



Terbit online pada laman: <https://ejurnal.umri.ac.id/index.php/JST>

Jurnal Surya Teknika

| ISSN (Print) 2354-6751 | ISSN (Online) 2723-7222 |



Research Article

Pengaruh Stray Capacitance pada Model Coupling Capacitor Voltage Transformer terhadap Penentuan Lokasi Gangguan Saluran Transmisi 150 kV Menggunakan Metode Transformasi Wavelet Diskrit

Tesya Uldira Septiyeni^{1,*}, Novizon², Fanni Sonia², Rusvaira Qatrunnada³, Mardini Hasanah⁴

¹ Institut Teknologi Bisnis Riau, Gedung Guru Riau, Jl. Jend. Sudirman, Tangkerang Selatan, Kota Pekanbaru, 28125, Indonesia

² Universitas Andalas, Limau Manis, Kecamatan Pauh, Kota Padang, 25163, Indonesia

³ Universitas Eka Sakti, Jl. Veteran Dalam No. 26 B, Purus, Padang Barat, Kota Padang, 25113, Indonesia

⁴ Akademi Komunitas Olat Maras, Jl. Raya Olat Maras, Pernek, Kec. Unter Iwes, Kabupaten Sumbawa, Nusa Tenggara Barat, 84316, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diserahkan : 31 Mei 2026
Diterima : 28 Juni 2026
Diterbitkan : 30 Juni 2026

KATA KUNCI

Coupling Capacitor Voltage Transformer, Gelombang Berjalan, Sistem Transmisi, Stray Capacitance, Transformasi Wavelet Diskrit.

KORESPONDENSI

*E-mail: tesyauldira@gmail.com

A B S T R A K

Sistem transmisi panjang di area terbuka kerap menghadapi kendala dalam mendeteksi titik gangguan secara cepat dan akurat. Faktor utama ketidakakuratan ini bersumber dari ketidaktepatan model sensor tegangan yang digunakan. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis model Capacitor Coupling Voltage Transformer (CCVT) dengan mengintegrasikan pengaruh stray capacitance. Studi kasus dilakukan pada jalur transmisi PLTA Maninjau menuju GI Pauh Limo. Melalui metode ujung tunggal berbantuan wavelet Daubechies 4, hasil simulasi menunjukkan bahwa model CCVT yang memperhitungkan stray capacitance menghasilkan tingkat galat (error) yang lebih rendah dibandingkan model konvensional tanpa stray capacitance. Di samping itu, penggunaan frekuensi sampling sebesar 1 MHz terbukti memberikan akurasi lokasi gangguan yang lebih tinggi daripada frekuensi sampling 10 kHz dan 500 kHz.

A B S T R A C T

Long transmission systems in open areas frequently face challenges in detecting fault locations quickly and accurately. The primary factor behind this inaccuracy stems from the imprecision of the voltage sensor model used. Therefore, this study analyzes the Capacitor Coupling Voltage Transformer (CCVT) model by integrating the effects of stray capacitance. A case study was conducted on the transmission line from the Maninjau Hydroelectric Power Plant (PLTA) to the Pauh Limo Substation (GI). Utilizing the single-ended method assisted by Daubechies 4 wavelet, the simulation results indicate that the CCVT model accounting for stray capacitance yields a lower error rate, resulting in higher accuracy compared to the conventional CCVT model without stray capacitance. Furthermore, the use of a 1 MHz sampling frequency provides higher fault location accuracy than sampling frequencies of 10 kHz and 500 kHz.

1. PENDAHULUAN

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. Bertambahnya pembangkit dan beban menyebabkan saluran transmisi serta distribusi semakin panjang, sehingga meningkatkan kompleksitas sistem secara keseluruhan. Sejalan dengan penambahan tersebut maka peningkatan risiko 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 diakibatkan 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 sistem tenaga listrik berbasis gelombang berjalan (*traveling wave*) adalah salah satu metode paling baik untuk memperkirakan jarak gangguan. Meskipun teori ini sudah cukup lama [1], [2], 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. Mengintegrasikan parameter tegangan ke dalam pelacakan gangguan berbasis TW biasanya mengarahkan implementasi pada metode dua sisi saluran (*double-ended approach*). Pilihan ini didasari oleh mekanisme kerja sistem yang bergantung pada pembacaan gelombang induksi di batas ujung transmisi. Namun, celah peningkatan akurasi masih sangat terbuka jika gelombang refleksi dan refraksi tegangan dapat dipetakan secara akurat, sebab ketepatan pengukuran ini akan mempermudah proses pengenalan karakteristik sinyal gangguan.

Teknik deteksi gangguan RFDD pada saluran transmisi yang disimulasikan oleh Affijulla dan Tripathy melalui Siemens PSS/Sincal menunjukkan keterbatasan operasional. Metode tersebut tidak hanya menuntut integrasi dengan relai jarak demi menjaga akurasi, tetapi juga memiliki ruang lingkup deteksi yang terbatas pada gangguan berkala seperti power swing [3]. Metode deteksi dan klasifikasi gangguan saluran transmisi berbasis K-NN yang disimulasikan oleh Majd dkk. pada MATLAB/Simulink menunjukkan keterbatasan dalam hal akurasi. Hasil yang kurang akurat tersebut diperoleh meskipun simulasi telah memperhitungkan parameter luas seperti resistansi, lokasi gangguan, sudut awal, level hubung singkat, sudut beban sumber, dan rasio X/R [4]. Penerapan logika *fuzzy* untuk deteksi gangguan saluran transmisi enam fasa yang diteliti oleh Tirupathi dkk. menunjukkan keterbatasan operasional. Metode tersebut dilaporkan hanya mampu memberikan hasil yang akurat ketika diterapkan pada gangguan kategori seri [5]. Evaluasi deteksi gangguan pada variasi lokasi dan resistansi menggunakan HHT oleh Zhu Xiaoguang dkk. menawarkan performa yang kokoh dengan presisi yang signifikan. Namun, dari aspek pencarian nilai riil, metode ini dievaluasi masih belum memberikan hasil deteksi yang benar-benar akurat [6]. Zhao Jianwen dan Duan Jiaxin membahas mengenai deteksi gangguan menggunakan metode *traveling wave* dengan transformasi wavelet empiris yang menguraikan sinyal gelombang dan dikalibrasi menggunakan EMF2 frekuensi tinggi, hanya saja terdapat masalah aliasing [7].

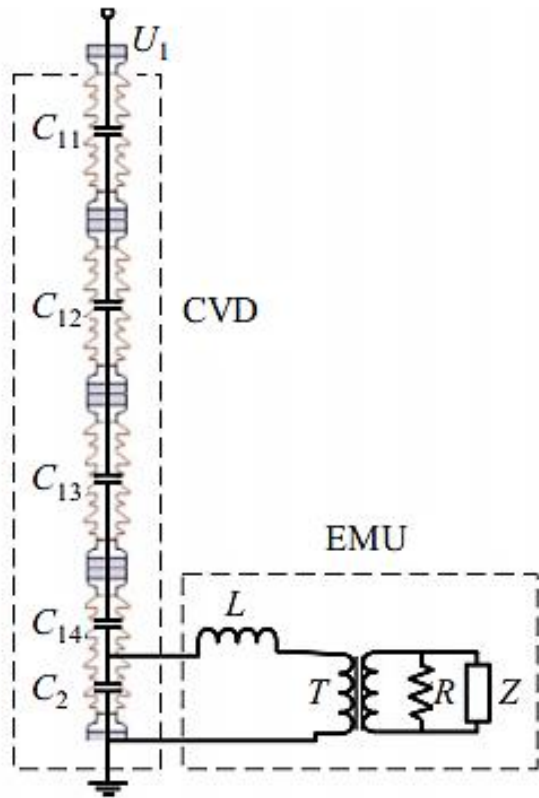
Penggunaan *coupling capacitor voltage transformer* (CCVT) sebagai sensor untuk pengukuran tegangan gangguan dalam penentuan lokasi gangguan berbasis gelombang berjalan metode ujung ganda telah banyak diteliti oleh beberapa peneliti [8]. Meskipun

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. Guna meminimalkan margin kesalahan hingga mendekati nol dalam penentuan lokasi gangguan, diperlukan pengukuran yang sangat presisi terhadap gelombang pantulan dan pembiasan [9]. Kendati demikian, keterbatasan praktis pada perangkat keras menyebabkan pengujian respons frekuensi umumnya dibatasi hanya sampai 10 kHz [8], batasan frekuensi tersebut dinilai kurang merepresentasikan karakteristik frekuensi tinggi dari gelombang yang terinduksi saat terjadinya gangguan di lapangan. 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 [10], 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 10 kHz sehingga menghasilkan pengukuran dan deteksi gelombang pantulan awal menjadi kurang akurat dalam hal waktu kedatangannya [11], [2]. Penelitian yang menggunakan model CCVT dengan memperhitungkan *stray capacitance* untuk spektrum frekuensi yang lebih tinggi dari spektrum terbatas 10 kHz dengan metode gelombang berjalan pada ujung tunggal belum ada dilaporkan oleh jurnal-jurnal sebelumnya. Oleh karena itu, penelitian yang memperhitungkan efek *stray capacitance* pada spektrum frekuensi tinggi untuk CCVT dengan metode gelombang berjalan pada ujung tunggal menarik bagi industri, yang dapat mengarah pada pengembangan model CCVT baru atau rekonstruksi CCVT yang inovatif.

2. METODOLOGI

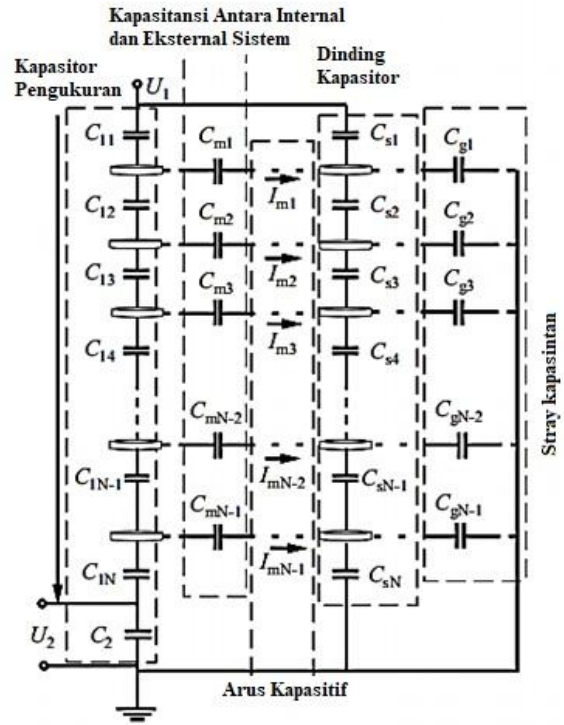
Struktur kolom CCVT yang paling umum diimplementasikan pada sistem tenaga saat ini diilustrasikan pada Gambar 1. Perangkat ini secara garis besar terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu *Capacitive Voltage Divider* (CVD) dan *Electromagnetic Unit* (EMU). Komponen CVD tersusun atas kapasitor tegangan tinggi, kapasitor tegangan menengah, *metal expander* eksternal, dan isolator porselen. Baik blok kapasitor tegangan tinggi maupun menengah dibentuk dari puluhan hingga ratusan unit kapasitansi yang terhubung secara seri. Masing-masing unit kapasitansi tersebut memanfaatkan lapisan aluminium foil dan film isolasi yang disusun bertumpuk serta direndam di dalam minyak isolasi [12]. Dalam pengoperasiannya, CVD berfungsi mereduksi tegangan tinggi primer menjadi tegangan menengah pada rentang 10–25 kV untuk dialirkan sebagai input bagi EMU. Selanjutnya, bagian EMU—yang terdiri dari reaktor kompensasi, transformator tegangan menengah, dan peredam (*damping*)—akan mengubah tegangan menengah dari keluaran CVD tersebut menjadi tegangan sekunder standar (*standard secondary voltage*) sebagai masukan bagi *power meter* dan perangkat relai proteksi. Secara menyeluruh, nilai rasio pembagi tegangan (*Total Voltage Difference Ratio*) pada CCVT sangat dipengaruhi oleh karakteristik CVD, EMU, pergeseran suhu, fluktuasi frekuensi daya, serta efek kedekatan (*proximity effect*).



Gambar 1. Struktur Coupling Capacitor Voltage Transformer

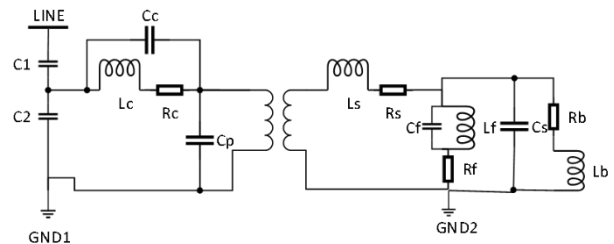
Kapasitansi kesasar (*stray capacitance*) atau kapasitansi parasit (*parasitic capacitance*) merupakan jenis kapasitansi laten yang tidak dikehendaki kehadirannya dalam suatu rangkaian elektrik. Berbeda dengan komponen kapasitor yang sengaja dipasang untuk fungsi tertentu, kapasitansi parasit muncul sebagai konsekuensi fisis yang tidak terhindarkan. Fenomena ini terbentuk ketika dua permukaan konduktor berpotensi listrik berbeda berada dalam jarak yang cukup dekat, sehingga memicu timbulnya medan listrik yang bertindak menyerupai kapasitor imajiner. Karena efek dari kapasitansi kesasar ini tidak dapat dihilangkan secara total, keberadaannya kerap memicu penurunan performa dan akurasi pada unit detektor [13].

Gambar 2 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. Diagram Ekuivalen Coupling Capacitor Voltage Transformer

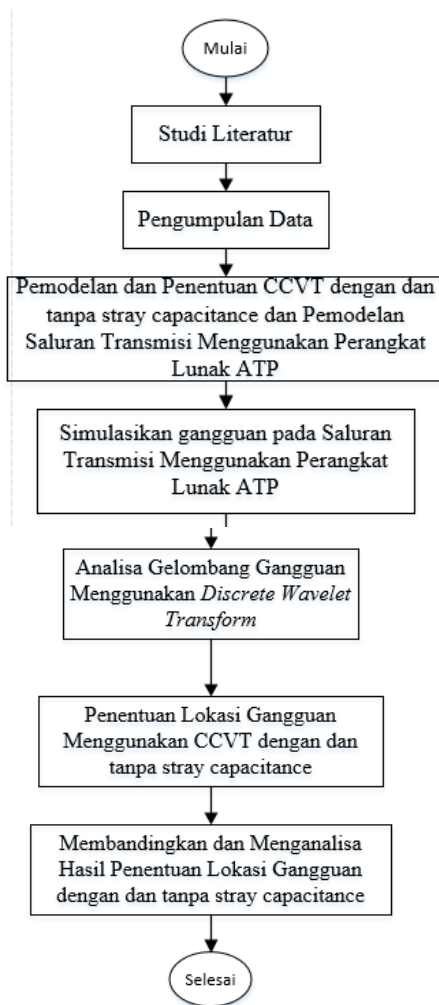
Efek stray capacitance yang ada antara konduktor dan konduktor atau antara konduktor dan tanah harus dipertimbangkan ketika kita mempelajari model rangkaian ekuivalen CCVT [14]. Model rangkaian ekuivalen CCVT ditunjukkan pada Gambar 3. C_c adalah stray capacitance yang ada antara reaktor kompensasi dan 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 3. Rangkaian Ekuivalen CCVT dengan Stray Capacitance

Melalui simulasi pada sistem transmisi PLTA Maninjau hingga GI Pauh Limo sepanjang 92 km di bawah naungan UPT PLN Padang, penelitian ini mengkaji perbandingan akurasi lokasi gangguan menggunakan sensor tegangan CCVT konvensional (tanpa melibatkan stray capacitance). Tahapan pemodelan jenis dan titik gangguan beserta sensornya

disimulasikan melalui *Alternative Transients Program* (ATP). Data hasil simulasi tersebut kemudian diproses menggunakan MATLAB untuk menentukan letak gangguan secara tepat. Pada tahap akhir, data yang diperoleh akan dibandingkan dan dianalisis tingkat kesalahannya demi mengetahui tingkat keakuratannya [2], dengan diagram alir kerja umum yang tersaji pada Gambar 4.



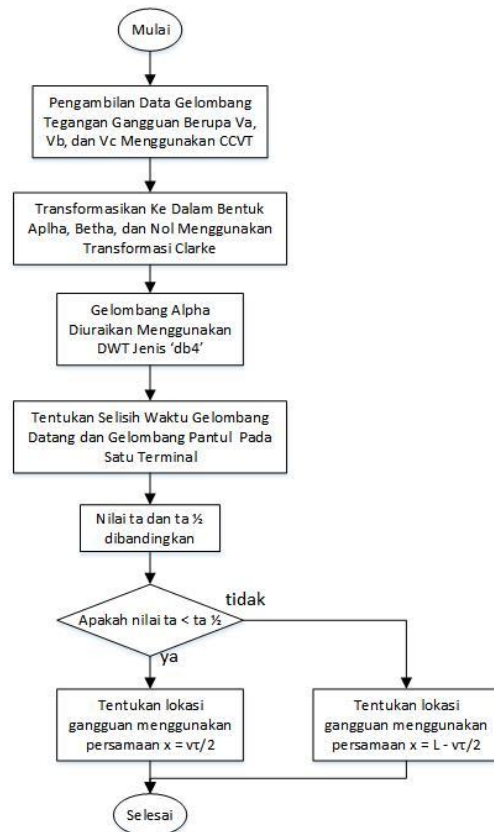
Gambar 4. Diagram Alir Penelitian Secara Umum

Parameter transmisi yang digunakan dalam riset ini meliputi komponen urutan positif dan urutan nol dari resistansi, induktansi, serta kapasitansi, ditambah dengan spesifikasi fisik saluran (panjang, jenis, dan diameter konduktor). Menggunakan perangkat lunak ATP, saluran transmisi dan sumber daya (generator) dimodelkan untuk kemudian diuji dengan gangguan internal maupun eksternal. Sinyal gelombang hasil simulasi transien ini selanjutnya dianalisis menggunakan metode traveling wave dan Discrete Wavelet Transform (DWT) untuk menghitung dan

menentukan lokasi gangguan yang terjadi pada jaringan.

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 α , fasa β , 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 (τ).

Tahapan penentuan lokasi gangguan menggunakan single-ended method traveling wave dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Alir Single-ended Method

Ketika terjadi gangguan pada sistem, data yang direkam berupa sinyal tegangan yang diperoleh melalui sensor tegangan. Sinyal yang diamati mencakup tegangan fasa V_a , V_b , dan V_c yang diukur menggunakan CCVT (Capacitive Coupling Voltage Transformer). Data tersebut berasal dari hasil simulasi model saluran transmisi yang dijalankan dengan perangkat lunak ATP (*Alternative Transients Program*). Selanjutnya, sinyal tegangan tiga fasa

dalam koordinat abc diubah ke koordinat α , β , dan 0 menggunakan transformasi Clarke. Komponen α yang diperoleh kemudian dianalisis lebih lanjut pada ranah waktu dan frekuensi melalui metode Discrete Wavelet Transform (DWT) dengan basis wavelet Daubechies orde 4 ('db4'). Penggunaan wavelet 'db4' dimaksudkan untuk mendeteksi dan membedakan karakteristik gelombang yang datang serta gelombang yang dipantulkan pada salah satu ujung saluran transmisi.

Untuk kasus gangguan yang terjadi pada titik yang jaraknya kurang dari separuh panjang saluran, posisi gangguan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\tau = 2x(t_b - t_a) \tag{1}$$

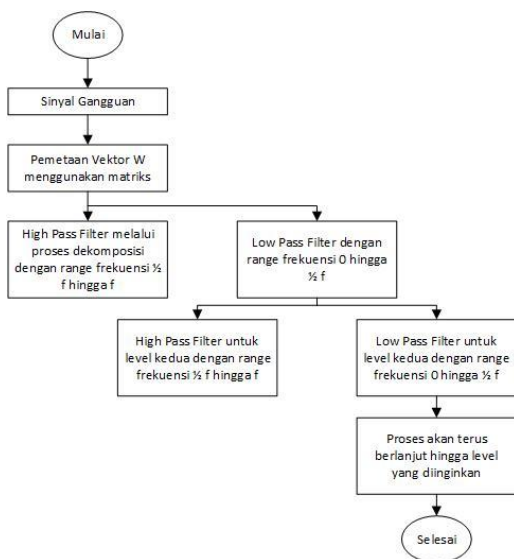
Untuk gangguan yang terletak lebih dari setengah panjang saluran, lokasi gangguan dapat dihitung dengan persamaan :

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

Dan jarak lokasi gangguan dapat dihitung dengan persamaan :

$$x = \frac{v\tau}{2} \tag{3}$$

Tahapan transformasi wavelet dapat dilihat pada Gambar 6 sebagai berikut :



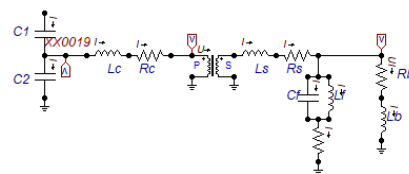
Gambar 6. Diagram Alir Transformasi Wavelet Diskrit

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 τ merupakan selisih waktu gelombang datang dan pantul ketika gangguan terjadi. Sedangkan nilai $\tau/2$ merupakan selisih waktu gelombang datang dan pantul ketika gangguan tepat di tengah-tengah saluran. Setelah dilakukan perhitungan dalam masing-masing kondisi maka jarak gangguan dapat diketahui. Lokasi gangguan yang telah didapat dari hasil simulasi dan perhitungan dibandingkan dengan nilai yang ditetapkan untuk menganalisis besar kesalahan simulasi. Selanjutnya akan dianalisis perbandingan hasil menggunakan sensor tegangan (CCVT).

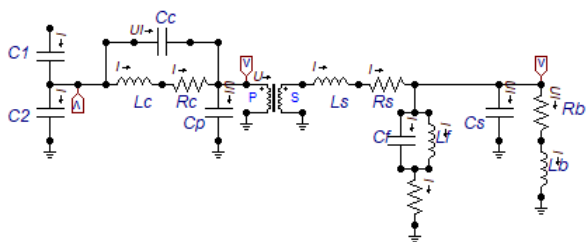
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sisi pengukuran menggunakan sensor CCVT untuk menangkap gelombang berjalan yang dipicu oleh gangguan. CCVT ini mengombinasikan dua kapasitor seri sebagai pembagi tegangan yang terhubung dengan transformator tegangan serta reaktor kompensasi. Hasilnya, tegangan transien akibat gangguan dapat terukur dan diidentifikasi secara tepat pada sisi sekunder transformator [2].



Gambar 7. Model Coupling Capacitor Voltage Transformer Tanpa Stray Capacitance

Selanjutnya digunakan model CCVT menggunakan *stray capacitance*, dimana nilai *stray capacitance* didapatkan berdasarkan referensi yang ada [15].



Gambar 8. Model Coupling Capacitor Voltage Transformer dengan Stray Capacitance

3.1. Gangguan Satu Fasa Tanah

Untuk mensimulasikan gangguan satu fasa, sebuah sakelar terkontrol waktu diset pada 0,01 detik dan dihubungkan ke tanah melalui impedansi gangguan sebesar 1 Ω. Pengujian dilakukan pada saluran sepanjang 92 km dengan memposisikan titik gangguan pada jarak 30 km, 46 km, dan 60 km dari ujung area pengukuran. Gelombang tegangan transien yang dipicu oleh gangguan ini akan menjalar secara bilateral menuju Busbar A dan B. Pada Busbar A, kedatangan gelombang transien tersebut ditangkap oleh CCVT, lalu mengalami pembagian sinyal di mana sebagian gelombang diteruskan dan sebagian lagi direfleksikan. Gelombang refleksi dari Busbar A ini akan kembali ke titik asal gangguan, lalu terpantul kembali menuju Busbar A. Karakteristik hasil simulasi satu fasa ke tanah dengan melibatkan stray capacitance dapat dicermati pada Tabel 1.

Tabel 1.

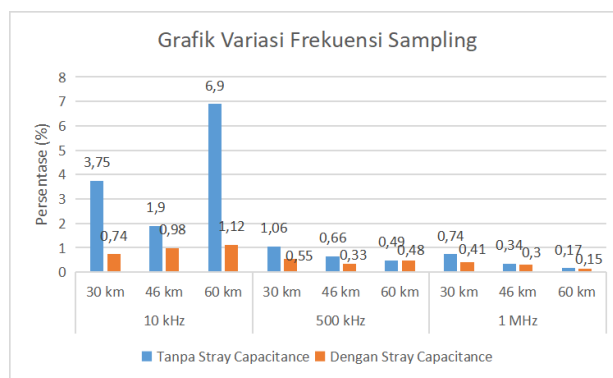
Hasil Simulasi Gangguan Satu Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal dengan Stray Capacitance

No	Jumlah Sampling	Jarak Gangguan (km)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	30.67	0.74
		46	46.9	0.98
		60	61.03	1.12
2	500 kHz	30	29.5	0.55
		46	46.3	0.33
		60	59.6	0.48
3	1 MHz	30	30.38	0.41
		46	45.72	0.3
		60	60.14	0.15

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai error tertinggi mencapai 1,12%, yang ditemukan pada gangguan berjarak 60 km dengan frekuensi sampling 10 kHz. Sementara itu, nilai error terendah sebesar 0,15% diperoleh pada lokasi gangguan yang sama ketika frekuensi sampling yang digunakan sebesar 1 MHz. Temuan ini mengindikasikan adanya hubungan antara

frekuensi sampling dan tingkat ketepatan hasil pengukuran. Peningkatan jumlah sampling cenderung menghasilkan nilai error yang lebih rendah, sehingga estimasi lokasi gangguan dapat dilakukan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Dengan kata lain, semakin besar frekuensi sampling yang diterapkan, semakin baik pula ketelitian dalam menentukan posisi gangguan pada saluran transmisi.

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 9 berikut:



Gambar 9. Grafik Variasi Frekuensi Sampling Gangguan Satu Fasa Tanah Tanpa dan Dengan Stray Capacitance

Gambar 9 merupakan grafik perbandingan antara CCVT tanpa stray capacitance dan dengan stray capacitance pada gangguan satu fasa tanah [2]. Pada gangguan satu fasa tanah dapat dilihat bahwa pengukuran menggunakan stray capacitance memberikan hasil tingkat keakuratan yang lebih baik dibandingkan tanpa stray capacitance yang mana hal tersebut dapat dilihat pada nilai persentase error yang didapatkan.

3.2. Gangguan Dua Fasa

Untuk menyimulasikan gangguan dua fasa, dua sakelar otomatis digunakan untuk menghubungkan kedua fasa yang terganggu secara bersamaan pada waktu 0,01 detik. Skenario gangguan ini diterapkan pada jalur transmisi sepanjang 92 km dengan memposisikan letak gangguan sejauh 30 km, 46 km, dan 60 km dari stasiun pengukuran. Gelombang transien tegangan yang dipicu oleh gangguan tersebut akan merambat ke dua arah berlawanan menuju Busbar A dan B. Kehadiran sensor CCVT di Busbar A berfungsi untuk menangkap gelombang datang ini, di

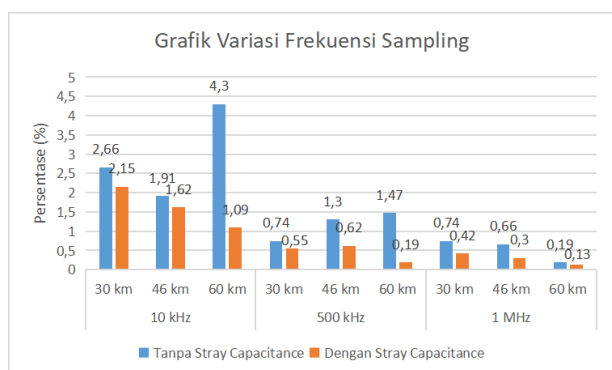
mana karakteristik gelombang tersebut akan terbagi; sebagian akan dipantulkan kembali ke saluran dan sebagian lagi diteruskan menuju sistem. Adapun hasil pengujian simulasi gangguan dua fasa dengan melibatkan parameter *stray capacitance* dapat dicermati pada Tabel 2.

Tabel 2.

Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Metode Ujung Tunggal dengan *Stray Capacitance*

No	Jumlah Sampling	Jarak Gangguan (km)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	28.023	2.15
		46	47.49	1.62
		60	58.99	1.09
2	500 kHz	30	29.497	0.55
		46	46.016	0.62
		60	60.175	0.19
3	1 MHz	30	30.38	0.42
		46	45.72	0.3
		60	59.88	0.13

Berdasarkan hasil pengujian, galat (error) maksimum tercatat sebesar 2,15% pada titik gangguan 30 km dengan frekuensi sampling 10 kHz. Sebaliknya, galat minimum sebesar 0,13% diperoleh pada jarak 60 km dengan frekuensi sampling 1 MHz. Fenomena ini menunjukkan korelasi positif di mana peningkatan frekuensi sampling akan menghasilkan tingkat akurasi lokalisasi gangguan yang semakin optimal. Evaluasi tingkat akurasi yang dihitung berdasarkan persentase rata-rata galat antara kondisi tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance* dalam memetakan lokasi gangguan dua fasa pada variasi frekuensi sampling disajikan secara visual pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik Variasi Frekuensi Sampling Gangguan Dua Fasa Tanpa dan Dengan *Stray Capacitance*

Pada Gambar 10 menyajikan grafik perbandingan antara CCVT tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance* pada gangguan dua fasa [2]. Pada gangguan dua fasa pengukuran menggunakan *stray capacitance* memberikan hasil tingkat keakuratan yang lebih baik atau tinggi dibandingkan tanpa *stray capacitance*. Hal tersebut dapat dilihat pada nilai persentase error yang didapatkan. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian *stray capacitance* pada CCVT memberikan hasil yang lebih optimal.

3.3. Gangguan Dua Fasa Tanah

Untuk mensimulasikan gangguan dua fasa ke tanah, dua sakelar otomatis digunakan untuk menghubungkan kedua fasa yang terganggu ke tanah melalui sebuah impedansi. Skenario pengujian ini diterapkan pada jalur transmisi sepanjang 92 km dengan memposisikan letak gangguan sejauh 30 km, 46 km, dan 60 km dari stasiun pengukuran. Gelombang transien tegangan yang dipicu oleh gangguan tersebut akan menjalar ke dua arah berlawanan menuju Busbar A dan B. Kehadiran sensor CCVT di Busbar A bertugas menangkap gelombang datang ini, di mana karakteristik gelombang tersebut akan terbagi; sebagian akan dipantulkan kembali ke saluran dan sebagian lagi diteruskan ke sistem. Adapun hasil pengujian simulasi gangguan dua fasa ke tanah dengan melibatkan parameter *stray capacitance* dapat dicermati pada Tabel 3.

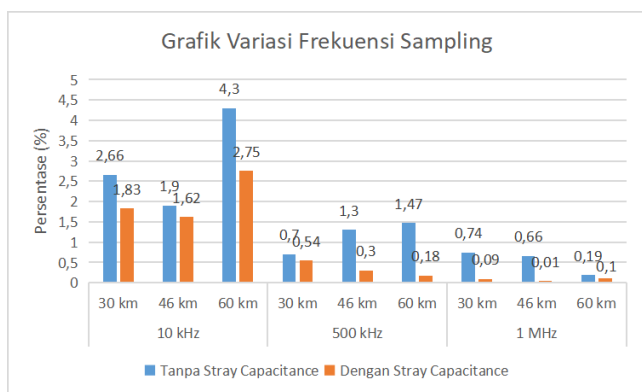
Tabel 3.

Hasil Simulasi Gangguan Dua Fasa Tanah Metode Ujung Tunggal dengan *Stray Capacitance*

No	Jumlah Sampling	Jarak Gangguan (km)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	28.317	1.83
		46	47.49	1.62
		60	62.534	2.75
2	500 kHz	30	29.497	0.54
		46	45.72	0.3
		60	60.175	0.18
3	1 MHz	30	30.08	0.09
		46	46.02	0.01
		60	59.88	0.1

Berdasarkan tabel di atas, *error* maksimum sebesar 2,75% terjadi pada jarak 60 km dengan laju sampling 10 kHz, sementara *error* minimum sebesar 0,01%

terjadi pada jarak 46 km dengan laju sampling 1 MHz. Terlihat tren bahwa setiap kenaikan frekuensi sampling menyebabkan nilai *error* pada masing-masing jarak gangguan semakin mengecil. Hal ini mengonfirmasi bahwa semakin tinggi frekuensi sampling, maka tingkat akurasi yang diperoleh akan semakin optimal. Selain itu, membuktikan bahwa semakin tinggi jumlah sampling yang digunakan dan disertai pemberian *stray capacitance* maka akan memberikan tingkat keakuratan yang lebih maksimal. 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 11 berikut:



Gambar 11. Grafik Variasi Frekuensi Sampling Gangguan Dua Fasa Tanah Tanpa dan Dengan *Stray Capacitance*

Gambar 11 menyajikan grafik perbandingan CCVT antara tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance* pada gangguan dua fasa tanah [2]. Pada gangguan dua fasa tanah juga tampak jelas bahwa pemberian *stray capacitance* memberikan hasil yang lebih baik dan lebih optimal. Hal tersebut dapat dilihat pada tingkat keakuratan yang lebih maksimal.

3.4. Gangguan Tiga Fasa

Untuk menyimulasikan gangguan tiga fasa, tiga sakelar otomatis digunakan untuk menghubungkan ketiga fasa secara bersamaan pada waktu 0,01 detik. Skenario pengujian ini diterapkan pada jalur transmisi sepanjang 92 km dengan memposisikan letak gangguan sejauh 30 km, 46 km, dan 60 km dari stasiun pengukuran. Gelombang transien tegangan yang dipicu oleh gangguan tersebut akan menjalar ke dua arah berlawanan menuju Busbar A dan B. Kehadiran sensor CCVT di Busbar A berfungsi untuk menangkap gelombang datang ini, di mana karakteristik

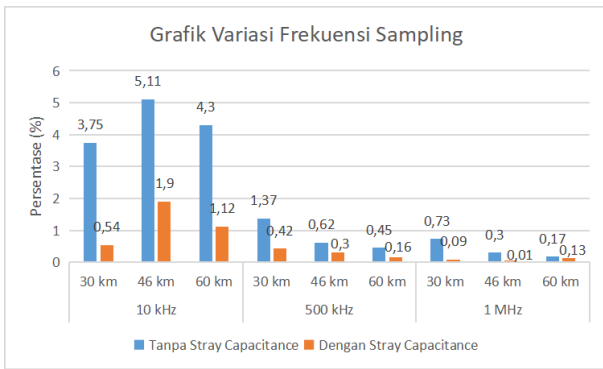
gelombang tersebut akan terbagi menjadi komponen pantulan dan komponen terusan. Sinyal gelombang yang terpantul dari Busbar A akan merambat kembali ke titik gangguan dan mengalami pemantulan ulang menuju Busbar A. Adapun karakteristik hasil simulasi tiga fasa dengan melibatkan parameter *stray capacitance* dapat dicermati pada Tabel 4.

Tabel 4.

Hasil Simulasi Gangguan Tiga Fasa Metode Ujung Tunggal dengan *Stray Capacitance*

No	Jumlah Sampling	Jarak Gangguan (km)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	29.5	0.54
		46	44.25	1.9
		60	58.96	1.12
2	500 kHz	30	30.38	0.42
		46	45.72	0.3
		60	59.84	0.16
3	1 MHz	30	30.08	0.09
		46	46.01	0.01
		60	59.88	0.13

Merujuk pada data tabel di atas, galat (*error*) maksimum tercatat sebesar 1,9% yang terjadi pada titik gangguan 60 km dengan frekuensi sampling 10 kHz. Sementara itu, galat minimum sebesar 0,01% diperoleh pada jarak 46 km dengan frekuensi sampling 1 MHz. Berdasarkan tabel di atas tampak pola pada pemberian jumlah sampling, semakin tinggi jumlah sampling yang diberikan semakin kecil pula nilai *error* yang dihasilkan. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi penggunaan jumlah sampling maka akan semakin kecil nilai *error* yang dihasilkan, sehingga tingkat keakuratan yang menunjukkan penentuan lokasi gangguan pada sistem yang mengalami gangguan semakin optimal. Evaluasi tingkat keakuratan yang dihitung berdasarkan persentase rata-rata galat antara kondisi tanpa *stray capacitance* dan dengan *stray capacitance* dalam memetakan lokasi gangguan tiga fasa dengan memvariasikan frekuensi sampling pada nilai 10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz disajikan secara visual pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik Variasi Frekuensi Sampling Gangguan Tiga Fasa Tanpa dan Dengan *Stray Capacitance*

Gambar 12 merupakan grafik persentase error antara pengukuran tanpa stray capacitance dan dengan stray capacitance pada gangguan tiga fasa [2]. 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.

3.5. Gangguan Surja Petir

Untuk menyimulasikan sambaran petir, gangguan surja petir dimodelkan secara paralel dengan sebuah tahanan pada jalur transmisi sepanjang 92 km. Skenario pengujian ini diterapkan dengan memposisikan letak gangguan sejauh 30 km, 46 km, dan 60 km dari stasiun pengukuran. Gelombang transien tegangan yang dipicu oleh surja tersebut akan menjalar ke dua arah berlawanan menuju Busbar A dan B. Kehadiran sensor CCVT di Busbar A berfungsi untuk menangkap gelombang datang ini, di mana karakteristik gelombang tersebut akan terbagi menjadi komponen pantulan dan komponen terusan. Sinyal gelombang yang terpantul dari Busbar A akan merambat kembali ke titik gangguan dan mengalami pemantulan ulang menuju Busbar A. Adapun karakteristik hasil simulasi surja petir dengan melibatkan parameter stray capacitance dapat dicermati pada Tabel 5.

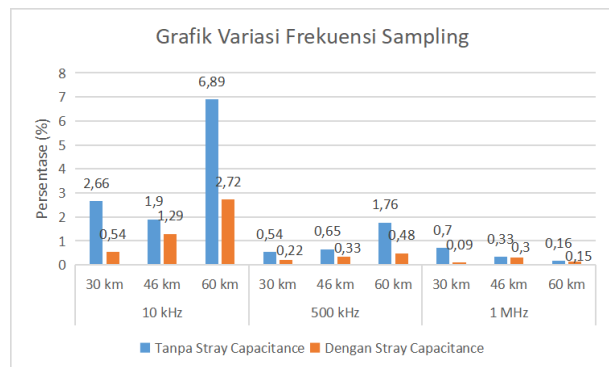
Tabel 5.

Hasil Simulasi Gangguan Surja Petir Metode Ujung Tunggal dengan *Stray Capacitance*

No	Jumlah Sampling	Jarak Gangguan (km)	X (km)	Error (%)
1	10 kHz	30	29.497	0.54
		46	47.195	1.29
		60	62.5	2.72

2	500 kHz	30	29.97	0.22
		46	46.31	0.33
		60	59.55	0.48
3	1 MHz	30	30.087	0.09
		46	45.72	0.3
		60	60.143	0.15

Merujuk pada hasil pengujian di atas, nilai error tertinggi mencapai 2,72% pada jarak gangguan 60 km saat menggunakan laju sampling 10 kHz, sedangkan error terendah sebesar 0,15% ditemukan pada jarak 60 km dengan laju sampling 1 MHz. Pada pemberian perlakuan gangguan surja petir juga didapatkan pola antara penggunaan jumlah sampling dengan nilai error yang dihasilkan. Semakin tinggi penggunaan jumlah sampling, maka semakin tinggi pula tingkat keakuratan yang didapatkan. Grafik komparasi keakuratan yang membandingkan persentase rata-rata error antara pemodelan dengan dan tanpa melibatkan pengaruh stray capacitance untuk skenario gangguan ini pada variasi frekuensi sampling (10 kHz, 500 kHz, dan 1 MHz) dapat dicermati pada Gambar 13.



Gambar 13. Grafik Variasi Frekuensi Sampling Gangguan Surja Petir Tanpa dan Dengan *Stray Capacitance*

Gambar 13 merupakan grafik persentase error antara pengukuran tanpa stray capacitance dan dengan stray capacitance pada gangguan surja petir [2]. 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.

3.6. Analisis Statistik Menggunakan One-Way ANOVA

Uji *One-Way* ANOVA dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh frekuensi sampling terhadap akurasi

penentuan lokasi gangguan yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6.

Hasil *One-Way* ANOVA Pengaruh Frekuensi Sampling Terhadap Error Penentuan Lokasi Gangguan

Jenis Gangguan	Mean Error 10 kHz (%)	Mean Error 500 kHz (%)	Mean Error 1 MHz (%)	Fhitung	p-value
1-fasa tanah	0.947	0.453	0.287	14.76	0.00
2-fasa tanah	1.620	0.453	0.283	18.92	0.00
2-fasa tanah	2.067	0.340	0.067	45.31	< 0.0
3-fasa petir	1.187	0.293	0.077	39.54	< 0.0
petir	1.517	0.343	0.180	31.86	< 0.0

Hasil menunjukkan p-value < 0.05 yang mengindikasikan adanya perbedaan signifikan antar frekuensi sampling. Nilai error menurun seiring peningkatan frekuensi sampling, dengan hasil terbaik diperoleh pada 1 MHz. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi sampling yang lebih tinggi memberikan estimasi lokasi gangguan yang lebih akurat.

4. SIMPULAN

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.

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.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memvariasikan nilai stray capacitance serta pengujian sensitivitas stray capacitance untuk menganalisis pengaruh lebih lanjut dalam penentuan lokasi gangguan pada saluran transmisi. Selanjutnya, melakukan penelitian di Laboratorium untuk melihat apakah model CCVT ini dapat diaplikasikan dengan baik atau tidak secara praktek.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems," 1973.
- [2] T. U. S. Dkk, "Penggunaan Sensor Tegangan Terhadap Penentuan Lokasi Saluran Gangguan Transmisi 150 kV." *Surya Tek.*, vol. 12, no. 2, pp. 370–377, 2025.
- [3] S. Kanwal, "Artificial Intelligence Based Faults Identification, Classification, and Localization Techniques in Transmission Lines-A Review." *IEEE*, vol. 21, pp. 1291–2305, 2023.
- [4] K. Swain, M. Cherukuri, I. S. Samanta, B. Appasani, N. Bizon, and M. Oproescu, "IoT Based Transmission Line Fault Classification Using Regularized RBF-ELM and Virtual PMU in a Smart Grid," *Comput. Model. Eng. Sci.*, no. 2, pp. 1993–2015, 2025, doi: 10.32604/cmescs.2025.067121.
- [5] T. R. Althi and E. Koley, "Fuzzy Logic based Fault Detection and Classification scheme for Series Faults in Six Phase Transmission," pp. 479–483, 2021.
- [6] X. Zhu, S. Li, Y. Guo, X. Chen, C. He, and J. Deng, "Novel wavefront detection and fault location method based on Hilbert-Huang transform for long HVDC transmission lines," *elsevier*, vol. 211, no. February, p. 108213, 2022.
- [7] R. Gomez, "Study for localization of fault in the electrical distribution systems . Estudio para la localización de fallas en sistemas de distribución eléctrica .," *Ingenius Rev. Cienc. c Technol.*, pp. 64–77, 2023.

- [8] Z. Zhu, ; Li Binbin, ; Xue Jianyi, and ; Ding Lijian, "Research on adaptive state prediction method for the metering error of capacitor voltage transformer," *AIP Publ.*, vol. 94, no. 8, 2023, doi: 10.1016/j.epr.2006.02.007.
- [9] R. L. A. Reis, F. V Lopes, E. P. Ribeiro, C. M. Moraes, K. M. Silva, and A. M. Britto, "Traveling wave-based fault locators: Performance analysis in series-compensated transmission lines," *Elsevier*, vol. 223, 2023.
- [10] Z. Xiaoguang, H. Chunying, D. Junbo, G. Yubo, and C. Xiaohui, "Research on a Highly Precise Fault Location Method for ± 1 100kV UHVDC Transmission Lines Based on Hilbert-Huang Transform," pp. 850–854, 2019.
- [11] A. Guzmán, B. Kasztenny, Y. Tong, and M. V Mynam, "Accurate and Economical Traveling-Wave Fault Locating Without Communications," 2018.
- [12] 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," vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/1155443.
- [13] N. N. Ghuge, S. Jasrotia, and C. Sadhu, "GEIGER MULLER: A THIN END WINDOW TUBE RADIATION DETECTOR," pp. 190–196, 2015.
- [14] S. Wang and G. Xu, "Research on traveling wave fault technology based on ground potential," no. May, 2023, doi: 10.1063/5.0069963.
- [15] S. Poornima, "Frequency Analysis of Gas Discharge Based Memristor Emulator for Ferroresonance," *J. Electr. Syst.*, pp. 5782–5788, 2024.

NOMENKLATUR

τ	selisih waktu gelombang datang dan gelombang pantul ketika gangguan terjadi
t	waktu
x	jarak lokasi gangguan hasil perhitungan
v	kecepatan rambat gelombang
L	panjang jarak gangguan