

SISTEM MONITORING TRACK PANJANG BERBASIS ESP32 UNTUK DETEKSI DINI GANGGUAN TRACK CIRCUIT PADA STASIUN KALIWUNGU

Galih Satria^{1*}, Mariana Diah Puspitasari², Dara Aulia Feryando³, Fathurrozi Winjaya⁴,
Meinedianingrum Metri Agrefine⁵

^{1,2,3,4,5} Politeknik Perkeretaapian Indonesia

Keywords:

track circuit;
monitoring system;
MTTD;
ESP-32.

Correspondent Email:

galih@ppi.ac.id

Abstrak: *Track circuit* merupakan bagian penting dalam sistem persinyalan kereta api yang berfungsi mendeteksi keberadaan kereta pada jalur rel. Pada stasiun dengan emplasemen panjang, *track circuit* dibagi menjadi beberapa bagian untuk mengurangi drop tegangan. Akan tetapi pembagian tersebut tidak disertai pemisahan indikator pada *Local Control Panel* (LCP) sehingga ketika terjadi gangguan lokasi gangguan sulit diidentifikasi dan berdampak pada keterlambatan penanganan. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring gangguan *track* panjang berbasis mikrokontroler ESP32 untuk mempercepat proses deteksi gangguan. Sistem memanfaatkan tegangan dari relai *track circuit* sebagai input untuk mengaktifkan indikator LED dan suara, serta mengirimkan notifikasi secara real-time melalui aplikasi Telegram. Data gangguan juga dicatat ke dalam Google sheets sebagai data logger. Metode penelitian dilakukan dengan metode research and development. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mempercepat deteksi gangguan secara efektif dan efisien ditunjukkan dari hasil *Mean Time to Detect* (MTTD) 1,2 menit dari sebelumnya 43,9 menit.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract: *Track circuits* are an essential component of railway signaling systems used to detect train occupancy along the track. At stations with long yard tracks, *track circuits* are divided into several sections to reduce voltage drop. However, this division is not accompanied by separate indicators on the *Local Control Panel* (LCP), making it difficult to identify the exact location of a fault when a disturbance occurs, which leads to delays in handling. This study aims to design and implement a long-track disturbance monitoring system based on an ESP32 microcontroller to accelerate the fault detection process. The system utilizes a signal from the track circuit relay as input to activate LED and audio indicators and sends real-time notifications via the Telegram application. Disturbance data are also recorded in Google sheets as a data logger. The research method used is research and development (R&D). The test results show that the system is able to improve fault detection effectively and efficiently, as indicated by a reduction in the *Mean Time to Detect* (MTTD) from 43.9 minutes to 1.2 minutes.

1. PENDAHULUAN

Industri perkeretaapian adalah salah satu industri penting yang berhubungan dengan pertumbuhan ekonomi dan sebagai transportasi komuter di suatu negara[1]. Perkeretaapian tidak hanya berdampak pada sektor ekonomi, tetapi juga berfungsi sebagai instrumen pembangunan sosial, modernisasi, dan bahkan identitas kebangsaan[2]. Untuk menjamin lalu lintas perkeretaapian yang aman dan lancar, dibutuhkan sistem pengoperasian dan pengendalian yang andal dan terintegrasi.

Sistem Persinyalan adalah suatu sarana untuk menjaga keselamatan dan mengatur operasi kereta api yang efisien dan efektif dengan jalan membagi ruang dan waktu[3]. Sistem persinyalan merupakan salah satu komponen utama dalam penyelenggaraan transportasi perkeretaapian yang berperan penting dalam menjamin keselamatan, keamanan, dan kelancaran perjalanan kereta api. Keamanan operasi dalam sistem persinyalan kereta api tergantung kepada keakuratan dan kemutakhiran posisi dan pergerakan kereta api yang disediakan oleh alat pendeteksi kereta api[4].

Salah satu perangkat fundamental dalam sistem persinyalan adalah *track circuit*, yang berfungsi untuk mendeteksi keberadaan kereta pada jalur rel melalui aliran arus listrik. Informasi dari *track circuit* digunakan sebagai dasar pengendalian sinyal, pengaturan rute, serta pengamanan pergerakan kereta api.

Track circuit adalah kunci dalam persinyalan kereta api, yang secara langsung mempengaruhi efisiensi dalam keseluruhan operasional lalu lintas perkeretaapian[5]. *Track circuit* bekerja dengan memanfaatkan *short circuit* as roda kereta atau arus *feeder* yang diumpankan pada koil relay, *track circuit* juga mempunyai kekurangan yaitu rentan terhadap petir[6]. Kegagalan dan *malfunction* dari *track circuit* mempunyai dua konsekuensi yaitu menyebabkan keterlambatan, dan kecelakaan[4]. Fluktuasi tegangan transien yang merusak relai *track circuit* dapat menghambat perintah operasional kereta api, menunjukkan perlunya sistem pemantauan yang proaktif[7]. Penurunan kinerja *track circuit* adalah hilangnya kontinuitas listrik sementara antara rel dan roda kereta api yang mempengaruhi perangkat peringatan perlintasan sebidang, persinyalan, dan pendeteksian kereta[8].

Pada stasiun dengan emplasemen panjang, seperti Stasiun Kaliwungu, *track circuit* umumnya dibagi menjadi beberapa bagian untuk mengurangi *drop* tegangan dan menjaga keandalan deteksi. Namun, dalam praktik operasional, pembagian *track circuit* tersebut belum diikuti dengan pemisahan indikator gangguan pada *Local Control Panel* (LCP). Akibatnya, ketika terjadi gangguan, petugas kesulitan mengidentifikasi lokasi gangguan secara cepat karena seluruh bagian *track circuit* ditampilkan dalam satu indikator. Kondisi ini berdampak pada lamanya proses penelusuran gangguan, keterlambatan penanganan, serta potensi terganggunya ketepatan waktu perjalanan kereta api.

Dunia yang cepat berubah karena adanya perubahan besar mengubah proses industri karena perkembangan teknologi baru, digitalisasi industri perkeretaapian harus berjalan seiring dengan kemajuan teknologi ini mengingat pentingnya peran industri ini dalam pembangunan ekonomi suatu negara[1]. Teknologi dapat memungkinkan penggunaan sumber daya dan informasi yang lebih efisien dan meningkatkan proses industri[9].

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji sistem monitoring persinyalan dan jalur kereta api, termasuk pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) untuk pemantauan kondisi rel dan peralatan secara real-time. IoT juga berfungsi untuk mengumpulkan dan menganalisis data dari berbagai sensor dan aktuator, yang kemudian dapat diakses melalui smartphone atau komputer secara nirkabel[10]. Beberapa studi menunjukkan bahwa penggunaan mikrokontroler dan sistem komunikasi berbasis jaringan mampu meningkatkan kecepatan penyampaian informasi gangguan kepada petugas. Pengembangan sistem monitoring *track* panjang berbasis ESP32 menjadi krusial untuk mengatasi keterbatasan inspeksi manual yang padat karya, lambat, dan rentan terhadap kesalahan manusia[11]. Namun demikian, penelitian yang secara khusus membahas sistem monitoring gangguan *track circuit* pada emplasemen panjang dengan notifikasi secara real-time masih terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut diperlukan suatu sistem yang mampu memberikan informasi gangguan secara cepat, spesifik, dan mudah diakses oleh petugas tanpa

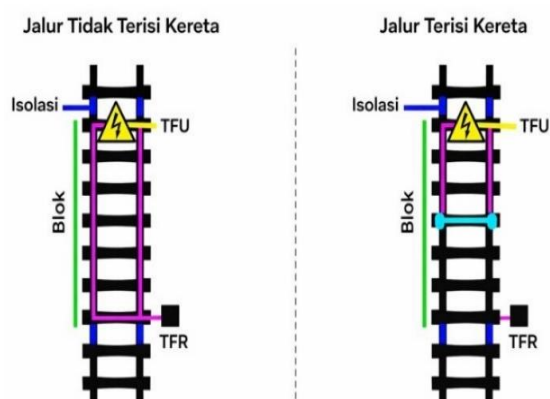
harus bergantung sepenuhnya pada indikator terpusat di LCP. Kebaruan penelitian ini terletak pada implementasi sistem monitoring gangguan *track circuit* pada track panjang berbasis mikrokontroler ESP32 yang memanfaatkan sinyal relay *track circuit* sebagai inputan, dilengkapi indikator LED dan suara, serta notifikasi Telegram dan perekaman data gangguan otomatis pada Google Sheets.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengimplementasikan dan menguji sistem monitoring berbasis ESP32 sebagai sarana deteksi dini gangguan *track circuit* pada stasiun Kaliwungu. Penelitian ini diharapkan dapat mempercepat proses identifikasi gangguan, meningkatkan efisiensi penanganan, serta mendukung keandalan operasi dan pemeliharaan sistem persinyalan kereta api.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Track Circuit

Track circuit adalah salah satu perangkat deteksi yang digunakan pada sistem persinyalan kereta api untuk mengidentifikasi keberadaan sarana seperti kereta api, langsiran, lori, dan material bergerak lainnya di sepanjang jalur rel. Teknologi ini bekerja dengan memanfaatkan rangkaian listrik yang dialirkan melalui rel untuk mendeteksi perubahan resistansi yang terjadi ketika roda logam kereta api atau material lainnya berada dalam area deteksi. Jika terdapat kereta pada bagian *track circuit* ini, maka keadaan akan menyebabkan aliran arus listrik berubah, dimana arus listrik tidak akan melalui lilitan relai melainkan melalui jalan pintas yaitu melalui roda kereta api seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Cara kerja *track circuit*

Hal ini menyebabkan kontak relay tidak bekerja dan akan mengirimkan tegangan ke

relay pada ruang ER (*equipment room*) sehingga PLC (*programmable logic controller*) memproses informasi yang akan ditampilkan pada LCP. Pada LCP indikasi track berwarna merah karena terduduki sarana.

Track circuit memiliki tujuh komponen utama yaitu TFU (*track feed unit*), kabel penghubung, TFR (*track feed relay*), pasak, resistor *variable*, rel, dan IRJ (*insulated rail joint*). TFU berfungsi untuk menyediakan arus listrik ke *track circuit*, sedangkan TFR berfungsi mendeteksi aliran arus listrik pada rel. Pada saat kondisi kosong arus mengalir, kontak relai TFR tetap terhubung yang menunjukkan jalur aman. Sedangkan ketika ada sarana maka roda dan gandar kereta menjadi jembatan paralel (*shunt*) yang menarik arus ke dirinya sendiri, sehingga arus tidak sampai ke relai. Kontak relai akan terputus, menandakan ada kereta di jalur tersebut. Tiap section *track circuit* dipisahkan oleh IRJ yang menunjukkan pembeda antara *track circuit* satu dengan lainnya.

2.2. Perangkat Utama Sistem

2.2.1. Relai

Relai adalah komponen elektromekanik yang berfungsi sebagai saklar listrik yang dikendalikan oleh arus atau tegangan kecil untuk menghubungkan atau memutuskan rangkaian listrik.

2.2.2. Switching Adaptor

Switching adaptor adalah catu daya elektronik yang mengubah tegangan listrik (AC atau DC) menjadi tegangan DC yang diinginkan dengan cara pensaklaran frekuensi tinggi menggunakan rangkaian *switching*.

2.2.3. Mikrokontroler ESP32

mikrokontroler berbasis *sistem on chip* yang memiliki kemampuan pemrosesan tinggi serta dilengkapi modul Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi. ESP32 banyak digunakan dalam aplikasi *Internet of Things* (IoT) karena mendukung komunikasi data secara real-time, konsumsi daya rendah, serta fleksibilitas pemrograman.

2.2.4. Modul MP3-TF-16P

Modul MP3-TF-16P adalah modul pemutar audio digital yang digunakan untuk memutar file suara berformat MP3 yang tersimpan pada kartu microSD (TF card). Modul ini dapat dikendalikan melalui komunikasi serial oleh mikrokontroler seperti ESP32.

2.2.5. Speaker

Speaker adalah perangkat output audio yang berfungsi mengubah sinyal listrik menjadi gelombang suara sehingga dapat didengar oleh manusia.

2.2.6. LED

LED (*Light Emitting Diode*) adalah komponen semikonduktor yang memancarkan cahaya ketika dialiri arus listrik dengan arah maju.

2.3. Mean Time To Detect

Mean Time To Detect (MTTD) mengukur durasi rata-rata yang dibutuhkan untuk mengidentifikasi insiden atau ancaman keamanan dalam suatu sistem[12]. MTTD (*Mean Time to Detect*) adalah rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk mendeteksi terjadinya suatu gangguan sejak gangguan tersebut muncul hingga pertama kali teridentifikasi oleh sistem atau petugas.

MTTD digunakan untuk mengukur kecepatan deteksi pada sistem monitoring, khususnya pada sistem kritis seperti persinyalan dan *track circuit*. Nilai MTTD yang lebih rendah sangat diinginkan, karena berkorelasi langsung dengan pengurangan *downtime* dan peningkatan *availability* sistem, sehingga dapat meminimalkan gangguan operasional dan biaya terkait[13]. Semakin kecil nilai MTTD, semakin cepat gangguan terdeteksi, sehingga penanganan dapat dilakukan lebih dini dan risiko gangguan operasi dapat diminimalkan.

$$MTTD = \frac{\sum \text{waktu deteksi gangguan}}{\text{jumlah gangguan}} \dots (1)$$

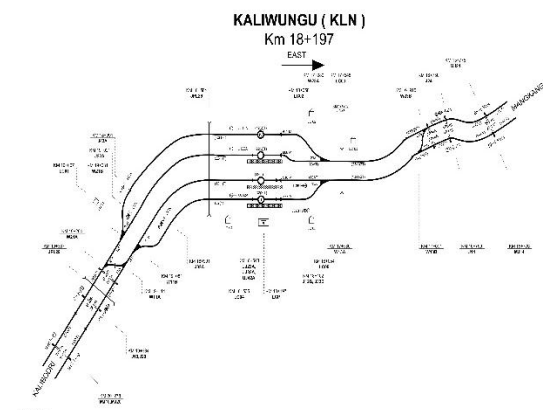
3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Jenis Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian terapan dengan metode penelitian R&D (*research and development*). R&D mencakup pendekatan sistematis terhadap inovasi, mulai dari penelitian dasar hingga penciptaan dan validasi produk atau proses baru[14]. Penelitian R&D adalah metode penelitian yang bertujuan menghasilkan, mengembangkan, dan menguji suatu produk, sistem, atau metode baru agar layak digunakan. Dalam penelitian R&D, proses tidak hanya berhenti pada analisis masalah, tetapi dilanjutkan dengan perancangan, pembuatan, pengujian, dan penyempurnaan produk berdasarkan hasil evaluasi.

3.2. Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Stasiun Kaliwungu, dengan objek penelitian berupa sistem *track circuit* pada emplasemen stasiun. Gambar 2 menunjukkan emplasemen stasiun Kaliwungu yang memiliki empat track panjang dan terbagi dalam 12 seksi.



Gambar 2. Emplasmen Kaliwungu

3.3. Tahapan Penelitian

Alur penelitian dilakukan secara runtut dan sistematis agar proses penelitian berjalan terarah, meminimalkan kesalahan, serta menghasilkan data dan kesimpulan yang valid, objektif, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Adapun tahapan penelitian dilakukan dengan runtutan sebagai berikut:

1. Analisis Kebutuhan

Analisis dilakukan terhadap kondisi eksisting sistem *track circuit* dan prosedur penanganan gangguan. Tahap ini bertujuan mengidentifikasi

kebutuhan fungsional sistem monitoring, termasuk jenis input, output indikator, dan metode notifikasi yang paling sesuai dengan kondisi lingkungan.

2. Perancangan Sistem

Perancangan meliputi arsitektur sistem, perangkat keras, dan perangkat lunak. Perangkat keras dirancang menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama, dengan trigger input dari relay *track circuit* 24 VDC serta output berupa LED dan modul suara. Mikrokontroler ESP32 memiliki kelebihan lain, yaitu harga yang murah, dan mudah didapatkan di pasaran, ukuran yang kecil dan ringan, sehingga mudah dipasang dengan konsumsi daya yang rendah, sehingga hemat energi dan ramah lingkungan dan memiliki banyak pin input/output (I/O)[15]. Perancangan perangkat lunak harus memperhatikan algoritma pemrograman yang membutuhkan beberapa masukan termasuk ETA (*estimation time arrival*). Masalah estimasi ini memerlukan pembuatan ETA baru seiring berjalannya waktu dan kereta melaju di jalur rel. Setiap kali kereta mencapai salah satu dari sejumlah lokasi tetap di jalur rel, data dikumpulkan dan perkiraan waktu perjalanan baru ke tujuan dihasilkan[16]. Perangkat lunak yang dirancang meliputi algoritma deteksi gangguan, pengiriman notifikasi Telegram, dan pencatatan data ke Google Sheets.

3. Integrasi Sistem

Integrasi sistem merupakan proses menggabungkan seluruh komponen sistem, baik perangkat keras maupun perangkat lunak yang sudah terpasang dengan sistem baru ataupun eksisting yang sudah terpasang, agar dapat bekerja secara terpadu sebagai satu kesatuan. Tujuan integrasi sistem adalah memastikan komunikasi antar komponen berjalan dengan baik sehingga sistem dapat berfungsi sesuai dengan desain dan kebutuhan operasional.

4. Pengujian Sistem

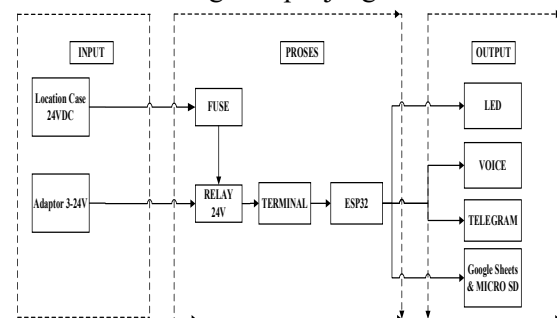
Pengujian sistem adalah tahap untuk memastikan bahwa seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak bekerja sesuai dengan perancangan dan spesifikasi yang telah ditetapkan. Pengujian dilakukan untuk memverifikasi fungsi, keandalan, dan kinerja sistem, serta untuk mengidentifikasi dan memperbaiki kesalahan sebelum sistem digunakan secara operasional.

5. Evaluasi dan Analisis Data

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan waktu deteksi gangguan sebelum dan setelah sistem diterapkan menggunakan metode MTTD.

3.4. Blok Diagram Alat

Blok diagram merupakan representasi visual sederhana yang menggambarkan hubungan dan alur kerja antar bagian utama suatu sistem. Blok diagram menunjukkan input, proses, dan output dari alat, sehingga memudahkan pemahaman fungsi setiap komponen serta aliran data atau sinyal dalam sistem. Gambar 3 menunjukkan blok diagram sistem monitoring trak panjang.

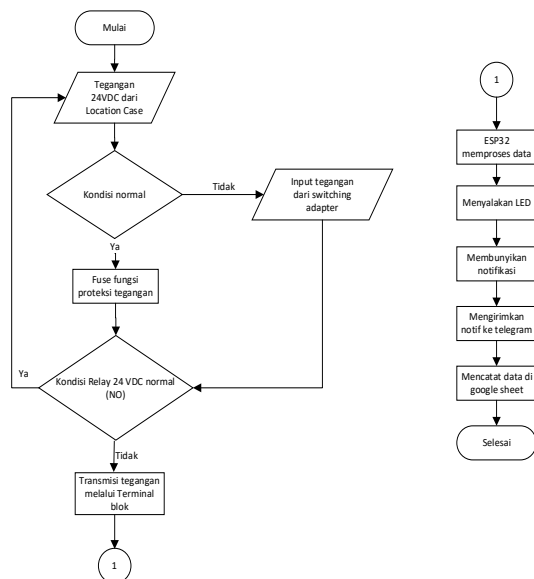


Gambar 3. Blok Diagram Sistem Monitoring Trak Panjang

3.5. Flowchart Sistem

Dalam rancang bangun alat dan dalam pembuatan alur pemrograman diperlukan alat bantu *flowchart*. *Flowchart* dibuat untuk mempermudah peneliti dalam memvisualisasikan alur kerja sistem, membantu perancangan logika program, menjadi panduan implementasi perancangan alat, dan mempermudah poin-poin dalam pengujian alat dan alur pemrograman. Gambar 4 menunjukkan

flowchart dari cara kerja sistem monitoring track panjang.



Gambar 4. *Flowchart* sistem monitoring track panjang

Tahap awal pada cara kerja sistem ini dimulai pada tegangan *track circuit* dengan *input* tegangan 24VDC. Kondisi tegangan dari location case (LC) dapat mengalami dua kondisi yaitu saat kondisi normal atau *track clear* dan saat gangguan atau terdapat sarana yang melintas. Jika kondisi normal tegangan disupply oleh tegangan 24VDC dari LC. Selanjutnya menuju ke fuse untuk proteksi tegangan. Kemudian terhubung dengan koil relay 24VDC, kondisi koil relai tidak aktif atau NO. Sehingga tegangan akan kembali lagi menuju ke LC. Namun saat kondisi gangguan tegangan 24VDC dari LC akan terputus. Menyebabkan supply tegangan berasal dari *Switching adaptor* yang langsung terhubung dengan kontak relai 24VDC. Relai akan aktif menyebabkan kondisi yang semula NO menjadi NC yang akan menjadi trigger input tegangan yang akan terhubung dengan ESP32. Output dari ESP32 berupa LED, *voice*, dan telegram. Selain itu riwayat dari gangguan akan terekam pada google sheets.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Analisis Kebutuhan Alat

Analisis kebutuhan alat sistem monitoring dengan melihat kondisi peralatan eksisting dari *track circuit* diperlukan komponen input, processing, dan output untuk menjadikan

peralatan sistem monitoring track panjang. Adapun komponen dalam mendukung inputan dari *track circuit* yang nantinya mentrigger mikorkontroler ESP 32 adalah relai, kabel, dan *switching adaptor*. Untuk kebutuhan proteksi dan processing digunakan fuse, relai, dan mikrokontroler ESP32. Adapun untuk output digunakan LED, modul MP3, Speaker, dan wireless hotspot untuk keperluan IOT notifikasi via telegram dan Google Sheet.

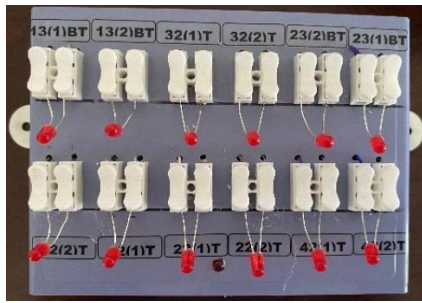
4.2. Hasil Perancangan Alat

Dalam perancangan alat sistem monitoring *track* panjang dilakukan perangkaian komponen yang diperlukan baik untuk perangkat input, proses, dan output. Mikrokontroler ESP 32 yang merupakan *evaluator* deteksi gangguan yang dirangkai dengan 12 relai 24 VDC untuk mendeteksi gangguan pada 12 seksi track panjang yang ada pada stasiun Kaliwungu.

Pada output mikrokontroler ESP32 dirangkai dengan perangkat notifikasi seperti LED dan modul MP3-TF-16P untuk dapat memberikan indikator peringatan adanya kegagalan pada track panjang dengan indikasi LED yang berkedip dan peringatan suara. LED disusun dua baris dengan masing-masing baris berjumlah 6 LED yang disusun berdasarkan seksi setiap *track*.

Penempatan *box* peralatan monitoring *track* panjang diletakkan di ruang Sintel untuk memudahkan PNC (petugas negatif cek) dalam menjangkau dan pengidentifikasian dini gangguan *track* panjang. Sistem monitoring track panjang menerapkan konsep IOT (*Internet of Things*) dalam proses notifikasinya jarak jauhnya sehingga mikrokontoller ESP32 harus terhubung dengan jaringan internet melalui *wireless hotspot* untuk dapat memberikan notifikasi ke petugas PNC apabila tidak berada di dalam ruangan melalui telegram.

Selain itu untuk sistem monitoring memiliki database perekaman *history* kegagalan pada track panjang yang otomatis akan merekam setiap kegagalan yang terjadi pada Google sheet. Gambar 5 menunjukkan bentuk alat sistem monitoring track panjang yang terpasang di ruang kantor Sintel 4.5 Kaliwungu.



Gambar 5. Alat monitoring *track* panjang

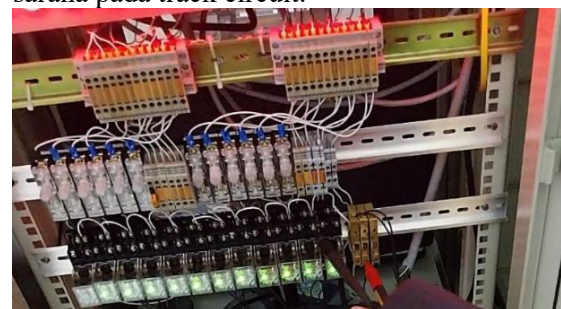
Pemrograman mikrokontroller ESP32 merupakan penentu dalam tata kerja sistem monitoring. Mikrokontroller ESP32 difungsikan sebagai otak dalam pendeteksian gangguan harus diprogram sesuai dengan kondisi eksisting di stasiun Kaliwungu dengan mempertimbangkan banyak seksi *track circuit*, *track* terpanjang, dan jenis rangkain KA terpanjang yang melewatinya, serta regulasi kecepatan sarana kereta api yang melewatinya sebagai masukan dalam algoritma pemrograman sehingga dapat memberikan notifikasi warning gangguan *track* panjang secara akurat.

Jarak *track* terpanjang adalah jumlah panjang dari jarak *track* 23(1)BT, 23(2)BT, dan jalur III dengan total panjang *track* 2,033km. Sedangkan panjang rangkain kereta terpanjang adalah pada rangkaian kereta barang dengan 30 rangkaian gerbong dengan total panjang yaitu 440m dimana batas kecepatan kereta barang ketika melewati emplasmen adalah 30km/jam. Dari data ini didapatkan waktu yang dibutuhkan pada kereta barang melalui *track* panjang yaitu 4,95 menit dibulatkan menjadi 5 menit yang digunakan sebagai referensi dalam pemrograman lebih lama daripada kebutuhan waktu rangkaian lokomotif ataupun kereta penumpang yang memiliki rangkaian kereta yang lebih pendek dan dapat dipastikan memiliki waktu melewati emplasmen *track* panjang yang lebih cepat. Hal ini bertujuan mengakomodir rangkaian kereta barang yang melewati *track* panjang dengan rangkain gerbong yang cukup panjang untuk menghindari *false detection* dari sistem monitoring.

4.3. Hasil Integrasi Sistem

Integrasi dilakukan dengan penggabungan peralatan sistem monitoring dengan peralatan *track circuit* yang sudah terpasang. Interkoneksi sistem monitoring

dilakukan pada mencuplik tegangan pada rak evaluator yang terdiri dari 12 relay yang mewakili 12 seksi *track circuit* yang di monitoring pada ruang ER (equipment room). Untuk menyampaikan inputan tegangan yang rak evaluator pada ER dengan alat monitoring yang berada di kantor sintel disambungkan dengan kabel YSLY 16x0,5mm². Penggunaan kabel YSLY untuk menghubungkan inputan dari rak evaluator di ruang ER dengan ruang kantor Sintel dengan mempertimbangan adanya interferensi dari pergerakan kereta api yang mengakibatkan efek dopler sehingga berpotensi mengganggu propagasi sinyal. Dengan pertimbangan tersebut dipilihlah interkoneksi kabel yang kuat dan handal untuk inputan pada sistem monitoring dibandingkan wireless. Walaupun untuk beberapa output menggunakan wireless communication dengan memanfaatkan IOT untuk pengiriman telegram dan perekaman data pada Google sheet. Gambar 6 menunjukkan rangkaian input sistem monitoring yang mencuplik tegangan dari rak evaluator di ruang ER sebagai penunjuk adanya sarana pada *track circuit*.



Gambar 6. Rangkaian input sistem monitoring

4.4. Hasil Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan dengan mengevaluasi kinerja seluruh sistem dan validitas alat yang telah dirancang. Pengujian sistem dilakukan dengan *black box testing* yaitu menguji fungsi dan output sistem sesuai spesifikasi. Testing ini untuk menguji fungsi input-output apakah ketika ada gangguan (input), alat memberikan respon yang benar (output) dan berdampak pada durasi penanganan [17]. Berdasarkan input tegangan dari setiap *track* yang berasal dari *relay track* sebesar 24VDC. Input diberikan tegangan seolah-olah terjadi adanya gangguan yang akan mentrigger inputan 3.3VDC dari adaptor ke mikrokontroller ESP32 untuk selanjutnya diproses pada mikrokontroler dan akan

memberikan notifikasi gangguan sesuai dengan track yang mengalami gangguan dengan notifikasi berupa suara, LED berkedip, pesan via telegram, dan rekaman data gangguan pada Google sheet yang ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Pengujian sistem monitoring track panjang

Kondisi Track Circuit		Notifikasi		
Normal	Gangguan	LED	Voice	Telegram
Ya		mati	mati	tidak kirim
	12(1) T	kedip	bunyi	kirim
	12(2) T	Kedip	bunyi	kirim
	22(1) T	Kedip	bunyi	kirim
	22(2) T	Kedip	bunyi	kirim
	32(1) T	Kedip	bunyi	kirim
	32(2) T	Kedip	bunyi	kirim
	42(1) T	Kedip	bunyi	kirim
	42(2) T	Kedip	bunyi	kirim
	13(1) BT	Kedip	bunyi	kirim
	13(2) BT	Kedip	bunyi	kirim
	23(1) BT	Kedip	bunyi	kirim
	23(2) BT	Kedip	bunyi	kirim

Dari pengujian sistem monitoring track panjang secara keseluruhan, didapatkan hasil pengujian yang memuaskan dimana semua kondisi yang dicobakan memberikan hasil yang sesuai dengan kondisi yang diharapkan dan mampu mendeteksi gangguan pada seksi-seksi track circuit.

4.5. Hasil Evaluasi dan Analisis Data

Tabel 2 menunjukkan perbandingan hasil pengujian sistem secara keseluruhan untuk pendeteksian gangguan pada track panjang dengan membandingkan dengan sembilan data history gangguan track panjang yang pernah terjadi.

Tabel 2. Perbandingan waktu deteksi gangguan

Gangguan	Waktu Deteksi		Lokasi
	Sebelum	Setelah	
1	41 menit	5 menit 7 detik	Track Awal
2	40 menit	5,20 detik	Track Lanjutan

3	40 menit	4,50 detik	Track Lanjutan
4	47 menit	4,19 detik	Track Lanjutan
5	45 menit	5 menit 10 detik	Track Awal
6	40 menit	4,20 detik	Track Lanjutan
7	45 menit	4,09 detik	Track Lanjutan
8	49 menit	4,13 detik	Track Lanjutan
9	48 menit	4,35 detik	Track Lanjutan
Total Waktu	395 menit	10.8 menit	
MTTD	43.9 menit	1.2 menit	

Dari pengujian yang dilakukan untuk pendeteksian gangguan menggunakan sistem monitoring *track* panjang cukup efektif menunjukkan adanya gangguan. Pada *track* panjang sistem monitoring dapat mendeteksi gangguan dalam waktu sekitar 5 menit, sedangkan pada track lanjutan dibutuhkan waktu rata rata sekitar 4,4 detik.

Sedangkan untuk dari hasil perhitungan MTTD untuk waktu rata-rata PNC (petugas negative check) dalam mendeteksi gangguan pada *track* panjang sebelum dan sesudah sistem monitoring *track* panjang digunakan sangat signifikan bahwa sebelum dioperasikan sistem monitoring waktu MTTD oleh petugas PNC adalah 43.9 menit sedangkan setelah pengoperasian sistem monitoring menjadi 1.2 menit. Hal ini menunjukkan kecepatan dan ketepatan petugas PNC dalam pendeteksian masalah track panjang semakin cepat, efektif dan efisien sehingga secara signifikan mencegah keterlambatan perjalanan kereta api yang akhirnya memberikan kenyamanan dan keamanan perjalanan pada penumpang kereta api.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring berbasis ESP32 untuk deteksi dini gangguan

track circuit pada stasiun Kaliwungu didapatkan poin-poin sebagai berikut:

- **Keberhasilan Perancangan**
Perancangan alat monitoring gangguan *track circuit* pada *track* panjang di stasiun Kaliwungu berhasil diimplementasikan dengan baik dengan memberikan response deteksi dini dari 12 kombinasi seksi *track* yang ada dengan deteksi pemandu posisi *track* yang bermasalah berupa *flashing* LED, *voice alarm*, dan *broadcast* Telegram ke petugas PNC.
- **Kinerja Sistem**
Implementasi alat monitoring gangguan *track* panjang pada stasiun Kaliwungu memberikan kemudahan bagi petugas PNC untuk mendeteksi adanya gangguan pada *track circuit* dengan cepat, dari rata-rata waktu pendeteksian gangguan yang pernah terjadi berdasarkan *log-book* kegiatan PNC yang membutuhkan waktu 44 menit menjadi sekitar 5 menit untuk *track* awal dan kurang lebih 4,4 detik untuk *track* lanjutan.
- **Kontribusi Penelitian**
Penelitian ini memberikan manfaat bagi petugas PNC dalam melakukan pendeteksian dini adanya gangguan pada *track* panjang secara efektif dan efisien sehingga perjalanan kereta api tidak terhambat yang menyebabkan kerugian operasional pada perusahaan.
- **Rekomendasi Pengembangan**
Penerapan metode pendeteksian kereta pada *track* awal dengan tambahan *hardware* ataupun peningkatan algoritma pemrograman yang efektif untuk mempersingkat waktu pendeteksian gangguan *track* awal sehingga bisa mendekati pendeteksian gangguan seperti halnya pada *track* lanjutan.

Secara garis besar implementasi sistem monitoring *track* panjang untuk deteksi dini gangguan *track circuit* pada stasiun Kaliwungu yang telah dikembangkan mampu memberikan jawaban kepada kebutuhan dunia industri dalam peningkatan keamanan, kenyamanan, dan keselamatan perjalanan kereta api.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala unit beserta petugas PNC UPT Resor Sintel 4.5 Kaliwungu, serta seluruh pihak yang terlibat, atas dukungan, bimbingan, dan kerja sama yang diberikan selama pelaksanaan penelitian. Kontribusi dan fasilitasi yang diberikan sangat membantu kelancaran seluruh tahapan penelitian sehingga dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Laiton-bonadiez, J. W. Branch-bedoya, J. Zapata-cortes, E. Paipa-sanabria, and M. Arango-sera, "Industry: A Systematic Review," 2022.
- [2] J. Society, "Sejarah Perkeretaapian Dan Relevansinya Terhadap Perekonomian Masyarakat Pulau Jawa 1917-2017 The History of Railways and Their Relevance to the Economy of," vol. 1, pp. 146–161, 2025.
- [3] M. Alhan, Y. Finayani, and P. B. Utomo, "Analisis Pendeteksi Kereta Api Dengan Axle Cunter Altopro Pada Sistem Persinyalan SIL-02," 2025.
- [4] J. Wybo, "Track circuit reliability assessment for preventing railway accidents," *Saf. Sci.*, no. January, pp. 0–1, 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.03.022.
- [5] W. Tao, X. Li, and Z. Li, "Track Circuits Fault Diagnosis Method Based on the UNet-LSTM Network (ULN)," vol. 2024, 2024, doi: 10.1155/2024/1547428.
- [6] M. D. Puspitasari and F. H. Purwaka, "Analisis Perbandingan Pendeteksi Sarana Pada Lintas Surabaya – Madiun," vol. 1, no. November, 2017.
- [7] U. Kornkanok, S. Deeon, and S. Wongcharoen, "Safety hysteresis comparator design for transient overvoltage detection," vol. 34, no. 1, pp. 69–80, 2024, doi: 10.11591/ijeecs.v34.i1.pp69-80.
- [8] F. R. Administration, "TRACK CIRCUIT SHUNTING," no. July, 2021.
- [9] T. Niebel, F. Rasel, and S. Viete, "BIG data – BIG gains ? Understanding the link between big data analytics and innovation," vol. 8599, 2019, doi: 10.1080/10438599.2018.1493075.
- [10] A. Winarno, A. M. Ibad, and D. T. Wahyudi, "PROTOTYPE ALAT PERINGATAN DAN PINTU AIR MIKROKONTROLER ESP32 BERBASIS INTERNET OF THINGS (IoT)," vol. 13, no. 3.
- [11] N. Jones, J. Sebastian, M. M. P. S, N. R. N. R, and R. J. Renjith, "Real-Time Railway Track Monitoring Using Yolov8 and Embedded Systems for Automated," no. April, 2025.

- [12] V. Savchenko *et al.*, “Time Aspect of Insider Threat Mitigation,” vol. 19, no. 1, pp. 129–144, 2024, doi: 10.3849/aimt.01830.
- [13] T. Theodoropoulos, J. Violos, A. Makris, and K. Tserpes, “A New Approach for Evaluating the Performance of Distributed Latency-Sensitive Services”.
- [14] et al. Bakara, Y., Sinaga, T., Febianti, A., “RANCANGAN VFR ROUTE DI PERUM LPPNPI CABANG PEMBANTU PANGKALAN BUN,” vol. 5, no. 1, pp. 20–26, 2025.
- [15] S. S. Sudewanto, F. Hasan, and M. A. Riyadi, “Pengukuran Listrik Jaringan Tegangan Rendah Secara Online dengan Mikrokontroler ESP32 di PLN UP3 Surabaya Selatan dan UP3 Surabaya Utara Online Low-Voltage Network Electrical Measurement with Microcontroller ESP32 in PLN UP3 Surabaya Selatan and UP3 Surabaya Utara,” vol. 9, no. 2, 2023.
- [16] W. Barbour, J. Carlos, M. Mori, S. Kuppa, and D. B. Work, “Prediction of arrival times of freight traffic on US railroads using support vector regression,” *Transp. Res. Part C*, vol. 93, no. April, pp. 211–227, 2018, doi: 10.1016/j.trc.2018.05.019.
- [17] M. P. A. Ginting and A. S. Lubis, “Pengujian Aplikasi Berbasis Web Data Ska Menggunakan Metode Black Box Testing,” *Cosm. J. Tek.*, vol. 2, no. 1, pp. 41–48, 2024, doi: 10.55537/cosmic.