

Perangkat Pemantauan dan Identifikasi Kondisi Rel Kereta Api sebagai Panduan bagi Petugas Perawatan dan Masinis

Ahmad Zaini¹, Virbyansah Achmadan Nurrohman¹, Farah Zakiyah Rahmanti²

¹Dept. Teknik Komputer Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

²Teknologi Informasi Telkom University Surabaya

Email: zaini@its.ac.id, virbyansah14@mhs.te.its.ac.id, farah.zakyah@telkomuiversity.ac.id

Abstrak

Pemeriksaan rutin kondisi rel kereta api saat ini telah dilakukan oleh PT Kereta Api Indonesia (PT KAI) menggunakan kereta ukur. Namun, ketidakseimbangan antara jumlah kereta ukur yang tersedia dengan panjang jalur rel kereta api yang harus diperiksa menyebabkan pemeriksaan kondisi rel hanya dapat dilakukan sebanyak dua kali dalam satu tahun. Kondisi tersebut dinilai belum memadai untuk memperoleh pembaruan data kondisi rel secara optimal.

Pada penelitian ini dikembangkan sebuah sistem pemantauan kondisi rel kereta api secara real time menggunakan sensor vibrasi untuk mengidentifikasi kondisi rel berdasarkan lokasi. Sistem ini memungkinkan pembaruan data dilakukan lebih cepat karena dapat diterapkan pada berbagai jenis kereta api. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh tingkat validasi data dengan rata-rata selisih nilai getaran sebesar 0,06 g pada sumbu horizontal, 0,1 g pada sumbu lateral, dan 0,19 g pada sumbu vertikal, dengan selisih jarak sebesar 34,3 meter. Selain itu, nilai galat rata-rata sensor meliputi galat lokasi sebesar 12,2 meter, *delay* GPS sebesar 2,8 detik, galat kecepatan sebesar 17,36%, galat akselerometer sebesar 0,059 g, serta interval waktu transmisi data sebesar 1,04 detik.

Dengan dikembangkannya sistem ini, petugas perawatan rel kereta api dapat memperoleh laporan kondisi rel berdasarkan warna penanda (*marker*) yang disesuaikan dengan parameter nilai indeks rel. Selain itu, melalui aplikasi peringatan dini, masinis kereta api dapat menerima notifikasi mengenai batas kecepatan maksimum pada lokasi rel tertentu.

Kata kunci: Kereta Api, Peta Digital, Indeks Rel, Batas Kecepatan, Peringatan Dini

Diterima Redaksi: 3-11-2023 Selesai Revisi: 14-11-2023 Diterbitkan Online: 15-12-2023

DOI: DOI: <https://doi.org/10.59378/jcenim.v1i3.31>

I. PENDAHULUAN

Kereta api merupakan moda transportasi umum yang banyak digunakan oleh seluruh lapisan masyarakat di Indonesia. Hal ini dikarenakan kereta api menawarkan berbagai kemudahan, keamanan, kenyamanan, dan ketepatan waktu menjadi keunggulan kereta api. Hal ini telah diatur dalam Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2009 tentang lalu lintas angkutan jalan [1]. Di Indonesia, PT Kereta Api Indonesia (Persero) atau disingkat PT KAI merupakan satu-satunya perusahaan milik pemerintah yang menyediakan jasa transportasi kereta api.

Seiring dengan bertambahnya jumlah layanan kereta api, jumlah kecelakaan kereta api juga semakin meningkat. Berdasarkan data kasus kecelakaan kereta api yang dilakukan oleh Komite Nasional Keselamatan Transportasi Indonesia dari tahun 2010 hingga 2016, penyebab terbesar kecelakaan kereta api adalah anjaknya kereta api dari perlintasan rel kereta api sebesar 68% [2]. Hal ini disebabkan kereta api yang melaju diatas rel melebihi batas kecepatan maksimal yang telah ditentukan berdasarkan tingkat kerusakan rel pada lokasi tersebut. Aditya menjabat sebagai *Junior Manager Track Maintenance PT KAI* mengatakan, pemeriksaan rel dengan kereta ukur dilakukan setiap enam bulan sekali [3]. Namun pemeriksaan berkala yang dilakukan oleh kereta ukur masih dirasa kurang cukup untuk memperbarui data kondisi rel dan batas kecepatan maksimum berdasarkan koordinat. Berdasarkan penelitian D. Wahono (2015), pengukuran dapat dilakukan dengan sensor GPS dan sensor akselerometer [4]. Pada penelitian tersebut, ketidakaturan lintasan dideteksi dengan menggunakan pengukuran percepatan bogie dan car body dan pengukuran ini selanjutnya dioptimalkan menggunakan algoritma particle swarm optimization (PSO). Pada penelitian lain, pengukuran rel kereta api menggunakan sensor piezo dan sensor

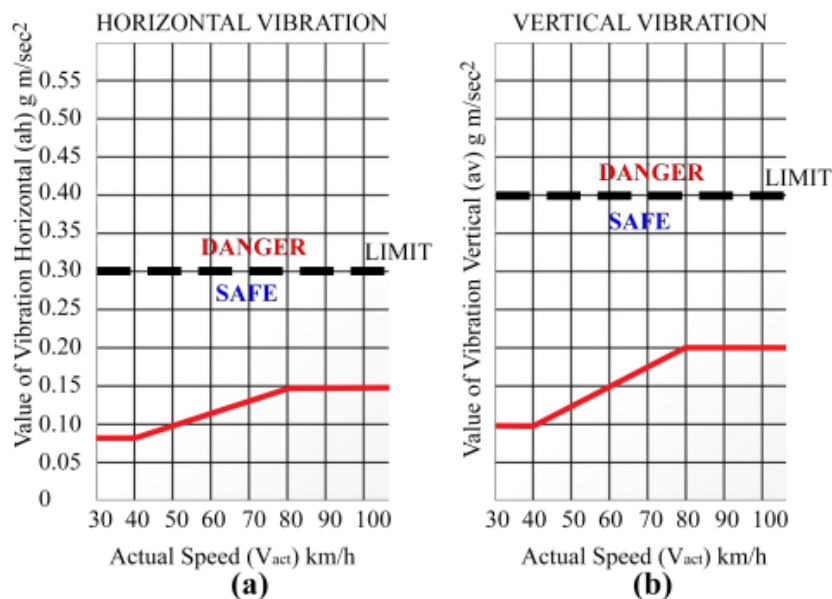
strain gauge dapat dimonitor [6]. Sistem pemantauan rel onboard dikembangkan yang dapat dipasang di semua jenis kereta api sehingga dapat memperingatkan masinis [7]. Dan ini [8] merangkum pengembangan baru dari perangkat on-board ukuran kecil untuk pemantauan kondisi rel kereta api dan software monitoring.

Berdasarkan uraian latar belakang, dibuatlah sebuah alat yang dapat mengintegrasikan sensor akselerometer sebagai pembaca getaran kereta api ketika melintas diatas rel, GPS, serta internet sebagai media komunikasi untuk melakukan pemantauan terhadap kondisi lintasan rel kereta api berdasarkan geolokasi sehingga diharapkan dapat menjadi peringatan bagi petugas perawatan rel kereta api terhadap kerusakan rel dan peringatan dini batas kecepatan maksimal kepada masinis kereta api saat kereta akan melaju diatas rel tertentu.

II. DASAR TEORI

A. Getaran Kereta Api

Getaran kereta api menurut arahnya terbagi menjadi dua jenis getaran yang terjadi ketika rel dilewati oleh rangkaian kereta api, yaitu getaran horisontal dan getaran vertikal [?]. Getaran yang ditimbulkan oleh kereta api memiliki dua parameter, yaitu berat kereta api yang melintas dan kecepatan kereta api yang melintas. Getaran yang dihasilkan oleh kereta api kemudian ditransmisikan dari rel ke rel dan dapat dirasakan oleh penumpang sebagai getaran kereta api. Getaran kereta api dapat dideteksi menggunakan sensor akselerometer untuk mengukur percepatan getaran, sehingga diperoleh percepatan getaran horizontal dan percepatan getaran vertikal. Gambar 1 menunjukkan korelasi antara kecepatan aktual dan percepatan getaran.



Gambar 1: Korelasi antara kecepatan aktual dan nilai getaran untuk getaran a. horizontal, b. vertikal.

B. Nilai Indeks Jalur

Indeks jalur rel kereta api digunakan untuk menilai baik atau tidaknya kondisi dari suatu jalur rel kereta api dengan menghitung besarnya nilai indeks N [?]. Berdasarkan Persamaan (1) dan (2), nilai indeks dihitung saat kecepatan aktual lebih besar sama dengan 80 km/jam, sedangkan Persamaan (3) dan (4) digunakan saat kecepatan aktual berada pada rentang 40 hingga 80 km/jam.

$$V_{act} \geq 80 \text{ km/jam} \rightarrow N_x = \frac{15}{ah} \quad (1)$$

$$V_{act} \geq 80 \text{ km/jam} \rightarrow N_y = \frac{20}{av} \quad (2)$$

Persamaan (1) digunakan untuk menghitung nilai indeks horizontal N_x dan Persamaan (2) digunakan untuk menghitung nilai indeks vertikal N_y saat kecepatan aktual kereta api lebih besar sama dengan 80 km/jam, di mana ah merupakan nilai getaran horizontal dan av merupakan nilai getaran vertikal.

$$40 \text{ km/jam} \leq V_{act} < 80 \text{ km/jam} \rightarrow N_x = \frac{3 \times V_{act}}{16 \times ah} \quad (3)$$

$$40 \text{ km/jam} \leq V_{act} < 80 \text{ km/jam} \rightarrow N_y = \frac{4 \times V_{act}}{16 \times av} \quad (4)$$

Persamaan (3) digunakan untuk menghitung nilai N_x dan Persamaan (4) digunakan untuk menghitung nilai N_y saat kecepatan aktual kereta api berada pada rentang 40 km/jam hingga 79 km/jam. Jika V_{act} kurang dari 40 km/jam, maka nilai getaran diabaikan sehingga tidak dilakukan perhitungan nilai indeks rel.

Setelah diperoleh nilai N_x dan N_y , nilai indeks rel N ditentukan menggunakan Persamaan (5) dan (6).

$$N_x < N_y \rightarrow N = N_x \quad (5)$$

$$N_y < N_x \rightarrow N = N_y \quad (6)$$

Persamaan (5) menunjukkan bahwa jika nilai N_x lebih kecil dari nilai N_y , maka nilai indeks rel N sama dengan N_x . Sebaliknya, Persamaan (6) menunjukkan bahwa jika nilai N_y lebih kecil dari nilai N_x , maka nilai indeks rel N sama dengan N_y .

Berdasarkan nilai N , indeks jalur dapat diklasifikasikan menjadi empat kelas yang menunjukkan kualifikasi kondisi jalur rel kereta api.

Tabel 1: Kualifikasi Indeks Kualitas Jalur

Nilai Indeks	Kondisi Rel
$N \geq 100$	Jalur dalam kondisi baik
$100 > N \geq 85$	Jalur dalam kondisi kurang baik
$85 > N \geq 70$	Jalur dalam kondisi buruk
$70 > N$	Jalur dalam kondisi sangat buruk

C. Nilai Batas Kecepatan Maksimal

Batas kecepatan maksimum digunakan untuk mengatur kecepatan maksimum kereta api ketika melintas pada jalur rel tertentu. Nilai batas kecepatan maksimum ditentukan berdasarkan nilai indeks jalur dan kecepatan aktual kereta api [?].

$$V_{\max} = \frac{V_{act}}{100} \times N \quad (7)$$

Persamaan (7) digunakan untuk menentukan batas kecepatan maksimum $V_{\max}$ yang diperoleh dari kecepatan aktual kereta api V_{act} dan nilai indeks rel N .

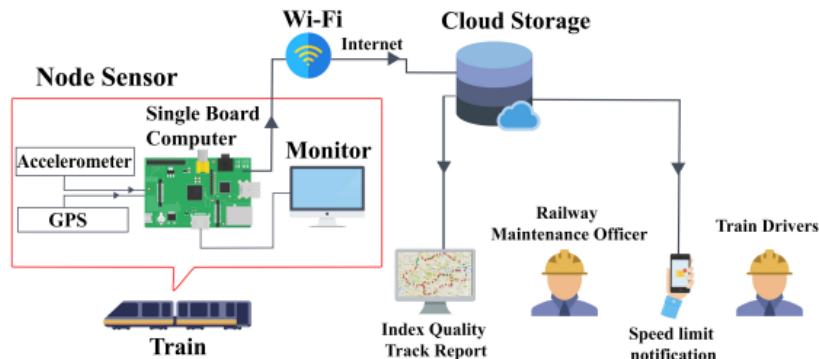
III. DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

Penelitian ini dilaksanakan sesuai dengan desain sistem berikut dengan implementasinya.

A. Desain Sistem

Gambar 2 menjelaskan secara singkat bahwa awal pengambilan data dilakukan oleh *Single Board Computer* (SBC) yang terhubung dengan GPS dan sensor getaran. Kemudian SBC melakukan penyimpanan data pada data lokal dan divisualisasikan dengan tampilan interaktif pada monitor. Jika ada koneksi ke *server* maka dilakukan penyimpanan data dari data lokal ke *cloud storage*. Data yang tersimpan dalam bentuk *cloud storage* tersebut dapat diakses kembali melalui pelaporan kondisi keadaan kereta api berdasarkan web dan notifikasi batas kecepatan kereta api. Terkait dengan gambaran umum kerja sistem, sistem dibagi menjadi empat bagian yaitu sensor *node*, pengiriman data ke *cloud storage*, visualisasi data

pada sensor *node* dan laporan nilai indeks rel kereta api berbasis web, dan sistem notifikasi peringatan dini batas kecepatan maksimum kereta api.



Gambar 2: Overview Kerja Sistem

Perancangan skema alur kerja sensor *node*, terdiri dari sensor akselerometer digital untuk akuisisi nilai getaran traksi saat berkendara, sensor GPS untuk akuisisi lokasi aktual berupa lintang dan bujur, waktu dan kecepatan, dan Raspberry pi 3 sebagai SBC. Terdapat empat jenis data yang akan diakuisisi, yaitu data nilai getaran rel, data kecepatan aktual, data waktu pengambilan data dan data lokasi. Untuk mendapatkan data getaran, sensor yang digunakan adalah sensor getaran tipe ADXL345. Ada tiga getaran yang didapatkan berdasarkan arah getaran yaitu getaran horizontal (sumbu X), getaran lateral (sumbu Y), dan getaran vertikal (sumbu Z). Sedangkan untuk mengetahui lokasi, kecepatan aktual kereta api, dan waktu pengambilan sensor yang digunakan adalah GPS tipe tiga versi GPS Ultimate. Data yang diperoleh, dilakukan penyimpanan dan pengiriman data lokal oleh SBC. Penyimpanan dilakukan oleh SBC pada file lokal bertipe text yang menyimpan semua data yang telah diakuisisi oleh sensor getaran dan GPS. Data yang telah disimpan oleh SBC juga divisualisasikan ke dalam bentuk grafik meliputi grafik nilai getaran dan kecepatan kereta api. Kemudian, untuk pengiriman data lokal ke *cloud storage*, SBC telah dilengkapi dengan modul Wi-Fi sehingga pengiriman dapat dilakukan dengan menghubungkan Wi-Fi SBC dengan *Access Point* (AP) yang telah terkoneksi dengan internet.

User interface dibagi menjadi tiga yaitu *user interface* pada sensor *node*, *user interface* berupa peta digital berbasis web, dan *user interface* aplikasi notifikasi batas kecepatan maksimum. Sensor *node* dilengkapi dengan layar sentuh dengan GUI menggunakan Tkinter sebagai media kontrol untuk melakukan *tracking* kondisi rel kereta api. Dalam visualisasi data sensor *node* merupakan data aktual yang telah diakuisisi oleh sensor getaran dan GPS ke dalam bentuk grafik bergerak. Sehingga petugas operator monitor dapat mengoperasikan alat tersebut dengan cara menyentuh dan sekaligus memantau kondisi aktual rel kereta api pada monitor sensor *node*.

Untuk melaporkan nilai indeks, data tersebut divisualisasikan ke dalam peta digital berbasis web dengan menggunakan *Google Maps API* sebagai sumber tampilan. Data yang ditampilkan pada *user interface* peta digital merupakan data yang berasal dari *cloud storage* yang sebelumnya dikirim oleh sensor *node*. Warna pada *marker* menandakan nilai indeks kondisi rel kereta api yang didapatkan pada *database* sesuai dengan parameter pada Tabel 2.

Tabel 2: Parameter Warna Penanda

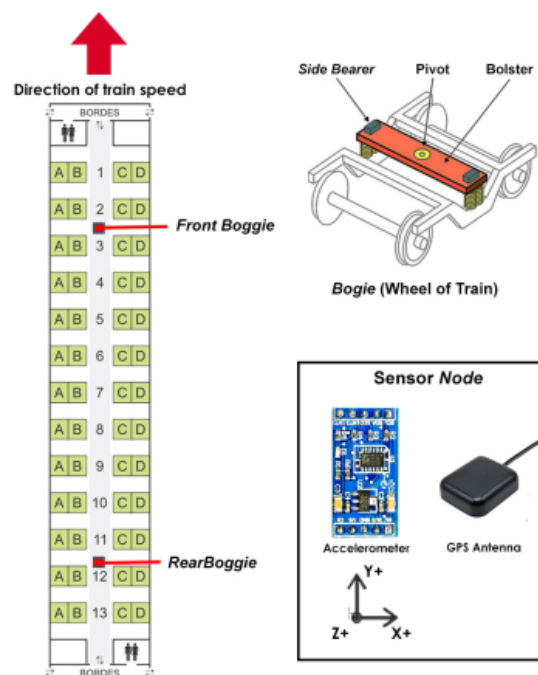
Warna	Nilai Indeks (N)	Kondisi Rel
Hijau	$N > 100$	Baik
Kuning	$100 \geq N > 85$	Cukup Baik
Oranye	$85 \geq N > 70$	Buruk
Merah	$70 \geq N$	Sangat Buruk

Untuk informasi notifikasi batas kecepatan maksimal, data tersebut divisualisasikan ke dalam peta digital berbasis Android. Desain aplikasi dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama adalah peta digital dan bagian kedua adalah informasi aktual. Bagian peta digital terdiri dari dua *marker* dengan warna yang berbeda yaitu *marker* berwarna biru yang menunjukkan lokasi sebenarnya dari rel kereta api dan *marker* berwarna merah yang menunjukkan lokasi batas kecepatan maksimum. Bagian informasi aktual

bertujuan untuk memberikan informasi aktual termasuk kecepatan aktual kereta api, batas kecepatan, dan jarak.

B. Implementasi Sistem

Pemasangan sensor *node* dilakukan pada kereta penumpang. Pemasangan sensor *node* dilakukan pada gerbong kereta penumpang di bagian depan atau belakang gerbong penumpang yang dekat dengan sambungan *bogie* dengan tempat duduk gerbong penumpang. Pada pemasangan sensor *node*, sensor getar dipasang dengan cara menempelkan sensor pada lantai gerbong penumpang (di atas sambungan *pivot bogie* depan atau *pivot bogie* belakang gerbong penumpang) dengan posisi sensor getar yang dipasang menghadap ke atas (Z+) dan sumbu (Y+) kereta. Sedangkan pemasangan sensor *node* antenna GPS dipasang di kereta penumpang dengan posisi antenna menghadap ke atas. Gambar 3 adalah skema pemasangan sensor *node* di gerbong penumpang.

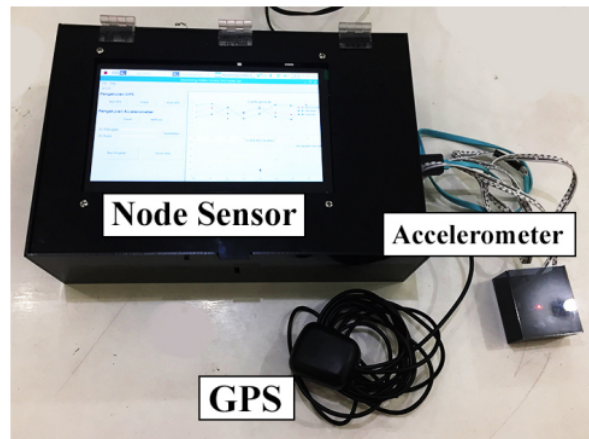


Gambar 3: Skema pemasangan sensor *node* di kereta.

Sensor *node* terdiri dari sensor accelerometer ADXL345 dan sensor *GPS Ultimate* yang terhubung ke SBC Raspberry Pi 3. Sensor ADXL345 dihubungkan Raspberry pi melalui GPIO menggunakan komunikasi I2C dimana untuk menggunakan komunikasi I2C, pin CS dan pin 3.3v sensor akselerometer dihubungkan ke pin 3.3V SBC, pin SDO dan pin GND sensor akselerometer dihubungkan ke GND SBC, pin SDA pada sensor akselerometer dihubungkan ke pin 5 SBC, dan pin SCL sensor akselerometer dihubungkan ke pin 7 SBC. Sedangkan Ultimate GPS dihubungkan dengan SBC menggunakan komunikasi serial UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*). Hasil implementasi konfigurasi akselerometer dan GPS pada SBC, ditunjukkan pada Gambar 4.

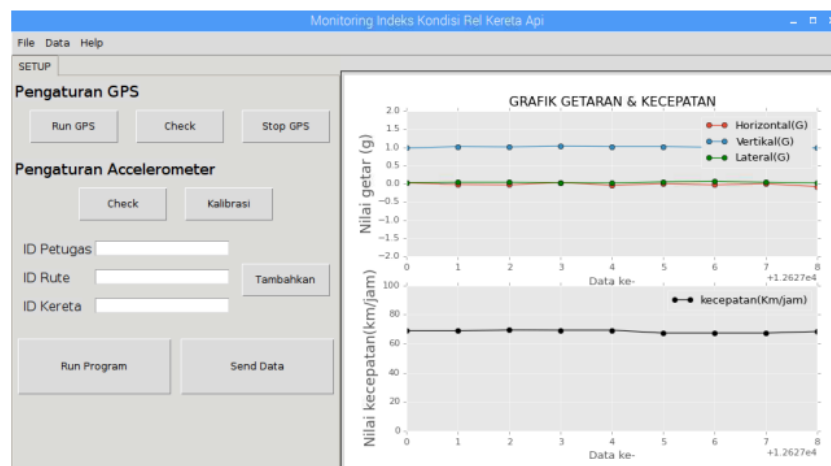
Penyimpanan ke *cloud storage* dikirim oleh SBC melalui Wi-Fi yang terhubung ke internet. Dalam proses kerja awalnya, data yang disimpan pada penyimpanan lokal dibuka kembali. Data dibaca per baris hingga data terakhir yang disimpan. Data lokal yang telah dibaca per baris, kemudian dipisahkan dan dikelompokkan sesuai dengan variabel masing-masing. Jika terdapat lokasi yang sama, maka nilai data getaran disimpan pada *array* sementara dan kemudian dihitung nilai rata-ratanya pada setiap variabel. Kemudian membuat koneksi pengiriman menggunakan modul MySQLdb yang bekerja pada mesin lokal dengan menggunakan standar *UNIX Socket*. Pada prosesnya, pengiriman dilakukan dengan interval 100 milidetik per pengiriman.

Pada tampilan *user interface* pada sensor *node* memiliki dua fungsi utama yaitu *monitoring* dan kontrol. Fungsi pemantauan terdiri dari grafik yang memvisualisasikan data sensor secara *real time*. Sedangkan fungsi kontrol digunakan untuk petugas media dalam menjalankan alat tersebut. Cara kerja



Gambar 4: Implementasi Konfigurasi Akselerometer dan Akselerasi GPS pada SBC

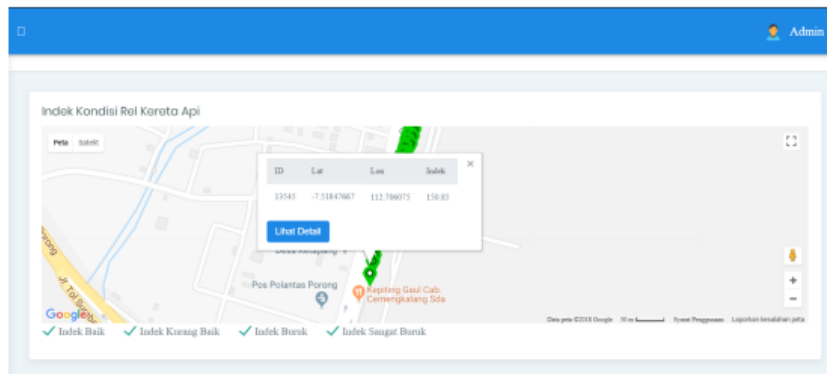
dari visualisasi data yaitu pada awalnya data yang telah tersimpan di lokal, dibaca setiap barisnya. Kemudian data yang telah dibaca dilakukan pemecahan data sesuai dengan delimiter yang telah diprogram. Dari hasil pemecahan data didapatkan data getaran rel dan kecepatan aktual yang nilainya divisualisasikan ke tampilan UI sensor *node*. *User interface* dibangun dari *layout* yang dibangun menggunakan *library* Tkinter pada bahasa pemrograman Python. Gambar 5 merupakan implementasi dari *user interface* yang dibuat.



Gambar 5: Implementasi konfigurasi sensor *node*.

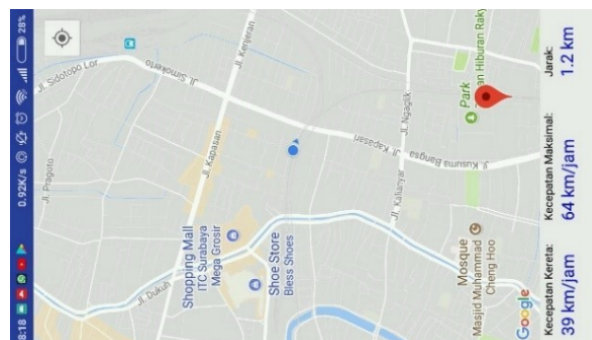
Pelaporan nilai indeks kualitas rel kereta api digunakan untuk memvisualisasikan laporan kondisi rel kereta api kepada petugas perawatan rel. Sistem pelaporan nilai indeks rel kereta api dibuat dengan cara mengambil data sensor dari *cloud storage* yang telah menyimpan data kondisi rel dari sensor *node*. Data yang diambil kemudian dilakukan pengelompokan berdasarkan indeks rel sesuai dengan Tabel 2. Data yang telah dikelompokkan disajikan ke dalam bentuk peta digital dengan *marker* berwarna yang menunjukkan nilai indeks jalur dan batas kecepatan maksimum berdasarkan lokasi saat akuisisi data. Warna pada *marker* tersebut merepresentasikan nilai indeks jalur kereta api. Indeks nilai indeks jalur kereta api berbasis web dibuat dengan menggunakan pemrograman PHP (*HyperText Preprocessor*) sebagai *back-end* dan divisualisasikan dalam peta digital dengan menggunakan API (*Application Programming Interface*) Google Maps. Gambar 6 merupakan hasil implementasi laporan nilai indeks rel berbasis web yang dapat diakses oleh petugas perawatan rel.

Pembuatan aplikasi notifikasi batas kecepatan maksimum ini berfungsi untuk memberikan peringatan dini kepada masinis agar dapat mengatur kecepatan kereta api sesuai dengan batas kecepatan maksimum. Nilai batas kecepatan maksimum didapatkan dengan mengambil nilai indeks kondisi jalan kereta api, nilai kecepatan aktual, dan nilai lokasi data. Aplikasi notifikasi pemberitahuan batas kecepatan maksimum menggunakan platform Android dan Google Maps API. Aplikasi notifikasi batas kecepatan maksimum



Gambar 6: Visualisasi data dalam bentuk peta digital.

memiliki fitur-fitur seperti mengetahui posisi aktual kereta api, kecepatan aktual kereta api, titik posisi batas kecepatan maksimum, dan jarak antara posisi aktual kereta api dengan titik batas kecepatan maksimum. Nilai batas kecepatan maksimum yang akan dilewatkan dengan cara melakukan HTTP request ke server menggunakan metode GET pada port 80. Data diupload dengan cara memasukkan data ke URL server tujuan yaitu nilai lintang dan bujur kereta api sebenarnya dan mendapatkan response dari server berupa data yang diinginkan. Data response yang didapatkan menggunakan format JSON yang terdiri dari data lokasi titik penanda lintang dan bujur, batas kecepatan maksimum, nilai indeks rel, dan jarak aktual antara kereta api dengan titik batas kecepatan maksimum. Gambar 7 merupakan implementasi aplikasi notifikasi batas kecepatan maksimum kereta api.



Gambar 7: Implementasi aplikasi notifikasi batas kecepatan maksimum kereta api.

IV. HASIL

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap sistem yang telah dibuat. Pengujian tersebut meliputi pengujian *user interface*, pengujian perangkat sensor *node*, pengujian interval waktu penyimpanan ke *database*, dan pengujian sistem peringatan dini.

A. User Interface Laporan Nilai Indeks Rel

Pada bagian ini, pengujian dilakukan untuk melihat apakah warna *marker* yang ditampilkan oleh peta digital sudah sesuai dengan parameter nilai indeks rel yang ditentukan. Pada pengujian ini, hasil yang didapatkan adalah peta digital telah berhasil menampilkan sesuai dengan parameter yang ditentukan. Dari empat sampel pengujian *user interface* laporan nilai indeks rel kereta api pada Tabel 3, diketahui bahwa semua sampel dapat menampilkan warna *marker* yang sesuai dengan nilai indeks rel.

B. Pengujian Perangkat

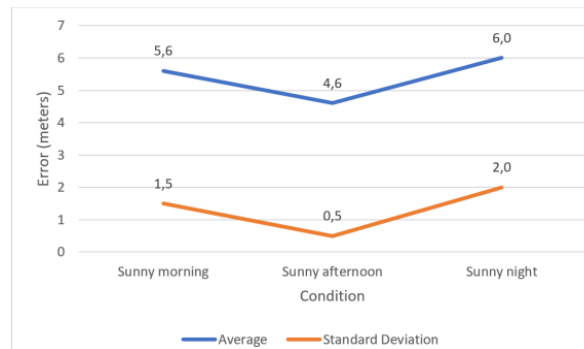
Pada penelitian ini dilakukan pengujian pada perangkat yang digunakan yaitu sensor *node* accelerometer dan sensor GPS untuk mengetahui keakuratan sensor GPS. Terdapat dua macam pengujian untuk sensor

Tabel 3: Pengujian Contoh dari Antarmuka Pengguna terhadap Nilai Indeks

ID Indeks	Nilai Indeks	Warna Penanda
1125	569,73	Hijau
940	97,97	Kuning
1157	79,8	Oranye
1659	17	Merah

GPS yaitu pengujian akurasi lokasi dan pengujian akurasi kecepatan. Dan sensor accelerometer yaitu pengujian keakuratan nilai keluaran sensor.

Pada akurasi lokasi GPS dilakukan perbandingan nilai lintang, bujur yang didapatkan oleh perangkat sensor *GPS node* dengan patok ITS 01. Pengujian ini dilakukan untuk melihat nilai galat dari perangkat GPS yang digunakan pada sensor *node*, jika dibandingkan dengan patok patok ITS 01 sudah memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Dari hasil pengujian akurasi lokasi GPS sebanyak tiga kali yaitu pada saat pagi hari yang cerah, siang hari yang cerah dan malam hari yang cerah dapat disimpulkan dalam sebuah grafik garis seperti pada Gambar 8, bahwa tingkat kesalahan rata-rata tertinggi adalah 6,0 meter pada malam hari dengan nilai terang alat standar deviasi sebesar 2,0 meter. Sedangkan pada tingkat kesalahan rata-rata terendah adalah 4,6 meter pada hari yang cerah dengan standar deviasi kesalahan 0,5 meter. Dan ada pagi hari yang cerah nilai rata-rata kesalahan adalah 5,6 meter dengan standar deviasi kesalahan 1,5 meter.



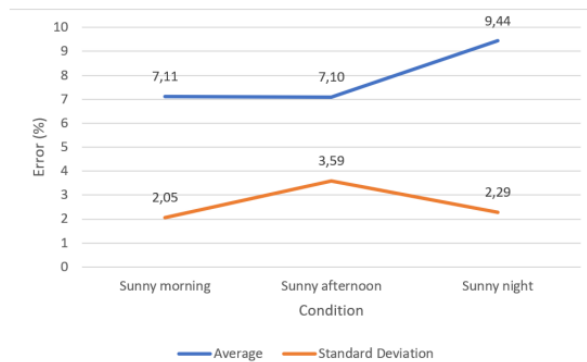
Gambar 8: Rata-rata dan deviasi standar galat akurasi lokasi GPS.

Pada pengujian akurasi kecepatan, dilakukan perbandingan nilai kecepatan yang didapatkan oleh perangkat GPS yang digunakan pada sensor *node* dengan speedometer sepeda motor dengan kecepatan yang telah ditentukan. Terdapat lima parameter kecepatan yang diuji yaitu kecepatan 20 km/jam, 30 km/jam, 40 km/jam, 50 km/jam, dan 60 km/jam. Pengujian ini dilakukan untuk melihat nilai galat dari perangkat GPS yang digunakan pada sensor *node*, jika dibandingkan dengan speedometer sepeda motor yang sudah memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Gambar 9 merupakan grafik hasil pengujian deteksi kecepatan GPS, dapat dilihat bahwa nilai rata-rata galat terendah adalah 7,10% pada saat hari cerah dengan nilai standar deviasi sebesar 3,59%. Sedangkan nilai rata-rata galat tertinggi adalah 9,44% pada malam hari yang cerah dengan standar deviasi 1,57%. Dan pada kondisi pagi hari yang cerah, tingkat kesalahan rata-rata adalah 7,11% dengan standar deviasi 2,32%.

Pada pengujian ini dilakukan perbandingan nilai setiap sumbu horizontal (X), vertikal (Y), dan lateral (Z) yang diperoleh sensor accelerometer yang digunakan pada sensor *node* dengan perangkat yang dilengkapi dengan sensor accelerometer dan aplikasi pembaca sensor accelerometer pada kereta api yang sama. Pengambilan data dilakukan sebanyak 100 kali. Terlihat pada Tabel 4 yang merupakan hasil pengujian akselerasi sensor accelerometer, nilai galat rata-rata dari masing-masing sumbu yaitu sumbu horizontal sebesar 0.012 g, sumbu lateral sebesar 0.014 g, dan 0.033 g untuk sumbu vertikal. Sedangkan nilai galat maksimum dari masing-masing sumbu adalah 0.040 g untuk sumbu horizontal, 0.060 g untuk sumbu lateral, dan 0.280 g untuk sumbu vertikal.

C. Pengujian Interval Waktu Penyimpanan ke Database

Pada bagian ini dilakukan pengujian untuk mengetahui waktu rata-rata *delay* pengiriman dari sensor *node* sebagai pengirim ke *database* sebagai penerima. Pengujian dilakukan dengan melihat selisih waktu



Gambar 9: Rata-rata dan deviasi standar galat kecepatan GPS.

Tabel 4: Nilai Minimum, Rata-rata, dan Maksimum dari Galat Sensor Akselerometer

Nilai Galat	Sumbu X (g)	Sumbu Y (g)	Sumbu Z (g)
Rata-rata	0,012	0,014	0,033
Maksimum	0,040	0,060	0,280
Minimum	0,000	0,000	0,000

yang didapatkan oleh sensor *node* yang telah disinkronisasi oleh GPS sebagai pengirim dan waktu yang didapatkan oleh *database* sebagai penerima. Waktu jeda dihitung dengan mengurangi waktu penerimaan data dengan waktu pengiriman data. Pengambilan data dilakukan sebanyak 203 kali. Pada Tabel 5 terdapat 10 sampel yang menguji interval pengiriman data dari sensor *node* sebagai pengirim dan *database* sebagai penerima. Secara umum, tanggal dan waktu yang didapatkan oleh *database* dan GPS menggunakan satuan UTC (*Coordinated Universal Time*). Indonesia menggunakan zona waktu (UTC + 07:00) sehingga nilai waktu pada *database* dan GPS sebelumnya telah ditambahkan pukul 07:00 oleh sistem. Dari hasil pengujian pengiriman data, dapat dilihat bahwa nilai waktu pengiriman tercepat adalah selama 1 detik. Rata-rata kecepatan pengiriman data adalah 1,04 detik. Sedangkan waktu pengiriman terlama adalah selama 2 detik.

Tabel 5: Waktu dan Tanggal Pengiriman Data (GPS) dan Penerimaan Data di Basis Data

Transmitter		Receiver	
Tanggal GPS	Waktu GPS	Tanggal Database	Waktu Database
2018-05-22	15:44:12	2018-05-22	15:44:13
2018-05-22	15:44:18	2018-05-22	15:44:16
2018-05-22	15:44:25	2018-05-22	15:44:19
2018-05-22	15:44:30	2018-05-22	15:44:39
2018-05-22	15:44:35	2018-05-22	15:44:52
2018-05-22	15:44:42	2018-05-22	15:45:23
2018-05-22	15:44:48	2018-05-22	15:45:32
2018-05-22	15:44:54	2018-05-22	15:45:39
2018-05-22	15:45:00	2018-05-22	15:45:46
2018-05-22	15:45:07	2018-05-22	15:45:52
2018-05-22	15:45:13	2018-05-22	15:45:58
2018-05-22	15:45:20	2018-05-22	15:46:02
2018-05-22	15:45:26	2018-05-22	15:46:08
2018-05-22	15:45:33	2018-05-22	15:50:32

D. Pengujian Sistem Peringatan Dini

Pada pengujian ini dilakukan pengujian peringatan dini pada aplikasi berbasis Android untuk mengetahui aplikasi mana yang dapat memberikan notifikasi batas kecepatan maksimum seperti yang telah dirancang. Pada pengujian sistem peringatan dini, aplikasi akan memberikan notifikasi berupa kecepatan-

an aktual kereta api, batas kecepatan maksimal, jarak antara posisi aktual kereta api dengan *marker* titik batas kecepatan maksimal, stasiun kereta api aktual berupa *marker* berwarna biru, dan titik batas kecepatan maksimal dengan nilai indeks kondisi kereta api kurang dari 100 berupa *marker* berwarna merah. Pengujian dibagi berdasarkan parameter jarak antara posisi aktual perangkat dengan posisi titik batas kecepatan maksimum. Pembagian parameter jarak dibagi menjadi enam, yaitu lebih dari 500 m, 499-400 m, 399-300 m, 299-200 m, 199-100 m, dan 99-0 m. Berdasarkan Tabel 6 dapat dilihat bahwa pada jarak lebih dari 500 m, posisi aktual terdeteksi dengan jarak 660 m dengan kecepatan aktual 41 km/jam. Pada parameter jarak 499-499 m, posisi sebenarnya terdeteksi dengan jarak 460 m dengan kecepatan sebenarnya 39 km/jam. Pada parameter jarak 399-300 m, posisi sebenarnya terdeteksi dengan jarak 320 m pada kecepatan 36 km/jam. Pada parameter jarak 299-200 m, posisi sebenarnya terdeteksi dengan jarak 290 m dengan kecepatan 38 km/jam. Pada parameter jarak antara 199-100 m, posisi sebenarnya terdeteksi dengan jarak 170 m dengan kecepatan 39 km/jam. Pada parameter jarak antara 199-100 m, posisi aktual terdeteksi dengan jarak 170 m pada kecepatan 39 km/jam. Dan pada parameter jarak 99-0 m, posisi aktual terdeteksi dengan jarak 90 m pada kecepatan 41 km/jam.

Tabel 6: Test Results of Early Warning Application Maximum Train Speed Limit

Distance Parameters (m)	Actual Distance (m)	Actual Speed (km/h)
>500	660	41
499-400	460	39
399-300	320	36
299-200	250	38
199-100	170	39
99-0	90	41

V. HASIL

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap sistem yang telah dibuat. Pengujian tersebut meliputi pengujian *user interface*, pengujian perangkat sensor *node*, pengujian interval waktu penyimpanan ke *database*, dan pengujian sistem peringatan dini.

A. User Interface Laporan Nilai Indeks Rel

Pada bagian ini, pengujian dilakukan untuk melihat apakah warna *marker* yang ditampilkan oleh peta digital sudah sesuai dengan parameter nilai indeks rel yang ditentukan. Pada pengujian ini, hasil yang didapatkan adalah peta digital telah berhasil menampilkan sesuai dengan parameter yang ditentukan. Dari empat sampel pengujian *user interface* laporan nilai indeks rel kereta api pada Tabel 3, diketahui bahwa semua sampel dapat menampilkan warna *marker* yang sesuai dengan nilai indeks rel.

Tabel 7: Pengujian Contoh dari Antarmuka Pengguna terhadap Nilai Indeks

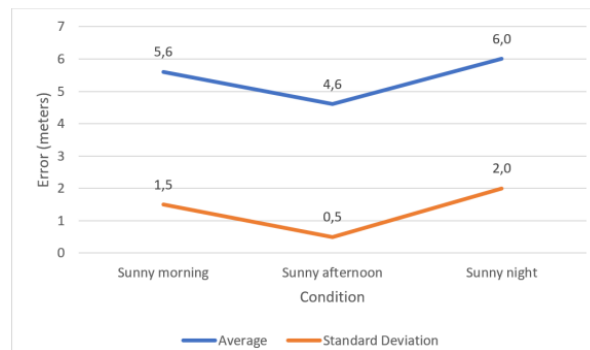
ID Indeks	Nilai Indeks	Warna Penanda
1125	569,73	Hijau
940	97,97	Kuning
1157	79,8	Oranye
1659	17	Merah

B. Pengujian Perangkat

Pada penelitian ini dilakukan pengujian pada perangkat yang digunakan yaitu sensor *node* accelerometer dan sensor GPS untuk mengetahui keakuratan sensor GPS. Terdapat dua macam pengujian untuk sensor GPS yaitu pengujian akurasi lokasi dan pengujian akurasi kecepatan. Dan sensor accelerometer yaitu pengujian keakuratan nilai keluaran sensor.

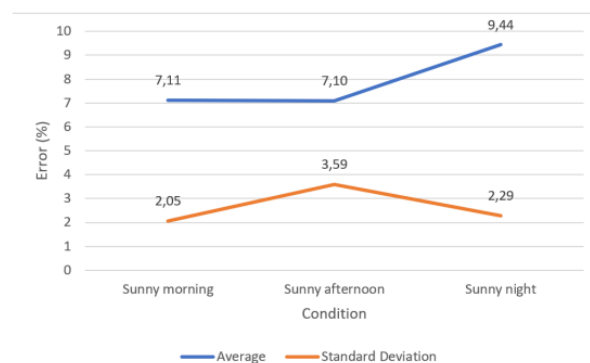
Pada akurasi lokasi GPS dilakukan perbandingan nilai lintang, bujur yang didapatkan oleh perangkat sensor *GPS node* dengan patok ITS 01. Pengujian ini dilakukan untuk melihat nilai galat dari perangkat GPS yang digunakan pada sensor *node*, jika dibandingkan dengan patok patok ITS 01 sudah memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Dari hasil pengujian akurasi lokasi GPS sebanyak tiga kali yaitu pada

saat pagi hari yang cerah, siang hari yang cerah dan malam hari yang cerah dapat disimpulkan dalam sebuah grafik garis seperti pada Gambar 8, bahwa tingkat kesalahan rata-rata tertinggi adalah 6,0 meter pada malam hari dengan nilai terang alat standar deviasi sebesar 2,0 meter. Sedangkan pada tingkat kesalahan rata-rata terendah adalah 4,6 meter pada hari yang cerah dengan standar deviasi kesalahan 0,5 meter. Dan ada pagi hari yang cerah nilai rata-rata kesalahan adalah 5,6 meter dengan standar deviasi kesalahan 1,5 meter.



Gambar 10: Rata-rata dan deviasi standar galat akurasi lokasi GPS.

Pada pengujian akurasi kecepatan, dilakukan perbandingan nilai kecepatan yang didapatkan oleh perangkat GPS yang digunakan pada sensor *node* dengan speedometer sepeda motor dengan kecepatan yang telah ditentukan. Terdapat lima parameter kecepatan yang diuji yaitu kecepatan 20 km/jam, 30 km/jam, 40 km/jam, 50 km/jam, dan 60 km/jam. Pengujian ini dilakukan untuk melihat nilai galat dari perangkat GPS yang digunakan pada sensor *node*, jika dibandingkan dengan speedometer sepeda motor yang sudah memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Gambar 9 merupakan grafik hasil pengujian deteksi kecepatan GPS, dapat dilihat bahwa nilai rata-rata galat terendah adalah 7,10% pada saat hari cerah dengan nilai standar deviasi sebesar 3,59%. Sedangkan nilai rata-rata galat tertinggi adalah 9,44% pada malam hari yang cerah dengan standar deviasi 1,57%. Dan pada kondisi pagi hari yang cerah, tingkat kesalahan rata-rata adalah 7,11% dengan standar deviasi 2,32%.



Gambar 11: Rata-rata dan deviasi standar galat kecepatan GPS.

Pada pengujian ini dilakukan perbandingan nilai setiap sumbu horizontal (X), vertikal (Y), dan lateral (Z) yang diperoleh sensor accelerometer yang digunakan pada sensor *node* dengan perangkat yang dilengkapi dengan sensor accelerometer dan aplikasi pembaca sensor accelerometer pada kereta api yang sama. Pengambilan data dilakukan sebanyak 100 kali. Terlihat pada Tabel 4 yang merupakan hasil pengujian akselerasi sensor accelerometer, nilai galat rata-rata dari masing-masing sumbu yaitu sumbu horizontal sebesar 0.012 g, sumbu lateral sebesar 0.014 g, dan 0.033 g untuk sumbu vertikal. Sedangkan nilai galat maksimum dari masing-masing sumbu adalah 0.040 g untuk sumbu horizontal, 0.060 g untuk sumbu lateral, dan 0.280 g untuk sumbu vertikal.

Tabel 8: Nilai Minimum, Rata-rata, dan Maksimum dari Galat Sensor Akselerometer

Nilai Galat	Sumbu X (g)	Sumbu Y (g)	Sumbu Z (g)
Rata-rata	0,012	0,014	0,033
Maksimum	0,040	0,060	0,280
Minimum	0,000	0,000	0,000

C. Pengujian Interval Waktu Penyimpanan ke Database

Pada bagian ini dilakukan pengujian untuk mengetahui waktu rata-rata *delay* pengiriman dari sensor *node* sebagai pengirim ke *database* sebagai penerima. Pengujian dilakukan dengan melihat selisih waktu yang didapatkan oleh sensor *node* yang telah disinkronisasi oleh GPS sebagai pengirim dan waktu yang didapatkan oleh *database* sebagai penerima. Waktu jeda dihitung dengan mengurangi waktu penerimaan data dengan waktu pengiriman data. Pengambilan data dilakukan sebanyak 203 kali. Pada Tabel 5 terdapat 10 sampel yang menguji interval pengiriman data dari sensor *node* sebagai pengirim dan *database* sebagai penerima. Secara umum, tanggal dan waktu yang didapatkan oleh *database* dan GPS menggunakan satuan UTC (*Coordinated Universal Time*). Indonesia menggunakan zona waktu (UTC + 07:00) sehingga nilai waktu pada *database* dan GPS sebelumnya telah ditambahkan pukul 07:00 oleh sistem. Dari hasil pengujian pengiriman data, dapat dilihat bahwa nilai waktu pengiriman tercepat adalah selama 1 detik. Rata-rata kecepatan pengiriman data adalah 1,04 detik. Sedangkan waktu pengiriman terlama adalah selama 2 detik.

Tabel 9: Waktu dan Tanggal Pengiriman Data (GPS) dan Penerimaan Data di Basis Data

Transmitter		Receiver	
Tanggal GPS	Waktu GPS	Tanggal Database	Waktu Database
2018-05-22	15:44:12	2018-05-22	15:44:13
2018-05-22	15:44:18	2018-05-22	15:44:16
2018-05-22	15:44:25	2018-05-22	15:44:19
2018-05-22	15:44:30	2018-05-22	15:44:39
2018-05-22	15:44:35	2018-05-22	15:44:52
2018-05-22	15:44:42	2018-05-22	15:45:23
2018-05-22	15:44:48	2018-05-22	15:45:32
2018-05-22	15:44:54	2018-05-22	15:45:39
2018-05-22	15:45:00	2018-05-22	15:45:46
2018-05-22	15:45:07	2018-05-22	15:45:52
2018-05-22	15:45:13	2018-05-22	15:45:58
2018-05-22	15:45:20	2018-05-22	15:46:02
2018-05-22	15:45:26	2018-05-22	15:46:08
2018-05-22	15:45:33	2018-05-22	15:50:32

D. Pengujian Sistem Peringatan Dini

Pada pengujian ini dilakukan pengujian peringatan dini pada aplikasi berbasis Android untuk mengetahui aplikasi mana yang dapat memberikan notifikasi batas kecepatan maksimum seperti yang telah dirancang. Pada pengujian sistem peringatan dini, aplikasi akan memberikan notifikasi berupa kecepatan aktual kereta api, batas kecepatan maksimal, jarak antara posisi aktual kereta api dengan *marker* titik batas kecepatan maksimal, stasiun kereta api aktual berupa *marker* berwarna biru, dan titik batas kecepatan maksimal dengan nilai indeks kondisi kereta api kurang dari 100 berupa *marker* berwarna merah. Pengujian dibagi berdasarkan parameter jarak antara posisi aktual perangkat dengan posisi titik batas kecepatan maksimum. Pembagian parameter jarak dibagi menjadi enam, yaitu lebih dari 500 m, 499-400 m, 399-300 m, 299-200 m, 199-100 m, dan 99-0 m. Berdasarkan Tabel 6 dapat dilihat bahwa pada jarak lebih dari 500 m, posisi aktual terdeteksi dengan jarak 660 m dengan kecepatan aktual 41 km/jam. Pada parameter jarak 499-499 m, posisi sebenarnya terdeteksi dengan jarak 460 m dengan kecepatan sebenarnya 39 km/jam. Pada parameter jarak 399-300 m, posisi sebenarnya terdeteksi dengan jarak 320 m pada kecepatan 36 km/jam. Pada parameter jarak 299-200 m, posisi sebenarnya terdeteksi dengan jarak 290 m dengan kecepatan 38 km/jam. Pada parameter jarak antara 199-100 m,

posisi sebenarnya terdeteksi dengan jarak 170 m dengan kecepatan 39 km/jam. Pada parameter jarak antara 199-100 m, posisi aktual terdeteksi dengan jarak 170 m pada kecepatan 39 km/jam. Dan pada parameter jarak 99-0 m, posisi aktual terdeteksi dengan jarak 90 m pada kecepatan 41 km/jam.

Tabel 10: Test Results of Early Warning Application Maximum Train Speed Limit

Distance Parameters (m)	Actual Distance (m)	Actual Speed (km/h)
>500	660	41
499-400	460	39
399-300	320	36
299-200	250	38
199-100	170	39
99-0	90	41

VI. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan diantaranya, yaitu tingkat validasi data berdasarkan rata-rata selisih nilai getaran dan selisih jarak yang diperoleh dari jenis kereta dan kecepatan yang berbeda adalah sebesar 0,6 g untuk sumbu horizontal, 0,01 g untuk sumbu lateral, 0,19 g untuk sumbu vertikal, dan 34,3 meter untuk selisih jarak. Tingkat keakurasian masing-masing sensor jika dilihat dari nilai galat rata-rata pada sensor GPS dalam menentukan lokasi serta besar kecepatan adalah 5,4 meter dengan delay gps 2,8 detik, dan 17,36% dan pada sensor akselerometer sebesar 0,059 g. Proses pengiriman data oleh sensor sebagai pengirim *node* menuju *database server* sebagai penerima membutuhkan interval waktu rata-rata sebesar 1,04 detik. Aplikasi peringatan dini batas kecepatan maksimal kereta api dapat menampilkan *marker* terdekat yang memiliki nilai indeks kurang dari 100 serta menampilkan informasi kecepatan aktual kereta api, batas kecepatan maksimal, dan jarak antara posisi kereta api dengan posisi *marker*. Aplikasi dapat digunakan oleh petugas PT KAI untuk memantau kondisi rel kereta api berdasarkan warna pada *marker* (hijau, kuning, jingga, dan merah) sesuai dengan parameter nilai indeks kondisi rel kereta api yang telah ditetapkan.

Daftar Pustaka

- [1] Republik Indonesia, Undang-Undang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan Nomor 22 Tahun 2009. [Daring]. Tersedia: <http://www.dpr.go.id/dokjdih/document/uu/UU%202009%2022.pdf> [Diakses: Apr. 2018].
- [2] Komisi Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT), Data Investigasi Kecelakaan Perkeretaapian 2010-2016. [Daring]. Tersedia: http://knkt.dephub.go.id/knkt/ntsc_home/Media_Release/Media%20Release%202016/Media%20Release%202016--IK%20KA%2020161130.pdf [Diakses: Apr. 2018].
- [3] M. Final, "Inspeksi Keselamatan Perjalanan Kereta," Kompas.com, 2 Sep. 2010. [Daring]. Tersedia: <https://travel.kompas.com/read/2010/09/02/03165727/Deteksi.Keselamatan.Perjalanan.Kereta> [Diakses: Jul. 2018].
- [4] D. Wahono, Instrumentasi Deteksi Kondisi Kereta Api. Jakarta: LIPI Press, 2015.
- [5] C. Chellaswamy, L. Balaji, A. Vanathi, dan L. Saravanan, "Sistem Pemantauan Kesehatan Rel Berbasis IoT dan Sistem Informasi," Proceeding Konferensi Internasional Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS), 2017.
- [6] F. Imdad, M. T. Niaz, dan H. S. Kim, "Sistem Pemantauan Kesehatan Struktur Rel Kereta Api," Konferensi Internasional ke-15 Control, Automation and Systems (ICCAS), 2015.
- [7] N. Bosso, A. Gugliotta, dan N. Zampieri, "Perancangan dan Pengujian Sistem Pemantauan Inovatif untuk Kendaraan Kereta Api," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018.
- [8] H. Tsunashima, H. Mori, K. Yanagisawa, M. Ogino, dan A. Asano, "Pemantauan Kondisi Rel Kereta Api Menggunakan Perangkat Pemantauan Onboard Ukuran Kompak," Konferensi IET ke-6 tentang Railway Condition Monitoring (RCM), 2014.
- [9] M. Subyanto, Dinamika Kendaraan Rel. Bandung: CV Komala, 1982.