

Analisis Karakteristik Sensor Laser Sebagai Pengukur Lebar Rel Kereta Api

Riza Achmad Fauzi
Program Studi Perkeretaapian
Jurusan Teknik
Politeknik Negeri Madiun
Madiun, Indonesia
achmadriza06@gmail.com

Mohammad Erik Echsony
Program Studi Perkeretaapian
Jurusan Teknik
Politeknik Negeri Madiun
Madiun, Indonesia
erik.sony@pnm.ac.id

Alfi Tranggono Agus Salim
Program Studi Perkeretaapian
Jurusan Teknik
Politeknik Negeri Madiun
Madiun, Indonesia
alfitranggono@pnm.ac.id

Sefi Novendra Patrialova
Departemen Teknik Instrumentasi
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Surabaya, Indonesia
sefi.patrialova@gmail.com

Romal Hadi Setyawan
Departemen Desain
Divisi Teknologi
PT INKA
Madiun, Indonesia
romal.hadi@inka.co.id

Abstract— Lebar rel kereta api yang tidak standar mengakibatkan kereta anjlok. Dikarenakan rel menerima beban dari roda kereta api secara kontinyu selama kereta beroperasi. Inspeksi rel dilakukan oleh tenaga manusia atau PPJ (Petugas Penilik Jalur) menggunakan *track gauge master*, untuk mengukur lebar rel kereta api. Pengukuran lebar rel secara manual menjadi permasalahan, mengakibatkan petugas berjalan di sepanjang rel kereta api. Sehingga kurang efisien baik segi waktu dan tenaga, serta dapat membahayakan keselamatan. Solusi dari permasalahan tersebut adalah dibutuhkan perangkat untuk mengukur lebar rel yang memudahkan petugas. Perangkat pengukur lebar rel menggunakan sensor laser. Penggunaan sensor laser dalam pengukuran memanfaatkan selisih waktu tempuh sinyal yang dipantulkan dan diterima oleh sensor, kemudian diolah menjadi nilai jarak. Nilai jarak disaring menggunakan metode *kalman filter*. Pengujian keakuratan jarak dibandingkan dengan alat ukur *laser distance meter*. Sensor laser dikalibrasi untuk meminimalisir selisih pengukuran (*error*) dari hasil perbandingan. Hasil penelitian didapatkan akurasi *error* pada sensor laser sebesar 1,5%. Akurasi *error* menjadi 0,11% setelah menggunakan *kalman filter*.

Kata Kunci— : sensor laser, lebar rel, rel kereta api, sensor jarak, kalman filter.

I. PENDAHULUAN

Jalan rel adalah satu kesatuan konstruksi yang terbuat dari baja, beton, atau konstruksi lain yang terletak di permukaan, di bawah, dan di atas tanah atau bergantung beserta perangkatnya yang mengarahkan jalannya kereta[1]. Untuk menjamin keselamatan dan keamanan memerlukan perawatan dan pemeliharaan sebagai pendukung pengoperasian kereta api.

Jalan rel berfungsi menerima dan mendistribusikan beban gandar kereta api selama kereta beroperasi [2]. Akibatnya rel patah, aus dan bergelombang, serta penambat longgar menyebabkan lebar rel renggang. Jumlah kecelakaan yang disebabkan prasarana tahun 2015 hingga 2019 terdapat 112 kali kecelakaan karena anjlok [3]. Salah satu penyebab kereta anjlok yaitu perbedaan ukuran lebar rel berada di bawah standar, lebar rel telah ditetapkan dalam PM Nomor 60 Tahun 2012 [4]. Peraturan tersebut menentukan penyimpangan lebar jalan rel untuk lebar 1067 mm dapat

diterima +4 mm dan -2 mm untuk jalan rel yang telah dioperasikan [5]. Saat ini pengukuran lebar rel dilakukan oleh Petugas Pemeriksa Jalur (PPJ) secara manual. Sehingga kurang efisien segi waktu dan tenaga, serta dapat membahayakan keselamatan.

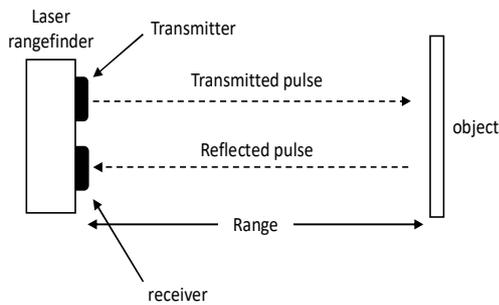
Pada penelitian terdahulu berupa robot inspeksi rel menggunakan sensor ultrasonik untuk mendeteksi adanya cacat rel [6]. Berdasarkan penelitian tersebut peneliti mengembangkan perangkat inspeksi rel dapat mengukur lebar rel kereta api di jalur rel sesungguhnya. Selain itu terdapat penelitian pengujian sensor ultrasonik untuk mendeteksi perubahan di permukaan material dilakukan secara statis dan dinamis. Diperoleh persentase akurasi alat untuk pengujian statis adalah 96,67 %, sedangkan akurasi untuk pengujian dinamis adalah 95,02 % [7]. Berdasarkan penelitian tersebut peneliti menggunakan sensor laser tipe *TOF 10120* untuk mengetahui akurasi sensor jika dibandingkan menggunakan sensor ultrasonik. Hasil pembacaan sensor laser *TOF 10120* dipengaruhi oleh warna objek target (reflektivitas objek). Ini berdampak pada jarak target pengukuran di dalam ruangan dan di luar ruangan [8]. Peneliti menggunakan metode kalman filter untuk meningkatkan akurasi pengukuran [9].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik sensor laser sebagai pengukur lebar rel kereta api secara statis dan dinamis. Sensor laser yang digunakan tipe *TOF 10120*. Sebelum dilakukan pengukuran rel sensor laser dikalibrasi untuk meminimalisir selisih pengukuran (*error*) dari hasil perbandingan.

II. BAHAN DAN METODE

A. Sensor Laser

Sensor laser dapat digunakan untuk pengukuran jarak dengan memanfaatkan prinsip *TOF (Time of Flight)* atau mengukur interval waktu antara pulsa yang dipancarkan oleh *transmitter* dan kembalinya setelah direfleksikan oleh objek diterima oleh *receiver* sesuai jarak yang ditentukan [10].



Gambar 1. Prinsip Kerja Sensor Laser

Perbandingan kecepatan cahaya dan waktu diperoleh nilai jarak [11]. Persamaan jarak berdasarkan *TOF (Time of Flight)* dinyatakan sebagai berikut [12].

$$d = \frac{c \times \Delta t}{2} \quad (1)$$

Keterangan :

d = jarak(m)

c = kecepatan cahaya di udara (3×10^8 m/s)

Δt = time of flight (sekon)

B. Spesifikasi Sensor Laser TOF 10120

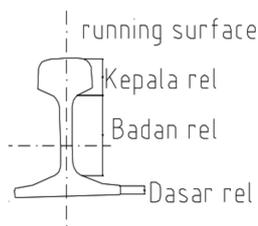
Laser TOF10120 menggunakan laser pemancar permukaan rongga vertikal (VCSEL). VCSEL adalah semikonduktor laser, lebih khusus dioda laser dengan resonator laser monolitik, cahaya terpancar meninggalkan perangkat dalam arah tegak lurus terhadap permukaan *chip* [8]. Berikut spesifikasi sensor laser yang digunakan:

TABLE I. SPESIFIKASI SENSOR LASER TOF 10120 [13]

Parameter	Rating	Satuan
Jarak Jangkauan	100-1800	mm
VCC	3~5	V
Arus	35	mA
Koneksi	Inter Integrated Circuit (I2C)	
Suhu operasi	-20 + 70	°C
Kecepatan pengukuran jarak	33	ms
Maksimal akurasi di Luar ruangan	12	%

C. Struktur Rel Kereta Api

Rel memiliki bagian-bagian dalam bentuknya. Berikut bagian-bagian komponen rel, yaitu: permukaan rel untuk pergerakan kereta api atau disebut sebagai *running surface (rail thread)*, kepala rel (*head*), badan rel (*web*), dasar rel (*base*).

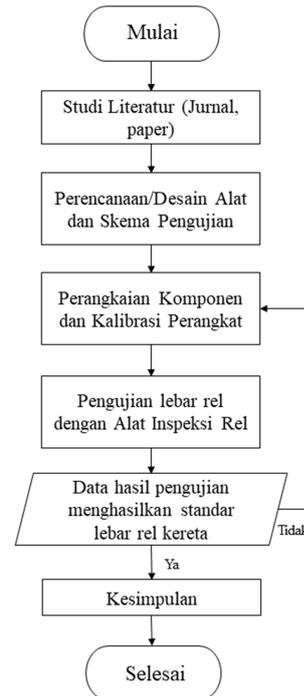


Gambar 2. Bagian-bagian komponen rel tipe R54 [1]

D. Flowchart Penelitian

Metode penelitian yang digunakan metode eksperimen. Beberapa tahapan diantaranya studi literatur dan observasi,

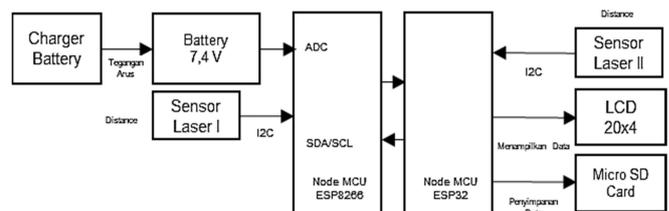
proses perencanaan desain alat dan skema pengujian perancangan, perakitan perangkat lebar rel pada alat inspeksi rel dan kalibrasi, pengambilan data lebar rel kereta api, pengolahan data, pembahasan dan kesimpulan. Metode penelitian dijelaskan sesuai gambar 2.



Gambar 3. Flowchart Penelitian

E. Perencanaan Desain Alat dan Skema Pengujian

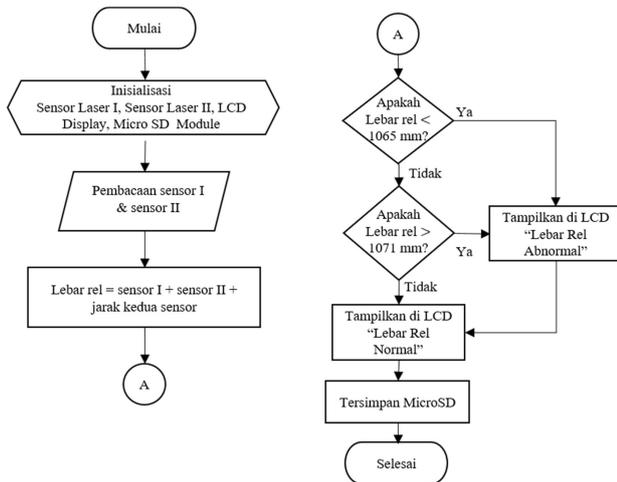
Perangkat pengukur lebar rel kereta api menggunakan mikrokontroler *Node MCU ESP 8266* dan *Node MCU ESP32* serta 2 (dua) sensor laser *TOF 10120* sebagai pengukur lebar rel kereta api. Data pengukuran ditampilkan pada *LCD (Liquid Crystal Display) 20x4* dan disimpan dalam *micro-SD card*. Berikut diagram sistem perangkat pengukur lebar rel kereta api.



Gambar 4. Blok Diagram Sistem

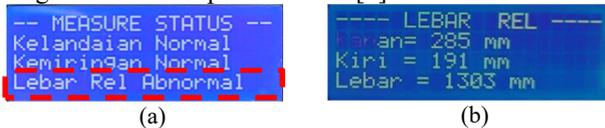
Sistem kerja perangkat terbagi menjadi *input*, mikrokontroler, dan *output* data. *Input* yang terhubung ke mikrokontroler sebagai pengolah data. *Input* meliputi 2 (dua) sensor laser *TOF 10120*. Mikrokontroler *NodeMCU ESP8266* mengolah data sensor lalu mengirimkan data ke Mikrokontroler *NodeMCU ESP32* melalui komunikasi serial [14]. Data jarak akan ditampilkan melalui *LCD* [6] [7].

Diagram alir program dimulai dengan membaca pin dan variabel. Kemudian sistem akan membaca nilai jarak dari 2 (dua) sensor laser. Dari pembacaan kedua sensor dijumlahkan terhadap jarak antara sensor. Diperoleh nilai lebar rel kereta api. Pembacaan sensor terhadap lebar juga terdapat dua kondisi yaitu lebar dengan kondisi standar atau tidak.



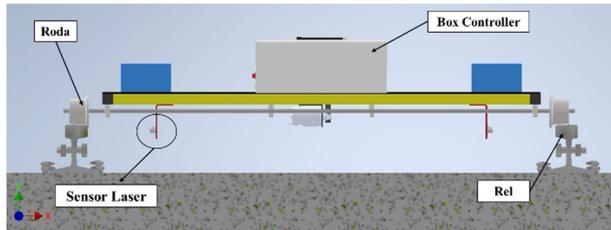
Gambar 5. Diagram Program Perangkat

Jika sesuai dengan standar LCD akan menampilkan status “Lebar Rel Normal”, jika tidak standar menampilkan status “Lebar Rel Abnormal”. Lebar rel standar pada rentang 1065 mm sampai 1071 mm [5].



Gambar 6. Tampilan LCD perangkat, (a) tampilan status pengukuran, (b) Output sensor laser

Gambar 6 merupakan desain alat inspeksi rel. Perencanaan posisi sensor laser diletakkan pada bracket terletak di bawah alat inspeksi rel. Pembacaan sensor, pulsa dipantulkan transmitter diarahkan pada kepala rel. Dipastikan posisi sensor laser sejajar terhadap bagian kepala rel.



Gambar 7. Alat Inspeksi Rel

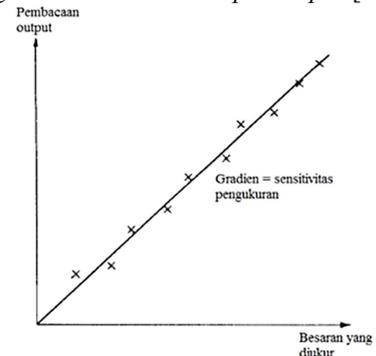
F. Kalibrasi Sensor

Hasil pembacaan sensor laser TOF 10120 dipengaruhi oleh warna objek target (reflektivitas objek). Berdampak pada jarak target pengukuran di dalam ruangan dan di luar ruangan [8]. Dilakukan penyesuaian reflektor yang digunakan ketika melakukan kalibrasi. Metode kalibrasi sensor laser mempertimbangkan warna dan permukaan material [15]. Kalibrasi sensor pada penelitian ini menggunakan reflektor berupa rel kereta api. Sehingga dilakukan penyesuaian ketika melakukan kalibrasi menggunakan plat logam sebagai reflektor. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan jarak aktual dari pengukuran alat ukur laser distance meter dengan pembacaan sensor laser TOF 10120. Kalibrasi dilakukan di tempat yang sama lebih akurat dan memiliki kebisingan yang lebih sedikit [16]. Variasi jarak yang digunakan antara 100 mm hingga 200 mm atau jarak optimal dimiliki sensor [13].

G. Variabel Data

Variabel yang akan diuji yaitu lebar rel kereta api. Output pengujian lebar rel kereta api menggunakan sensor

laser TOF 10120. Kemudian dilakukan perbandingan dengan hasil pengukuran alat ukur laser distance meter. Tahap pertama menghitung nilai linearitas sensor laser TOF 10120. Garis lurus ideal adalah garis menghubungkan titik minimum dengan titik maksimum input/output [17].



Gambar 8. Karakteristik linear output instrumen [17]

Persamaan linearitas sederhana dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$y = mx + b \quad (2)$$

Nilai m adalah slope atau kemiringan suatu garis lurus atau disebut sensitivitas. Sedangkan nilai b adalah offset atau sinyal output pada saat sinyal input nol. Sedangkan y adalah output dan x adalah input [17].

Digunakan persamaan matematis dalam perhitungan akurasi dan nilai presisi sensor sebagai berikut [18].

$$\text{rata-rata} = \frac{\text{data1} + \text{data2} \dots + \text{data ke-n}}{\text{banyak data (n)}} \quad (3)$$

$$\text{error} = |(\text{rata-rata}) - \text{nilai dari alat ukur}| \quad (4)$$

$$\text{presentase error} = \text{error} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{presisi} = \sqrt{\frac{\sum(\text{data terukur} - \text{rata-rata})^2}{\text{banyak data} - 1}} \quad (6)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

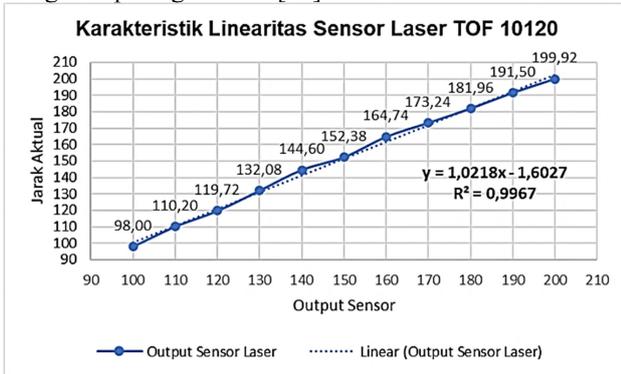
A. Hasil Pengujian Sensor Laser

Pengujian sensor laser dengan variasi jarak dilakukan dengan membandingkan nilai dari alat ukur laser distance meter. Pengujian sensor digunakan reflektor berupa logam, bertujuan untuk menyesuaikan reflektor di rel kereta api [15]. Pengujian ini bertujuan memperoleh akurasi error, nilai presisi, dan nilai offset [19]. Berikut hasil pengukuran jarak dapat dilihat pada tabel 2.

TABLE II. PENGUJIAN SENSOR LASER

Jarak Aktual (mm)	Output Sensor (mm)	Error	Presisi
100	98,00	2%	1,23
110	110,20	0%	1,59
120	119,72	0%	1,91
130	132,08	2%	1,62
140	144,60	3%	2,08
150	152,38	2%	2,22
160	164,74	3%	1,69
170	173,24	2%	3,06
180	181,96	1%	2,11
190	191,50	1%	2,62
200	199,92	0%	2,42
Rata-rata		1%	2,05

Berdasarkan tabel 2 diketahui bahwa rata-rata *error* sebesar 1 %. Nilai *error* maksimal yaitu 3 %. Jarak optimal sensor pada jarak 110 mm dan 120 mm. Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai linearitas dengan pembacaan *output* sensor berbanding lurus dengan jarak aktual dalam bentuk grafik pada gambar 7 [18].



Gambar 8. Karakteristik linear *output* sensor laser terhadap jarak aktual

Berdasarkan grafik tersebut bahwa linearitas hubungan antara nilai *input* berupa jarak aktual yang diukur dengan alat ukur *laser distance meter* dan *output* pembacaan sensor laser diperoleh persamaan $y = 1,0218x - 1,6027$. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa alat ukur mengonversi setiap perubahan jarak pada sensor sebesar 1,02 mm. Jadi sensitivitas sensor tersebut adalah 1,0218 per 100 mm pada alat ukur. Sedangkan nilai *offset* yaitu -1,6072 mm.

Selanjutnya dilakukan pengujian di atas rel kereta api. Pengujian sensor diimplementasikan *kalman filter* untuk mendapatkan nilai yang lebih akurat. Dilakukan beberapa penyesuaian sebelum menggunakan *kalman filter*. Rasio konstanta digunakan dalam *kalman filter* adalah 100 dengan konstanta pengukuran lebih besar dari konstanta varian proses [9].

B. Hasil Pengujian Lebar Rel Secara Statis

Pengujian statis dilakukan alat inspeksi rel dalam kondisi tidak bergerak dan diletakkan di titik rel yang telah ditentukan. Pengujian ini bertujuan memperoleh akurasi *error*, nilai presisi, dan nilai *offset* [19]. Pengujian ini dilakukan di atas rel kereta api pada track yang lurus (kondisi ideal) [20].

TABLE III. PENGUJIAN SENSOR DI REL KERETA API SECARA STATIS

Titik	Hasil Alat Ukur ± 2 mm	Tanpa Filter		
		Sensor (mm)	Error	Presisi
1	1065	1083,64	2%	3,86
2	1069	1087,84	2%	4,03
3	1069	1079,72	1%	3,82
4	1065	1081,38	2%	3,94
5	1065	1081,96	2%	3,75
Rata-rata			1,5%	3,88

TABLE IV. PENGUJIAN SENSOR MENGGUNAKAN METODE KALMAN FILTER DI REL KERETA API SECARA STATIS

Titik	Hasil Alat Ukur ± 2 mm	Menggunakan Filter		
		Sensor (mm)	Error	Presisi
1	1065	1066,08	0,10%	0,89
2	1069	1070,68	0,16%	0,88
3	1069	1070,68	0,16%	0,88
4	1065	1064,54	0,04%	1
5	1065	1064,12	0,08%	0,79

Rata-rata	0,11%	0,89
-----------	-------	------

Dari tabel 3 dan 4 diketahui perbandingan hasil pengujian sensor tanpa filter dengan menggunakan filter pada hasil secara statis terhadap lebar rel kereta api. Hasil pengukuran lebar rel dengan alat ukur *laser distance meter* menunjukkan kondisi rel standar, diantara sama dengan 1065 mm dan 1071 mm [5]. Metode perhitungan rata-rata, akurasi *error*, dan presisi menggunakan persamaan (3) hingga (6) menunjukkan hasil pembacaan sensor menghasilkan rata-rata akurasi *error* yaitu 1,5 % dengan tingkat presisi ±3,88 mm. Setelah menggunakan filter akurasi *error* didapatkan 0,1 % dengan tingkat presisi ±0,89 mm.

C. Hasil Pengujian Lebar Rel Secara Dinamis

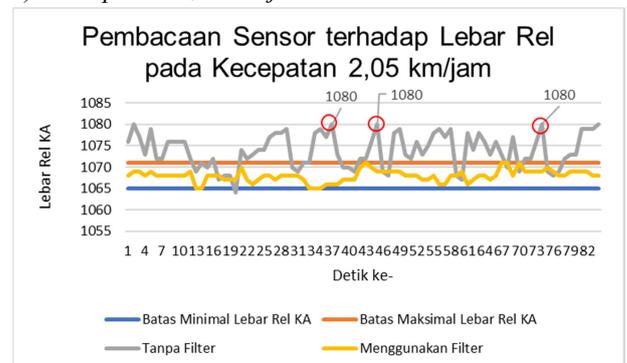
Pengujian dinamis dilakukan alat inspeksi rel dalam kondisi bergerak dengan variasi 3 (tiga) kecepatan yaitu 2,05 km/jam; 2,45 km/jam; dan 2,99 km/jam. Pengujian dilakukan di rel kereta api sejauh 50 m. Pengujian ini dilakukan di atas rel kereta api pada track yang lurus (kondisi ideal) [20].



Gambar 9. Pengujian Dinamis di Rel Kereta Api

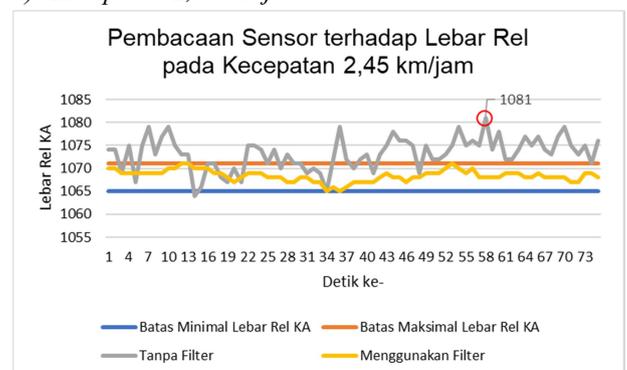
Berikut hasil pembacaan sensor terhadap lebar rel kereta api dengan dilakukan pengujian dinamis.

a) Kecepatan 2,05 km/jam



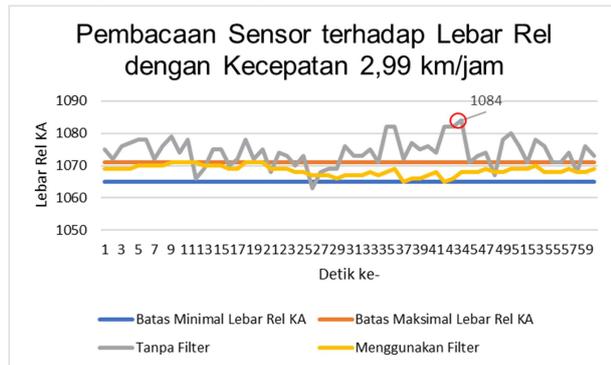
Gambar 10. Grafik Pembacaan Sensor Laser secara Dinamis dengan Kecepatan 2,05 km/jam

b) Kecepatan 2,45 km/jam



Gambar 11. Grafik Pembacaan Sensor Laser secara Dinamis dengan Kecepatan 2,45 km/jam

c) Kecepatan 2,99 km/jam



Gambar 12. Grafik Pembacaan Sensor Laser secara Dinamis dengan Kecepatan 2,99 km/jam

Berdasarkan pengujian dinamis dengan 3 (tiga) variasi kecepatan di atas diketahui nilai error maksimal pembacaan sensor laser terhadap lebar rel kereta mengalami peningkatan. Fenomena yang terjadi di lapangan yaitu terjadi getaran antara roda dan rel kereta api yang mengakibatkan hasil data pembacaan sensor yang ekstrim (*noise*). Karakteristik sensor laser TOF 10120 sensitif terhadap warna permukaan objek atau reflektor [16]. Untuk meminimalisir *noise* tersebut digunakan *kalman filter* [9].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian “Analisis Karakteristik Sensor Laser Sebagai Pengukur Lebar Rel Kereta Api” dapat disimpulkan bahwa:

1. Sensor laser TOF 10120 dapat diaplikasikan pada alat inspeksi rel dengan kalibrasi yang memperhatikan warna reflektor [16], reflektor berupa logam dan diperoleh nilai *offset* pada sensor laser yaitu -1,6027 mm.
2. Menggunakan metode *kalman filter* dapat meminimalisir *noise* [9]. Hasil pengujian statis terhadap lebar rel diperoleh nilai rata-rata *error* menggunakan filter yaitu 0,11 % dan nilai rata-rata *error* tanpa menggunakan filter 1,5 %.
3. Pada pengujian dinamis, pembacaan sensor laser lebih optimal pada kecepatan 2,05 km/jam. Dibuktikan nilai *error* maksimal pada kecepatan tersebut lebih kecil yaitu 1,97 % jika dibandingkan nilai *error* maksimal pada kecepatan yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Republik Indonesia, “PM. 32 Tahun 2011,” *Menteri Perhub. Republik Indones.*, p. 2, 2011.
- [2] W. T. Adi, “Kajian Umur Jalan Rel Berdasarkan Keausan dengan Metode dari AREA dan Perjana,” *J. Perkeretaapi. Indones. (Indonesian Railw. Journal)*, vol. 3, no. 2, 2019, doi: 10.37367/jpi.v3i2.84.
- [3] Kementerian Perhubungan, *Buku Statistik Bidang Perkeretaapian Tahun 2019*. 2019.
- [4] Komite Nasional Keselamatan Transportasi, “Laporan Akhir Laporan Akhir,” 2018.
- [5] Republik Indonesia, “Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api,” *PM. 60 Tahun 2012*, pp. 1–57, 2012.
- [6] N. Mahfuz, O. A. Dhali, S. Ahmed, and M. Nigar, “Autonomous railway crack detector robot for Bangladesh: SCANOBOT,” *5th IEEE Reg. 10 Humanit. Technol. Conf. 2017, R10-HTC 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 524–527, 2018, doi: 10.1109/R10-HTC.2017.8289014.
- [7] W. Y. Rezika *et al.*, “Characteristics of Sensor Detector Deformation Railways Material,” vol. 6, no. 4, p. 7, 2021.
- [8] J. T. Subramanian, “Surveillance System for Autonomous Survey Vehicles,” University of Oslo, 2021.
- [9] A. Ma’arif, I. Iswanto, A. A. Nuryono, and R. I. Alfian, “Kalman Filter for Noise Reducer on Sensor Readings,” *Signal Image Process. Lett.*, vol. 1, no. 2, pp. 11–22, 2019.
- [10] S. M. Nejad and S. Olyae, “Low-noise high-accuracy TOF laser range finder,” *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 5, no. 7, pp. 755–762, 2008.
- [11] P. Gordon and C. K. Toth, *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, vol. 31. 2010.
- [12] Y. S. Suh, “Laser sensors for displacement, distance and position,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 8, 2019.
- [13] Surt Technology, “Datasheet TOF10120, Time-of-Flight ranging Sensor.” 2019. Available: <https://surttech.com/2019/03/18/easy-use-of-tof-10120-laser-rangefinder-to-measure-distance-with-arduino-lcd/>. Diakses tanggal 7 Agustus 2022.
- [14] G. Hergika, Siswanto, and Sutarti, “Perancangan Internet of Things (IoT) Sebagai Kontrol Infrastruktur Dan Peralatan Toll Pada Pt. Astra Infratoll Road,” *J. PROSISKO*, vol. 8, no. 2, pp. 86–98, 2021.
- [15] C. S. Park, D. Kim, B. J. You, and S. R. Oh, “Characterization of the Hokuyo UBG-04LX-F01 2D laser rangefinder,” *Proc. - IEEE Int. Work. Robot Hum. Interact. Commun.*, pp. 385–390, 2010.
- [16] S. Komarizadehasl, B. Mobaraki, H. Ma, J. A. Lozano-Galant, and J. Turmo, “Low-Cost Sensors Accuracy Study and Enhancement Strategy,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 6, 2022, doi: 10.3390/app12063186.
- [17] A. S. Morris and R. Langari, *Measurement and Instrumentation Theory and Application Alan*. San Diego, California: Elsevier, 2012.
- [18] J. P. Bentley, *Principles of Measurement Systems*, vol. 30, no. 1. 2005.
- [19] P. S. Frima Yudha and R. A. Sani, “Implementasi Sensor Ultrasonik Hc-Sr04 Sebagai Sensor Parkir Mobil Berbasis Arduino,” *EINSTEIN e-JOURNAL*, vol. 5, no. 3, 2019.
- [20] W. A. Fistcar, “Pengaruh Parameter Track Quality Indeks (TQI) Terhadap Perilaku Bantalan Beton,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2019.