

# Perangkat Pengukur Kondisi Kemiringan Rel Kereta Api Menggunakan Sensor Giroskop Berbasis GPS

Syahrizal Rohmatul Nugroho<sup>1</sup>, Alfi Tranggono Agus Salim<sup>1</sup>, Mohammad Erik Echsony<sup>1</sup>, Sefi Novendra Patrialova<sup>2</sup>, Romal Hadi Setyawan<sup>3</sup>

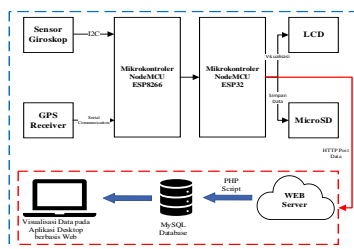
<sup>1</sup>Program Studi Perkeretaapian Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun, Jl. Serayu No. 84

<sup>2</sup>Departemen Teknik Instrumentasi Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jl. Teknik Kimia Kecamatan Sukolilo, Kota Surabaya,

<sup>3</sup>Departemen Engineering Divisi Teknologi, PT INKA, Jl. Yos Sudarso No.71 Kota Madiun

\*Corresponding author, [alfitranggono@pnm.ac.id](mailto:alfitranggono@pnm.ac.id)

## Graphical Abstract



## Abstract

Rail quality decreases directly in proportion to the operating time of the train since the rail is loaded from the train wheels. Railroad tracks are inspected by PPJ (Track Inspector) by using a track gauge master to measure slope. Manually operated devices cause PPJ to run along the railroad between stations, causing accidents and requiring relatively long operating times. Using a device that measures the slope of railroad tracks is a more effective solution to these problems. The device uses a gyroscope sensor and GPS module to locate non-standard rails. A complementary filter is applied to the converted pitch and roll values. A slope measuring instrument was used to test the accuracy of pitch and roll angles. Gyroscope sensors are calibrated to prevent measurement errors (errors). Based on the results, the gyroscope sensor had an accuracy error of  $0.20^\circ$  in pitch and  $0.27^\circ$  in a roll. A complementary filter reduces error accuracy to  $0.06^\circ$  for pitch and  $0.08^\circ$  for roll. Its accuracy compared to smartphone GPS is 5.38 meters, while its accuracy compared to the actual location is 7.74 meters.

Keywords: Gyroscope, GPS, slope, pitch, roll.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan transportasi kereta api semakin meningkat. Seiring meningkatnya jumlah layanan kereta api, kondisi prasarana dan sarana perkeretaapian memerlukan pemeliharaan sebagai pendukung pengoperasian kereta api. Manfaat utama pemeliharaan untuk menjaga keandalan peralatan prasarana seperti jalan rel, jembatan, stasiun, sinyal telekomunikasi dan kelistrikan, serta peralatan prasarana lainnya agar tetap layak operasi [1]. Jalan rel adalah suatu struktur yang terbuat dari baja, beton, atau struktur lainnya yang berada di permukaan, di bawah, dan di atas tanah atau bergantung beserta perangkatnya yang mengarahkan jalannya kereta api [2]. Penurunan kualitas rel terjadi seiring dengan masa beroperasinya kereta, karena rel menerima beban dari roda kereta api. Oleh karena itu rel membutuhkan pemeliharaan untuk menghindari kerusakan. Jika kerusakan tidak diidentifikasi dan segera diperbaiki, maka permasalahan tersebut dapat mengganggu perjalanan kereta api dan mempengaruhi dampak kecelakaan. Terjadi 112 kecelakaan dan 98 diantaranya disebabkan oleh rel anjlog tahun 2015 hingga 2019 [3].

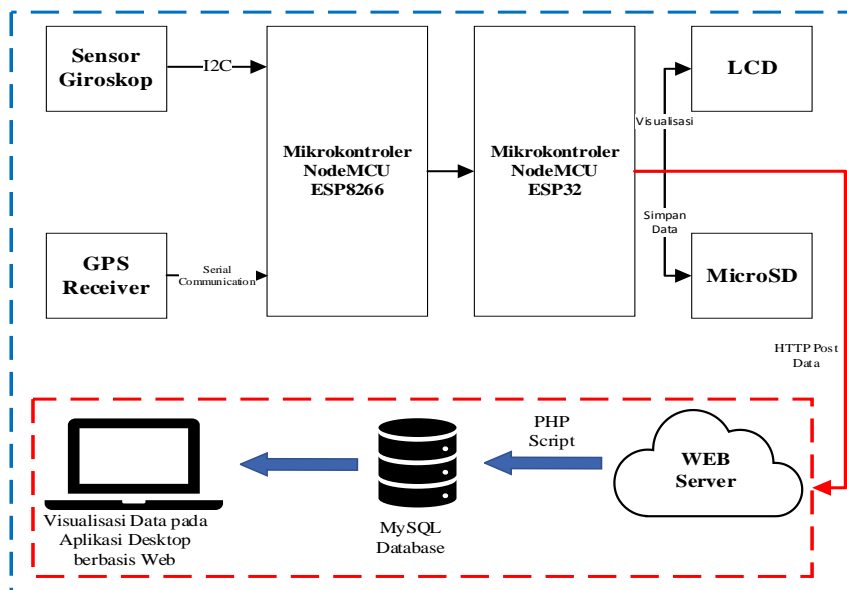
Permasalahannya pemeriksaan rel kereta api dilakukan secara manual oleh PPJ (Petugas Penilik Jalur) menggunakan alat track gauge master untuk mengukur kemiringan jalan rel. Alat tersebut dioperasikan langsung oleh petugas, sehingga petugas harus berjalan menyusuri sepanjang rel kereta api antar stasiun hingga 12 kilometer [4]. Selain itu terdapat rel kereta api di tempat yang rawan dilalui petugas seperti terowongan, jembatan, dan di tengah hutan. Hal tersebut membahayakan

keselamatan petugas dan kurang efektif. Oleh karena itu diperlukan inovasi alat pemeliharaan rel kereta api otomatis (terprogram) menggunakan sensor giroskop berbasis GPS. Sensor giroskop yang digunakan yaitu sensor MPU6050 sebagai pengukur kemiringan yang rentan terhadap getaran lalu menyebabkan noise [5]. Oleh karena itu menggunakan metode complementary filter yang berfungsi sebagai filter nilai sensor sehingga memiliki noise yang kecil atau bahkan tidak ada dan datanya lebih akurat [6].

Penelitian terdahulu berupa robot inspeksi rel menggunakan teknologi sensor ultrasonik, GPS, dan modul GSM untuk mendeteksi adanya cacat rel, lalu SMS peringatan yang berisi koordinat geografis jalur yang rusak dikirim ke otoritas perkeretaapian terdekat [7]. Berdasarkan permasalahan tersebut peneliti mengembangkan perangkat dari awalnya menggunakan sistem GSM menjadi sistem berbasis Internet of Things untuk memantau kondisi kemiringan rel kereta api dari jarak yang jauh. Sehingga diperlukan pengukuran delay yaitu waktu yang terjadi mulai dari pengiriman data yang sampai dengan data yang diterima di tempat tujuan [8]. Selain itu aplikasi berbasis website untuk fungsi fitur monitoring secara real-time pembacaan sensor dan hasil pengukuran yang tersimpan dalam database.

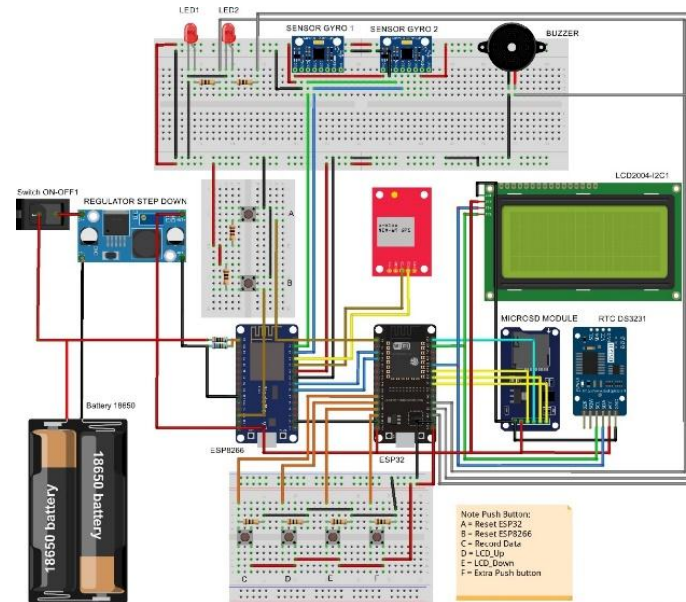
## 2. METODE PENELITIAN

Untuk mempermudah dalam mengetahui bagaimana cara kerja perangkat, sistem terbagi menjadi *input*, mikrokontroler, *output* data. *Input* yang terhubung ke mikrokontroler sebagai pengolah data. Dimana *input* meliputi MPU6050 dan GPS. Mikrokontroler NodeMCU ESP8266 mengolah data sensor dan modul GPS lalu mengirimkan data ke Mikrokontroler NodeMCU ESP32 melalui komunikasi serial. Mikrokontroler NodeMCU ESP32 juga terhubung dengan internet melalui jaringan WiFi. Data yang diolah di akan dikirim ke *web server* melalui HTTP-POST. *Web server* menjalankan *script PHP*. *Script PHP* mendapatkan data dari *HTTP Request*, memproses data lalu berinteraksi dengan *database MySQL*. Data tersebut akan ditampilkan melalui *LCD* dan aplikasi *website* dapat dipantau secara *real-time*.



Gambar 1. Diagram Sistem

NodeMCU ESP8266 digunakan untuk mengolah data sensor giroskop dan modul GPS. Sedangkan NodeMCU ESP32 menerima data dari ESP8266 dan mendapatkan waktu *real time* dari RTC DS3231 [17]–[19]. *LCD display* digunakan untuk menampilkan waktu serta pembacaan kemiringan dan koordinat lokasi GPS [14], [20].



Gambar 2. Skema Elektrik

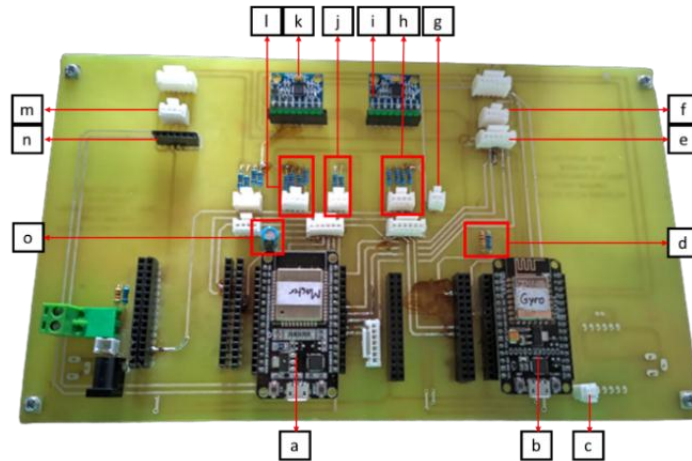
Diagram alir mikrokontroler dimana sistem dimulai dengan membaca pin dan variabel kemudian dilanjutkan dengan menghubungkan ke *WiFi*. Lalu sistem akan membaca sudut kemiringan, koordinat lokasi, dan kapasitas baterai. Data *GPS*, sensor tegangan, dan sensor giroskop tersebut akan disimpan pada *Micro SD Card*, *database*, serta ditampilkan pada *LCD*. Pembacaan sensor giroskop juga terdapat dua kondisi yaitu data yang terbaca apakah sudah sesuai dengan standar atau tidak. Jika sesuai dengan standar mikrokontroler akan memberikan notifikasi bahwa rel tersebut normal dan *LED* akan mati. Sedangkan jika sebaliknya data terbaca tidak sesuai standar, maka notifikasi yang akan diberikan yaitu status rel dalam keadaan tidak normal dan *LED* akan menyala *flip-flop*. Selain itu juga mengirimkan notifikasi yang akan disimpan dalam *database* lalu divisualisasikan dalam bentuk aplikasi *website*.

Program diawali dengan menghubungkan koneksi internet melalui jaringan *WiFi*. Tahap selanjutnya adalah *request data*, supaya aplikasi *website* dapat saling terhubung dengan *database MySQL*. *Login* dengan *username* dan *password* yang telah tersimpan pada *database*. Jika tidak valid, *user* akan menulis ulang *username* dan *password* hingga valid. *Display menu* akan tampil jika pengisian sudah valid. Terdapat 4 menu utama pada *Display Menu* yaitu *Dashboard Monitoring* yang berisi data monitoring hasil pembacaan data *GPS* (*latitude & longitude*), sensor giroskop (*pitch & roll*), dan kondisi status kemiringan secara *real-time*. Menu *Data Logger* merupakan penyimpanan yang berisi pengumpulan data *GPS*, sensor giroskop, dan kondisi status kemiringan yang dimuat dalam bentuk tabel. Selain itu juga terdapat fitur export data dalam bentuk format *.csv* untuk proses analisis lebih lanjut. Menu *Log Out* untuk keluar dari aplikasi *website*.

No	Routing	Time	Battery	Sensor 1		Sensor 2		GPS Data		Kemiringan	Status
				Pitch	Roll	Pitch	Roll	Latitude	Longitude		
1	2022-07-30-08:34:38	2022-7-30-08:34:37	0.680	-1.850	0.430	-0.820	-7.021935	111.527145	Rik Diah	Normal	OK
2	2022-07-30-08:34:37	2022-7-30-08:34:35	0.680	-1.850	0.430	-0.820	-7.021935	111.527145	Rik Diah	Normal	OK
3	2022-07-30-08:34:35	2022-7-30-08:34:34	0.670	-1.850	0.430	-0.820	-7.021932	111.527125	Rik Diah	Normal	OK
4	2022-07-30-08:34:34	2022-7-30-08:34:32	0.670	-1.870	0.430	-0.820	-7.021932	111.527134	Rik Diah	Normal	OK
5	2022-07-30-08:34:33	2022-7-30-08:34:31	0.670	-1.870	0.430	-0.820	-7.021930	111.527130	Rik Diah	Normal	OK
6	2022-07-30-08:34:31	2022-7-30-08:34:29	0.670	-1.870	0.430	-0.840	-7.021930	111.527137	Rik Diah	Normal	OK
7	2022-07-30-08:34:29	2022-7-30-08:34:28	0.680	-1.850	0.420	-0.840	-7.021932	111.527125	Rik Diah	Normal	OK
8	2022-07-30-08:34:28	2022-7-30-08:34:26	0.680	-1.850	0.420	-0.820	-7.021932	111.527124	Rik Diah	Normal	OK
9	2022-07-30-08:34:27	2022-7-30-08:34:25	0.680	-1.850	0.420	-0.830	-7.021931	111.527117	Rik Diah	Normal	OK
10	2022-07-30-08:34:25	2022-7-30-08:34:24	0.690	-1.850	0.420	-0.820	-7.021930	111.527115	Rik Diah	Normal	OK

Gambar 3. Tampilan Data Logger Website

Tahap perancangan *hardware* terdiri dari persiapan alat dan bahan, perancangan *PCB* (*Printed Circuit Board*), *setup* posisi komponen pada *PCB*, *soldering PCB*, dan *assembly* perangkat pada *box* kontroler.



Gambar 4. Perancangan Hardware

Gambar diatas merupakan tata letak komponen pada PCB dengan deskripsi sebagai berikut.

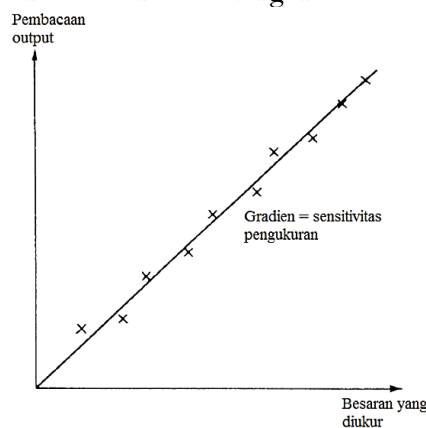
- |                                  |                                     |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| a. NodeMCU ESP32                 | i. Sensor MPU6050                   |
| b. NodeMCU ESP8266               | j. Resistor 100 $\Omega$            |
| c. Konektor saklar               | k. Sensor MPU6050                   |
| d. Sensor tegangan baterai       | l. Resistor 10 K $\Omega$ pull down |
| e. Konektor modul MicroSD        | m. Konektor LCD 20x4                |
| f. Konektor GPS                  | n. Female header RTC DS3231         |
| g. Konektor supply               | o. Elco 10 $\mu$ F                  |
| h. Resistor 1 K $\Omega$ pull up |                                     |

Hasil *assembly* pada box kontroler selanjutnya akan dipasang pada prototipe *rail inspection* dimana posisi box terletak pada bagian atas kerangka sisi tengah.



Gambar 4. Posisi Perangkat

Variabel yang akan diuji antara lain kemiringan dan kelandaian rel kereta api, pengujian akurasi modul *GPS* dan interval waktu penyimpanan ke *database*. Output pengujian kemiringan dan kelandaian menggunakan sensor *MPU6050* kemudian dilakukan perbandingan menggunakan alat ukur *inclinometer*. Tahap pertama yaitu menghitung persamaan linier sensor giroskop. Garis lurus ideal adalah garis menghubungkan titik minimum dengan titik maksimum *input/output* [21].



Gambar 5. Karakteristik Linier Output Instrumen

Persamaan linieritas sederhana dapat dilihat pada persamaan berikut [21].

$$y = a + bx \quad (1)$$

Nilai **a** merupakan nilai *offset* yaitu sinyal keluaran pada saat sinyal masukannya nol. Sedangkan **b** adalah *slope* atau kemiringan suatu garis lurus atau bisa disebut sensitivitas (*sensitivity*). Perhitungan akurasi dan nilai presisi sensor menggunakan persamaan berikut [22].

$$\text{rata - rata} = \frac{\text{data1} + \text{data2} + \dots + \text{data ke-n}}{\text{banyak data (n)}} \quad (2)$$

$$\text{error} = |(\text{rata - rata}) - \text{nilai aktual}| \quad (3)$$

$$\text{error rata - rata} = \frac{\text{error}}{\Sigma \text{pengujian persudut}} \quad (4)$$

$$\text{presisi} = \sqrt{\frac{\Sigma (\text{data terukur} - \text{rata rata})^2}{\text{banyak data} - 1}} \quad (5)$$

Perangkat telah terintegrasi *Internet of Things* dan diperlukan perhitungan interval waktu penyimpanan ke *database* untuk mengetahui waktu rata-rata jeda pengiriman dari perangkat mikrokontroler sebagai pengirim ke *database* sebagai penerima menggunakan persamaan berikut.

$$\text{delay} = \text{waktu data terima} - \text{waktu data kirim} \quad (6)$$

*Delay* yang didapat dari selisih waktu kirim antara suatu paket dengan paket lainnya yang dinyatakan dalam satuan detik berdasarkan standar *delay* menurut *TIPHON Standar* oleh ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) [23].

Tabel 1. Standar *Delay*

Kategori Latensi	Besar <i>Delay</i> (milidetik)	Indeks
Sangat Bagus	< 150	4
Bagus	< 250	3
Sedang	< 450	2
Buruk	> 450	1

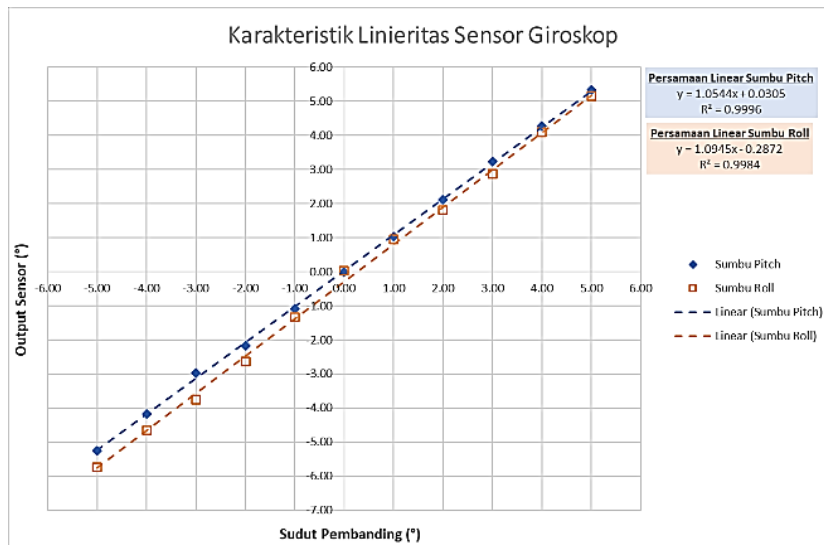
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Pengujian Sensor Giroskop

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik sensor berupa nilai akurasi error, presisi, dan sensitivitas. Pengujian sensor dilakukan dengan memiringkan perangkat pada sumbu yang telah ditentukan lalu membandingkan dengan alat ukur *inclinometer*.

Tabel 2. Pengujian Sensor Giroskop

Sudut Aktual (°)	Sudut <i>Pitch</i>			Sudut <i>Roll</i>		
	Output (°)	Error (°)	Presisi (°)	Output (°)	Error (°)	Presisi (°)
-5.00	-5.25	0.25	0.01	-5.73	0.73	0.01
-4.00	-4.16	0.16	0.01	-4.65	0.65	0.01
-3.00	-2.97	0.05	0.06	-3.74	0.74	0.01
-2.00	-2.17	0.17	0.01	-2.63	0.63	0.01
-1.00	-1.10	0.10	0.01	-1.34	0.34	0.01
0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.04	0.01
1.00	1.03	0.03	0.01	0.95	0.05	0.01
2.00	2.11	0.11	0.01	1.82	0.18	0.01
3.00	3.23	0.23	0.01	2.87	0.13	0.01
4.00	4.27	0.27	0.01	4.09	0.09	0.01
5.00	5.34	0.34	0.01	5.16	0.16	0.01
<b>Rata-rata</b>	-	<b>0.16</b>	<b>0.01</b>	-	<b>0.34</b>	<b>0.01</b>



Gambar 6. Grafik linieritas *output* sensor giroskop terhadap sudut pembanding

Dari grafik tersebut bahwa linieritas hubungan antara nilai *input* berupa sudut pembanding dan *output* pembacaan sensor giroskop terhadap sumbu *pitch* mendapatkan persamaan  $y = 1,0544x + 0,0305$ . Persamaan tersebut menginformasikan bahwa alat ukur mengonversi setiap perubahan sudut  $1^\circ$  menjadi perubahan nilai sudut sensor sebesar  $1,05^\circ$ . Jadi sensitivitas terhadap sumbu *pitch* adalah  $1,0544^\circ$  per  $1^\circ$  pada alat ukur. Sedangkan nilai *offset* yaitu  $0,0305^\circ$ .

Sedangkan pada sumbu *roll* mendapatkan persamaan  $y = 1,0945x + 0,2872$ . Persamaan tersebut menginformasikan bahwa alat ukur mengonversi setiap perubahan sudut  $1^\circ$  menjadi perubahan nilai sudut sensor sebesar  $1,1^\circ$ . Jadi sensitivitas terhadap sumbu *roll* adalah  $1,0945^\circ$  per  $1^\circ$  pada alat ukur. Sedangkan nilai *offset* yaitu  $0,2872^\circ$ .

Selanjutnya dilakukan pengujian di atas rel kereta api yang dapat dilihat pada 3. Pengujian sensor menggunakan implementasi *complementary filter* untuk mendapatkan nilai yang lebih akurat. Metode *complementary filter* berdasarkan kombinasi *high-pass* filter giroskop dan *low-pass* filter pada akselerometer.

Tabel 1. Hasil pengujian di rel kereta api

Titik	Sudut Pembandin g		Kemiringan Rel (Sumbu <i>Pitch</i> )						Kelandaian Rel (Sumbu <i>Roll</i> )					
	Sum bu <i>Pitc h</i> ( $^\circ$ )	Sum bu <i>Roll</i> ( $^\circ$ )	Tanpa Filter			Menggunakan Filter			Tanpa Filter			Menggunakan Filter		
			Out put Sens or ( $^\circ$ )	<i>Err or</i> ( $^\circ$ )	Pres isi ( $^\circ$ )	Out put Sens or ( $^\circ$ )	<i>Err or</i> ( $^\circ$ )	Pres isi ( $^\circ$ )	Out put Sens or ( $^\circ$ )	<i>Err or</i> ( $^\circ$ )	Pres isi ( $^\circ$ )	Out put Sens or ( $^\circ$ )	<i>Err or</i> ( $^\circ$ )	Pres isi ( $^\circ$ )
1	0.10	-	0.24	0.2	0.20	0.09	0.0	0.01	-0.36	0.2	0.21	-0.22	0.0	0.01
		0.20	0	1	1	2								
2	0.20	-	0.32	0.2	0.22	0.14	0.0	0.01	-0.33	0.2	0.20	-0.13	0.0	0.01
		0.10	1	6	0	3								
3	-	-	-0.11	0.2	0.23	-0.32	0.1	0.01	-0.45	0.1	0.19	-0.25	0.0	0.01
		0.20	0.30	1	2	9	5							
4	0.00	-	-0.16	0.2	0.20	-0.02	0.0	0.01	-0.53	0.2	0.21	-0.11	0.0	0.01
		0.10	1	2	1	1								
5	0.20	-	0.17	0.1	0.20	0.31	0.1	0.01	-0.46	0.2	0.20	-0.03	0.2	0.00
		0.30	7	1	0	7								
<b>Rata-rata</b>			-	<b>0.2</b>	<b>0.21</b>	-	<b>0.0</b>	<b>0.01</b>	-	<b>0.2</b>	<b>0.20</b>	-	<b>0.0</b>	<b>0.01</b>
				<b>0</b>			<b>6</b>			<b>7</b>			<b>8</b>	

Diketahui perbandingan tanpa filter dengan menggunakan filter pada hasil pengujian statis kemiringan dan kelandaian rel kereta api. Metode perhitungan rata-rata, akurasi *error*, dan presisi menggunakan persamaan (2) hingga (5) menunjukkan hasil pembacaan sensor menghasilkan rata-rata akurasi *error* pada sumbu *pitch* (kemiringan) yaitu  $0,20^\circ$  dengan tingkat presisi  $0,21^\circ$ . Setelah menggunakan *filter* akurasi *error* didapatkan  $0,06^\circ$  dengan tingkat presisi  $0,01^\circ$ .

Sumbu *roll* (kelandaian) menunjukkan rata-rata besar akurasi *error* yaitu  $0,27^\circ$  dengan nilai presisi  $0,20^\circ$  jika tanpa *filter*. Setelah menggunakan *filter* akurasi *error* didapatkan  $0,08^\circ$  dengan tingkat presisi  $0,01^\circ$ . Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa menggunakan metode *complementary filter* lebih akurat dibanding metode tanpa *complementary filter* karena menghasilkan nilai *error* dan tingkat presisi yang lebih kecil.

### Pengujian GPS

Pengujian ini dengan membandingkan antara nilai *latitude* dan *longitude* yang diperoleh perangkat modul *GPS* dengan perangkat *GPS* pada *smartphone* dan pencarian titik koordinat secara manual terhadap lokasi sebenarnya. Data pengujian dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian *GPS*

Titik	Galat terhadap Pembanding (meter)	
	<i>GPS Smartphone</i>	Manual Koordinat
1	6,55	9,83
2	3,52	1,49
3	4,65	6,44
4	6,09	8,02
5	6,11	12,90
<b>Rata-rata</b>	<b>5,38</b>	<b>7,74</b>

Nilai rata-rata akurasi modul *GPS Neo-6m* terhadap *GPS smartphone* sebesar 5,38 meter dan 7,74 meter terhadap titik koordinat secara manual (lokasi sebenarnya). Pada data sheet akurasi modul *GPS Neo-6m* yaitu hingga 2,5 meter. Faktanya dalam lapangan rata-rata akurasi melebihi dari nilai data sheet. Teori dasar *menjelaskan* ketidakakuratan dengan mengandalkan setidaknya tiga satelit untuk keakuratan hasil. Pemrosesan sinyal juga tertunda dan posisi satelit dapat berubah dengan perangkat *GPS* ini. Sebagai akibat dari kondisi atmosfer, kecepatan sinyal *GPS* juga sering berubah. Sinyal *GPS* juga rentan terhadap gangguan dari gelombang elektromagnetik lainnya [14].

### Pengujian Delay

Bagian ini dilakukan pengujian rata-rata waktu pengiriman dari data mikrokontroler sebagai pengirim ke database sebagai penerima. Waktu tunda dihitung dengan cara mengurangi waktu penerimaan data dengan waktu pengiriman data menggunakan persamaan (6).

Tabel 5. Hasil pengujian *delay*

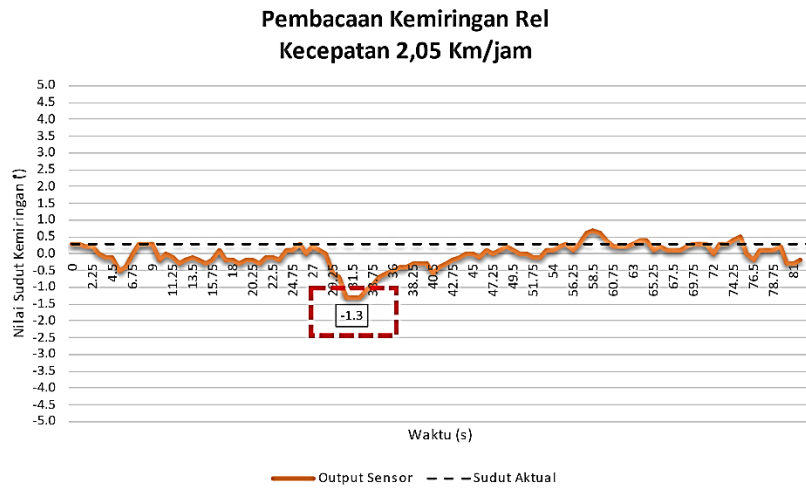
Titik	Rata-rata Interval (detik)
1	0,36
2	0,36
3	0,46
4	0,28
5	0,52
<b>Rata-rata</b>	<b>0,40</b>

Rata-rata *delay* pengiriman data dari mikrokontroler ke penyimpanan *database* yaitu 0,4 detik atau 400 milidetik. Berdasarkan *Quality of Service* kategori *delay* hasil ini masuk dalam kategori latensi sedang karena masuk dalam *range* 250 hingga 450 milidetik [23]. Penyebab dari *delay* tersebut dari jaringan internet yang tidak stabil dan baik serta tidak didukung dengan *management bandwidth* yang baik [24].

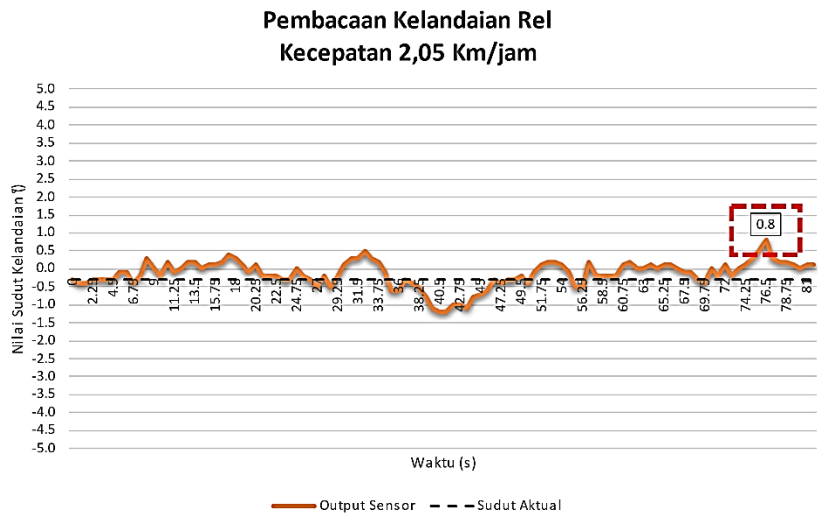
### Pengujian Dinamis

Pengujian dinamis dilakukan alat inspeksi rel dalam kondisi bergerak dengan variasi 3 (tiga) variasi kecepatan yaitu 2,05 km/jam; 2,49 km/jam; dan 2,99 km/jam. Jarak yang ditempuh alat inspeksi rel sejauh 50 m.

Kecepatan 2,05 km/jam



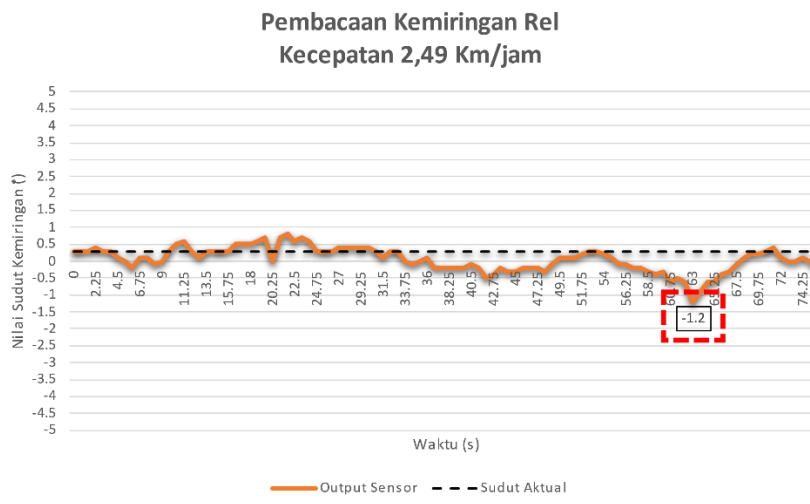
(a)



(b)

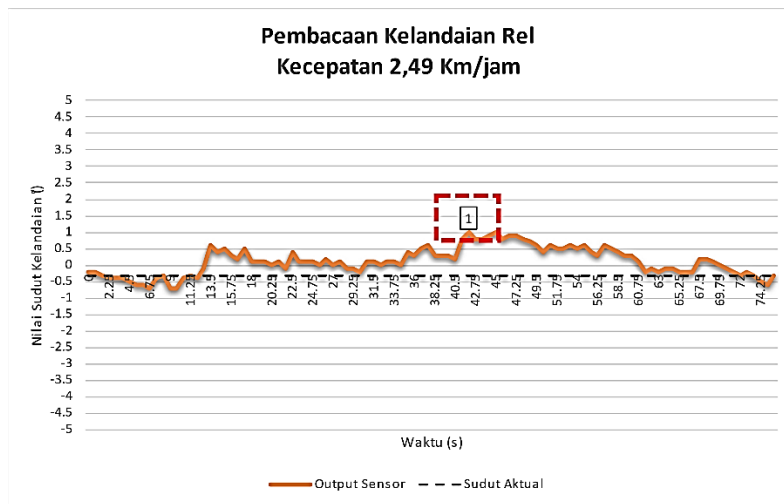
Gambar 7. Grafik data sensor dengan kecepatan 2,05 km/jam (a) kemiringan, dan (b) kelandaian

Kecepatan 2,49 km/jam



(a)

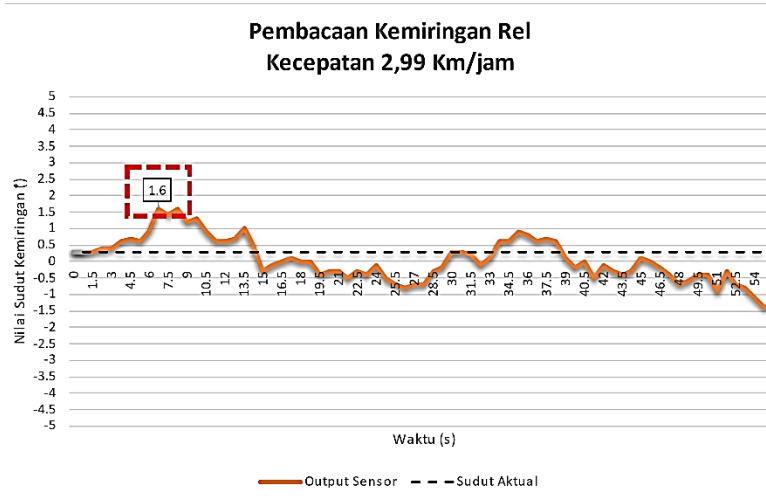




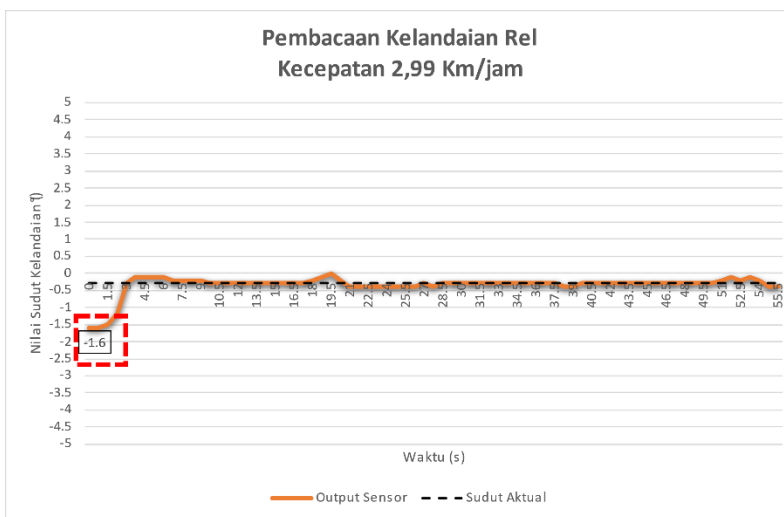
(b)

Gambar8. Grafik data sensor dengan kecepatan 2,49 km/jam (a) kemiringan, dan (b) kelandaian

Kecepatan 2,99 km/jam



(a)



(b)

Gambar 9. Grafik data sensor dengan kecepatan 2,99 km/jam (a) kemiringan, dan (b) kelandaian

Ketiga variasi kecepatan menghasilkan semakin tinggi kecepatan, berpengaruh pada pembacaan sensor yang semakin tidak signifikan atau semakin tinggi nilai *error*. Hal tersebut ditunjukkan pada label berwarna merah pada grafik. Fenomena terjadinya gesekan antara roda dengan rel kereta api menyebabkan getaran. Selain terdapat sensor giroskop, juga terdapat juga sensor akselerometer yang sensitif terhadap getaran karena baik sumbu giroskop dan sumbu akselerometer menjadi satu kesatuan dalam *chip* sensor MPU6050. Karena sensor berfungsi dengan maksimal ketika sistem sistem tidak mengandung getaran [5].

Untuk menghilangkan *noise* pada hasil tersebut dapat menggunakan metode *complementary filter* yang merupakan kombinasi *high-pass filter* giroskop dan *low-pass filter* pada akselerometer [6]. Setelah menggunakan *complementary filter* tingkat kestabilan (*smooth*) pada sensor berhasil meredam *noise* dan mengestimasi orientasi sudut *pitch* dan *roll* dengan baik dan hasil pengukuran sudut menjadi lebih akurat dan presisi dari hasil tanpa *filter*

#### 4. KESIMPULAN

Perangkat pengukur kemiringan rel kereta api yang telah dirancang terdiri dari beberapa blok rangkaian diantaranya input sensor MPU6050, modul GPS, rangkaian LCD, rangkaian WiFi, rangkaian penunjang dalam optimalisasi fungsi perangkat telah berfungsi dengan baik. Hasil pengujian rangkaian sensor MPU6050 menunjukkan nilai keluaran berupa sudut dengan satuan derajat. Sedangkan modul GPS menunjukkan nilai keluaran berupa koordinat latitude dan longitude. Adapun nilai keluaran tersebut ditampilkan pada LCD dan aplikasi website sehingga memudahkan dalam proses pemantauan oleh operator. Analisa sensor MPU6050 telah dihitung berupa nilai sensitivitas, offset, error, dan presisi. Nilai error sumbu *pitch* yaitu  $0,20^\circ$  dengan tingkat presisi  $0,21^\circ$ . Setelah menggunakan *complementary filter* nilai error menjadi  $0,06^\circ$  dengan tingkat presisi  $0,01^\circ$ . Nilai error sumbu *roll* yaitu  $0,27^\circ$  dengan tingkat presisi  $0,20^\circ$ . Setelah menggunakan *complementary filter* nilai error menjadi  $0,08^\circ$  dengan tingkat presisi  $0,01^\circ$ . Hasil ini menunjukkan menggunakan metode *complementary filter* dapat meredam *noise* dan mampu mengukur sudut yang lebih akurat karena tingkat error menjadi lebih kecil. Hasil pengujian akurasi GPS sebesar 5,38 meter terhadap GPS smartphone dan 7,74 meter terhadap koordinat manual melalui google earth. Hasil ini tidak sesuai dengan keakuratan pada data sheet, faktor penyebabnya adalah Sebagai akibat dari kondisi atmosfer, kecepatan sinyal GPS juga sering berubah. Sinyal GPS juga rentan terhadap gangguan dari gelombang elektromagnetik lainnya. Interval waktu pengiriman data perangkat ke database server didapatkan rata-rata interval waktu yaitu 0,4 detik atau 400 milidetik dan masuk dalam kategori latensi sedang menurut TIPHON Standard.

#### REFERENSI

- [1] Republik Indonesia. 2011. Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 32 Tahun 2011 tentang Standar dan Tata Cara Perawatan Prasarana Kementerian Perhubungan. Jakarta.
- [2] Republik Indonesia. 2012. Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api. Kementerian Perhubungan. Jakarta.
- [3] Direktorat Jenderal Perkeretaapian. 2019. Buku Statistik Bidang Perkeretaapian.
- [4] Public Relation KAI, "Pekerjaan Menantang Sebagai Petugas Pemeriksa Jalur KA," Siaran Pers PT KAI, Jun. 09, 2021. [https://www.kai.id/information/full\\_news/4819-pekerjaan-menantang-sebagai-petugas-pemeriksa-jalur-ka](https://www.kai.id/information/full_news/4819-pekerjaan-menantang-sebagai-petugas-pemeriksa-jalur-ka) (Accessed Jul. 23, 2022).
- [5] A. Albaghdadi and A. Ali, "An Optimized Complementary Filter For An Inertial Measurement Unit Contain MPU6050 Sensor," Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering., vol. 15, no. 2, pp. 71–77, 2019, doi: 10.37917/ijeee.15.2.8.
- [6] H. Z. Fahmi, R. Maulana, and W. Kurniawan, "Implementasi Complementary Filter Menggunakan Sensor Accelerometer dan Gyroscope pada Keseimbangan Gerak Robot Humanoid," Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer, vol. 1, no. 11, pp. 1376–1384, 2017.
- [7] N. Mahfuz, O. A. Dhali, S. Ahmed, and M. Nigar, "Autonomous railway crack detector robot for Bangladesh: SCANOBOT," 5th IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference 2017, R10-HTC 2017, pp. 524–527, 2018, doi: 10.1109/R10-HTC.2017.8289014.
- [8] A. M. Luthfi, N. Karna, and R. Mayasari, "Google maps API implementation on IOT platform for tracking an object using GPS," Proceedings - 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile, APWiMob 2019, pp. 126–131, 2019, doi: 10.1109/APWiMob48441.2019.8964139.
- [9] S. A. P. Rosyidi, *Rekayasa Jalan Kereta Api: Tinjauan Struktur Jalan Rel*, vol. 7, no. 1. LP3M Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2015.
- [10] V. M. N. Passaro, A. Cuccovillo, L. Vaiani, M. De Carlo, and C. E. Campanella, "Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 10, Oct. 2017, doi: 10.3390/S17102284.
- [11] A. Meyer, "Electronics I Using Gyroscopes to Enhance Motion Detection," *Eng. Student Trade J. Artic.*, 2020.
- [12] InvenSense, "MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification,"., 2013.

- [13] S. Yuliani and H. M. Saputra, "Kolaborasi Kalman Filter dengan Complementary Filter untuk Mengoptimasi Hasil Sensor Gyroscope dan Accelerometer," *Semin. Nas. ITENAS*, no. 01, pp. 1–6, 2016.
- [14] Y. D. Wibowo, Y. Saragih, and R. Hidayat, "Implementasi Modul GPS Ublox 6M Dalam Rancang Bangun Sistem Keamanan Motor Berbasis Internet Of Things," *Electrician*, vol. 15, no. 2, pp. 107–115, 2021, doi: 10.23960/elc.v15n2.2173.
- [15] S. Cheedella, J. Manne, K. V. B, and N. Yalamanchili, "Railway Track Monitoring System Using Arduino With LoRa," vol. 11, no. 6, pp. 775–780, 2020.
- [16] U-blox, *NEO-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet*. 2017.
- [17] A. Setiawan and A. I. Purnamasari, "Pengembangan Smart Home Dengan Microcontrollers ESP32 Dan MC-38 Door Magnetic Switch Sensor Berbasis Internet of Things (IoT) Untuk Meningkatkan Deteksi Dini Keamanan Perumahan," *Jurnal Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi*, vol. 3, no. 3, pp. 451–457, 2019, doi: 10.29207/resti.v3i3.1238.
- [18] N. H. L. Dewi, M. F. Rohmah, and S. Zahara, "Prototype Smart Home Dengan Modul Nodemcu Esp8266 Berbasis Internet of Things (Iot)," *Jurnal Teknik Informatika*, pp. 3, 2019.
- [19] Q. Hidayati, and A. N. Aziz, "Rancang bangun bel otomatis berbasis rtc ds3231 menggunakan arduino uno r3 sebagai tanda pergantian jadwal," *Journal of Electrical and Electronics.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [20] W. Y. Rezika et al., "Characteristics of Sensor Detector Deformation Railways Material," *International Research Journal of Advanced Engineering and Science.*, vol. 6, no. 4, p. 7, 2021.
- [21] A. S. Morris dan R. Langari, *Measurement and Instrumentation : theory and application*. 2011.
- [22] T. Perkasa and H. H. Rahmat, "Perancangan Alat Ukur Sudut Tekuk Lutut Wireless menggunakan Sensor Gyroscope berbasis ATMega 328 dan ATMega 2560," *Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika.*, vol. 5, no. 1, p. 30, 2018, doi: 10.26760/elkomika.v5i1.30.
- [23] European Telecommunications Standards Institute, "Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks (TIPHON); General aspects of Quality of Service (QoS)," ETSI TR 101 329 V1.2.5. 1998.
- [24] I. O. Suzanti, A. Khozaimi, P. Studi, T. Multimedia, and D. Jaringan, "Analisis Kinerja Efektifitas Pembagian Bandwidth dan Quality Of Service (QoS) Pada Jaringan Kampus Studi Kasus Universitas Trunojoyo," *Jurnal Ilmiah NERO*, vol. 3, no. 2, pp. 127–134, 2017.