

Sistem Kendali Jarak Miniatur Kereta Api Menggunakan Sensor Inframerah

1st Mohamad Nadim Djumena
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
nadimmi@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Ahmad Sugiana
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
sugianaa@telkomuniversity.ac.id

3rd Novi Prihatiningrum
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
nprihatiningrum@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Pada penelitian ini, penulis akan membuat sebuah sistem kendali jarak antara dua miniatur kereta api yang berjalan beriringan dengan menggunakan sensor inframerah KY-026 pada on-board di dalam masing-masing miniatur kereta api. LED inframerah (Tx) akan memancarkan cahaya inframerah terhadap LED photodiode (Rx), lalu hasil masukan yang didapatkan oleh sensor akan diolah pada mikrokontroler ESP8266.

Penelitian ini berhasil memberikan jarak aman antar dua miniatur kereta api melebihi jarak pemisah sebesar 12 cm pada kecepatan 12 cm/s dan percepatan 10 cm/s^2 serta dapat berjalan beriringan dengan profil kecepatan rata-rata sebesar 8.73 cm/s pada lintasan 80 cm dengan waktu tempuh 9.34 detik.

Kata Kunci : Kontrol Kereta Api, Sensor Inframerah, Moving Block, Safety Distance, Miniatur Kereta Api

Abstract

In this research, the author will create a distance control system between two miniature trains that run hand in hand by using the KY-026 infrared sensor on-board in each miniature train. The infrared LED (Tx) will emit infrared light to the photodiode LED (Rx), then the input results obtained by the sensor will be processed on the ESP8266 microcontroller.

This research successfully provides a safe distance between two miniature trains exceeding the separation distance of 12 cm at a speed of 12 cm/s and acceleration of 10 cm/s^2 and can walk hand in hand with an average speed profile of 8.73 cm/s on a track of 80 cm with a travel time of 9.34 seconds.

Keywords: Train Control, Infrared Sensor, Moving Block, Safety Distance, Miniature Railway

I. PENDAHULUAN

Persinyalan kereta api memiliki peran vital yang berfungsi untuk mengatur lalu lintas kereta api sehingga dapat mengamankan transportasi dengan moda kereta api. Terdapat masinis yang bertugas untuk mempercepat, memperlambat atau menghentikan kereta api dengan mengikuti isyarat dari sinyal kereta api seperti macam-macam sinyal yang digunakan di Indonesia dari sinyal mekanik hingga sinyal elektrik. Dengan meningkatnya frekuensi perjalanan kereta api, beberapa macam sinyal semakin berkurang efektifitasnya sehingga tidak dipergunakan lagi disebabkan peningkatan kapasitas perjalanan kereta api. Seiring perkembangan teknologi, peranan masinis juga dapat dikembangkan dengan suatu teknologi otomasi yang berbasis komunikasi sehingga dapat mengurangi resiko human error pada pengoperasian perjalanan kereta api.[1]–[3]

Teknologi persinyalan kereta api secara konvensional berdasarkan pada sinyal cahaya berwarna dan deteksi kereta api dengan bantuan sirkuit lintasan dan penghitung gandar. Meskipun teknologi ini masih relevan untuk pendeteksian dan pengendalian kereta api, namun teknologi tersebut belum dapat memanfaatkan kapasitas perjalanan kereta api secara maksimal. Selain kapasitas perjalanan kereta api, keamanan dalam pengoperasian kereta api secara otomatis juga perlu dipertimbangkan. [4]

Berkembangnya teknologi yang semakin modern dengan menggunakan komunikasi nirkabel telah menjadi salah satu pilihan alternatif dalam mengoperasikan kereta api, seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Sugiana, Ahmad; Sanyoto, Mulyo; Parwito; Gunawan, M. Rachmat; Seo Lee, Key. Sistem kontrol kereta api bermetode intermittent ATP menggunakan sensor inframerah sebagai pendeteksi objek serta menghitung jarak aman dan melakukan perintah pengereman darurat ketika kondisi Sinyal

Dalam Bahaya terpenuhi. Melanjut di penelitian tersebut, sistem dapat dikembangkan dengan menambahkan kemampuan kereta api yang tidak hanya berhenti darurat saja namun juga dapat meneruskan perjalanan kereta api dan menjaga jarak aman secara bersamaan. [5]–[8]

Pada penelitian saat ini, penulis akan membuat rancang bangun suatu sistem yang dapat mendeteksi miniatur kereta api dengan menggunakan sensor inframerah secara on-board dan mengatur kecepatan agar tetap dalam jarak aman sehingga tidak terjadinya resiko kecelakaan. Dengan kontrol menggunakan ESP8266 sebagai mikrokontroler, maka antar miniatur kereta api yang beriringan akan menyesuaikan kecepatan yang sudah diatur dalam bentuk PWM melalui driver motor L293D sesuai dengan jarak aman yang ditentukan.

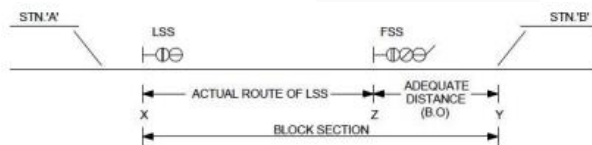
II. KAJIAN TEORI

2.1 Metode Konvensional Pada Kontrol Kereta Api

2.1.1 Absolute Block System

Ruang antara dua stasiun disebut sebagai bagian blok (biasanya lebih dari 6 km). Pada jalur tunggal, jalur harus dikosongkan dari kereta api yang berjalan pada arah yang sama hingga *First Stop Signal* (FSS) ditambah dengan jarak yang cukup dinamai *Block Overlap* (BO).

Jika mengasumsikan sistem kerjanya adalah sinyal cahaya warna aspek ganda, jarak yang memadai atau *Block Overlap* (BO) diambil 180 meter.

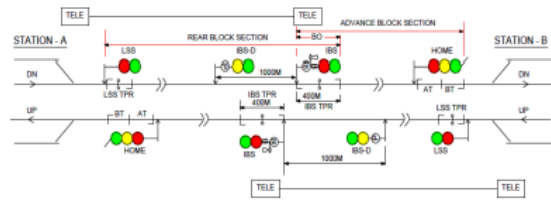


Gambar II-1 Absolute Block System

Hanya satu kereta api yang dapat ditangani di setiap arah pada satu waktu bersamaan. Panjang bagian *Block Absolute* 12-14 km dan pada frekuensi kereta lebih banyak menggunakan sistem *Intermediate Block Signalling* (IBS).

2.1.2 Intermediate Block Signalling (IBS)

IBS adalah pengaturan yang dibuat pada *Double Line Block* untuk meningkatkan Kapasitas Ruas dengan membagi Ruas Block yang panjang menjadi dua Ruas, yaitu '*Rear Section*' dan '*Advance Section*' dengan memasang sinyal IB pada titik percabangan di jalur yang sedang digunakan dengan arah lalu lintas.

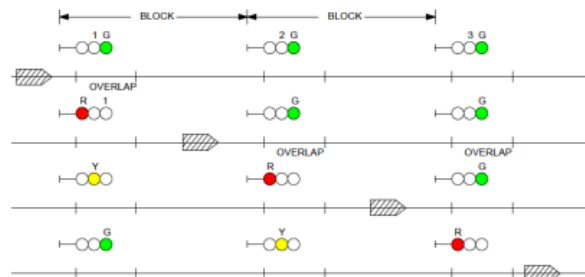


Gambar II-2 Sistem Intermittent Block Signalling

Maksimum dua kereta api dapat ditangani pada bagian *Double Line Block* pada tiap jalur yang digunakan dengan mengadopsi sistem IBS.

2.1.3 Automatic Block Signalling (ABS)

Jalur antara dua stasiun dilengkapi dengan Continuous Track Circuits atau Axle Counters dan dibagi menjadi serangkaian bagian yang disebut "*Automatic Block Signalling Section*". Panjang ABS biasanya sama dengan jarak pengereman sesuai dengan kecepatan maksimum yang diizinkan di bagian tersebut serta sistem yang masuk ke setiap bagian ABS akan dinaungi oleh lampu warna *Multiple Aspect Stop Signal*.

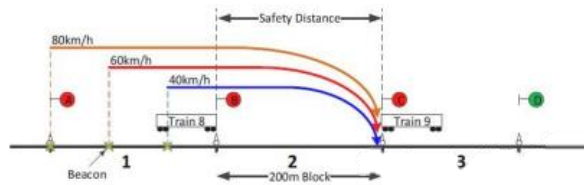


Gambar II-3 Sistem Automatic Block Signalling

2.1.4 Cabin Signalling

Cabin Signalling merupakan sinyal blok tetap yang disempurnakan dalam sistem ini yaitu:

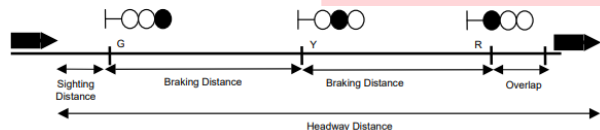
- Sinyal di sisi jalur biasanya tidak digunakan.
- Rel kereta api digunakan untuk menentukan lokasi kereta api.
- Kecepatan dan jarak harus ditempuh dengan tampilan *Train Overview Display* (TOD) serta memberlakukan Automatic Train Protection di dalam kabin.
- Memungkinkan beberapa profil kecepatan dalam blok yang sama, yang berarti memiliki kemampuan untuk memungkinkan kereta bergerak dengan kecepatan yang bervariasi dalam satu blok.
- Tidak mengubah konsep sinyal *Fixed Block* atau konvensional.
- Pengemudi akan menerima indikasi pada TOD apabila terdapat transisi kecepatan.
- Mengurangi headway antara kereta api sehingga meningkatkan kapasitas perjalanan kereta api.



Gambar II-4 Beberapa profil kecepatan dalam Cab Signalling.[4]

2.2 Jarak Pengereman Kereta Api

Jarak Pengereman adalah jarak yang ditempuh kereta api dari ketika masinis melakukan pengereman penuh penuh hingga ketika kereta berhenti.



Gambar II-5 Standar 3 Aspek Pengurutan yang digunakan di Queensland Rail.[9]

Menghentikan kereta api memerlukan kerja. Kerja ini sama dengan perubahan energi kinetik kereta api ditambah perubahan energi potensialnya (perubahan ketinggian akibat gradien jalur).

'Kerja' adalah energi dalam perlambatan kereta selama jarak berhenti, yaitu hasil kali massa kereta (m), laju percepatan kereta (a) (perlambatan adalah percepatan negatif) dan jarak berhenti (S).

Perubahan energi 'kinetik' berhubungan dengan perubahan kecepatan kereta, yaitu selisih kecepatan saat perlambatan dimulai (U) dan kecepatan 'saat berhenti' yaitu 0. Perubahan energi 'potensial' berhubungan dengan perubahan kecepatan kereta, yaitu selisih kecepatan saat kereta mulai berhenti (U) dan kecepatan 'saat berhenti' yaitu 0.

Perubahan energi 'potensial' berhubungan dengan perubahan ketinggian pusat massa kereta akibat gradien jalur, yaitu perbedaan ketinggian saat perlambatan dimulai (h_1), perlambatan dimulai (h_1) dan ketinggiannya pada titik berhenti (h_2), berhenti (h_2).

Secara matematis hal ini dapat dinyatakan sebagai:

$$m * (a) * S + \frac{1}{2} * m * (U^2) + m * g * (h_1 - h_2) = 0 \quad (1)$$

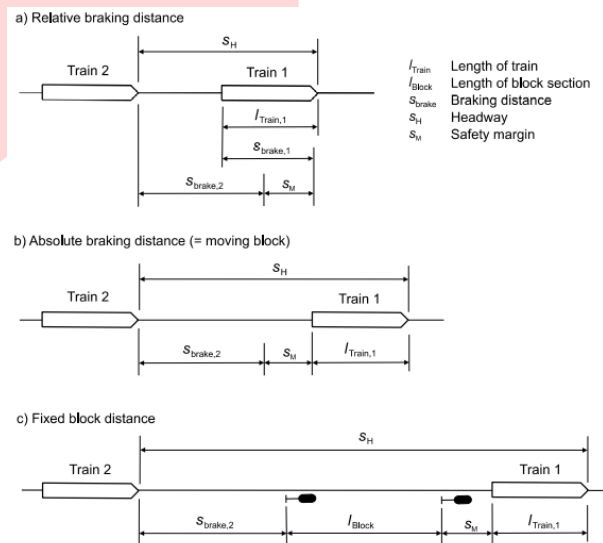
2.2.1 Absolute Braking Distance

Jarak pengereman absolut mengarah pada jarak antara dua kereta berikut yang sama dengan jarak pengereman kereta kedua ditambah margin keselamatan tambahan. Untuk headway minimum, panjang kereta pertama harus ditambahkan.

Pemisahan kereta dengan jarak pengereman

absolut sering dipandang sebagai prinsip pemisahan kereta yang paling cocok. Satu-satunya masalah yang sejauh ini menghalangi penerapan prinsip ini di luar sistem angkutan massal adalah kurangnya teknologi yang dapat digunakan untuk pemeriksaan kelengkapan kereta (integritas kereta).

Kelengkapan kereta (integritas kereta) dari kereta barang, yang diperlukan untuk lokasi yang aman dari bagian belakang kereta. Namun demikian, dengan perkembangan lebih lanjut dari teknologi operasi berbasis radio, pemisahan kereta api dengan jarak pengereman absolut dapat diperkenalkan secara luas dalam waktu dekat. Mode jarak pengereman absolut juga secara umum dikenal sebagai 'moving block'.



Gambar II-6 Prinsip-prinsip pemisahan kereta api.[10]

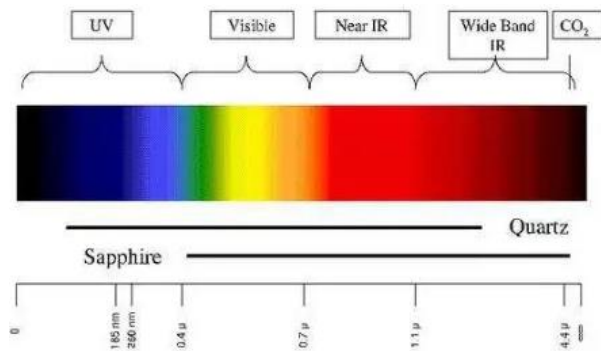
2.3 Pengukuran Jarak Inframerah

Sensor jarak inframerah adalah sejenis sensor yang menggunakan sinar inframerah sebagai medianya. Pada penelitian ini, sensor inframerah menggunakan modul KY-026. Sensor ini memiliki rentang pengukuran sebesar 60° dan waktu respons yang singkat. Sensor jarak inframerah diimplementasikan dengan sepasang sinyal inframerah oleh LED pemancar cahaya inframerah dan fotodioda yang menerima cahaya inframerah. Nilai masukan analog yang diolah dalam bentuk tegangan pada modul KY-026 diperoleh dengan rumus:

$$V = Analog \times \frac{5}{1023} \quad (2)$$

2.3.1 Prinsip Kerja

Spektrum cahaya inframerah dapat terdeteksi menggunakan sensor optic. LM393 yang berperan pada komponen KY-026 untuk mendeteksi radiasi inframerah yang dipancarkan.

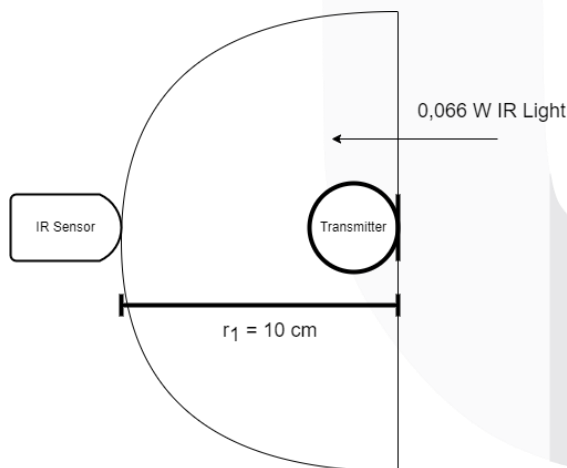


Gambar II-7 Rentang Panjang Gelombang Inframerah

Sensor inframerah ini dapat mendeteksi pancaran inframerah yang memiliki panjang gelombang 760 nm ~ 1100 nm. Jika dalam satuan skalar, sensor ini dapat memiliki kemampuan jarak deteksi maksimal sebesar 20 cm (4.8V) ~ 100 cm (1V) dengan fitur rentang deteksi yang bisa diatur menggunakan potensiometer.

2.3.2 Inverse Square Law

Untuk mendapatkan pemahaman tentang Inverse Square Law, pertama-tama dengan melakukan perhitungan intensitas yang dirasakan pada receiver (Rx) sensor inframerah yang ditempatkan 10 cm dari transmitter (Tx) 0,066 W. Daya radiasi inframerah secara teoritis didistribusikan secara merata di atas area kubah dan dihitung pada Gambar 2.8.



Gambar II-8 Diagram untuk menghitung intensitas radiasi pada sensor inframerah

$$\text{Intensitas sensor pada jarak } r_1 = \phi_r \cong \frac{\text{intensitas}}{2\pi r_1^2}$$

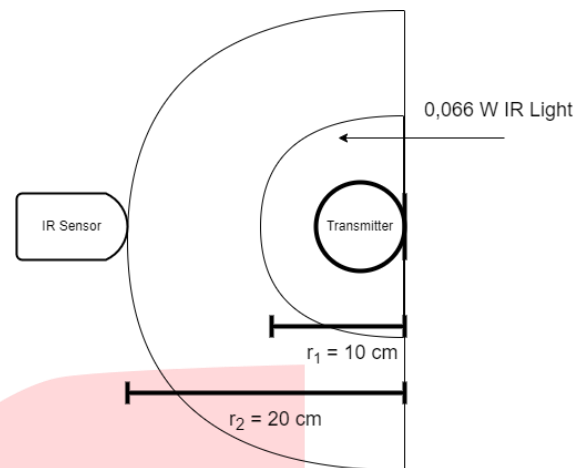
(3)

$$\text{Intensitas sensor pada jarak } r_1 = \phi_r \cong \frac{0.066 \text{ W}}{2\pi(10 \text{ cm})^2}$$

$$\text{Intensitas sensor pada jarak } r_1 = \phi_r \cong 1.05042262 \times 10^{-4} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Setelah melakukan perhitungan tersebut, akan dilakukan perhitungan ketika sensor memiliki jarak 20 cm dengan intensitas cahaya dari Tx yang sama sebesar

0,066 W.



Gambar II-9 Diagram perhitungan intensitas yang diperbarui

$$\text{Intensitas sensor pada jarak } r_2 = \phi_r \cong \frac{0.066 \text{ W}}{2\pi(20 \text{ cm})^2} \quad (4)$$

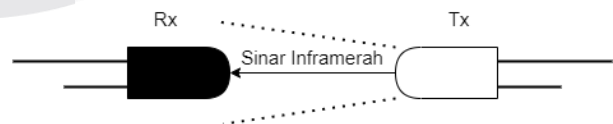
$$\text{Intensitas sensor pada jarak } r_2 = \phi_r \cong 2.62605656 \times 10^{-5} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Seiring dengan bertambahnya jarak dari Tx, nilai intensitas berkurang sebesar $1/r^2$ yang merupakan kebalikan dari jarak, kuadrat - dasar untuk hukum kuadrat terbalik.

Ketika mempertimbangkan jangkauan sensor inframerah, jika jangkauan maksimum perangkat dikatakan 20 cm untuk Tx yang diuji 0.066 W, maka agar perangkat yang sama mendeteksi cahaya inframerah dengan intensitas 0.066 W, perangkat tersebut harus ditempatkan sejauh 10 cm.

2.3.3 Sensor Inframerah Aktif

Sensor inframerah aktif adalah jenis sensor inframerah yang memancarkan radiasi inframerah yang kemudian diterima oleh penerima. IR dipancarkan oleh IR light Emitting Diode (LED) (Tx) dan diterima oleh fotodioda (Rx). Perubahan radiasi menyebabkan perubahan radiasi yang diterima di penerima. Properti ini digunakan untuk menghasilkan output yang diinginkan dengan bantuan sirkuit elektronik terkait.



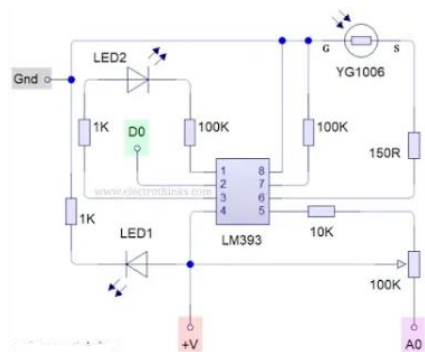
Gambar II-10 Implementasi Transmitter (Tx) & Receiver (Rx)

Jenis sensor IR Aktif ini memiliki pemancar dan penerima yang ditempatkan sedemikian rupa sehingga IR yang dipancarkan oleh pemancar jatuh langsung ke penerima. Selama operasi, sinar IR dipancarkan secara terus menerus ke arah penerima. Jika IR ditransmisikan tetapi diubah, maka penerima menghasilkan output

berdasarkan perubahan radiasi.

2.3.4 KY-026

Pada penelitian ini menggunakan sensor inframerah KY-026. Di dalam modul terdiri dari LED penerima infra-merah YG1006 5mm, komparator diferensial ganda LM393, potensiometer pemangkas, enam resistor, dan dua LED indikator yang digunakan seperti pada gambar.



Gambar II-11 Diagram Skematik KY-026.[13]

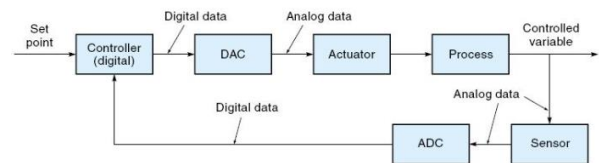
Sensor pada dasarnya mendeteksi panjang gelombang cahaya IR (Infra-Red) antara 760 nm - 1100 nm (nanometer) yang dipancarkan dari Transmitter LED IR. Tegangan operasi adalah dc +3.3V ke + 5V, LED1 menunjukkan sebagai indikator daya di papan sirkuit. Sensor IR YG1006 seperti semua fotosensor lainnya bekerja berdasarkan prinsip bahwa foton dengan energi yang cukup dapat merontokkan elektron sehingga resistansi rangkaian berubah.

Sirkuit terpadu komparator LM393 mengkonversi resistansi ini dan memberikan dua jenis nilai output. Salah satunya adalah nilai Logika di IC pin-2 dan yang lainnya adalah nilai Numerous di IC pin-5 melalui potensiometer. Ketika sensor cahaya inframerah, sinyal HIGH (atau logika 1) akan memberikan pin output digital, jika tidak, maka akan memberikan logika 0. Namun demikian, nilai numerik yang tinggi akan kembali ketika tidak ada cahaya inframerah dan akan turun mendekati nol jika terdapat cahaya inframerah. Memutar potensiometer searah jarum jam dapat meningkatkan ambang pendeteksian dan berlawanan arah jarum jam untuk menurunkannya. LED2 menyala hanya jika sensor mendeteksi cahaya inframerah.

2.4 Sistem Kendali Digital

Pada sistem kendali digital, pengendali menggunakan suatu rangkaian digital seperti komputer yang biasanya berbasis mikroprosesor atau mikrokontroler. Komputer akan menjalankan program secara berulang-ulang (setiap perulangan disebut iterasi). Program memerintahkan komputer untuk mengambil

nilai set point dan data hasil pengukuran dari sensor yang akan digunakan untuk menghitung keluaran pengendali (yang kemudian dikirim ke aktuator).



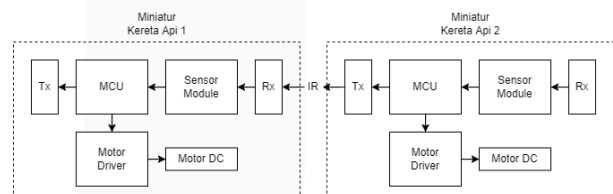
Gambar II-12 Diagram blok dari sistem kendali digital close loop

Pada Gambar 2-12 menunjukkan bahwa sistem kendali digital harus mengubah masukan dan keluaran dalam bentuk analog dari dengan terdapatnya DAC dan ADC. Sinyal feedback dari sensor yang langsung dikirim ke komputer berfungsi sebagai komparator antar nilai set point dengan nilai feedback.

III. METODE

3.1 Desain Perangkat Keras

Pada alat yang akan dirancang akan menggunakan berbagai komponen yang dikonfigurasi agar dapat bekerja sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Pada Gambar 3-1 dapat dilihat hubungan antara komponen yang akan digunakan.



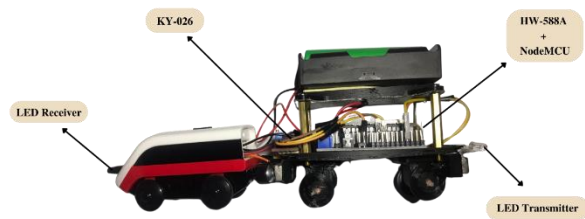
Gambar III-1 Diagram Blok Sistem

Sistem menggunakan LED Inframerah yang sebagai *transmitter* (Tx) untuk mengirimkan cahaya inframerah dan LED Photodioda sebagai receiver (Rx) untuk menerima cahaya inframerah yang akan diolah pada modul KY-026. Cahaya inframerah yang diterima dalam bentuk fisik akan disalurkan dalam bentuk sinyal analog ke *amplifier* kemudian sinyal diperkuat berdasarkan nilai resistansi pada potensiometer.

Nilai masukan yang telah diproses melalui modul KY-026 dalam bentuk analog akan diolah dengan pemrograman Arduino IDE guna merumuskan persamaan jarak ke bentuk satuan skalar lalu memberi keluaran kontrol PWM terhadap motor DC melalui driver motor L293D. Nilai PWM yang dikirim oleh ESP8266 akan dikonversikan ke bentuk tegangan yang menjadi tenaga untuk menggerakkan motor DC.

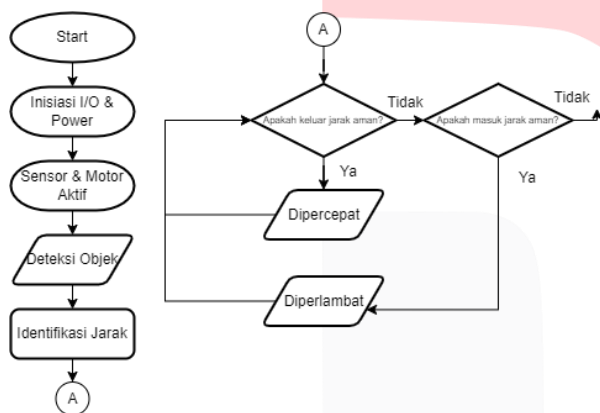
Motor digunakan untuk menggerakkan laju

miniatur kereta api dan baterai digunakan untuk sumber daya kereta api agar dapat bergerak, baterai yang digunakan memiliki fitur dapat diisi kembali dayanya.



Gambar III-2 Ilustrasi Alat

3.2 Desain Perangkat Lunak



Gambar III-3 Flowchart Sistem

Gambar 3-3 merupakan diagram alir pada sistem kendali jarak antar dua miniatur kereta api. Dimulai dari mengaktifkan pin pada komponen yang dialiri daya kemudian sensor dan motor akan aktif. Sistem akan melakukan pendeteksian objek dalam bentuk cahaya inframerah lalu mengidentifikasi jarak berdasarkan nilai tegangan yang dihasilkan pada modul sensor. Jika miniatur kereta api berada di luar jarak aman, maka nilai kecepatan akan bertambah. Jika di dalam jarak aman, maka nilai kecepatan akan berkurang. Sistem akan terus berulang selama sistem masih aktif atau mengidentifikasi jarak.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil pengujian dan analisis pada alat miniatur kereta api yang dikontrol kecepatan berdasarkan jarak aman, zona bahaya, dan di luar pendeteksian sensor.

1. Pengujian sensor inframerah KY-026.
2. Pengujian motor DC.

3. Pengujian sistem automasi kontrol jarak antar dua miniatur kereta api.

4.1 Pengujian Sensor Inframerah KY-026

Pada pengujian sensor inframerah KY-026 ini bertujuan untuk mengetahui jarak dalam satuan cm berdasarkan tegangan pada sensor yang mendeteksi cahaya inframerah. Proses pengujian sensor inframerah dilakukan dengan melakukan percobaan sebanyak 20 kali pada rentang jarak 0 cm sampai dengan 20 cm dan tegangan sampai dengan 5V serta melakukan tuning dengan memutar potensiometer sebanyak 12 kali dari posisi sensitivitas tertinggi.



Gambar IV-1 Sensitivitas Terendah

Gambar 4-1 menunjukkan saat sensor memiliki sensitivitas terendah, tegangan bermula dari 0.64 V pada jarak 0 cm dan berakhir dengan tegangan 4.33 V pada jarak 20 cm. Tegangan belum mencapai 5 V mengindikasikan bahwa jarak deteksi sensor dapat dilakukan lebih dari 20 cm.



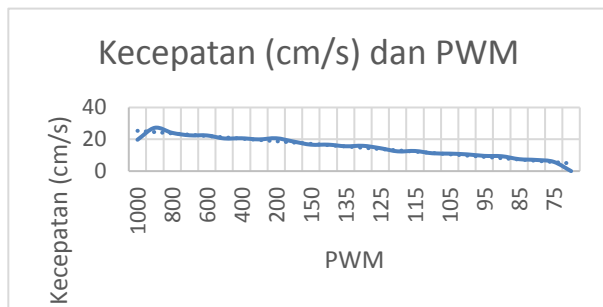
Gambar IV-2 Naik 12 Putaran Potensiometer

Gambar 4-2 menunjukkan saat potensiometer diputar sebanyak 12 kali, tegangan bermula dari 0.80 V pada jarak 0 cm dan berakhir dengan tegangan 5 V pada jarak 20 cm. Tegangan telah mencapai 5V pada jarak 18 cm merupakan jarak maksimal sensor agar dapat mendeteksi cahaya inframerah.

4.2 Pengujian Motor DC

Pengujian motor DC bertujuan untuk mengetahui nilai kecepatan perjalanan kereta api dalam satuan cm/s berdasarkan nilai PWM yang menjadi masukan pada

pemrograman di mikrokontroler.



Gambar IV-3 Pengujian Motor DC

Gambar 4-3 adalah hasil pengujian motor DC. Pengujian dilakukan sebanyak 26 kali dengan menjalankan miniatur kereta api yang bergerak lurus sejauh 70 cm dan rentang 50 sampai 1000 PWM. Motor DC hanya dapat bekerja pada rentang 75 sampai 1000 PWM, pada rentang 200 hingga 1000 PWM tidak memiliki peningkatan kecepatan dan kurang dari 50 PWM tidak dapat menggerakkan motor DC yang sebabkan terbatasnya kemampuan motor DC. Oleh karena itu, motor DC hanya akan menggunakan nilai 75 sampai 200 PWM yang telah dikonversi dalam satuan kecepatan cm/s dengan menghitung jarak yang dibagi oleh waktu tempuh.

4.3 Pengujian Sistem Kendali Jarak Antar Dua Miniatur Kereta Api

Proses pengujian sistem kendali jarak antar dua miniatur kereta api yang berjalan beriringan bertujuan untuk merancang jarak aman dan mengatur kecepatan pada miniatur kereta api terhadap jarak yang terdeteksi oleh sensor inframerah dengan melakukan dua jenis pengujian yaitu ketika salah satu miniatur kereta api yang bergerak dan kedua miniatur kereta api berjalan beriringan.

Tabel IV-1 Percobaan Nilai Percepatan Terhadap Keamanan

Percobaan Ke-	Percepatan (cm/s ²)	Selisih Jarak (cm)	Keterangan
1	1	0.00	Tidak Aman
2	2	0.00	Tidak Aman
3	3	0.00	Tidak Aman
4	4	0.00	Tidak Aman
5	5	0.00	Tidak Aman
6	6	3.55	Aman
7	7	4.29	Aman
8	8	4.44	Aman
9	9	5.28	Aman
10	10	6.05	Aman

Tabel 4-1 menunjukkan profil percepatan yang diuji keamanannya agar kedua miniatur kereta api dapat memiliki jarak aman sehingga tidak saling bertabrakan atau terlalu berdekatan.

1. Pengujian Jarak Aman

Pada percobaan pertama, miniatur kereta api depan akan memiliki kecepatan statis diam untuk mempermudah pengukuran dengan asumsi kereta api depan akan bergerak dengan kecepatan 12 cm/s. Miniatur kereta api belakang akan berjalan dengan kecepatan awal 12 cm/s dan perlambatan 10 cm/s². Panjang lintasan yang akan ditempuh miniatur kereta api belakang yaitu 35 cm, 70 cm, dan 105 cm.

Waktu durasi pengereman miniatur kereta api yaitu sekitar 1.2 detik. Dengan demikian, jarak aman yang dihasilkan pada percobaan ini dapat dihitung:

$$s_{aman} = v_{KD} \cdot t_{rem} \quad (5)$$

$$s_{aman} = \text{Jarak aman yang dihasilkan}$$

$$v_{KD} = \text{Kereta depan}$$

$$t_{rem} = \text{Durasi pengereman}$$

Tabel IV-2 Percobaan Panjang Lintasan 70 cm

Percobaan Ke-	Selisih Jarak Uji (cm)	Jarak Aman (cm)
1	4.2	18.6
2	4.2	18.6
3	3.3	17.7
4	3.2	17.6
5	2.8	17.2
6	4.7	19.1
7	3.8	18.2
8	3.6	18.0
9	3.0	17.4
10	2.8	17.2
Rata-rata	3.5	17.9
Safety Margin	4.7	

Tabel 4-2 memperlihatkan bahwa selisih jarak miniatur kereta api ketika berhenti memiliki panjang tertinggi 4.7 cm, sehingga panjang tersebut merupakan Safety Margin pada percobaan ini.

Data dari selisih jarak uji pada miniatur kereta api yang didapat, maka secara perhitungan *absolute braking distance (moving block)* dapat ditentukan jarak pemisah antara 2 miniatur kereta api yang dibutuhkan pada *safety margin* sebesar 4.7 cm dengan persamaan:

$$d = d_{brake,2} + d_m \quad (6)$$

Keterangan:

d = jarak pemisah

$d_{brake,2}$ = jarak pengereman

d_m = jarak *safety margin*

Dengan perhitungan GLBB Diperlambat, maka dapat menentukan jarak pengereman dengan persamaan:

$$V = V_0 + a \cdot t \quad (7)$$

$$0 = 12 + (-10) \cdot t$$

$$10t = 12$$

$$t = 1.2 \text{ s}$$

$$X = X_0 + V_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (8)$$

$$X = 0 + 12 \cdot 1.2 + \frac{1}{2} \cdot (-10) \cdot 1.2^2$$

$$X = 7.2 \text{ cm}$$

Hasil perhitungan GLBB Diperlambat mendapatkan hasil perubahan posisi sebesar 7.2 cm yang selanjutnya akan dijadikan jarak pengereman pada

miniatur kereta api. Maka hasil akhir untuk menentukan jarak aman pada miniatur kereta api yaitu:

$$d = 7.2 \text{ cm} + 4.7 \text{ cm} = 11.9 \text{ cm}$$

(9)

Berdasarkan perhitungan tersebut, pengujian pada lintasan 35 cm, 70 cm dan 105 cm menghasilkan jarak melebihi batas jarak aman yang 11.9 cm.

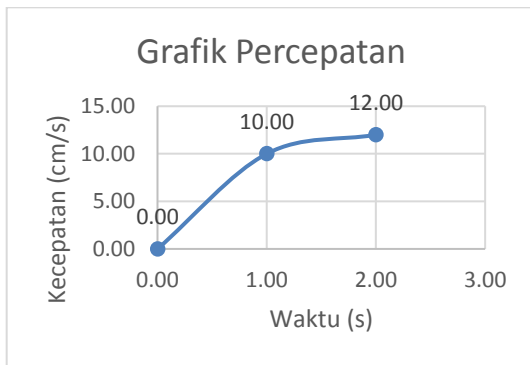
2. Pengujian Kecepatan Aman

Pada percobaan kedua, miniatur kereta api depan akan memiliki kecepatan statis yang sama dengan miniatur kereta api belakang. Kedua miniatur kereta api memiliki jarak pemisah 0 cm, kecepatan awal 0 cm/s dan percepatan 10 cm/s² dengan kecepatan maksimal 12 cm/s. Panjang lintasan yang akan ditempuh miniatur kereta api yaitu 80 cm.

Tabel IV-3 Kecepatan Terhadap Waktu

Waktu (s)	Kecepatan (cm/s)
0.00	0.00
1.00	10.00
2.00	12.00
3.00	12.00
4.00	12.00
5.00	12.00
6.00	12.00
7.63	12.00
8.00	2.00
9.34	0.00
Kecepatan Rata-rata	8.73

Tabel 4-3 menunjukkan waktu tempuh miniatur kereta api belakang selama 9.34 detik pada panjang lintasan sepanjang 80 cm. Kecepatan berubah ketika detik ke-1 sampai detik ke-2 dengan percepatan sebesar 10 cm/s² dan perlambatan sebesar 10 cm/s² pada detik ke-8 sampai detik ke-9. Kecepatan rata-rata yang diperoleh yaitu 8.73 cm/s.



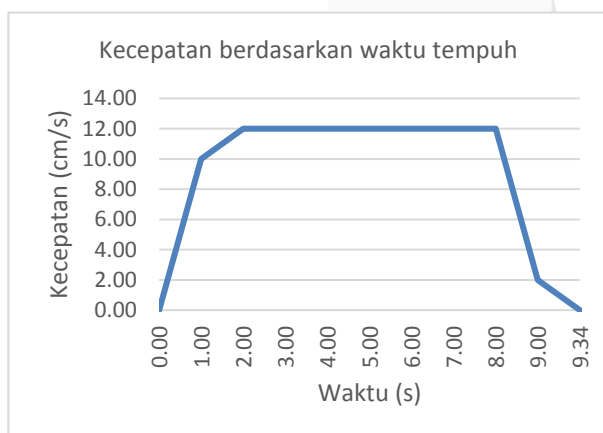
Gambar IV-4 Grafik Percepatan Pengujian Kecepatan Aman

Pada Gambar 4-4 menunjukkan perubahan kecepatan selama 2 detik dengan besar percepatan 10 cm/s^2 dan kecepatan maksimal 12 cm/s .



Gambar IV-5 Grafik Perlambatan Pengujian Kecepatan Aman

Pada Gambar 4-5 menunjukkan perubahan kecepatan selama 1.71 detik dengan besar perlambatan 10 cm/s^2 dan kecepatan minimal 0 cm/s atau berhenti.



Gambar IV-6 Grafik Perjalanan Kereta Belakang

Nilai percepatan dan perlambatan sebesar 10 cm/s^2 pada kereta api belakang dan kereta api belakang dapat berjalan secara beriringan tanpa bertabrakan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan pengambilan data pada sistem otomasi kontrol kecepatan miniatur kereta api dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Sistem dapat mengendalikan jarak aman minimum sebesar 12 cm pada kedua miniatur kereta api yang berjalan secara beriringan dengan rentang $16,9 \text{ cm}$ hingga 18 cm sebagai rata-rata jarak aman yang dihasilkan.
2. Sistem dapat mengendalikan miniatur kereta belakang yang berjalan beriringan tanpa bertabrakan serta tetap menjaga jarak aman dengan menggunakan profil percepatan 10 cm/s^2 dan kecepatan rata-rata $8,73 \text{ cm/s}$.

REFERENSI

- [1] D. A. N. Sriastuti, "Kereta Api Pilihan Utama Sebagai Moda Alternatif Angkutan Umum Massal," *Paduraksa*, vol. 4, no. 1, 2015.
- [2] DJKA DEPHUB, "SISTEM PERSINYALAN KERETA API, APA ITU?," *djka.dephub.go.id*. <https://djka.dephub.go.id/sistem-persinyalan-kereta-api-apa-itu> (accessed Oct. 30, 2021).
- [3] KAI, "Persinyalan Kereta Api Dari Sinyal Tebeng Sampai Elektrik," *heritage.kai.id*, 2017. [https://heritage.kai.id/page/Persinyalan Kereta Api Dari Sinyal Tebeng Sampai Elektrik](https://heritage.kai.id/page/Persinyalan%20Kereta%20Api%20Dari%20Sinyal%20Tebeng%20Sampai%20Elektrik) (accessed Oct. 15, 2021).
- [4] I. Railways, "An Introductory Handbook on Communications Based Train Control (CBTC)," no. February, 2021.
- [5] A. Sugiana, M. Sanyoto, Parwito, M. R. Gunawan, and K. Seo Lee, "Intermittent automatic train protection using an infrared system," *Transp. Plan. Technol.*, vol. 40, no. 3, pp. 359–373, 2017, doi: 10.1080/03081060.2017.1283160.
- [6] A. Sugiana, A. S. Wibowo, S. N. Waqash, and A. Rusdinar, "Design of railway signaling system using IR sensor as train detection," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1098, no. 4, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1098/4/042041.
- [7] E. Ates and I. Ustoglu, "An Approach for Moving Block Signalling System and Safe Distance Calculation," *2018 6th Int. Conf. Control Eng. Inf. Technol.*, no. October, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/CEIT.2018.8751745.

- [8] M. P. Ursu, O. C. Novac, M. Oproescu, G. Buidoso, and F. I. Hathazi, "Comparative study of the analog and digital operation for miniature railway systems," *2019 15th Int. Conf. Eng. Mod. Electr. Syst. EMES 2019*, pp. 137–140, 2019, doi: 10.1109/EMES.2019.8795182.
- [9] D. Barney, D. Haley, and G. Nikandros, "Calculating Train Braking Distance," *Sixth Aust. Work. Ind. Exp. with Saf. Crit. Syst. Softw. (SCS 2001)*, vol. 3, pp. 23–30, 2001, [Online]. Available: <http://crpit.com/confpapers/CRPITV3Barney.pdf>.
- [10] Jörn Pachl, "Railway Signalling Principles," p. 83, 2020, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/341277248_Railway_Signalling_Principles.
- [11] "Infrared Sensor: Types, Working Principle, and Applications." <https://www.easybom.com/blog/a/infrared-sensor-types-working-principle-and-applications>.
- [12] D. J. Welbourne, A. W. Claridge, D. J. Paull, and A. Lambert, "How do passive infrared triggered camera traps operate and why does it matter? Breaking down common misconceptions," *Remote Sens. Ecol. Conserv.*, vol. 2, no. 2, pp. 77–83, 2016, doi: 10.1002/rse2.20.
- [13] "KY-026 Flame Sensor Module." <https://www.electrothink.com/2021/01/KY-026-flame-sensor-module.html>.