

SISTEM DETEKSI REL PATAH MENGGUNAKAN LASER BROKEN RAIL DETECTION SYSTEM USING LASER

Krisna Muhammad Luthfi¹, Dr. -Ing. Fiky Y. Suratman², Mohamad Ramdhani, S.T., M.T.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹krisnamluthfi@student.telkomuniversity.ac.id, ²fysuratman@telkomuniversity.ac.id,

³mohamadramdhani@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Kereta api merupakan salah satu transportasi umum favorit masyarakat. Beberapa tahun belakangan, jumlah penumpang dan frekuensi perjalanan kereta api semakin meningkat. Akibatnya, rel kereta api semakin sering dilintasi. Rel merupakan salah satu komponen yang sangat penting dalam perjalanan kereta api. Jika kondisi tersebut tidak ditangani maka rel bisa mengalami kerusakan. Apabila rel mengalami kerusakan pada konstruksinya maka kereta api yang melintasinya dapat mengalami kecelakaan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji sistem deteksi kerusakan rel menggunakan sinar laser. Kerusakan rel yang diteliti berupa rel patah sehingga menimbulkan suatu celah pada rel tersebut. Penelitian ini dilakukan dengan merancang sebuah purwarupa yang telah dipasang sebuah sensor jarak berbasis laser yang bernama VL53L0X. Sensor ini akan membaca jarak rel yang telah diatur sejauh 50 milimeter. Untuk mengetahui apakah rel terdapat celah atau tidak, maka perlu mengetahui ambang batas ukur atau threshold. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada dasarnya semua kondisi celah dengan lebar ≥ 2 mm mampu dibaca oleh sensor VL53L0X yang posisinya berjarak ≥ 30 mm dari badan rel setelah ditemukan threshold-nya. Tetapi tidak semua celah dan jarak sensor menghasilkan pengukuran yang ideal. Hasil pengujian yang ideal diperoleh saat sensor berjarak 50 mm dari badan rel.

Kata kunci : Rel, celah, sensor, jarak, laser, threshold

Abstract

Train is one of the people's favorite public transportation. In recent years, the number of passengers and the frequency of train trips has increased. As a result, the railroad tracks are being crossed more frequently. Rail is one of the most important components in rail travel. If these conditions are not treated, the rail may be damaged. If the rail is damaged in its construction, the train that crosses it can have an accident. The aim of this research is to study a rail damage detection system using a laser beam. The rail damage studied was in the form of a broken rail causing a gap in the rail. This research was done by designing a prototype that has been fitted with a laser-based proximity sensor named VL53L0X. This sensor will read the rail distance that has been set as far as 50 millimeters. To find out whether the rail has a gap or not, it is necessary to know the measurement threshold. The results showed that basically all gaps condition with a width of ≥ 2 mm can be read by the VL53L0X sensor whose position is ≥ 30 mm from the rail body after the threshold was found. But not all sensor gaps and distances result in ideal measurements. The ideal test results are obtained when the sensor is 50 mm from the rail body.

Keywords: Rail, gap, sensor, distance, laser, threshold

1. Pendahuluan

Dari tahun ke tahun, sarana transportasi kereta api mengalami peningkatan jumlah penumpang [1]. Meningkatnya minat masyarakat dan pelaku bisnis terhadap kereta api membuat frekuensi perjalanan kereta api penumpang maupun barang mengalami peningkatan. Dengan meningkatnya frekuensi perjalanan kereta api, maka otomatis perawatan sarana dan prasarana kereta api pun perlu ditingkatkan. Mulai dari ketersediaan lokomotif, rangkaian kereta, sistem persinyalan, hingga kondisi rel pada lintas kereta api.

Dalam penelitian ini, bagaimana cara mendeteksi kondisi rel yang tepat menjadi persoalan yang akan dibahas secara seksama. Rel adalah perangkat batang besi atau baja yang diletakkan pada permukaan tanah untuk memandu arah kereta api selama perjalanan.

Kini, pihak perusahaan kereta api telah menjalankan program pemeriksaan rel, salah satunya mengecek kualitas rel dengan bantuan tenaga manusia sebagai petugas pemeriksa rel kereta api. Setiap petugas harus berjalan dengan jarak yang ditentukan dalam sektor tertentu dan akan bergantian dengan petugas lainnya untuk pengecekan rel pada sektor lainnya. Namun, metode ini dianggap tidak efisien. Dari sisi keakuratan, manusia terkadang kurang teliti dalam pengukuran yang mengakibatkan rendahnya tingkat keakuratan. Kemudian, karena

petugas harus memeriksa rel dengan berjalan kaki maka waktu yang dibutuhkan cukup lama untuk mencari kerusakan rel dari titik awal sampai titik akhir pemeriksaan. Kemudian dari sisi keamanan dinilai cukup beresiko. Hal ini dikarenakan petugas yang berjalan di atas rel bisa saja tertabrak kereta api yang sedang melintas. Maka dari itu, dibutuhkan teknologi yang lebih maju agar pemeriksaan rel dapat lebih akurat, cepat, serta aman untuk digunakan.

Pada penelitian ini, akan dikembangkan sistem pendeteksi rel patah menggunakan laser. Laser merupakan singkatan dari "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" [2]. Pada penelitian kali ini akan diujicobakan penggunaan sinar laser di bidang transportasi, khususnya kereta api. Apabila purwarupa laser berfungsi dengan baik, maka selanjutnya diharapkan mampu diimplementasikan langsung oleh pihak operator kereta api untuk melakukan pemeriksaan rel secara berkala.

2. Dasar Teori /Material dan Metodologi/perancangan

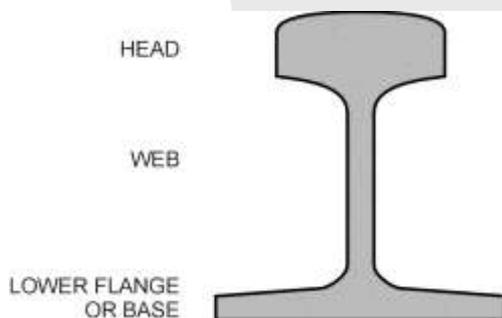
2.1 Rel

Rel adalah perangkat berupa besi atau baja untuk menopang dan mengarahkan pergerakan kereta api. Rel ini saling terhubung satu sama lain dan membentang hingga ratusan bahkan ribuan kilometer jauhnya.

Di Indonesia, standar rel yang digunakan bermacam-macam tipenya. Mulai dari UIC R25, R33, R42, hingga R54. Kata UIC merupakan singkatan dari *Union Internationale des Chemins de fer* atau dalam bahasa Inggris yaitu *International Union of Railways*. UIC merupakan badan industri transportasi kereta api internasional. Sementara "R" menyatakan berat rata-rata batang rel per meter. Sebagai contoh, rel tipe R54 memiliki berat rata-rata 54 kilogram tiap satu meter [3]. Semakin besar nilai "R" maka semakin tebal batang rel tersebut. Sehingga makin besar pula tekanan maksimum yang sanggup diterima oleh rel tersebut, dan kereta yang melintas di atasnya dapat melaju pada kecepatan yang tinggi dengan stabil dan aman.

2.1.1 Rel Patah

Sebuah rel dapat dikatakan patah apabila terdapat celah dalam satu batang rel yang sama. Pada umumnya, celah yang timbul pada rel meliputi seluruh bagian rel (permukaan rel, kepala rel, badan rel, dan dasar rel / kaki rel).



Gambar 1. Bagian Dasar Rel Kereta Api [4]



Gambar 2. Rel Patah [5]

Berdasarkan kasus rel patah yang pernah terjadi di beberapa titik lintas kereta api, penyebab rel patah biasanya terjadi dikarenakan tingginya frekuensi perjalanan kereta api, adanya benjolan pada roda kereta [6], serta perubahan cuaca dan suhu yang mengakibatkan penyusutan dan pemuaiannya pada rel [7].

Namun perlu diketahui bahwa celah yang terdapat pada rel patah berbeda dengan celah pada sambungan rel. Pada sambungan rel sengaja disediakan celah agar memberikan ruang bagi batang rel untuk menyusut atau memuai tergantung suhu di sekitarnya. Hal ini dilakukan untuk mencegah rel menjadi bengkok saat terjadi proses pemuaiannya.

Pada sambungan rel terdapat bagian yang disebut plat besi penyambung atau jointbars. Fungsi jointbars adalah untuk menjaga pergerakan pemuaiannya rel. Plat tersebut dipasang pada badan rel. Sehingga jika dilihat dari samping maka celah tersebut akan tertutupi oleh jointbars tersebut. Akan tetapi, celah masih dapat terlihat pada bagian permukaan, kepala rel, dan kaki rel. Maka dari itu, celah rel yang ditutupi oleh jointbars tidak dikatakan sebagai kondisi rel patah, melainkan hanya sambungan rel biasa.

2.1.2 Standar Celah Rel di Indonesia

Antara dua rel yang disambung harus ada renggang untuk memungkinkan rel memuai. Di negara kita, renggang ini ditetapkan sebagai berikut [8] :

Tabel 1. Standar Renggang Antar Sambungan Rel

No	Panjang Rel	Pagi Hari / Tempat Rindang	Siang Hari / Di Bawah Terik Matahari
1	13,6 meter	9 milimeter	5 milimeter
2	11,9 meter	8 milimeter	4 milimeter
3	10,2 meter	7 milimeter	4 milimeter
4	6,8 meter	5 milimeter	3 milimeter

Tabel 1 menyajikan standar celah rel berdasarkan referensi tahun 1981. Namun seiring berjalannya waktu, operator kereta api mulai mengubah panjang rel standar. Untuk meningkatkan keamanan dan kenyamanan penumpang dan barang, kini panjang rel standar diubah menjadi 25 meter sehingga jumlah sambungan rel dapat dikurangi [9]. Selain itu, besarnya celah pada rel standar yang ditetapkan saat ini maksimal 16 mm dengan panjang rel 100 meter dan pada suhu $\leq 20^{\circ}\text{C}$. [10]

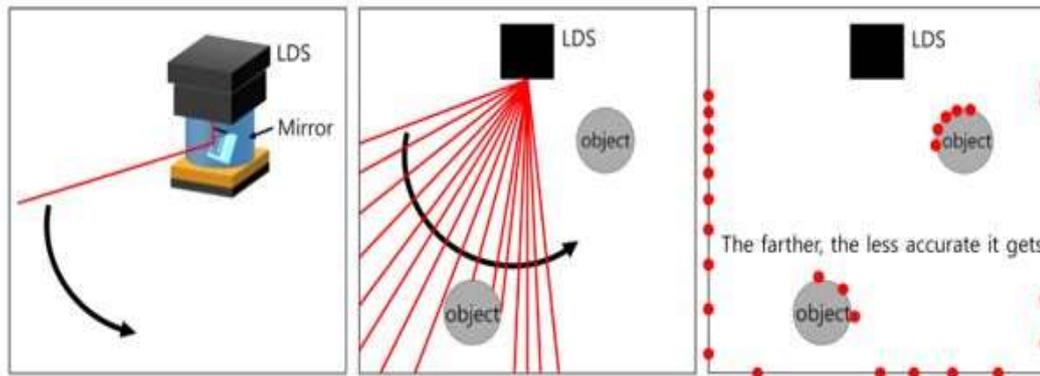
2.2 Laser

Kata LASER merupakan singkatan dari *Light Amplification by Stimulation Emission of Radiation*. Dalam bahasa Indonesia dapat diartikan sebagai perbesaran intensitas cahaya oleh pancaran terangsang. Setelah 30 tahun sejak ditemukan, kata "laser" menjadi serapan kata yang digunakan sehari-hari. Saat ini telah banyak peralatan yang memanfaatkan kerja laser seperti pendeteksi barcode, laser printing, lasik mata, hingga pemotong material keras.

Laser memiliki cara kerja yang meliputi optika dan elektronika. Ilmu mengenai laser digolongkan dalam bidang mekanika kuantum. Sebetulnya, laser merupakan pengembangan dari MASER dimana huruf M adalah singkatan dari Microwave, yang berarti gelombang mikro. Cara kerja laser dan maser pada dasarnya sama. Hanya saja laser dan maser bekerja pada panjang gelombang yang berbeda. Laser bekerja pada spektrum infra merah (infra red) dimana panjang gelombangnya 10^{-5} meter sampai ultra ungu (ultra violet) dimana panjang gelombangnya 10^{-8} meter. Sedangkan maser bekerja pada gelombang mikro yang panjang gelombangnya lebih panjang daripada laser, yaitu 10-2 meter. Laser yang memancarkan sinar tampak disebut juga laser optik.

2.2.1 Light Detection and Ranging (LIDAR)

Light Detection and Ranging atau yang biasa disebut lidar adalah sebuah metode pengukuran jarak dengan memantulkan sebuah sinyal pada sebuah objek. Pada dasarnya, lidar memiliki prinsip yang sama dengan radar (Radio Detection and Ranging). Namun lidar memantulkan sinyal yang panjang gelombangnya lebih pendek yaitu sekitar 10^{-9} meter (biasanya laser) daripada gelombang radar yaitu sekitar 10^3 meter. Perhitungan jarak didapatkan berdasarkan selisih waktu gelombang dikirimkan dengan waktu pantulan gelombang diterima. Selisih waktu tersebut dinamakan Time-of-Flight (ToF) [11][12]. Dalam sebuah sensor lidar terdapat algoritma yang mampu mengidentifikasi sebuah pola yang teratur berdasarkan perhitungan ToF tersebut.



Gambar 3. Ilustrasi Lidar [12]

Gambar 3 menjelaskan cara kerja lidar. Sensor lidar diletakkan pada satu titik dan berputar di tempatnya. Lidar akan memancarkan gelombang laser dan memantul di titik merah. Berdasarkan perbedaan jarak maupun ToF maka lidar akan membentuk suatu pola teratur berupa kotak. Ketika gelombang laser dipantulkan oleh sebuah lingkaran yang jaraknya lebih dekat dari garis kotak, maka titik pantul berjarak lebih dekat pula dari sebelumnya. Titik pantul dari lingkaran inilah yang mengacaukan pola teratur berupa kotak tadi. Sehingga, lingkaran itu bisa dikatakan sebuah gangguan.

2.3 Komponen Penyusun

2.3.1 Sensor Jarak VL53L0X

Sensor VL53L0X adalah sebuah modul elektronik yang dibuat oleh perusahaan elektronik ST Microelectronics. Sensor VL53L0X bekerja berdasarkan prinsip Time-of-Flight (ToF) [11]. Selain itu, alat ini juga menggunakan sistem komunikasi I2C (Inter Integrated Circuit) [12].

Perangkat ini memancarkan laser VCSEL [13] yang panjang gelombangnya 940 nanometer. Laser yang dipancarkan merupakan laser kelas 1. Artinya, laser yang dipancarkan sama sekali tidak terlihat dan aman apabila disorot langsung ke mata.

Di dalam modul sensor VL53L0X terdapat suatu komponen seperti chip berwarna hitam. Komponen itu adalah transmitter dan receiver laser. Laser dipancarkan oleh transmitter kemudian dipantulkan oleh objek dan diterima oleh receiver. Sama seperti sensor ultrasonik, dari hasil pantulan itu akan diketahui berapa jarak objek tersebut. Hanya saja sensor VL53L0X memiliki ketelitian hingga 1 milimeter.

2.3.2 Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 merupakan sebuah papan mikrokontroler yang berbasis Atmega 2560. Arduino Mega dapat diaktifkan melalui koneksi USB atau dengan catu daya eksternal. Sumber daya dipilih secara otomatis. Sumber daya eksternal (non-USB) dapat berasal baik dari adaptor AC-DC atau baterai. Adaptor dapat dihubungkan dengan mencolokkan DC Power Jack 2,1 mm. Jika tegangan berasal dari baterai dapat langsung dihubungkan melalui header pin Gnd dan pin Vin dari konektor power.

Papan Arduino Atmega 2560 dapat beroperasi dengan pasokan daya eksternal 6 Volt sampai 20 Volt. Jika diberi tegangan kurang dari 7 Volt, maka, pin 5 Volt mungkin akan menghasilkan tegangan kurang dari 5 Volt dan ini akan membuat papan menjadi tidak stabil. Jika sumber tegangan menggunakan lebih dari 12 Volt, regulator tegangan akan mengalami panas berlebihan dan bisa merusak papan. Rentang sumber tegangan yang dianjurkan adalah 7 Volt sampai 12 Volt.

2.3.3 Alarm / Buzzer

Alarm atau buzzer merupakan alat elektronik yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi bunyi. Alarm ini termasuk golongan transduser karena mampu mengubah suatu energi menjadi energi yang lain. Pada dasarnya komponen ini memiliki 2 buah kaki yaitu kaki positif dan negatif. Kaki positif bisa langsung diberikan tegangan listrik sebesar 3 hingga 12 volt, sementara kaki negatif langsung dihubungkan dengan ground.

2.3.4 Lampu LED

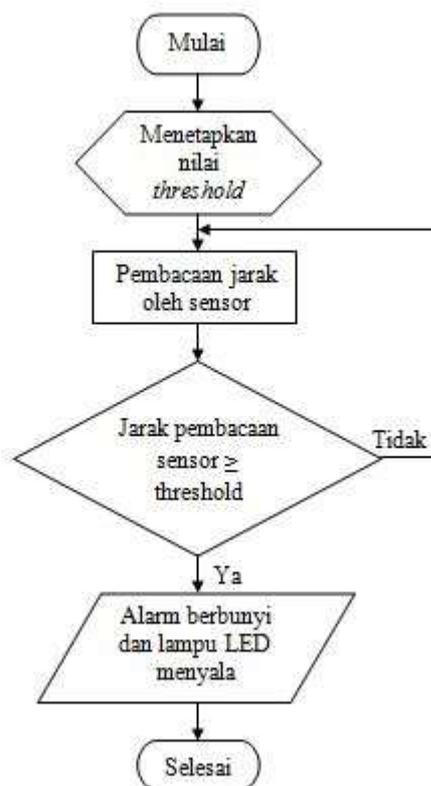
Lampu LED (Light Emitting Dioda) adalah komponen elektronika yang mampu memancarkan cahaya ketika diberi tegangan listrik. LED termasuk komponen yang digolongkan sebagai dioda yang terbuat dari bahan semikonduktor. Penggunaan bahan semikonduktor ini mempengaruhi warna yang dipancarkan.

Lampu LED hanya memancarkan cahaya ketika diberikan tegangan maju (Forward Bias) dari kaki positif (Anoda) menuju kaki negatif (Katoda). Di dalam LED terdapat semikonduktor yang terdiri dari junction P yang bermuatan positif (P-type) dan junction N yang bermuatan negatif (N-type). Ketika LED diberi tegangan maju maka elektron yang berlebih pada N-type akan berpindah menuju P-type yang memiliki kelebihan lubang (hole). Jika elektron bertemu dengan hole maka P-type akan melepaskan photon yang akan memancarkan cahaya monokromatik. LED juga termasuk golongan transduser karena mampu mengubah suatu energi menjadi energi lainnya, yaitu dari energi listrik menjadi energi cahaya.

2.4 Diagram Alir Sistem

Diagram alir atau flowchart merupakan suatu urutan berupa simbol-simbol yang menggambarkan hubungan suatu proses dengan proses lainnya dalam suatu sistem. Pada dasarnya, flowchart memiliki tiga bagian dasar yaitu input, proses, dan output.

Dalam penelitian ini, flowchart yang diterapkan adalah sebagai berikut :



Gambar 5. Diagram Alir Sistem

Gambar 5 menunjukkan diagram alir sistem ketika threshold telah diketahui. Maka dari itu terdapat preparation dimana nilai threshold telah ditetapkan di awal. Kemudian ketika purwarupa dijalankan maka sensor VL53L0X mulai membaca jarak rel. Hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan nilai threshold. Jika hasil pembacaan sensor lebih besar atau sama dengan nilai threshold maka output-nya adalah alarm berbunyi dan lampu LED menyala sebagai peringatan bahwa sensor telah mendeteksi adanya celah rel.

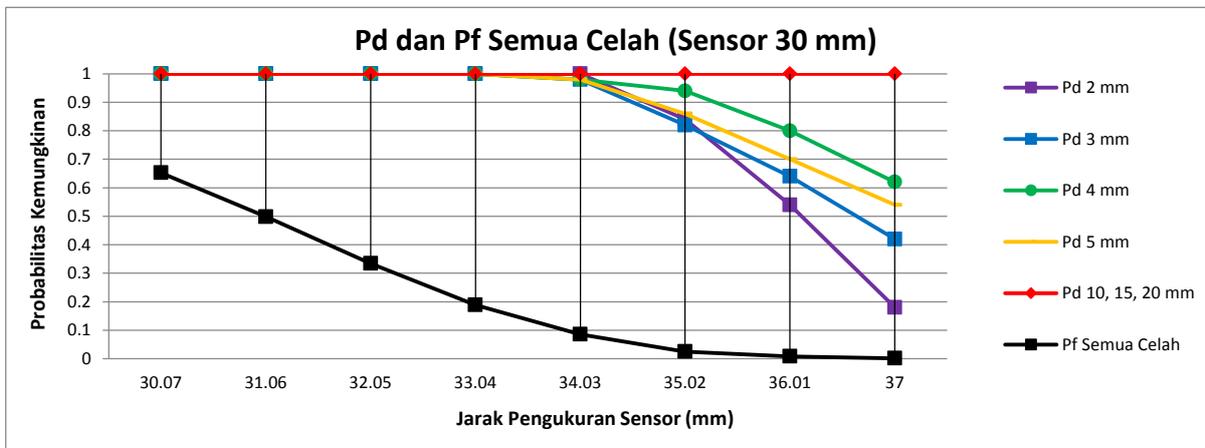
Sebagai catatan, purwarupa yang dioperasikan serta pengatiran celah rel masih menggunakan tangan. Hal ini disebabkan karena keterbatasan dari sisi mekanikal dan juga waktu pengerjaan. Tetapi pembacaan sensor serta indikator alarm dan lampu LED dikendalikan secara otomatis melalui mikrokontroler Arduino Mega 2560.

3. Pembahasan

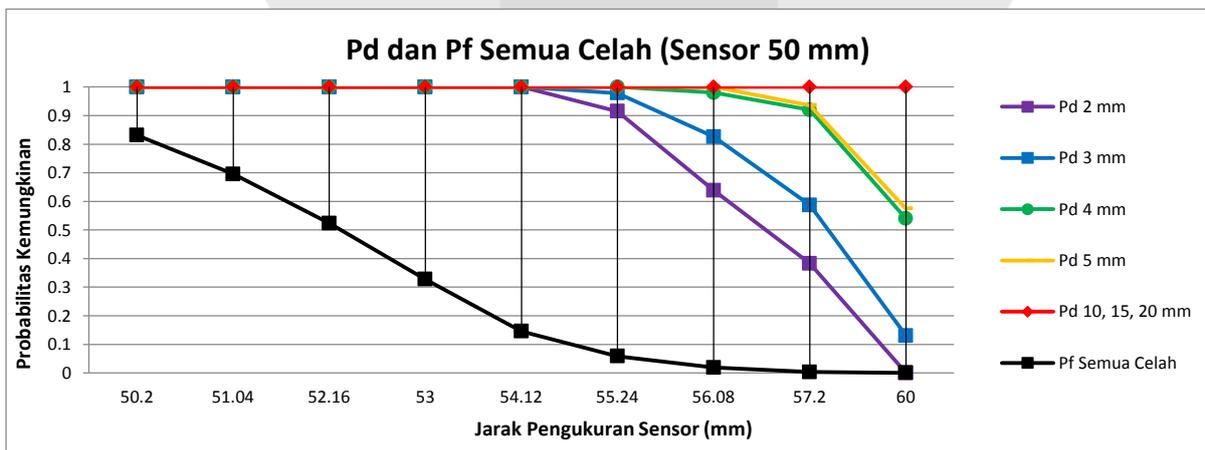
3.1 Pengujian Awal

Pengujian awal dilakukan untuk mendapatkan ambang batas atau *threshold* pada rel tanpa celah (normal) maupun yang bercelah. Dalam penelitian ini, *threshold* adalah batas jarak rel dari sensor untuk menentukan apakah rel yang ditelusuri terdapat celah atau tidak. Selain itu, pengujian awal juga bertujuan untuk menemukan nilai *Probability Detection* (Pd) dan *False Alarm* (Pf). *Probability Detection* adalah besarnya kemungkinan sensor mampu mendeteksi adanya celah dengan *threshold* tertentu dan kondisi celah tertentu. Sementara *False Alarm* adalah besarnya kemungkinan sensor salah mendeteksi dimana kondisi sesungguhnya rel tidak ada celah namun sensor menganggap ada celah. Maka, kondisi *False Alarm* hanya terjadi pada kondisi rel tanpa celah saja. Untuk perhitungan *Probability Detection*, maka harus ada pembandingan kondisi. Artinya, kondisi tanpa celah harus dibandingkan dengan kondisi celah tertentu.

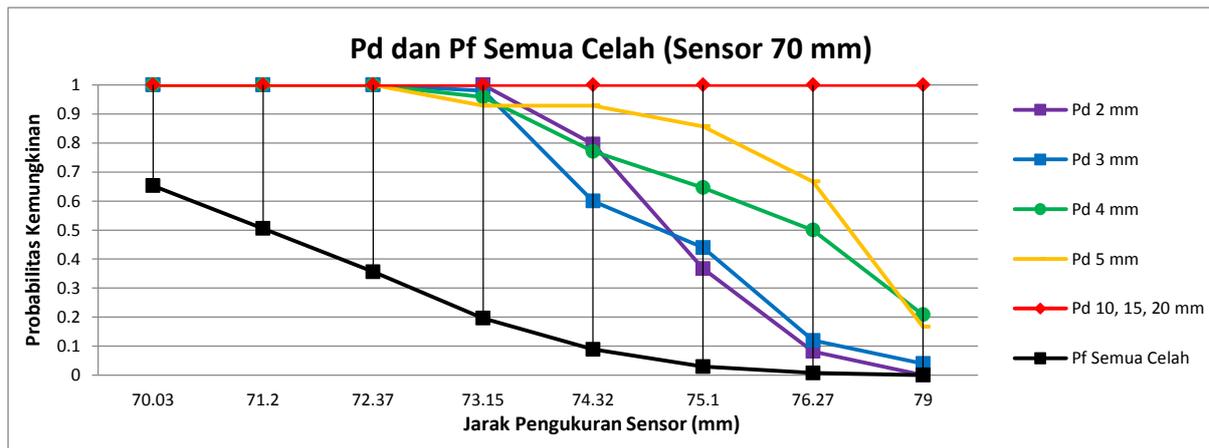
Berdasarkan hasil seluruh pengujian awal mulai dari kondisi rel tanpa celah hingga rel bercelah 20 mm, maka didapat nilai *Probability Detection* (Pd) dan *False Alarm* (Pf) secara keseluruhan adalah sebagai berikut :



Gambar 6. Grafik Nilai Pd dan Pf Semua Celah (Jarak Sensor 30 mm)



Gambar 7. Grafik Nilai Pd dan Pf Semua Celah (Jarak Sensor 50 mm)



Gambar 8. Grafik Nilai Pd dan Pf Semua Celah (Jarak Sensor 70 mm)

Sumbu X menunjukkan titik yang dapat dijadikan sebagai threshold. Jika diperhatikan, saat sensor berjarak 50 mm maka seluruh celah dapat terdeteksi saat threshold berada di titik 54,12 mm. Kemudian saat sensor berjarak 30 mm maka seluruh celah dapat terdeteksi saat threshold berada di titik 33,04 mm. Terakhir, saat sensor berjarak 70 mm maka seluruh celah dapat terdeteksi saat threshold berada di titik 72,37 mm. Namun apabila hanya ditetapkan satu titik threshold, maka nilai Pf untuk semua celah nilainya akan sama. Tetapi jika threshold dibedakan maka dapat mengurangi nilai Pf pada celah rel yang cukup lebar.

Penetapan threshold dilihat saat celah tertentu memiliki Pd menyentuh angka 1 atau 100%. Berdasarkan grafik, hasil pengujian saat sensor berjarak 50 mm dari badan rel terlihat lebih ideal. Hal ini dikarenakan semakin lebar celahnya maka semakin tinggi pula threshold-nya. Selain itu, sensor lebih mudah membedakan lebar celah rel karena nilai Pd setiap celah saling berjauhan, khususnya celah dibawah 10 mm.

Lain hanya dengan dua hasil pengujian lainnya. Saat sensor berjarak 30 mm, threshold untuk celah 2 mm justru sedikit lebih tinggi yaitu di titik 34,02 mm dimana untuk celah 3,4, dan 5 mm threshold-nya di titik 33,04 mm. Kemudian di rentang titik 34,03 mm hingga 35,02 mm terlihat bahwa nilai Pd untuk celah 2, 3, dan 5 mm saling berhimpitan artinya di rentang itu sensor sulit membedakan lebar celah tersebut. Namun untuk celah 4 mm memiliki nilai Pd sedikit lebih tinggi daripada ketiga celah lainnya. Ketika titiknya lebih besar dari 35,02 mm nilai Pd masing-masing celah mulai saling menjauh. Akan tetapi hingga titik tertinggi, celah 4 mm justru terlihat lebih mudah terbaca sensor karena memiliki nilai Pd yang lebih tinggi dibandingkan celah 2, 3, dan 5 mm. Karena dua alasan inilah yang menyebabkan pendeteksian rel patah saat sensor berjarak 30 mm dari rel dikatakan tidak ideal.

Saat sensor berjarak 70 mm, sama seperti saat sensor berjarak 30 mm bahwa celah 2 mm memiliki nilai threshold yang lebih tinggi yaitu di titik 73,15 mm dimana celah 3, 4, dan 5 mm memiliki threshold di titik 72,37 mm. Kemudian saat titiknya lebih rendah dari 75,1 mm, celah 2 mm terlihat lebih mudah dideteksi daripada celah 3 mm di titik-titik tertentu. Namun untuk titik yang lebih besar dari 75,1 mm pendeteksian terlihat lebih normal karena makin besar celah maka makin besar nilai Pd-nya. Namun tetap saja pendeteksian rel patah saat sensor berjarak 30 mm dari rel dikatakan tidak ideal karena alasan yang telah dijelaskan di awal.

Terakhir, untuk lebar celah 10, 15, dan 20 mm memiliki nilai Pd sebesar 1 di semua titik maupun di semua kondisi jarak sensor yang bervariasi. Artinya, ketiga kondisi celah ini mampu dideteksi sensor walaupun threshold berada pada titik tertinggi. Sebenarnya bisa saja threshold diletakkan pada titik 54,12 mm (jarak sensor 50 mm), 33,04 mm (jarak sensor 30 mm), dan 72,37 mm (jarak sensor 70 mm) tetapi hal ini akan mengakibatkan munculnya nilai Pf yang cukup tinggi. Maka itulah threshold perlu digeser ke kanan (lebih tinggi) agar meminimalisir nilai Pf atau error pada pembacaan sensor.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mulai dari pengujian awal, penentuan *threshold*, hingga pengujian akhir, maka didapatkan kesimpulan penelitian sebagai berikut :

1. Seluruh kondisi celah dengan lebar ≥ 2 mm memiliki *threshold* yang nilainya berada di atas nilai jarak sebenarnya. Saat sensor berjarak 30 mm, *threshold* berada di titik 33,04 mm. Saat sensor berjarak 50 mm, *threshold* berada di titik 54,12 mm. Saat sensor berjarak 70 mm, *threshold* berada di titik 72,37 mm.
2. Dari ketiga variasi jarak sensor terhadap rel (30, 50, dan 70 mm), didapatkan bahwa hasil pengukuran yang paling ideal terjadi saat sensor berada pada jarak 50 mm dari rel.

Referensi:

- [1] "Jumlah Penumpang Kereta Api, 2006-2020 (Ribu Orang)". Badan Pusat Statistik. 2020. Available : <https://www.bps.go.id/indicator/17/72/1/jumlah-penumpang-kereta-api.html>. [diakses 15 Oktober 2020].
- [2] "Laser Introduction". Physics and Radio Electronics. 2015. Available : <https://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/laserintroduction.html>. [diakses 15 Oktober 2020].
- [3] "Rail". JFE Steel Corporation. Available : <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/shapes/catalog/d1e-001.pdf>. [diakses 16 Oktober 2020].
- [4] "The Steel Rail". The Contact Patch. Available : <https://the-contact-patch.com/book/rail/r1605-the-steel-rail>. [diakses 16 Oktober 2020].
- [5] Deamita. "Rel Kereta Citayam Patah, Penumpang Numpuk di Stasiun". Pojok Jabar. 4 September 2015. Available : <https://jabar.pojoksatu.id/depok/2015/09/04/penumpang-numpuk-akibat-rel-kereta-stasiun-citayam-patah/>. [diakses 15 Oktober 2020].
- [6] Ardiahanni, Dian. 2016. *Ini Penyebab Rel Kereta Patah*. [Online] Available at : <https://megapolitan.kompas.com/read/2016/01/19/10444281/Ini.Penyebab.Rel.Kereta.Patah> [Accessed 27 January 2020].
- [7] Hadi, Syafiul. 2018. *Penyebab Rel KRL Patah di Cilebut Kata DAOP 1 PT KAI*. [Online] Available at : <https://metro.tempo.co/read/1067407/penyebab-rel-krl-patah-di-cilebut-kata-daop-1-pt-kai/full&view=ok>. [Accessed 27 January 2020].
- [8] Subarkah, Iman. 1981. *Jalan Kereta Api*. Bandung : Idea Dharma Bandung.
- [9] Raihan. 2016. *Evaluasi Geometrik dan Struktur Jalan Rel Kereta Api Pada Stasiun Jember-Rambipuji dan Arjasa* [Skripsi]. Jember (ID) : Universitas Muhammadiyah Jember.
- [10] Peraturan Menteri Perhubungan No.60 tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api.
- [11] Marioli, Daniele. Claudio Narduzzi, Carlo Offelli, Dario Petri, Emilio Sardini, and Andrea Taroni. 1992. "Digital Time-of-Flight Measurement for Ultrasonic Sensors." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. vol.41.
- [12] Patel, Sagar. Prachi Talati., and Saniya Gandhi. 2019. "Design of I2C Protocol." International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science (IJTIMES). vol. 5.
- [13] Iga, Kenichi. 2008. "Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser : Its Conception and Evolution." Japanese Journal of Applied Physics, 47(1), 1-10.