Desain dan Prototipe Relay Proteksi Berbasis *Traveling Wave* untuk Deteksi Gangguan Ultra-Cepat pada Sistem Tenaga

Ir. Pradita Octoviandiningrum Hadi, S.T., M.T., Ph.D., Dr. Ir. Kevin Marojahan Banjar Nahor, S.T., M.T., Dr. Ir. Fathin Saifur Rahman, S.T., M.T., Dr. Ing. Deny Hamdani, S.T, M.Sc., Raffa Andhika Ilham, S.T., Willy Indra Hikmawan, S.T., Reza Apriatna
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika (STEI), Institut Teknologi Bandung

1 LATAR BELAKANG

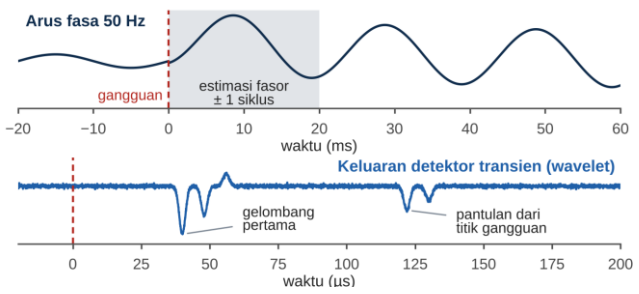
Keandalan penyulang distribusi tegangan menengah menentukan mutu layanan listrik; Pada penyulang radial yang panjang dan bercabang, gangguan hubung singkat harus segera dideteksi, diisolasi, dan ditemukan lokasinya agar pasokan cepat pulih.

Proteksi distribusi yang umum digunakan saat ini, relai arus lebih (OCR/GFR) bekerja dari fasor 50 Hz dengan keputusan berorde puluhan hingga ratusan milidetik dan tanpa informasi jarak, sehingga lokasi gangguan masih dicari melalui patroli, terlebih dengan hadirnya pembangkit EBT berbasis inverter.

Di sisi lain, gangguan hubung singkat selalu membangkitkan **gelombang berjalan** (*travelling wave*, TW), yaitu perubahan tegangan dan arus mendadak yang merambat dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Gelombang ini tiba di gardu dalam hitungan mikrodetik dan waktu tibanya menyimpan informasi jarak, sehingga berpotensi menjadi dasar proteksi yang jauh lebih cepat sekaligus mampu menunjukkan lokasi gangguan (Gambar 1).

320,24 menit — SAIDI PLN 2024: rata-rata lama padam per pelanggan per tahun

Sumber: PLN (2025); Kementerian ESDM, RUPTL PLN 2025–2034.

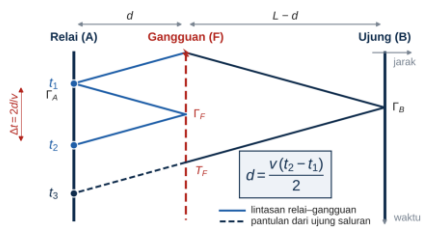


Gambar 1. Informasi yang dibaca relai konvensional (fasor 50 Hz, orde milidetik) dibandingkan dengan relai TW (muka gelombang, orde mikrodetik). Ilustrasi.

2 TUJUAN DAN SOLUSI

Berdasarkan permasalahan tersebut, kegiatan penelitian ini mengembangkan relai proteksi berbasis gelombang berjalan yang bekerja dari **satu titik ukur di gardu induk** (*single-ended*), tanpa sinkronisasi GPS maupun saluran komunikasi, melalui tiga sasaran yang berurutan.

1. **Deteksi.** Mengenali kedatangan muka gelombang dalam orde mikrodetik melalui transformasi modal dan wavelet, sekaligus menentukan arah gangguan dari polaritas tegangan dan arus.
2. **Penentuan lokasi.** Menghitung jarak dari selisih waktu tiba gelombang pertama dan pantulannya dari titik gangguan, sesuai diagram lattice Bewley (Gambar 2).
3. **Implementasi.** Menanamkan algoritma pada FPGA dan mengujinya secara waktu nyata dalam skema *hardware-in-the-loop* (HIL) sebelum penerapan di lapangan.



Gambar 2. Diagram lattice Bewley: gelombang dari titik gangguan F tiba di relai pada t_1, pantulannya dari F tiba pada t_2; selisih keduanya sebanding dengan jarak d.

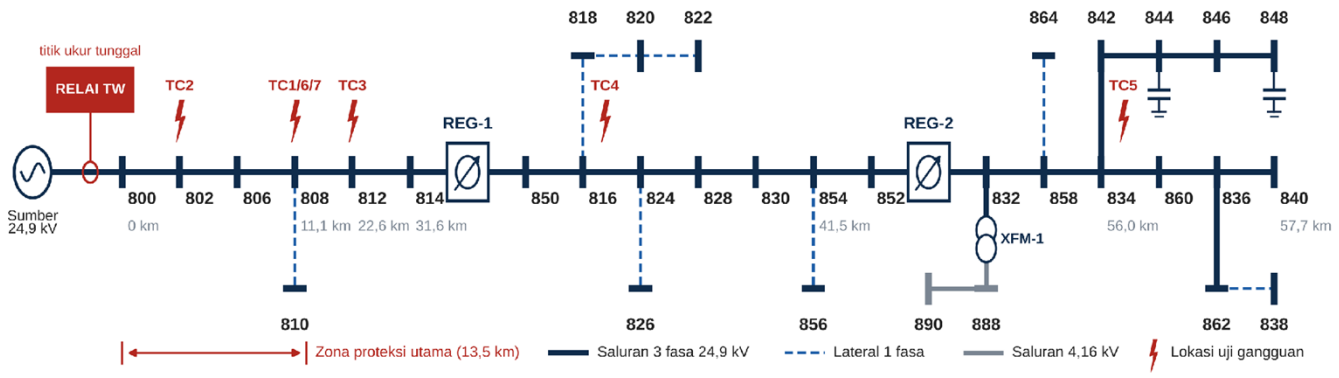
Logika keputusan relai TW satu ujung

Deteksi	Arah	Zona	Konfirmasi	TRIP
|d| > 6σ	sV·sI < 0	pantulan ≤ 112 µs	ΔI selama 0,5 ms	ke PMT

Trip hanya bila keempat syarat terpenuhi; gangguan luar zona dan transien *switching* kapasitor diblokir.

3 METODE DAN TAHAPAN PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan melalui simulasi transien elektromagnetik yang dilanjutkan dengan pengujian perangkat keras. Sistem uji adalah penyulang standar **IEEE 34-bus** (24,9 kV, ±58 km) yang dimodelkan pada MATLAB/Simulink dengan saluran berparameter terdistribusi dan laju pencuplikan 10 MHz (Gambar 3). Penyulang ini menyerupai jaringan distribusi pedesaan di Indonesia: saluran panjang, banyak lateral satu fasa, serta regulator tegangan, trafo, dan kapasitor yang masing-masing memantulkan gelombang.



Gambar 3. Diagram satu garis penyulang IEEE 34-bus sebagai sistem uji: relai TW tunggal di gardu (bus 800), regulator REG-1 dan REG-2, trafo XFM-1, kapasitor 844/848, serta lokasi uji gangguan. Skenario: lima lokasi (0,8–56 km), gangguan satu fasa ke tanah dan tiga fasa, resistansi gangguan 0,1 Ω dan 100 Ω

Alur pengolahan sinyal pada relai TW

1. **Akuisisi** — Tegangan dan arus tiga fasa di gardu (satu titik ukur)
2. **Transformasi modal** — Memisahkan mode aerial (cepat) dan ground (lambat)
3. **Transformasi Wavelet + modulus maxima** — Menandai waktu tiba dan polaritas muka gelombang
4. **Logika relai** — Menentukan arah, jarak dari pantulan, zona, dan konfirmasi arus
5. **Keputusan trip** — Sinyal pemutusan dikirim ke pemutus tenaga (PMT)

Tahapan pelaksanaan kegiatan (2026)

Mar–Jun	Kajian pustaka dan pemodelan penyulang IEEE 34-bus
Jul–Agu	Simulasi variasi skenario gangguan
Sep–Okt	Logika relai, evaluasi akurasi, perbaikan model
Okt–Nov	Perancangan rantai HIL OPAL-RT–FPGA dan diseminasi

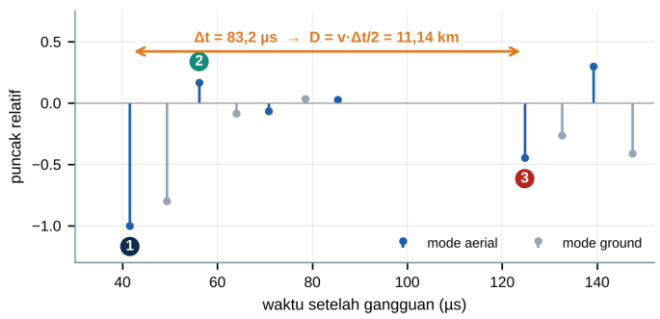
4 HASIL PENELITIAN

Waktu tiba gelombang pertama terbukti berbanding lurus dengan jarak gangguan ($R^2 = 0{,}9999$) dan tidak dipengaruhi jenis maupun resistansi gangguan. Sifat ini membuat relai TW unggul dalam kecepatan dan kemampuan menunjukkan lokasi dibandingkan proteksi arus lebih yang lazim dipakai pada jaringan distribusi di Indonesia (Tabel 1, Gambar 4–6).

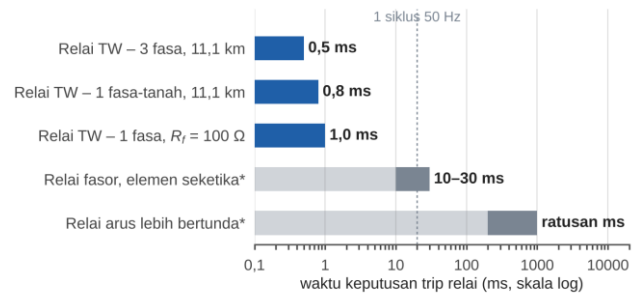
Tabel 1. Perbandingan relai TW dan relai arus lebih

Aspek	Relai arus lebih (konvensional)	Relai *Travelling Wave* simulasi
Besaran dibaca	Fasor arus 50 Hz	**Muka gelombang transien**
Waktu keputusan	10–30 ms hingga ratusan ms	**0,5–1,0 ms**
Informasi lokasi	Tidak ada; perlu patroli	**Jarak dari satu ujung, galat 1–84 m**
Rf tinggi (100 Ω)	Arus turun, sensitivitas berkurang	**Waktu tiba tetap, lokasi tidak berubah**
Pembangkit inverter	Arus terbatas, koordinasi rumit	**Tidak bergantung besar arus**
Kesiapan perangkat	Matang dan ekonomis	**Butuh ≥ 1 MHz dan FPGA; purwarupa**

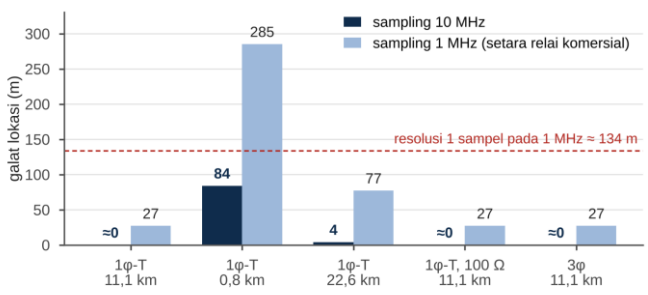
** Nilai tipikal relai konvensional; nilai relai TW dari simulasi kasus di dalam zona proteksi.*



Gambar 4. Prosedur pengolahan sinyal (TC1, gangguan di bus 808): puncak modulus maxima ① gelombang langsung, ② gema cabang 810, ③ pantulan dari titik gangguan; selisih ①–③ menentukan jarak.



Gambar 5. Waktu keputusan trip relai TW (simulasi) dibandingkan nilai tipikal relai konvensional*.



Gambar 6. Galat penentuan lokasi untuk gangguan di dalam zona; laju pencuplikan menentukan resolusi jarak.

Batas metode: gelombang dari balik regulator tinggal ±4% (satu) hingga ±0,1% (dua regulator), sehingga segmen itu perlu titik ukur tambahan. **Keberdayaan:** mitra memperoleh alur simulasi TW yang dapat diulang, modul logika relai, dan prosedur uji.

5 IMPLEMENTASI HARDWARE-IN-THE-LOOP BERBASIS FPGA

OPAL-RT OP5707XG (Model waktu nyata) → **DAC OP5330/32** (±16 V · 16 bit) → **Papan antarmuka** (Atenuasi · Filter anti-alias) → **ADC 12 kanal** (Simultan ≥ 10 MS/s) → **FPGA Artix-7** (Algoritma relai TW)

Sinyal TRIP (3,3 V → level shifter → OP5353) kembali ke simulator: lup tertutup dan latensi relai terukur

Algoritma relai diimplementasikan pada **FPGA** dan diuji dalam skema *hardware-in-the-loop*. Model penyulang dijalankan waktu nyata pada OPAL-RT; sinyal tegangan–arus dikondisikan papan antarmuka, dicuplik ADC, lalu diolah FPGA secara paralel dengan latensi deterministik, sehingga waktu respons relai dapat diukur secara nyata.

Status: spesifikasi perangkat, rantai sinyal, desain papan, dan model waktu nyata selesai; fabrikasi papan dan pemrograman HDL sedang berjalan.



Gambar 7. Pengerjaan dan implementasi algoritma proteksi pada HILS (Hardware-in-the-Loop Simulation).

6 LUARAN PENELITIAN

- **Makalah ilmiah:** "Relai Proteksi Berbasis Travelling Wave untuk Deteksi dan Penentuan Lokasi Gangguan pada Jaringan Distribusi Tegangan Menengah" (dalam proses)
- **Modul dan laporan teknis:** Dasar teori, Logika trip relai TW, dan Panduan uji
- **Perangkat lunak:** Model Simulink IEEE 34-bus dan skrip analisis otomatis
- **Purwarupa HIL:** Rantai OPAL-RT–FPGA (dalam pengerjaan)

ACKNOWLEDGEMENT. Kegiatan ini didanai oleh Program PPMI STEI ITB 2026 (skema Penelitian).