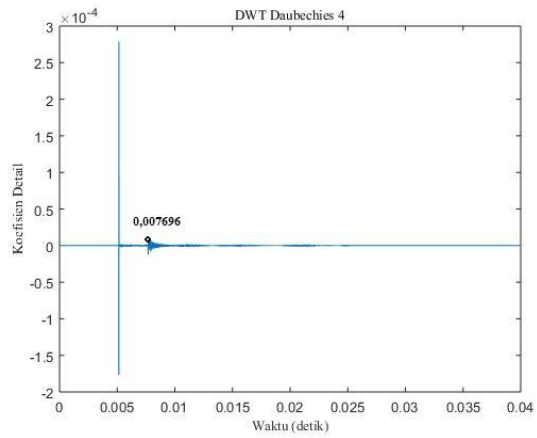
(f)

**Gambar B. 11** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

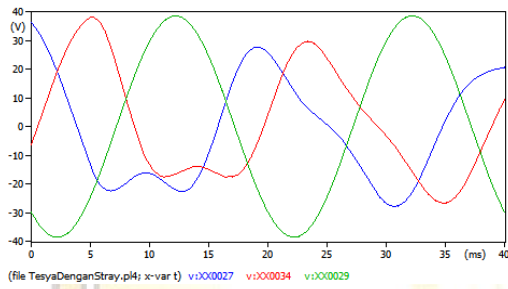
**c. Jumlah sampling 1 MHz**



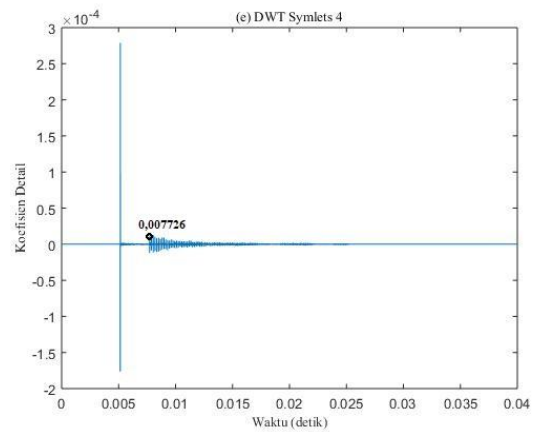
(a)



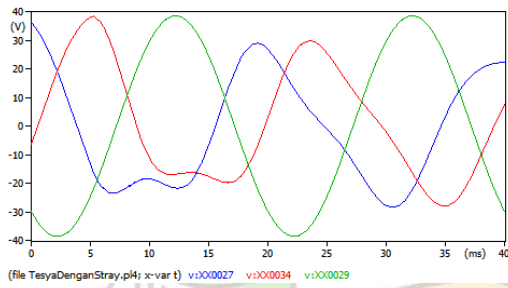
(b)



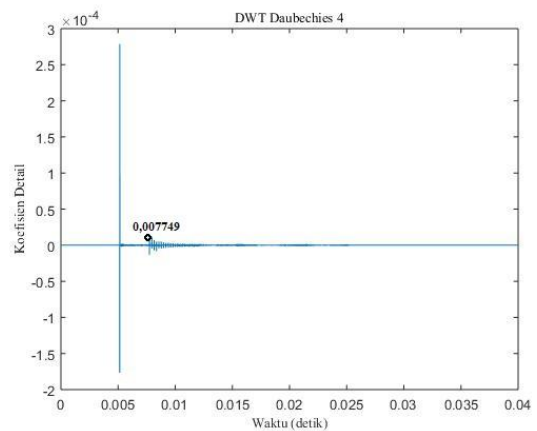
(c)



(d)



(e)



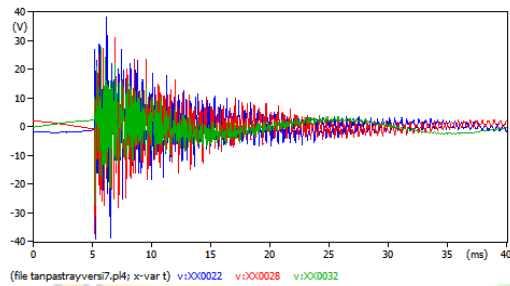
(f)

**Gambar B. 12** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

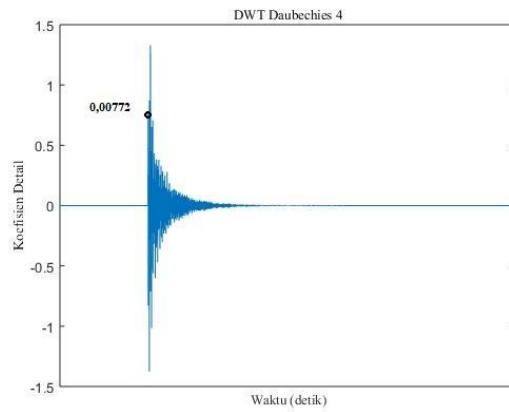
## B. 5 Gangguan Dua Fasa Tanah

### 1. Tanpa Stray Capacitance

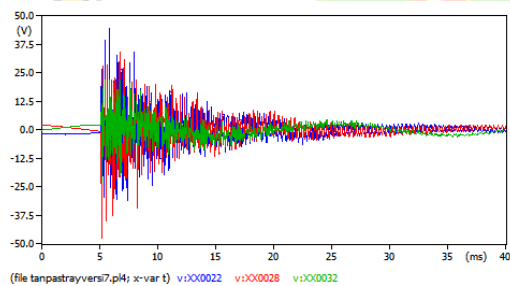
#### a. Jumlah sampling 10 kHz



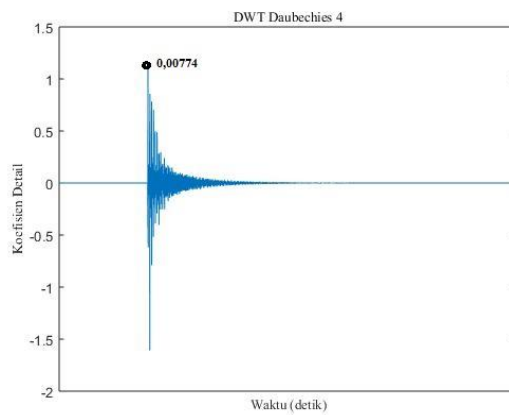
(a)



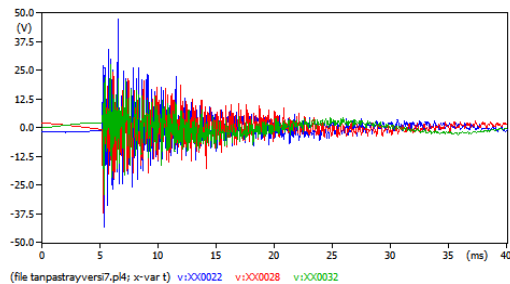
(b)



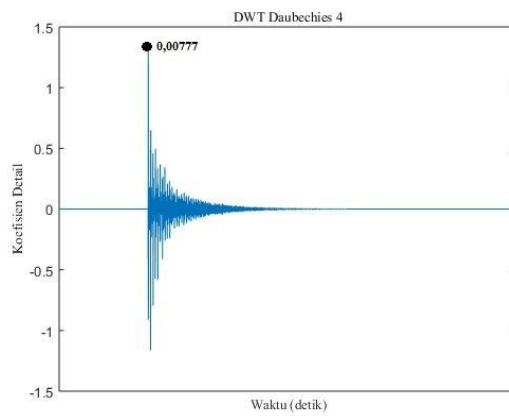
(c)



(d)



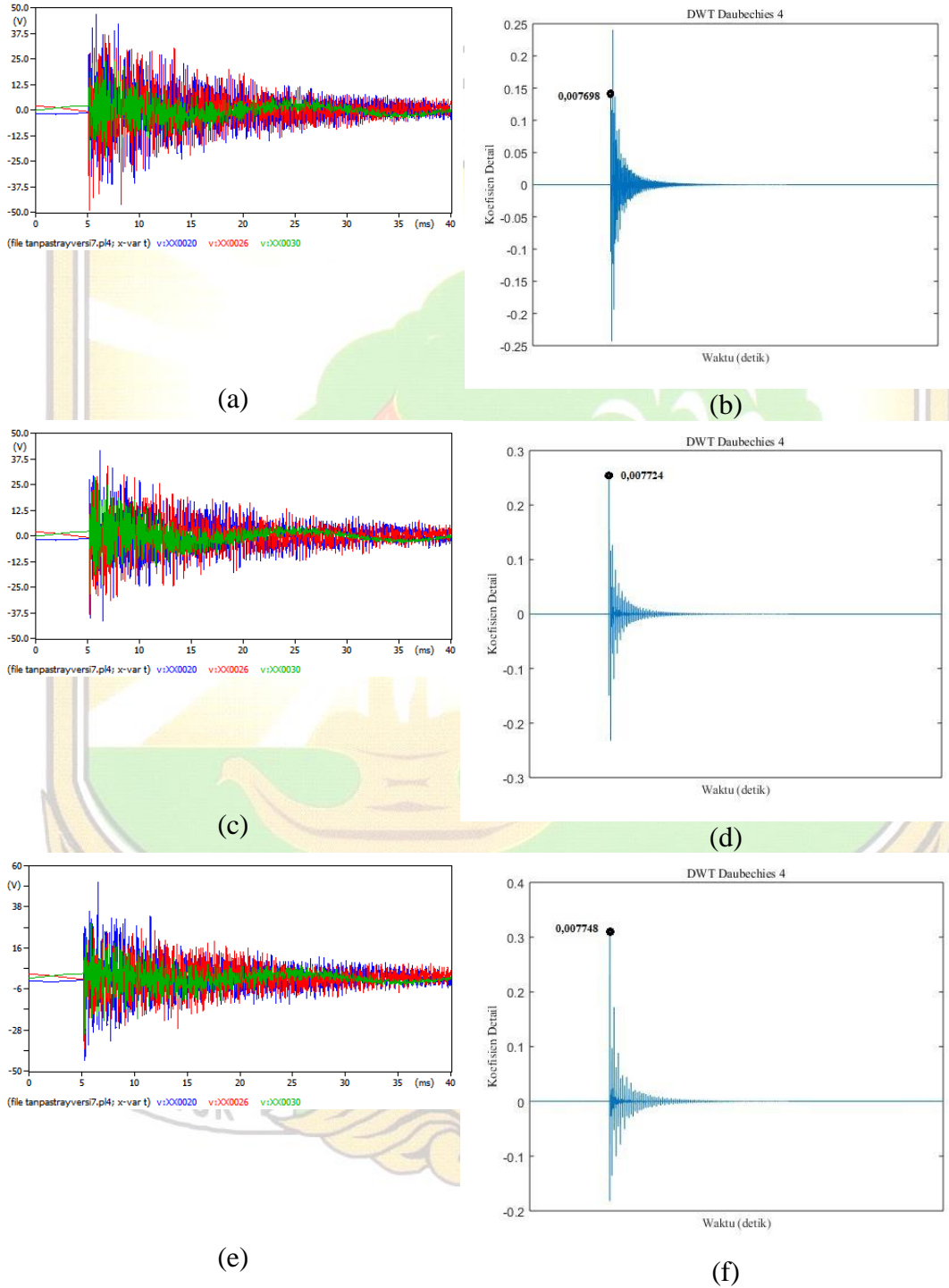
(e)



(f)

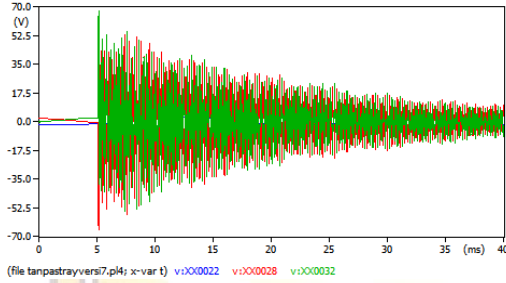
**Gambar B. 13** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

**b. Jumlah sampling 500 kHz**

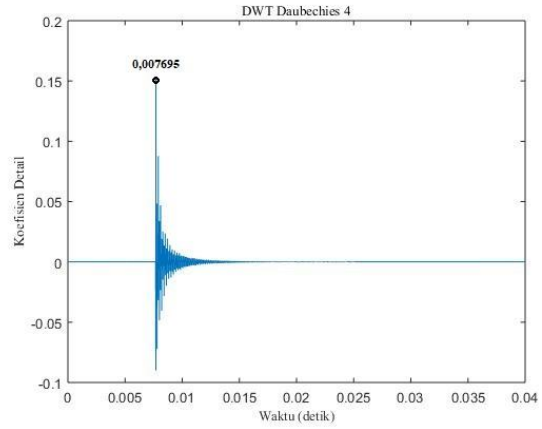


**Gambar B. 14** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

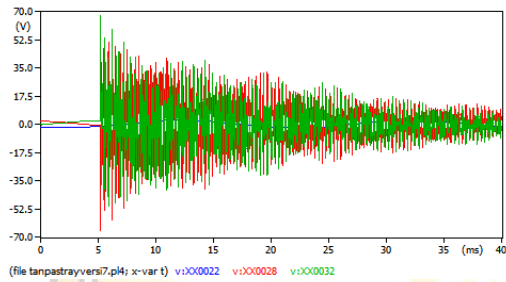
**c. Jumlah sampling 1 MHz**



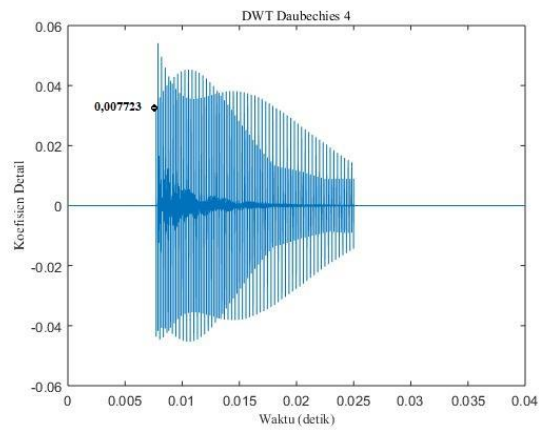
(a)



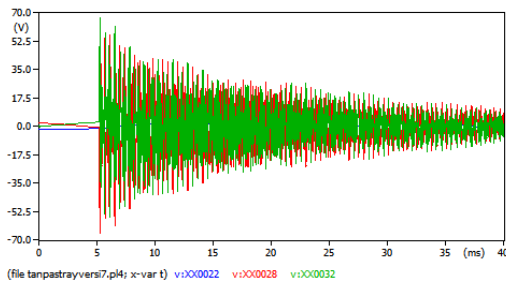
(b)



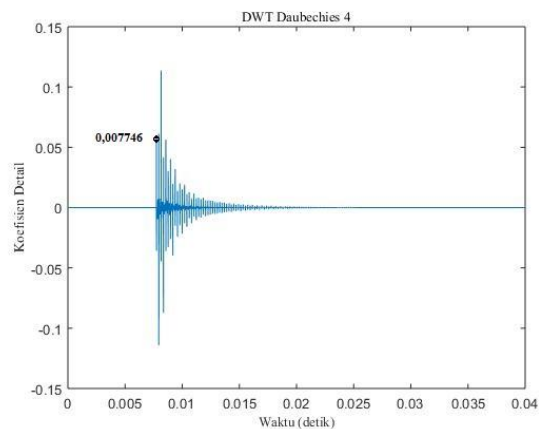
(c)



(d)



(e)

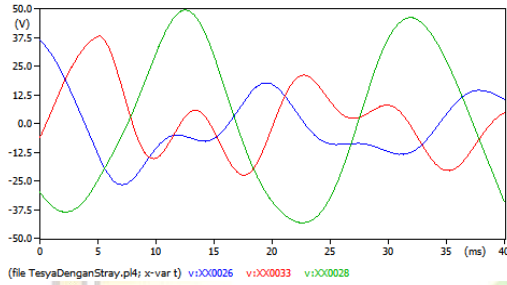


(f)

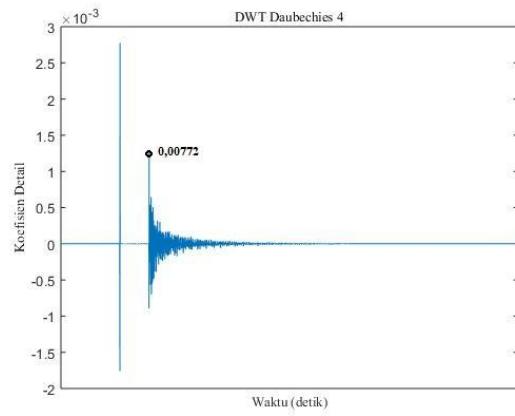
**Gambar B. 15** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

## 2. Dengan Stray Capacitance

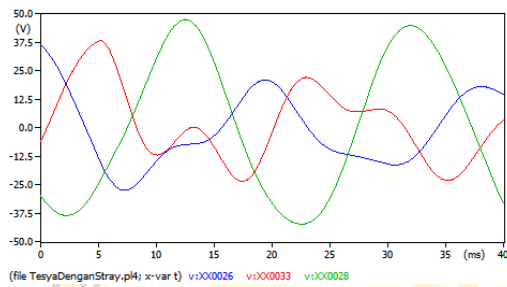
### a. Jumlah sampling 10 kHz



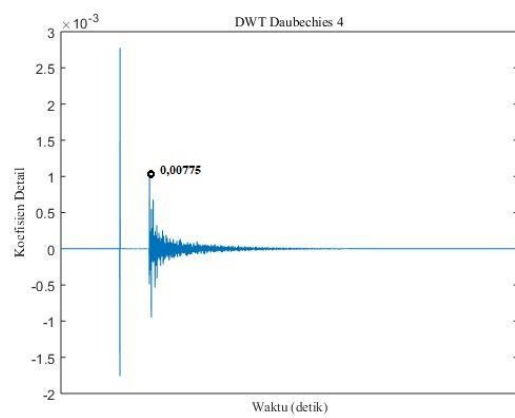
(a)



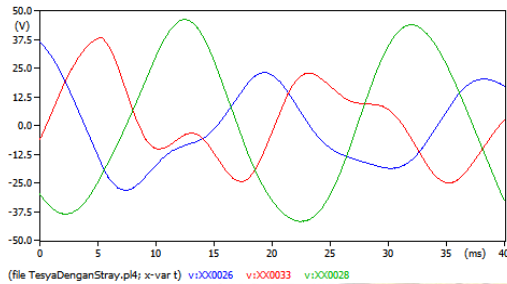
(b)



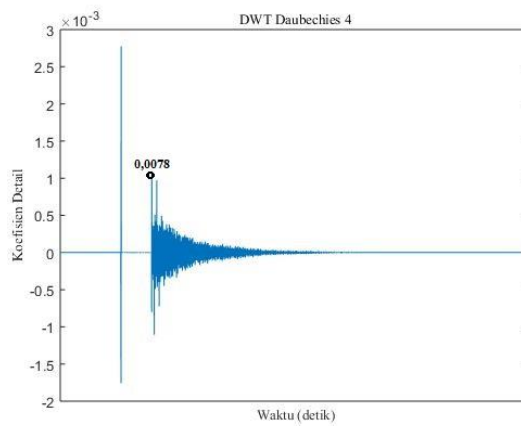
(c)



(d)



(e)

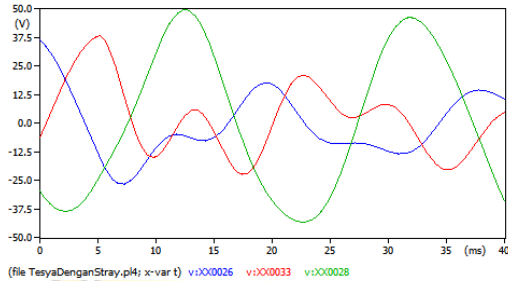


(f)

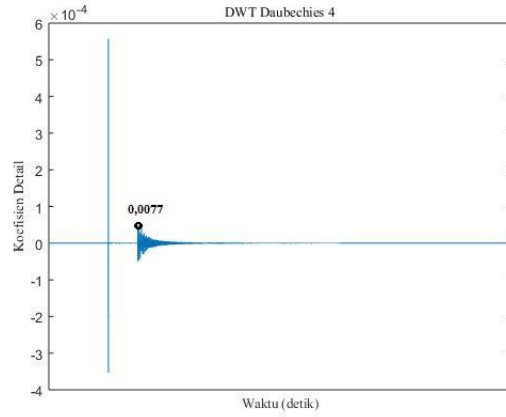


**Gambar B. 16** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

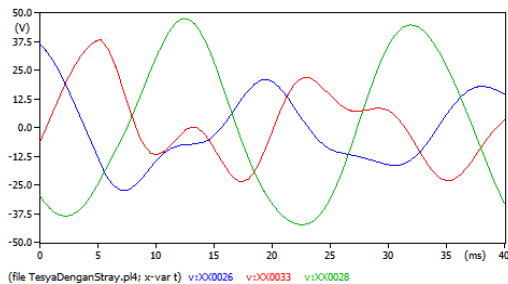
**b. Jumlah sampling 500 kHz**



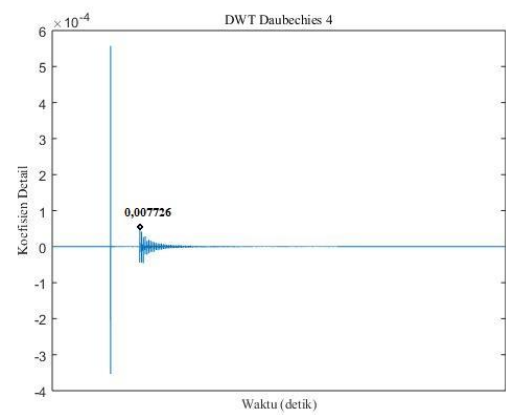
(a)



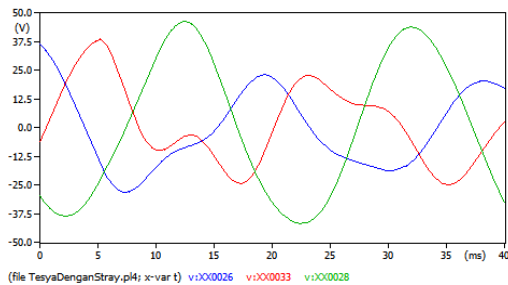
(b)



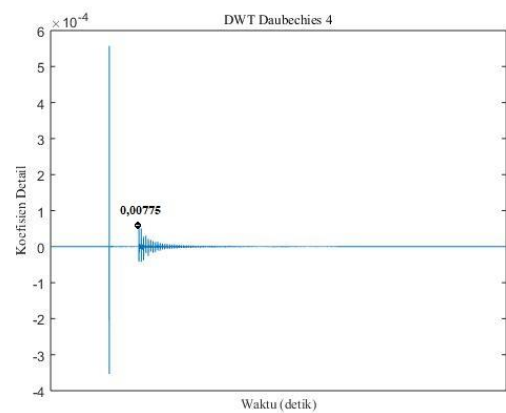
(c)



(d)



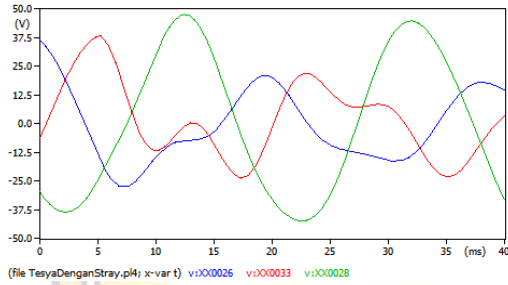
(e)



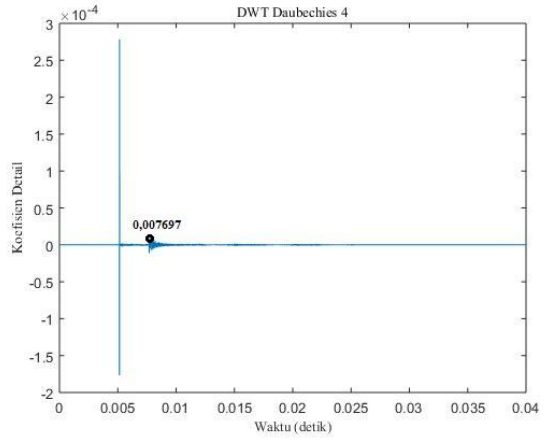
(f)

**Gambar B. 17** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

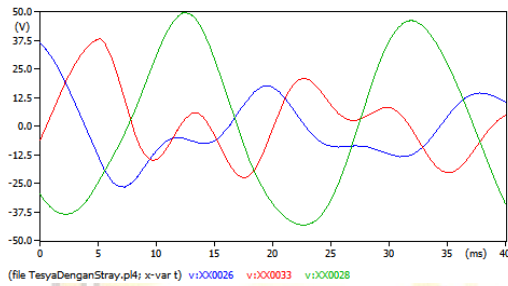
**c. Jumlah sampling 1 MHz**



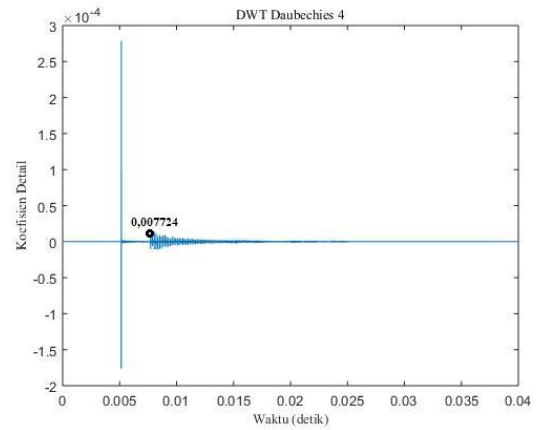
(a)



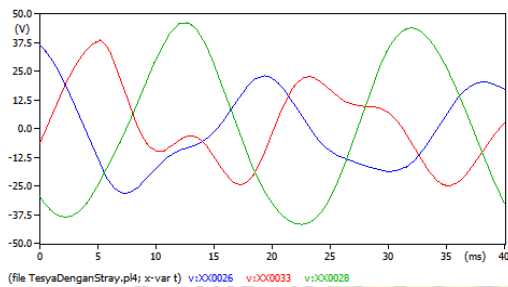
(b)



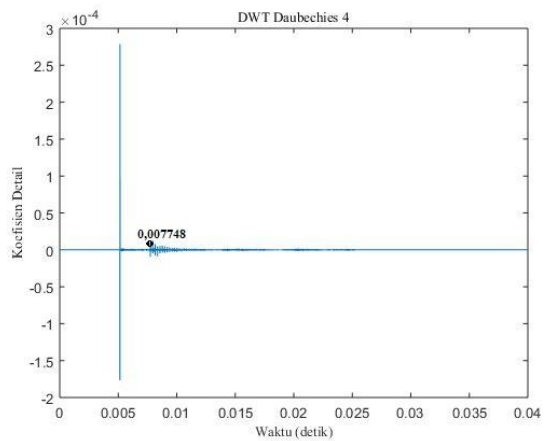
(c)



(d)



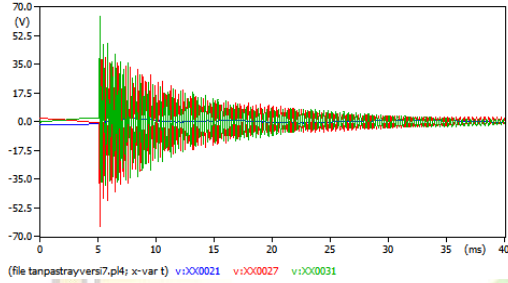
(e)



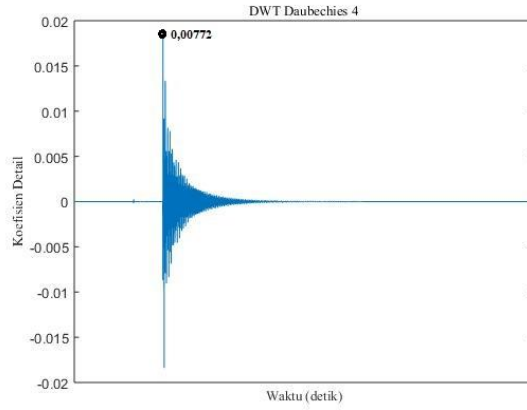
(f)

**Gambar B. 18** Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

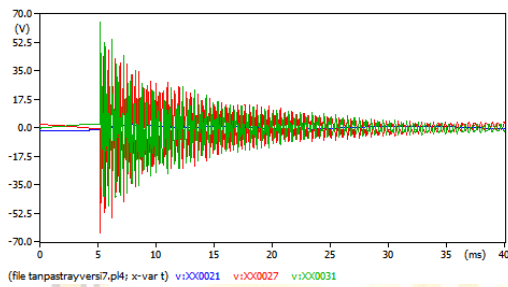
**B. 6 Gangguan Tiga Fasa**  
**1. Tanpa Stray Capacitance**  
**a. Jumlah sampling 10 kHz**



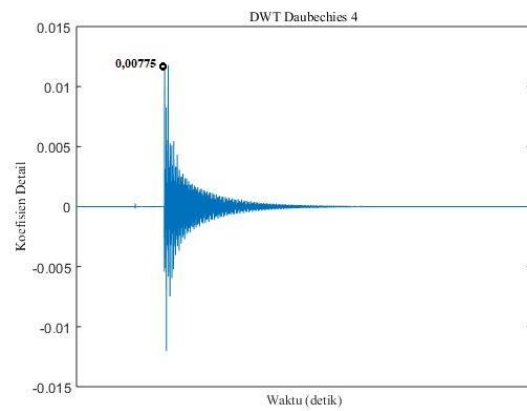
(a)



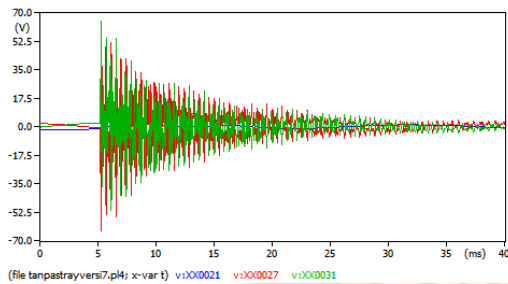
(b)



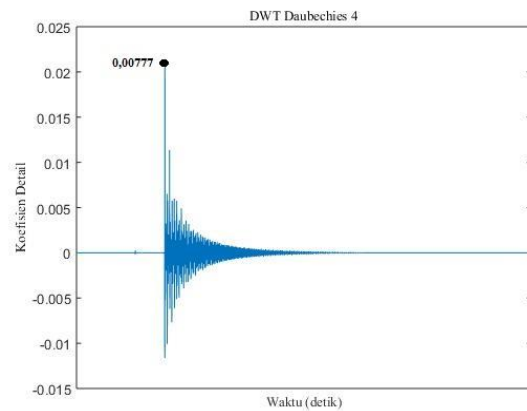
(c)



(d)



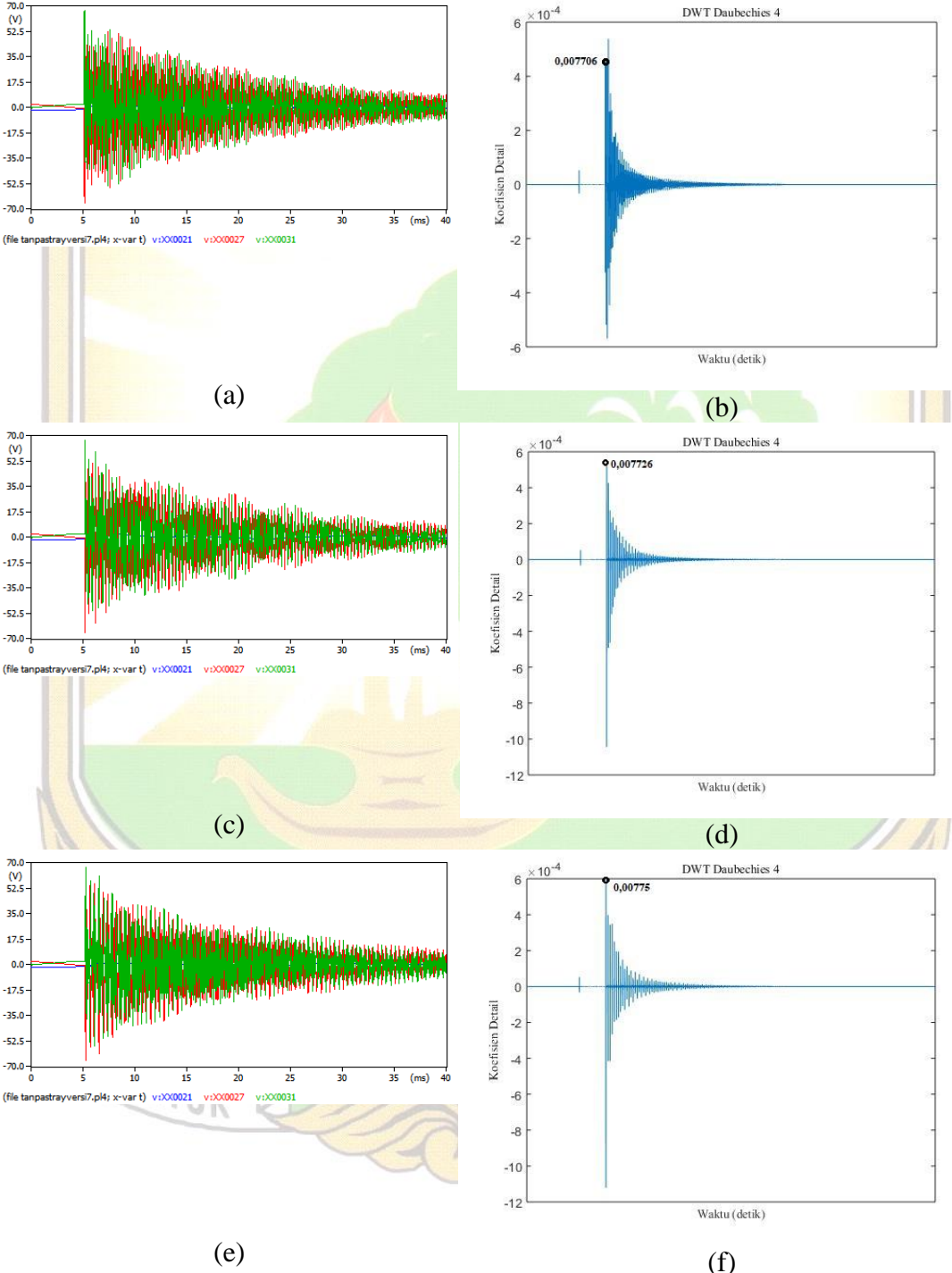
(e)



(f)

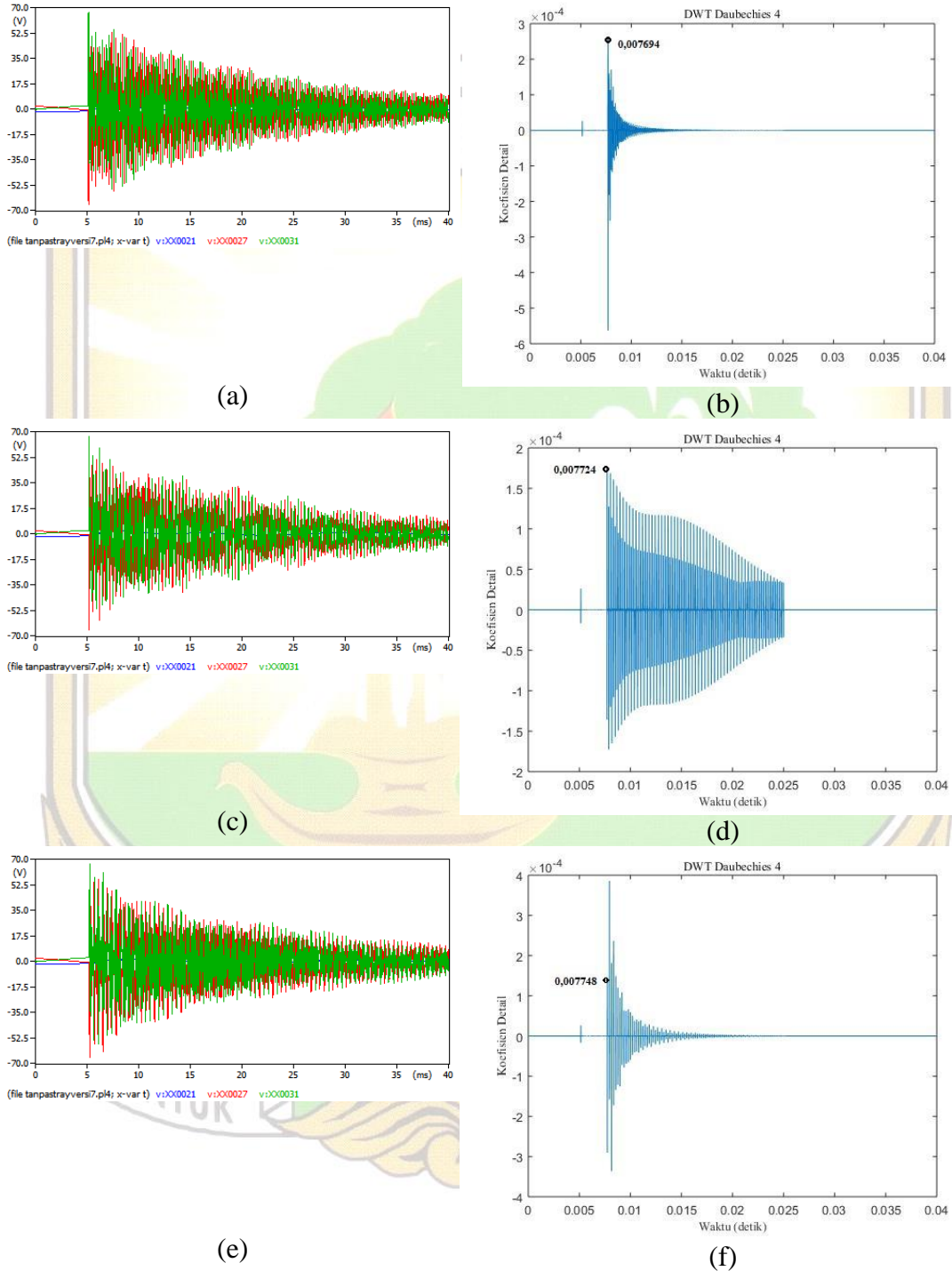
**Gambar B. 19** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

**b. Jumlah sampling 500 kHz**



**Gambar B. 20** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

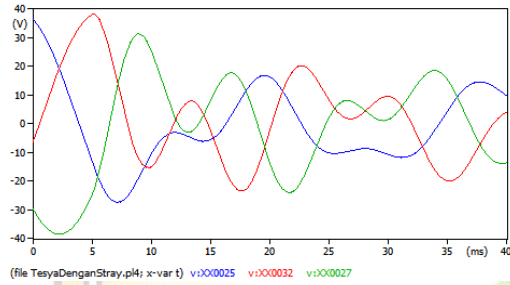
**c. Jumlah sampling 1 MHz**



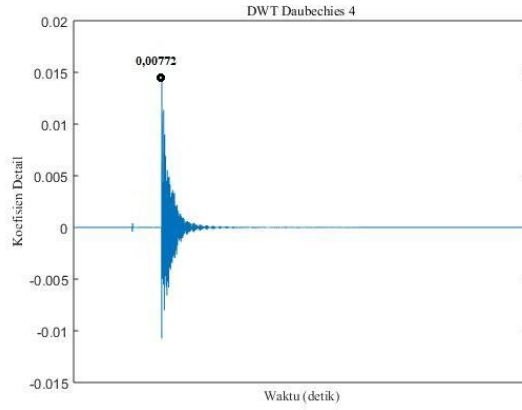
**Gambar B. 21** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

## 2. Dengan Stray Capacitance

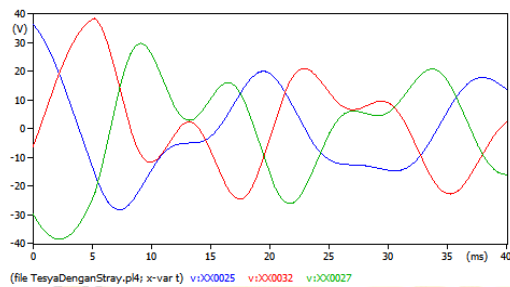
### a. Jumlah sampling 10 kHz



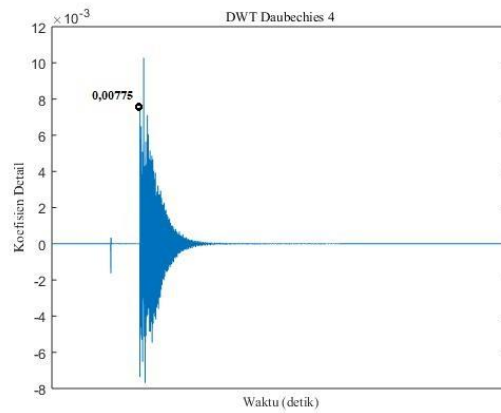
(a)



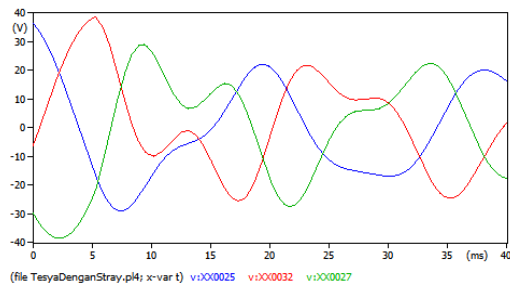
(b)



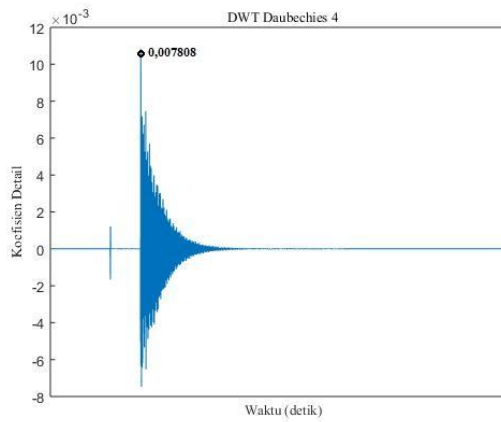
(c)



(d)



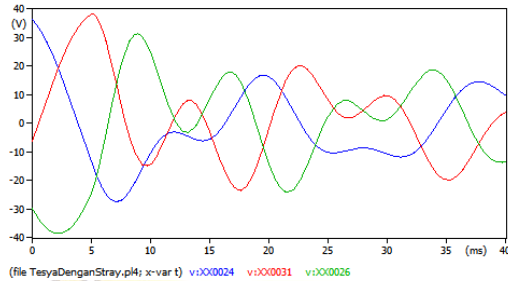
(e)



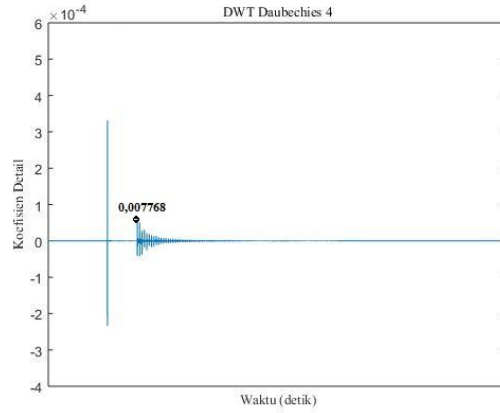
(f)

**Gambar B. 22** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

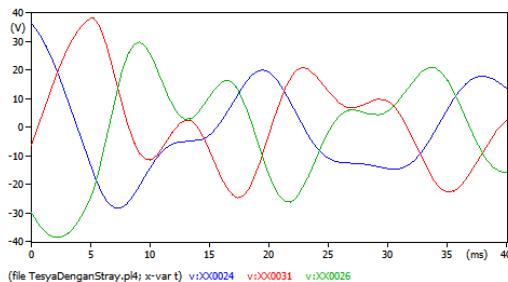
**b. Jumlah sampling 500 kHz**



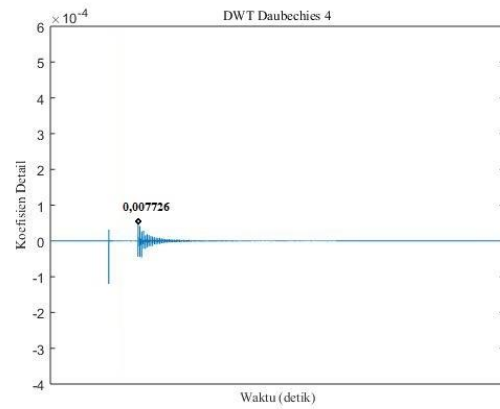
(a)



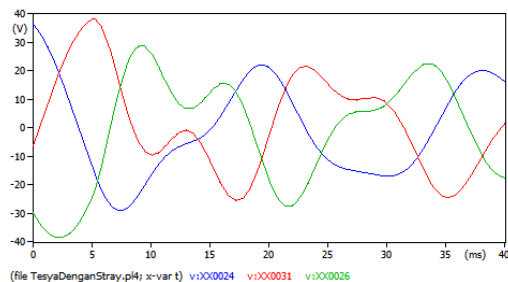
(b)



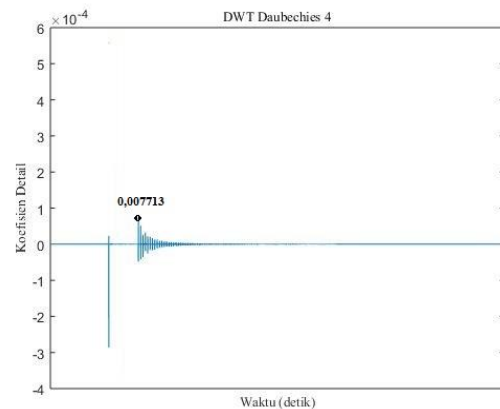
(c)



(d)



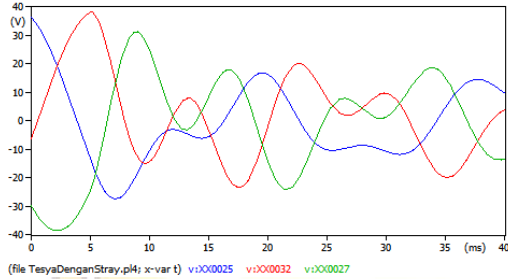
(e)



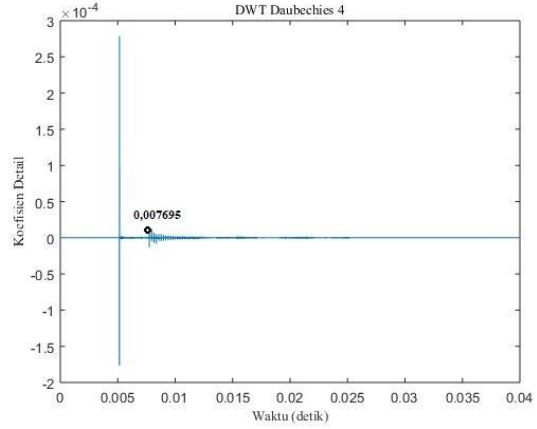
(f)

**Gambar B. 23** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

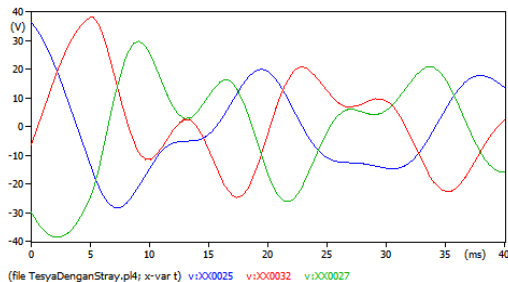
**c. Jumlah sampling 1 MHz**



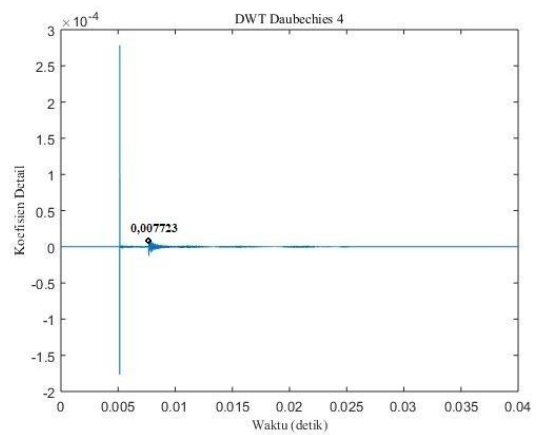
(a)



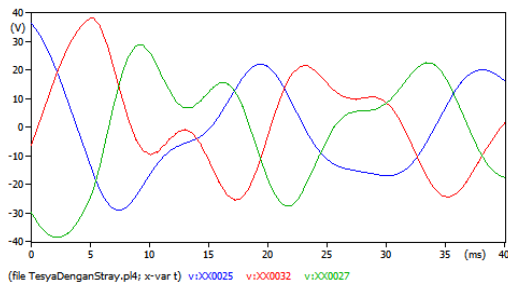
(b)



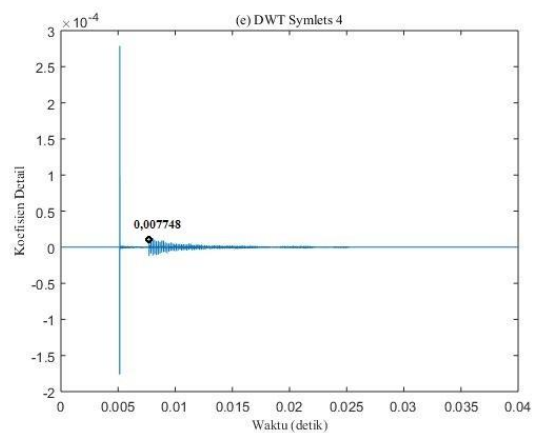
(c)



(d)



(e)



(f)

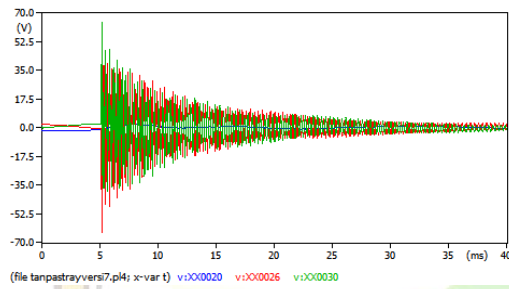
**Gambar B. 24** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km



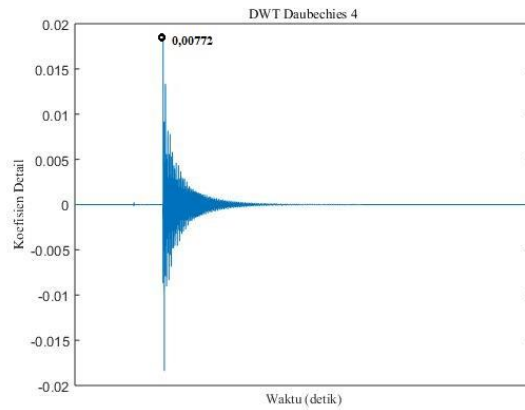
## B. 7 Gangguan Tiga Fasa Tanah

### 1. Tanpa Stray Capacitance

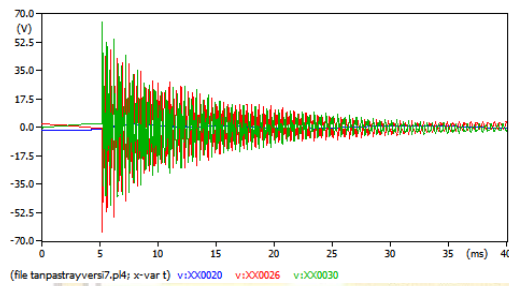
#### a. Jumlah sampling 10 kHz



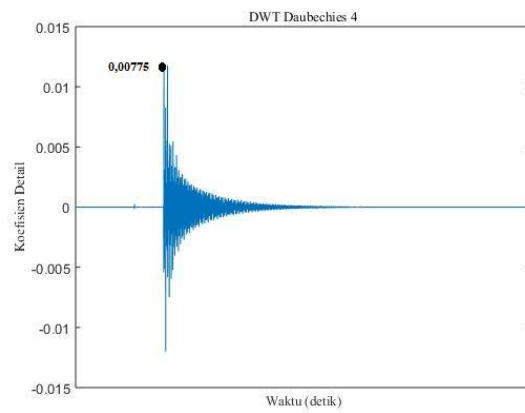
(a)



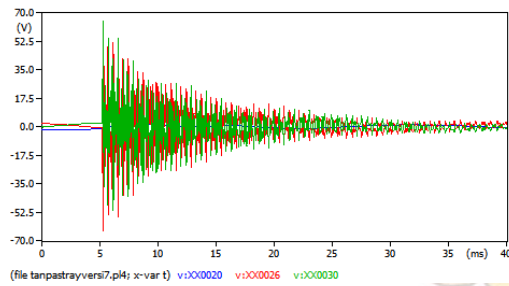
(b)



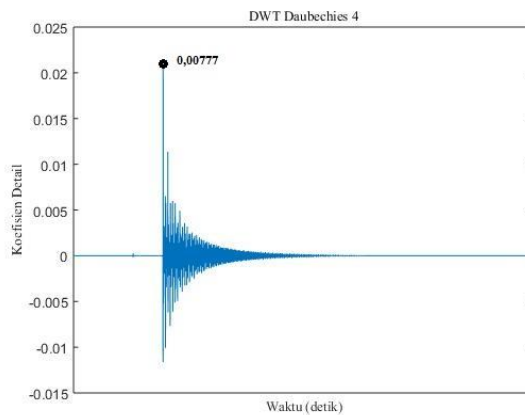
(c)



(d)



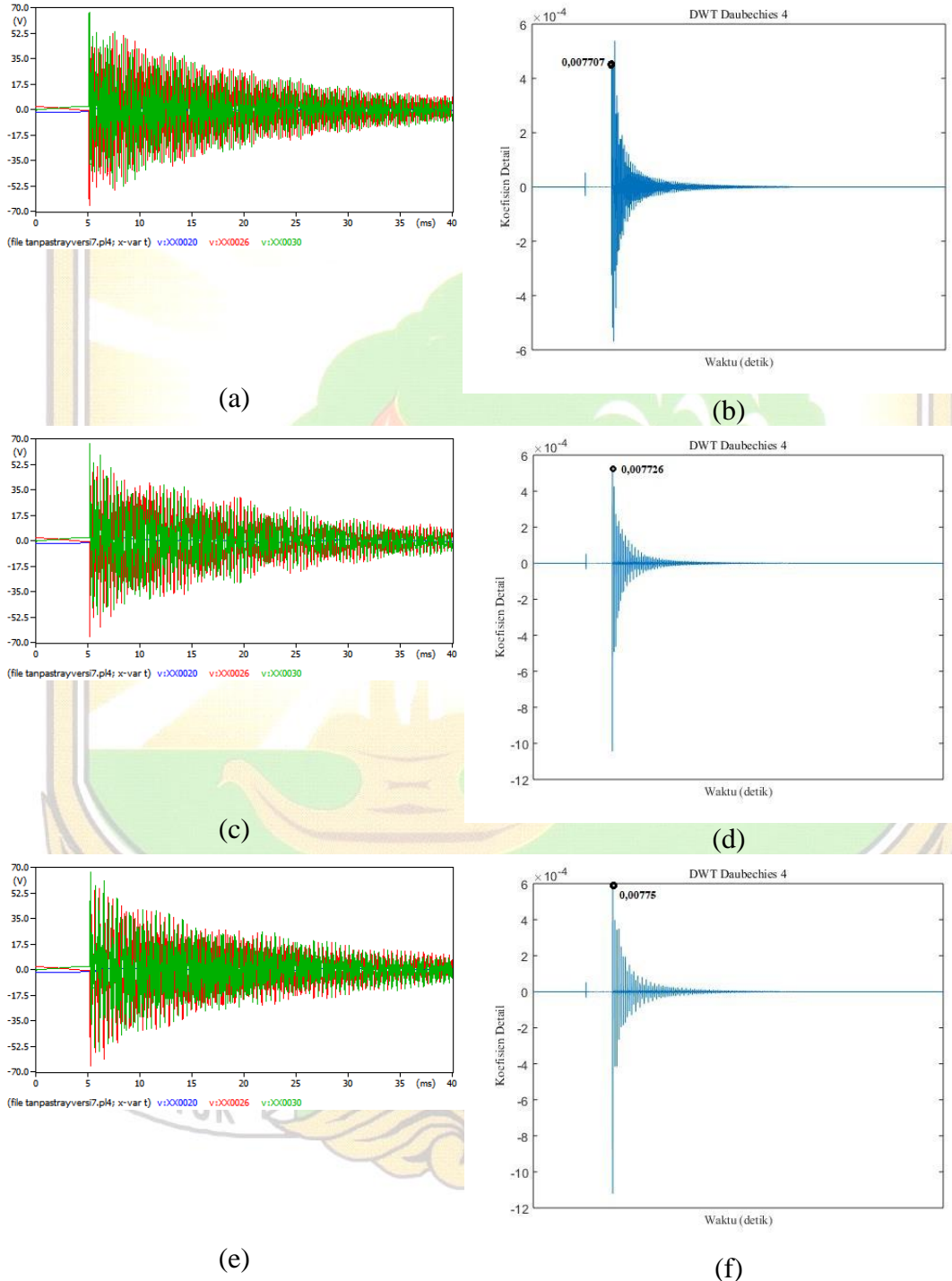
(e)



(f)

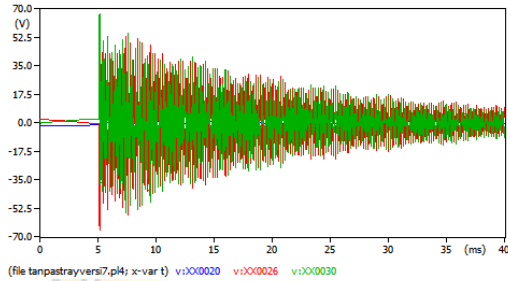
**Gambar B. 25** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

**b. Jumlah sampling 500 kHz**

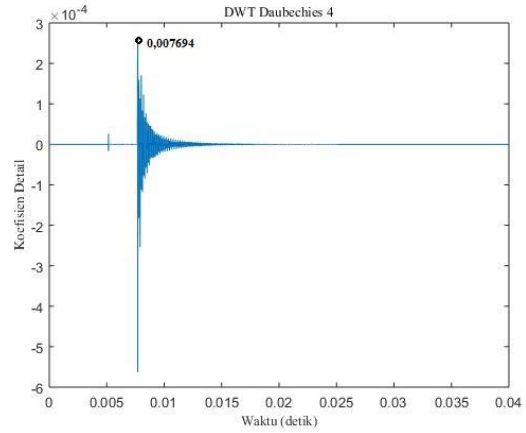


**Gambar B. 26** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

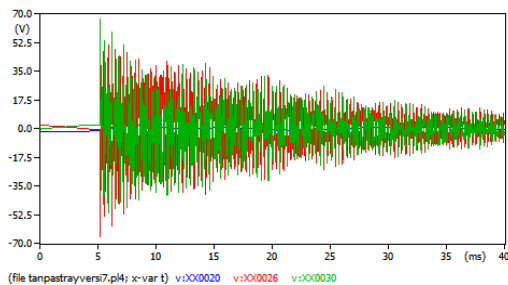
**c. Jumlah sampling 1 MHz**



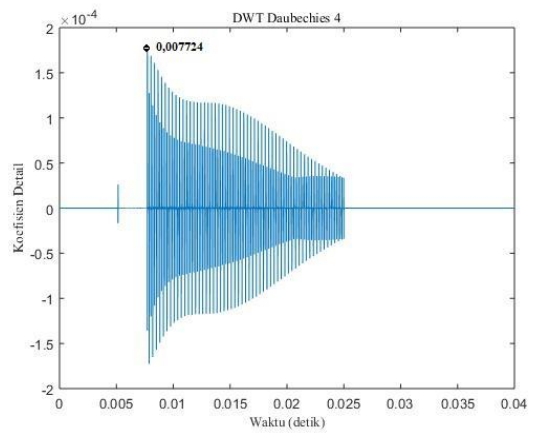
(a)



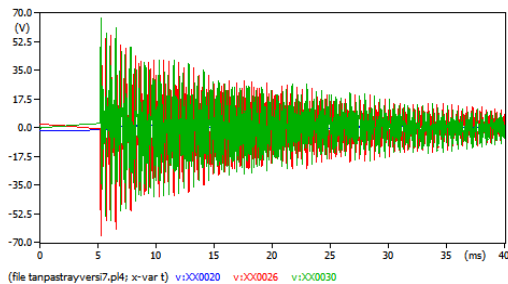
(b)



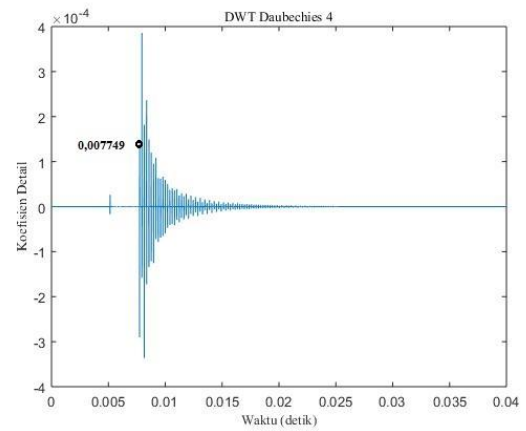
(c)



(d)



(e)

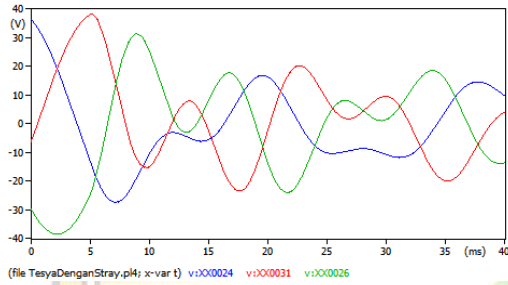


(f)

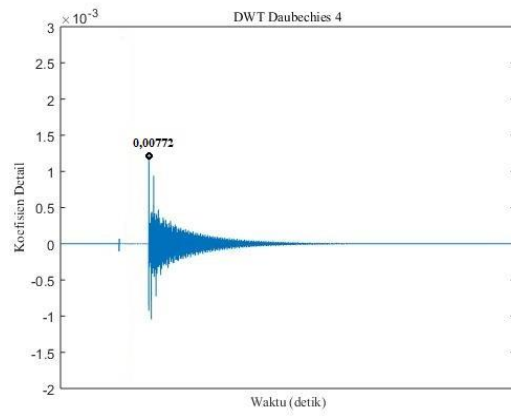
**Gambar B. 27** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

## 2. Dengan Stray Capacitance

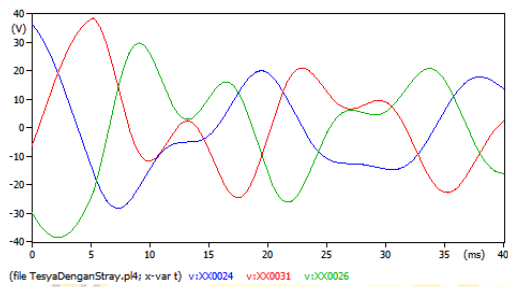
### a. Jumlah sampling 10 kHz



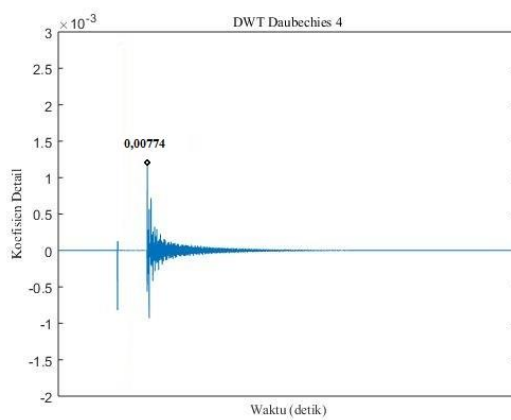
(a)



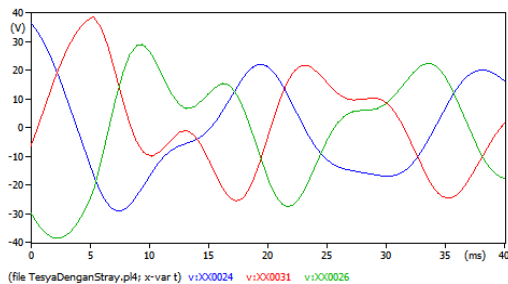
(b)



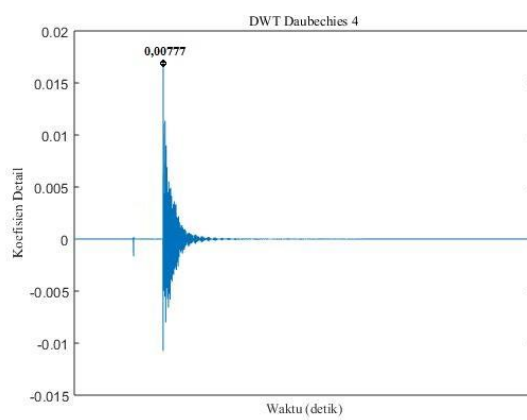
(c)



(d)



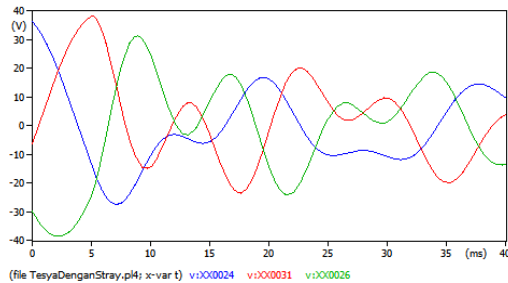
(e)



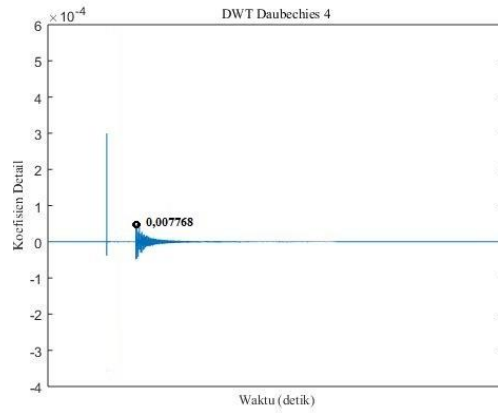
(f)

**Gambar B. 28** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

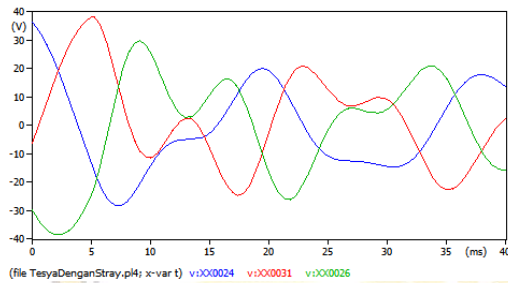
**b. Jumlah sampling 500 kHz**



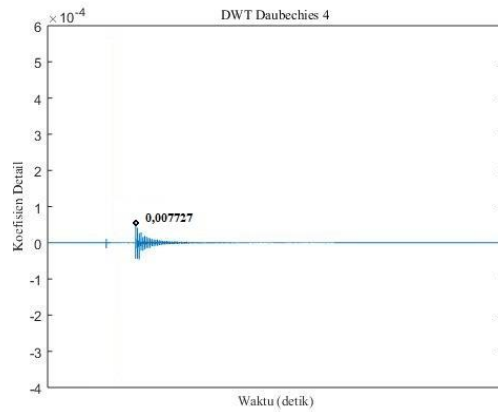
(a)



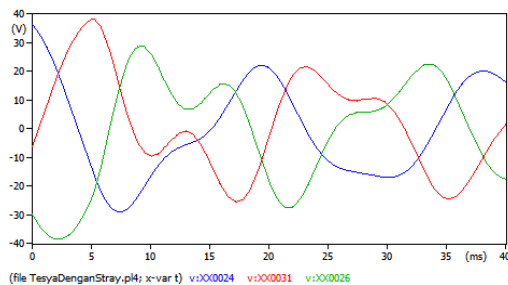
(b)



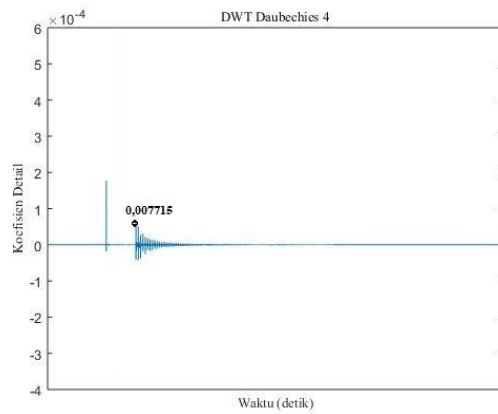
(c)



(d)



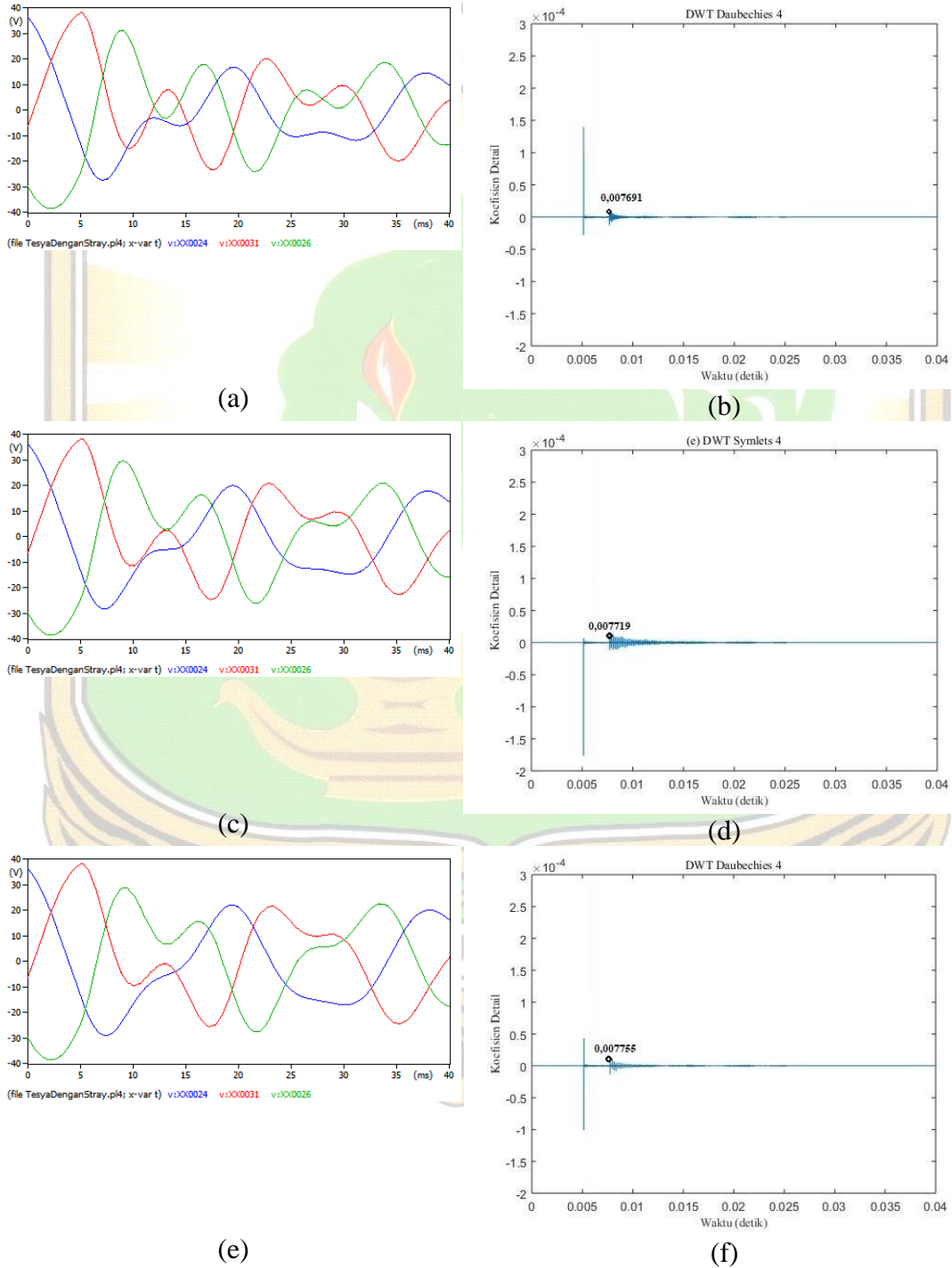
(e)



(f)

**Gambar B. 29** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

**c. Jumlah sampling 1 MHz**

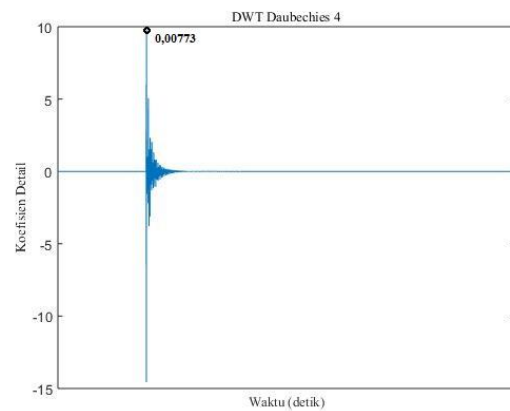
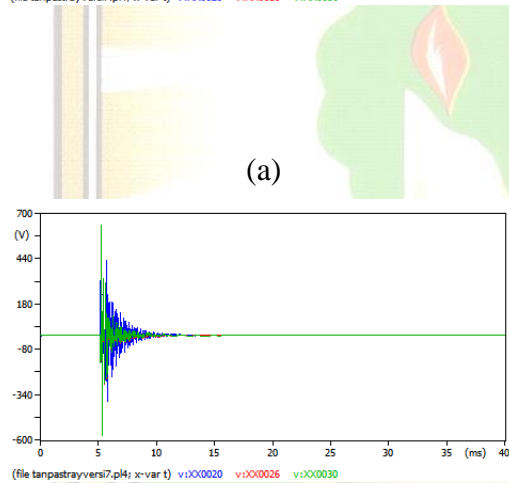
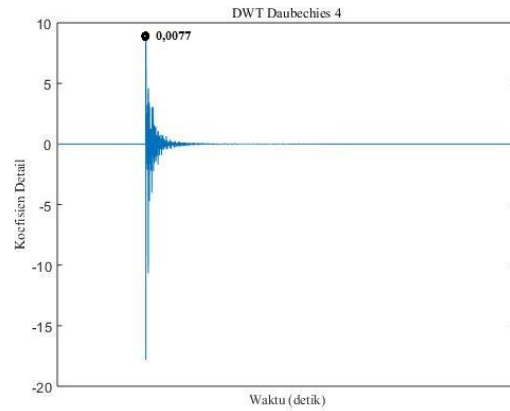
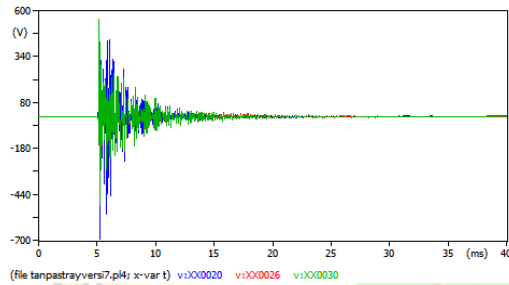


**Gambar B. 30** Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Tanah Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

## B. 8 Gangguan Surja Petir

### 1. Tanpa Stray Capacitance

#### a. Jumlah sampling 10 kHz

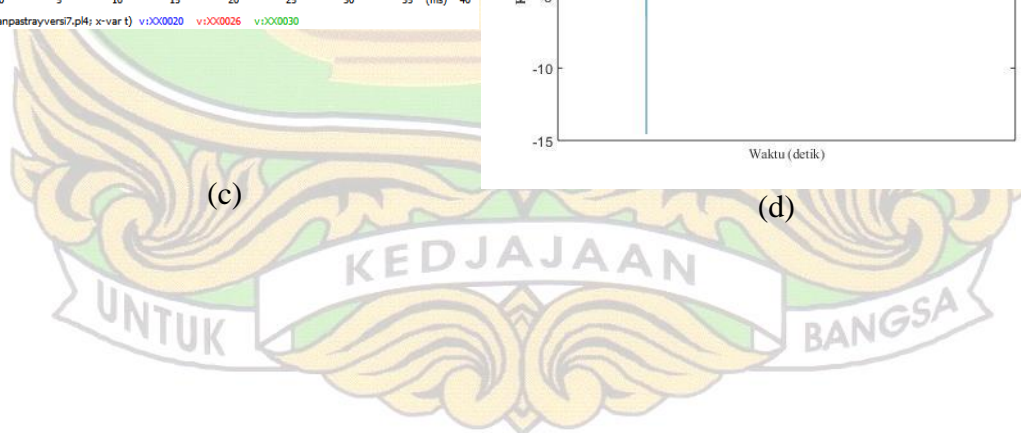


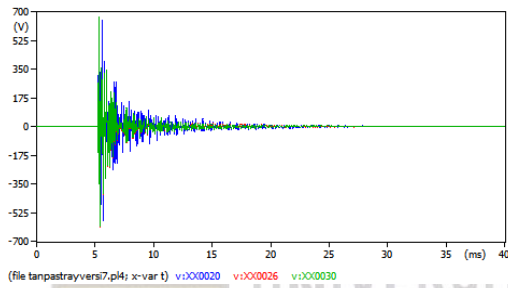
(a)

(b)

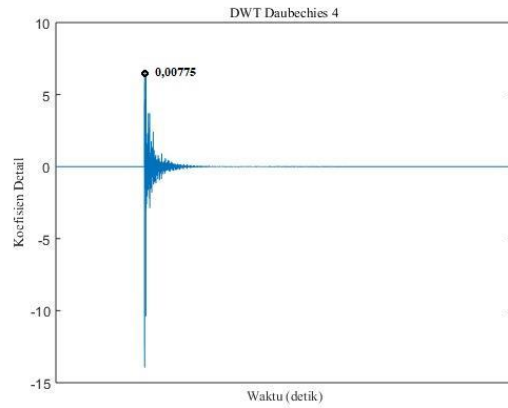
(c)

(d)





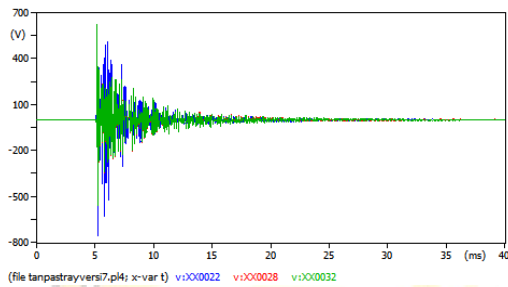
(e)



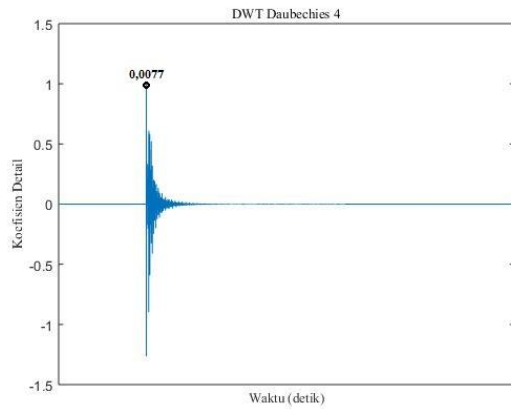
(f)

**Gambar B. 31** Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Tanpa Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

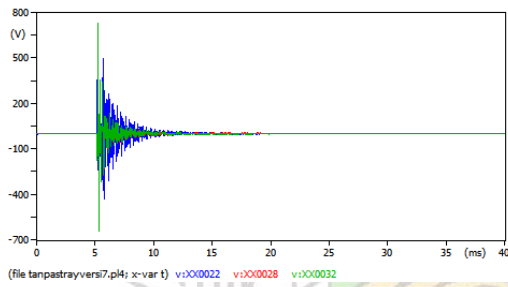
**b. Jumlah sampling 500 kHz**



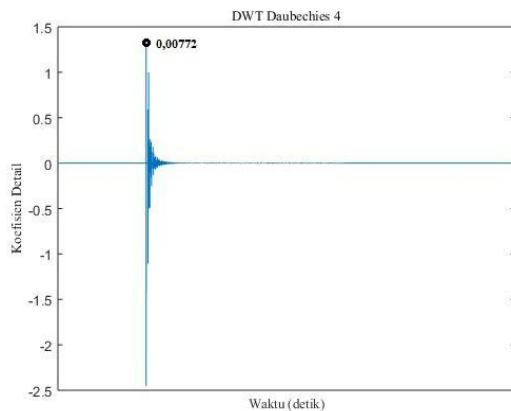
(a)



(b)

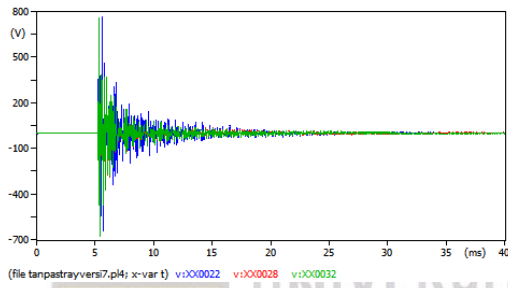


(c)

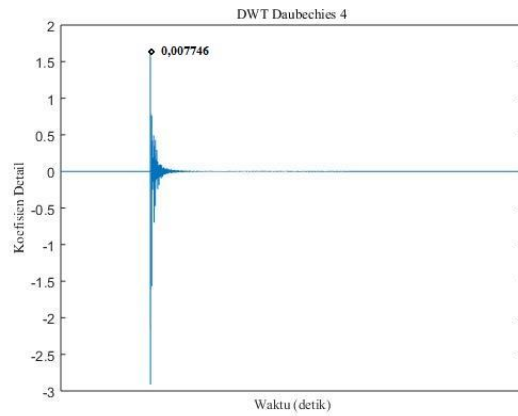


(d)





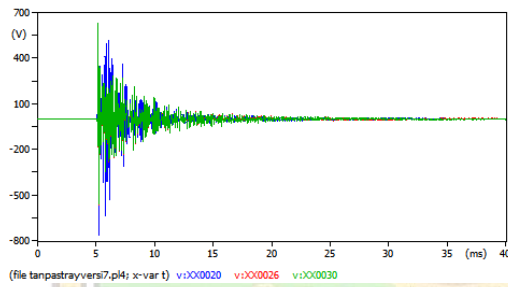
(e)



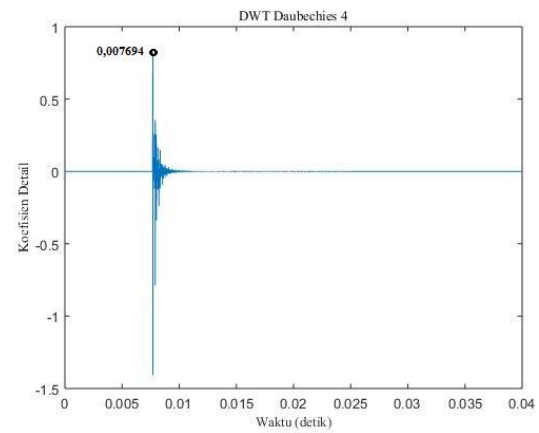
(f)

**Gambar B. 32** Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Tanpa Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

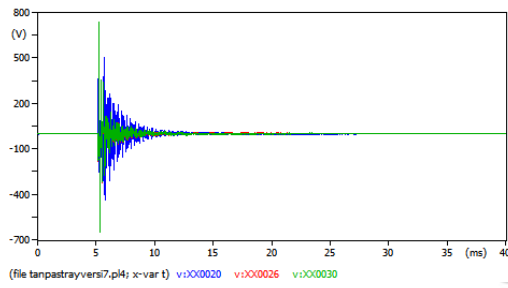
**c. Jumlah sampling 1 MHz**



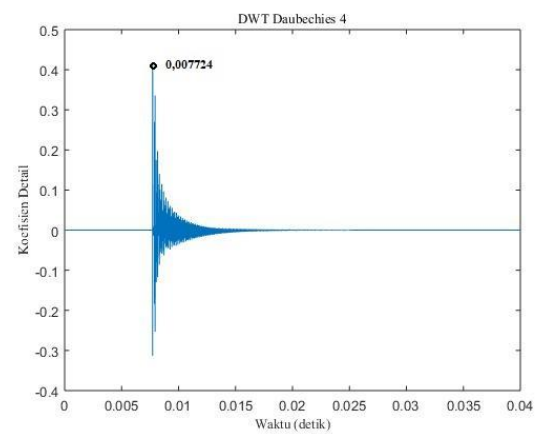
(a)

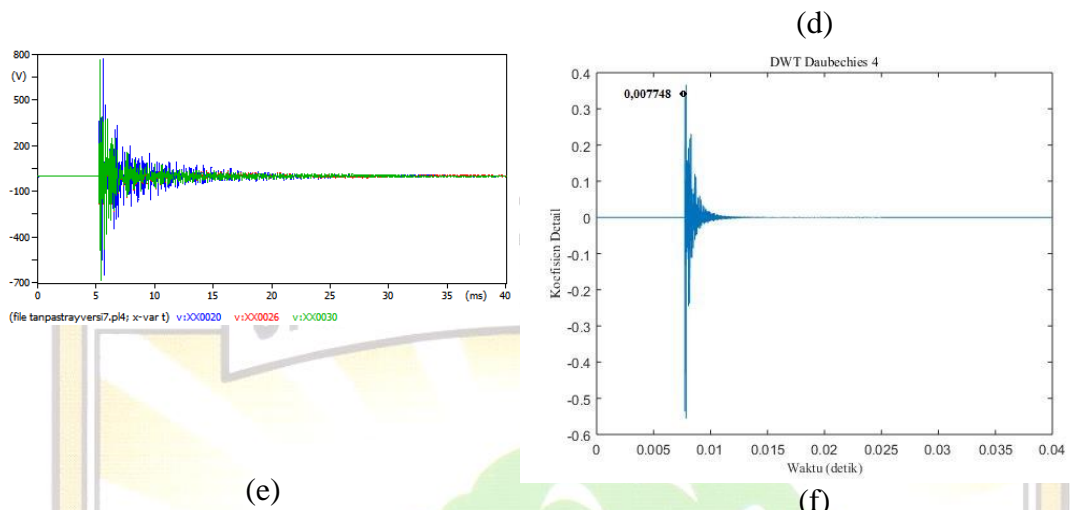


(b)



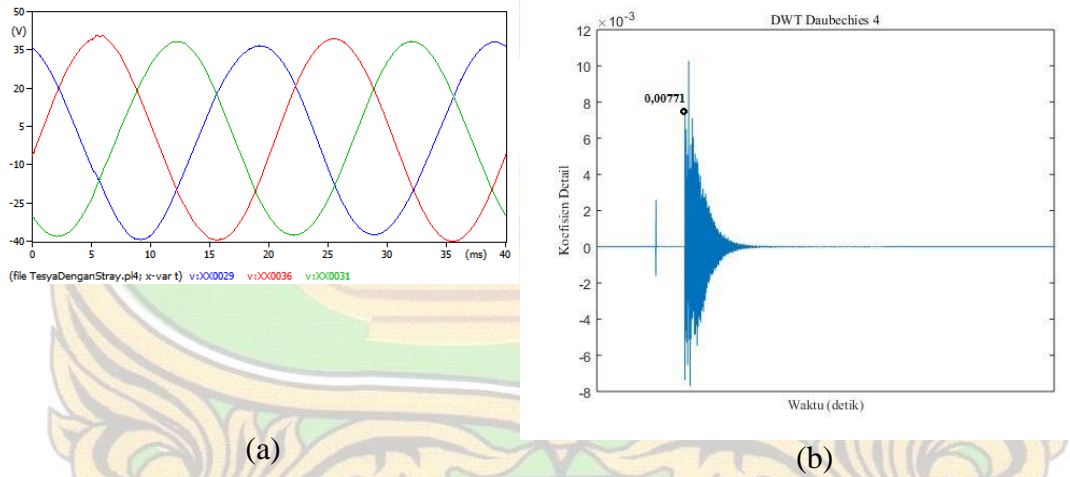
(c)

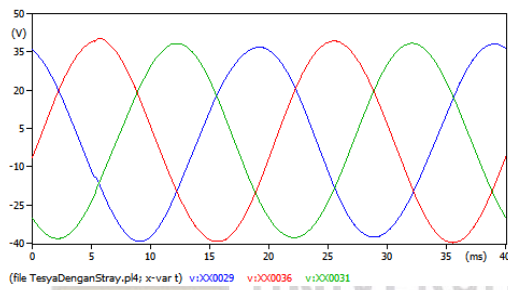




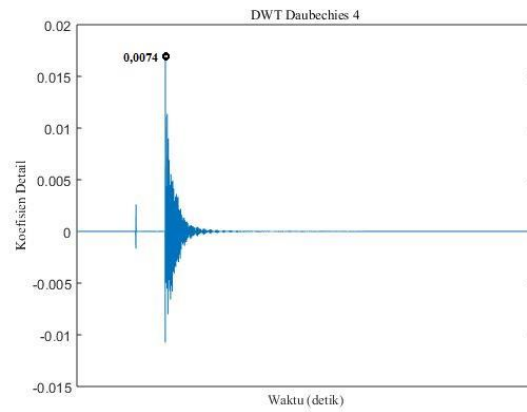
**Gambar B. 33** Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Tanpa Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

**2. Dengan Stray Capacitance**  
**a. Jumlah sampling 10 kHz**

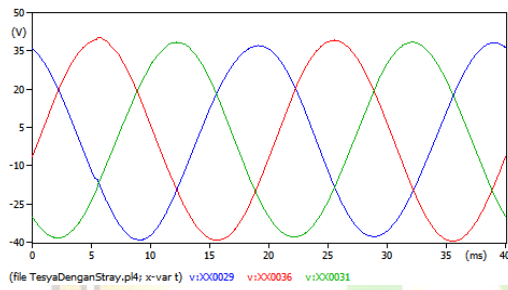




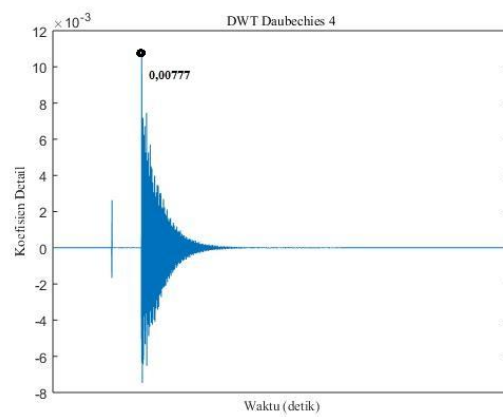
(c)



(d)



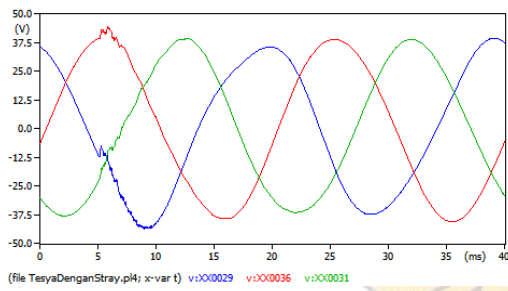
(e)



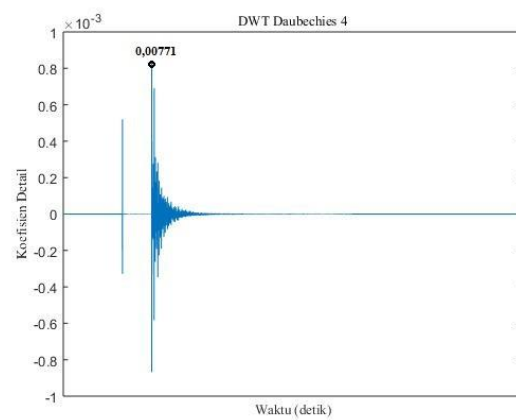
(f)

**Gambar B. 34** Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Dengan Stray Capacitance 10 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

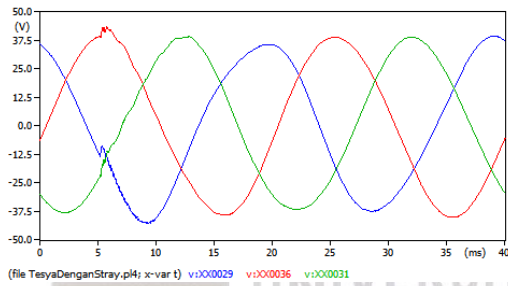
**b. Jumlah sampling 500 kHz**



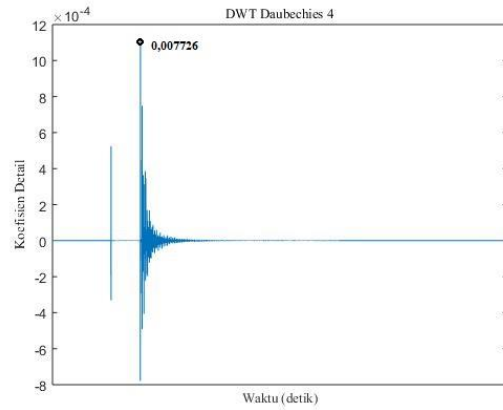
(a)



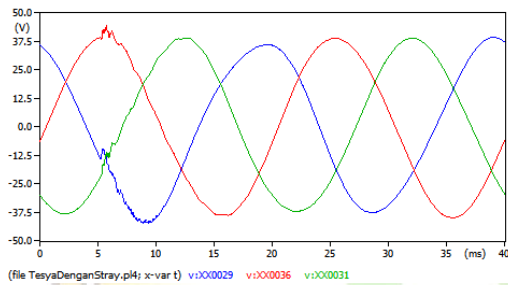
(b)



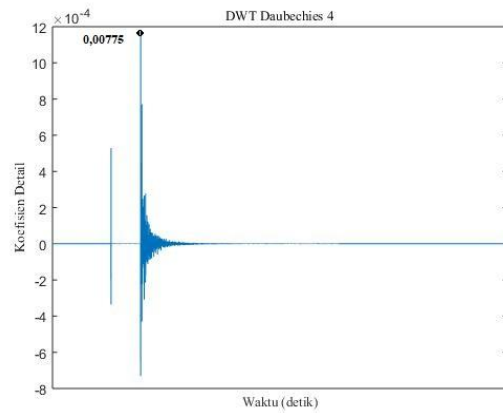
(c)



(d)



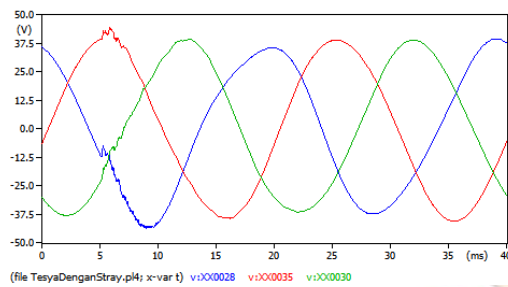
(e)



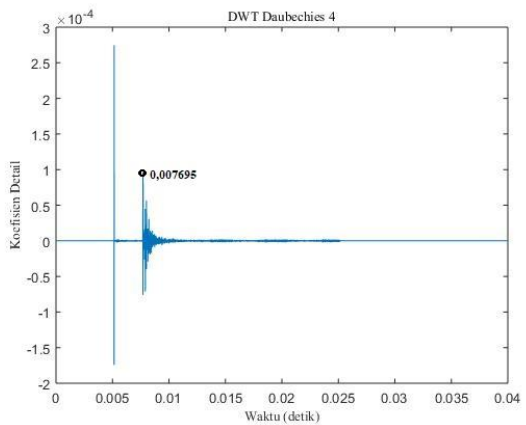
(f)

**Gambar B. 35** Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Dengan Stray Capacitance 500 kHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

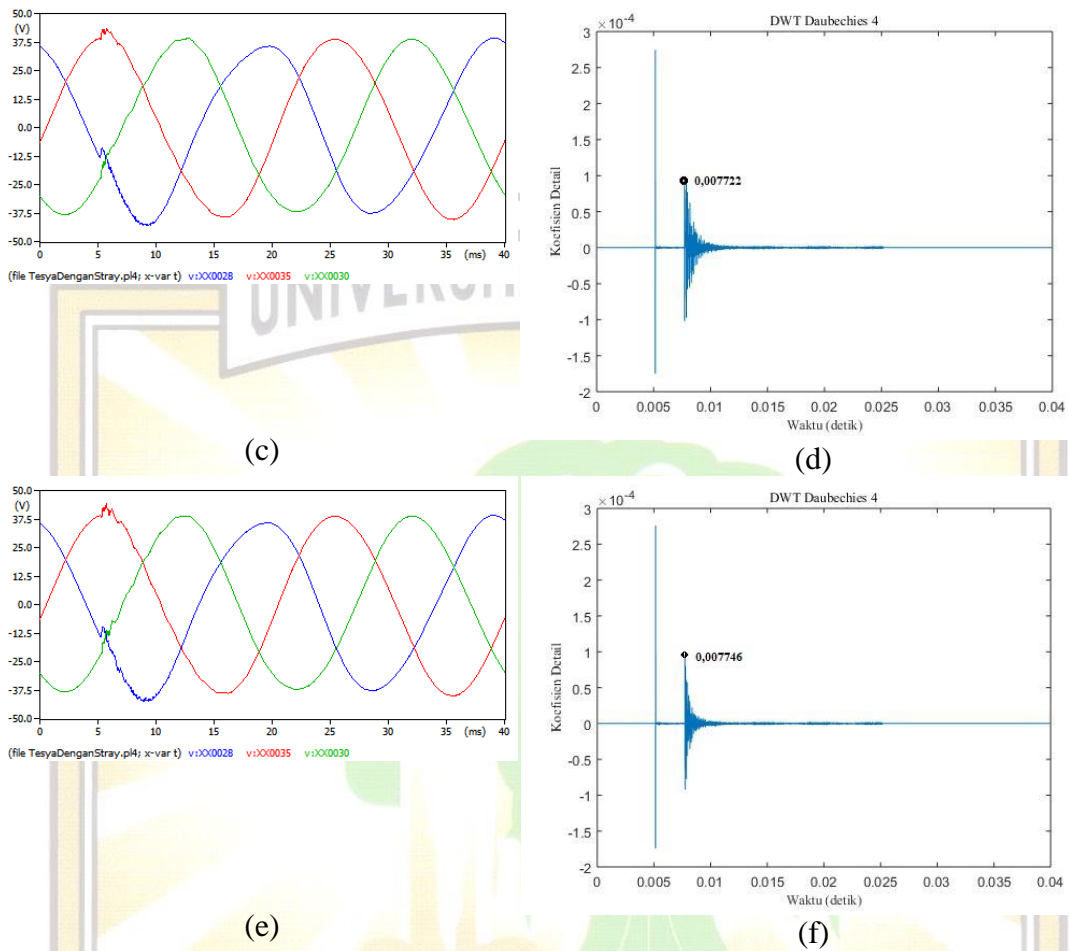
**c. Jumlah sampling 1 MHz**



(a)



(b)



**Gambar B. 36** Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Dengan Stray Capacitance 1 MHz jarak gangguan (a) 30 km, (b) 46 km, dan (c) 60 km

