

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Sumatera Barat merupakan salah satu provinsi yang memanfaatkan kereta api sebagai transportasi umum untuk berpindah antarkota. Tercatat sepanjang 107,221 KM jaringan rel kereta api aktif yang tersebar di kota-kota yang ada di Sumatera Barat [1]. Terdapat beberapa layanan kereta api yang menjadi layanan utama, seperti KA Pariaman Ekspres, KA Minangkabau Ekspres, dan KA Lembah Anai, dengan jadwal menunjukkan dalam satu hari total keseluruhan perjalanan pulang pergi layanan-layanan ini dapat mencapai 16 perjalanan pulang pergi [2] [3]. Salah satu kota destinasi utama layanan tersebut adalah Kota Padang, yang menjadi pusat aktivitas transportasi kereta api di Sumatera Barat.

Perlintasan sebidang adalah persilangan antara jalan raya yang berpotongan dengan jalan rel kereta api pada ketinggian yang sama [4]. Kota Padang memiliki banyak titik perlintasan kereta api sebidang. Berdasarkan Undang-undang No. 23 Tahun 2007 Tentang Perkertaapian, dalam Pasal 124, ditegaskan bahwa pada perpotongan sebidang antara jalur kereta api dan jalan, pengguna jalan wajib mendahulukan perjalanan kereta api. Untuk memastikan ketentuan ini berjalan, setiap perlintasan sebidang seharusnya dilengkapi dengan perangkat pengamanan yang memadai, seperti palang pintu, rambu, sinyal, maupun penjaga pintu lintasan. Namun, kondisi aktual di Kota Padang menunjukkan adanya 92 titik perlintasan, dengan rincian: 36 titik sudah tertangani, 27 titik terdaftar tetapi belum dijaga, serta 29 titik masih berstatus perlintasan liar [5]. Situasi ini berkontribusi pada masih tingginya angka kecelakaan. Sepanjang tahun 2023 saja, tercatat 20 kasus kecelakaan kereta api dengan total 31 korban jiwa maupun luka-luka, yang memperlihatkan betapa seriusnya masalah keselamatan di perlintasan sebidang di Kota Padang.

Salah satu alasan belum meratanya pengamanan di perlintasan kereta api sebidang disebabkan oleh faktor keterbatasan sumber daya, sementara pembangunan pengamanan yang ada saat ini memerlukan sumber daya yang besar. Berdasarkan

permasalahan yang telah dijabarkan, diangkat sebuah permasalahan ”Tingginya Risiko Kecelakaan di Perlintasan Kereta Api Sebidang di Kota Padang yang Tidak Memiliki Pengamanan”. Solusi yang ditawarkan dari penelitian ini diharapkan mampu mengurangi risiko kecelakaan, meningkatkan keselamatan dan kenyamanan masyarakat, serta dikembangkan dengan sumber daya yang lebih terjangkau dibandingkan solusi konvensional, namun tetap efektif, andal, dan layak diproduksi secara massal untuk diimplementasikan pada titik-titik rawan di Kota Padang.

Stakeholder, atau pemangku kepentingan dari permasalahan ini adalah Pemerintah Kota Padang, PT Kereta Api Indonesia (KAI), dan masyarakat setempat yang menggunakan jalan yang dilalui perlintasan kereta api sebidang.

Beberapa kepentingan dari Pemerintah Kota Padang terkait permasalahan ini, adalah sebagai berikut:

- 1) Berdasarkan UU No. 23 Tahun 2007, pemerintah harus memastikan seluruh perlintasan kereta api sebidang yang ada di Kota Padang memiliki pengamanan yang merata, guna memastikan keamanan serta keselamatan masyarakat.
- 2) Pemerintah harus mengefisiensi anggaran yang diperlukan untuk pengimplementasian pengamanan perlintasan kereta api sebidang ini.
- 3) Pemerintah bertanggungjawab apabila terjadi kecelakaan di perlintasan kereta api sebidang tanpa pengamanan, sehingga risiko kecelakaan harus ditekan semaksimal mungkin.

Beberapa kepentingan dari PT KAI selaku operator kereta api terkait permasalahan ini, adalah sebagai berikut:

- 1) PT KAI harus memastikan kelancaran operasi kereta tanpa gangguan kecelakaan.
- 2) PT KAI harus menjaga reputasi perusahaan sebagai transportasi yang aman dan ramah lingkungan.
- 3) PT KAI harus menekan biaya kerugian akibat kecelakaan yang terjadi (Kerusakan lokomotif, perbaikan rel, kompensasi korban, dan lain sebagainya).

Beberapa kepentingan dari Masyarakat selaku pengguna jalan terkait permasalahan ini, adalah sebagai berikut:

- 1) Masyarakat harus terjamin keselamatannya saat melintasi perlintasan sebidang.
- 2) Masyarakat harus mendapat rasa aman dan nyaman saat menggunakan jalan.

Jika permasalahan ini dapat diselesaikan dengan solusi yang efektif dan efisien, hal ini akan memberikan dampak yang positif dan signifikan bagi para pemangku kepentingan. Berikut adalah gambaran dampak positif yang dihasilkan melalui penyelesaian permasalahan ini:

- 1) Pengamanan terimplementasikan secara merata di titik-titik perlintasan kereta api sebidang.
- 2) Mengurangi risiko kecelakaan pada perlintasan kereta api sebidang.
- 3) Menciptakan mobilisasi yang aman, nyaman dan lancar, baik bagi kereta api maupun pengguna jalan.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Dalam memberikan penanganan terhadap perlintasan kereta api sebidang, diperlukan implementasi pengamanan yang sesuai dengan standar, serta disesuaikan dengan penelitian yang telah ada sebelumnya. Berikut adalah beberapa hal yang menjadi informasi pendukung permasalahan ini:

a. Kecepatan Operasional Kereta Api

Menurut regulasi perkeretaapian Indonesia, perlintasan sebidang hanya boleh ada jika kecepatan kereta yang melintas di bawah 60 km/jam. Kecepatan ini menentukan waktu reaksi pengemudi, jarak pandang minimal, dan kapan sistem pengaman (palang, lampu, alarm) harus mulai bekerja. Semakin tinggi kecepatan kereta, semakin panjang pula jarak pengereman yang dibutuhkan (hingga 200–300 m untuk 60 Km/jam) [6].

b. *Headway* dan Frekuensi Perjalanan

Frekuensi perjalanan kereta juga memengaruhi risiko di perlintasan sebidang. Peraturan Menteri Nomor 36 Tahun 2011 menyebutkan bahwa perlintasan sebidang hanya boleh ada jika *headway* antar kereta minimal 30 menit. Namun,

di Kota Padang, frekuensi perjalanan KA Pariaman Ekspres mencapai 10 perjalanan pp/hari, ditambah KA Minangkabau Ekspres ± 6 perjalanan pp/hari, dan KA Lembah Anai. Artinya, dalam satu hari bisa ada 16–18 kali persinggungan lalu lintas jalan–rel [3]. Semakin tinggi frekuensi, semakin besar pula kemungkinan kendaraan berinteraksi dengan kereta api di perlintasan.

c. Jarak pandang dan geometri jalan

Jarak pandang minimum ditetapkan agar pengguna jalan maupun masinis dapat melihat perlintasan lebih awal. Regulasi nasional menetapkan jarak pandang masinis ≥ 500 m dan pengguna jalan ≥ 150 m [7]. Selain itu, geometri perlintasan juga harus memenuhi standar: sudut 90° antara jalan dan rel, panjang jalan lurus 150 m sebelum perlintasan, serta permukaan jalan harus rata dengan kepala rel (toleransi $\pm 0,5$ cm) [7]. Kondisi nyata di banyak titik Padang masih jauh dari standar ini, ada perlintasan di jalan menikung, bergelombang, atau dengan gradien tajam. Sehingga nantinya solusi hanya dapat diimplementasikan pada perlintasan kereta api sebidang dengan geometri jalan yang telah mumpuni.

d. Waktu peringatan aktif

Waktu minimal peringatan aktif sebelum kereta melintas adalah 20 detik. Artinya, lampu, alarm, dan palang harus sudah bekerja setidaknya 20 detik sebelum kereta masuk perlintasan, memberi waktu cukup bagi kendaraan yang masih berada di atas lintasan untuk keluar [7].

e. Peralatan pengaman teknis

Perlintasan sebidang seharusnya dilengkapi minimal dengan: rambu, marka, alarm suara (≥ 85 dB), lampu berkedip [8].

f. Parameter pendeteksian kereta api

Terdapat beberapa parameter yang bisa digunakan untuk pendeteksian kedatangan kereta api, seperti menggunakan sensor magnetik (Magnetometer) [9], deteksi visual dan pengolahan citra [10], serta sensor meta, sensor induksi dan sensor getar [9].

g. Kondisi kelistrikan

Perlintasan Kereta Api Sebidang di Kota Padang dekat dengan sumber listrik, sehingga dapat dihubungkan secara langsung dengan sistem pengamanan.

h. Kondisi lingkungan

Perlintasan kereta api sebidang di Kota Padang berada pada lingkungan terbuka tanpa atap, sehingga perubahan lingkungan dapat mempengaruhi pendeteksian.

i. Perlintasan Tanpa Pengamanan

Salah satu temuan perlintasan tanpa pengamanan di Kota Padang, terletak di Jl. Jati, Kampung Pinang, Kecamatan Padang Timur. Kondisi perlintasan kereta seperti yang tertera pada gambar berikut.



Gambar 1.1 Perlintasan Kereta Api Sebidang tanpa Pengamanan



Gambar 1.2 Penjaga Perlintasan Kereta Api Sebidang tanpa Pengamanan



Gambar 1.3 Peringatan pada Perlintasan Kereta Api Sebidang di Lokasi Tersebut

Berdasarkan Gambar 1.1, 1.2 dan 1.3, dapat dilihat bahwasannya pada perlintasan tersebut memang tidak memiliki pengamanan yang baik, dan masih mengandalkan tenaga manusia untuk mengamankan lokasi tersebut. Solusi nantinya akan diimplementasikan pada lokasi ini. Secara teknis, telah dihitung lebar rel dari perlintasan tersebut, yaitu sekitar 1,067 meter dan jarak terjauh antara rel dengan sisi sampingnya adalah 1 meter.

Adapun solusi yang telah ada pada permasalahan penanganan perlintasan kereta api sebidang tanpa pengamanan ini, diantaranya:

- 1) Penggunaan Kamera dengan Pendeteksian Berbasis Citra untuk mendeteksi kedatangan kereta api [13].

Kamera digital dipasang di sekitar perlintasan dengan posisi dan sudut pandang yang diarahkan ke jalur rel. Kamera ini menangkap citra atau video secara terus-menerus, kemudian data citra tersebut diproses menggunakan metode Computer Vision. Ketika kereta mendekat, sistem mendeteksi adanya perubahan citra yang sesuai dengan karakteristik kereta, kemudian mengirimkan sinyal peringatan.

Kelebihan: Akurasi deteksi tinggi karena mampu mengenali pola visual spesifik kereta, serta dapat menjangkau area pantauan yang luas hanya dengan satu kamera. Lebih tahan gangguan mekanis.

Kekurangan: Bergantung pada kondisi pencahayaan dan cuaca.

2) Penggunaan Axle Counter untuk mendeteksi kedatangan kereta api [9].

Axle counter bekerja dengan menghitung jumlah roda (*axle*) kereta yang melewati titik sensor di rel. Sensor biasanya berupa *switch* mekanik atau sensor magnetik yang terpasang di rel, mengirimkan sinyal setiap kali roda melewati. Data yang direkam berupa hitungan jumlah roda yang melintas, digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan dan posisi kereta.

Kelebihan: Akurat dalam menghitung jumlah roda kereta yang melewati titik tertentu di rel, dan tidak perlu isolasi *rail joint*, serta mampu bekerja baik meskipun rel basah atau berpasir.

Kekurangan: Sensor menempel pada rel, sehingga rawan kerusakan saat pemeliharaan rel, serta tidak lebih akurat dibandingkan penggunaan sensor magnetik.

3) Penggunaan Sistem Sensor Getar dan *Proximity* untuk mendeteksi kedatangan kereta api [10].

Sensor getar mendeteksi getaran khas yang dihasilkan oleh kereta saat melewati rel. Data berupa frekuensi dan amplitudo getaran yang diterima sensor getar. Sensor *proximity* (seperti *infrared*) mendeteksi kehadiran objek berdasarkan jarak objek terhadap sensor melalui pantulan sinyal. Data yang digunakan berupa jarak objek dari sensor dalam cm atau sinyal deteksi kehadiran. Kombinasi data ini memungkinkan identifikasi keberadaan kereta dan rintangan di lintasan.

Kelebihan: Sensor getar mampu mendeteksi getaran khas kereta yang melintasi rel, dibantu dengan *proximity* dan *infrared* yang dapat mendeteksi kehadiran kereta dan objek di lintasan.

Kekurangan: Respon lambat jika sensor jauh dari sumber getaran, dan paling rentan gangguan dari vibrasi kendaraan lain atau gangguan lingkungan. Penggunaan sensor infrared juga rentan terganggu debu, kabut atau hujan.

1.1.2 Analisis Masalah

Berdasarkan penjabaran pada bagian sebelumnya, dapat dianalisis beberapa faktor yang berkaitan dengan permasalahan yang diangkat. Berikut pembahasan masalah yang diajukan jika ditinjau dari berbagai aspek.

- 1) Aspek Ekonomi: Tingginya biaya dari pengamanan yang ada saat ini menyebabkan implementasi yang dilakukan masih belum merata pada beberapa titik perlintasan kereta api sebidang di Kota Padang, sehingga diperlukan solusi yang jauh lebih terjangkau secara ekonomis sehingga memungkinkan pengimplementasian pengamanan yang jauh lebih merata. Selain itu, mengurangi tingkat terjadinya kecelakaan yang terjadi di perlintasan kereta api sebidang juga akan berdampak baik dari sisi ekonomi.
- 2) Aspek Manufakturabilitas: Mengingat banyaknya titik yang belum memiliki pengamanan, solusi yang dikembangkan harus dapat diproduksi dalam jumlah besar, sehingga dapat diimplementasikan dengan mudah pada titik-titik perlintasan kereta api sebidang.
- 3) Aspek Etika: Membiarkan perlintasan kereta api sebidang tanpa pengamanan menyalahi hak keselamatan masyarakat. Penyelesaian masalah ini dapat memberikan kembali hak keselamatan masyarakat yang melalui perlintasan kereta api sebidang.
- 4) Aspek Sosial: Perlintasan kereta api sebidang tanpa pengamanan memiliki risiko yang sangat tinggi untuk menyebabkan korban jiwa, sehingga menimbulkan trauma dan keresahan masyarakat setempat. Penyelesaian masalah ini dapat memberikan rasa aman dan nyaman terhadap masyarakat.

1.1.3 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan permasalahan, data serta informasi pendukung masalah yang telah dijabarkan sebelumnya, dapat dirancang kriteria yang berkaitan dengan kebutuhan yang harus dipenuhi oleh solusi yang ditawarkan, sebagai berikut.

- 1) Sistem mampu mendeteksi kedatangan kereta api pada jarak aman sebelum melalui perlintasan kereta api sebidang.
- 2) Sistem mampu memberikan peringatan kepada pengguna yang akan melewati perlintasan kereta api sebidang.

- 3) Sistem harus mampu memberikan peringatan apabila terjadi kerusakan atau gangguan komunikasi pada sebagian atau keseluruhan sistem.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan permasalahan yang sudah dipaparkan sebelumnya, maka dibutuhkan pengembangan sebuah sistem yang mampu mengurangi risiko kecelakaan dengan melakukan deteksi kedatangan kereta api pada jarak aman sebelum melewati perlintasan sebidang, serta memberikan peringatan secara real-time kepada pengguna jalan. Sistem ini ditujukan untuk mengurangi risiko kecelakaan, meningkatkan keselamatan dan kenyamanan masyarakat, serta dapat diproduksi dengan biaya terjangkau sehingga memungkinkan implementasi yang lebih merata pada titik-titik perlintasan kereta api sebidang di Kota Padang.

1.2 Solusi

Berdasarkan penjabaran pada bagian 1.1 sebelumnya, solusi yang akan diangkat pada permasalahan ini akan berfokus dalam pendeteksian kedatangan kereta api, dan memberikan peringatan dalam rentang waktu yang ditentukan sebelum kereta melintasi perlintasan sebidang.

1.2.1 Karakteristik Produk

Karakteristik produk berkaitan dengan fitur penting yang perlu diimplementasikan pada solusi, guna memaksimalkan fungsional dari solusi dalam menyelesaikan permasalahan yang telah diangkat.

a) Fitur Dasar

Fitur dasar adalah fitur yang harus ada dalam solusi yang akan dikembangkan sehingga menjadi solusi yang tepat guna.

1) Detecting Capability

Solusi memiliki kemampuan untuk mendeteksi secara akurat kedatangan kereta api sebelum melewati perlintasan sebidang, tanpa terpengaruhi oleh gangguan dari hal atau objek selain kereta api itu sendiri. Terdapat beberapa parameter yang dapat digunakan untuk mendeteksi kedatangan kereta api,

sehingga nantinya akan dipilih parameter yang paling andal dalam mendeteksi objek kereta api secara spesifik.

2) *Warning Capability*

Sistem memiliki kemampuan untuk memberikan peringatan, apabila sistem mendeteksi kedatangan kereta api sebelum melewati perlintasan sebidang. Peringatan harus dapat diandalkan, memastikan sistem ini dapat menyelesaikan permasalahan terkait perlintasan kereta api sebidang tanpa pengamanan.

3) *Notification Capability*

Sistem memiliki mekanisme *fail-safe* dalam bentuk notifikasi kepada stakeholder apabila terjadi kerusakan atau kegagalan pada sebagian atau keseluruhan sistem. Fitur ini berfungsi untuk memastikan sistem tidak menyebabkan kesalahan fatal pada situasi dunia nyata.

4) *Communication*

Sistem mampu berkomunikasi secara efisien dan memastikan informasi yang diperoleh benar-benar dikirim dan diterima dengan baik antarkomponen sistem. Fitur ini memastikan sistem tidak rawan mengalami kegagalan dan kehilangan fungsinya dalam mendeteksi dan memberikan peringatan.

5) *Computation Method*

Sistem memiliki metode komputasi yang sesuai dengan pola permasalahan pendeteksian kereta api dan sesuai dengan solusi yang dibutuhkan untuk memberikan peringatan pada perlintasan sebidang.

b) Fitur Tambahan

Fitur tambahan adalah fitur yang dapat mendukung fitur dasar, sehingga solusi menjadi jauh lebih efektif dalam menyelesaikan permasalahan.

1) Hemat Daya

Sistem yang dikembangkan harus hemat energi dan *standalone*, meskipun perlintasan kereta api sebidang di Kota Padang sudah dekat dengan sumber listrik

2) Kokoh

Sistem yang dikembangkan harus kokoh, sehingga mampu beroperasi dengan baik meskipun menghadapi gangguan atau kondisi lingkungan yang tidak menentu.

3) Waktu Pengembangan Singkat

Sistem yang dikembangkan harus dapat diselesaikan dalam kurun waktu 6 bulan.

4) *Low Cost*

Sistem yang dikembangkan dapat diselesaikan dengan *cost* seminimal mungkin, sehingga dapat diimplementasikan secara luas di berbagai titik di Kota Padang.

5) Adaptif

Sistem yang dikembangkan dapat tetap bekerja dengan baik pada kondisi lingkungan yang tidak menentu, seperti ketika malam hari, hujan, atau berkabut.

6) Sesuai Standarisasi dan Regulasi yang berlaku

Sistem yang dikembangkan harus memenuhi standar dan sesuai dengan regulasi yang telah eksis, seperti peraturan pemenuhan persyaratan perlintasan kereta api sebidang, pemenuhan kriteria pengamanan perlintasan kereta api sebidang, serta peraturan perlindungan, pengambilan dan penggunaan data di ruang publik. Secara spesifik, standar dan regulasi yang berlaku, dijelaskan pada Tabel 1.1 berikut.

Tabel 1.1 Standar dan Regulasi Terkait

Regulasi / Standar	Sumber
Jarak pandang bebas minimal 500 m bagi masinis dan 150 m bagi pengemudi	Peraturan Menteri No. 36 Tahun 2011
Perlintasan sebidang harus dilengkapi dengan rambu, marka dan alat pemberi isyarat lalu lintas	Peraturan Menteri No. 36 Tahun 2011 Pasal 6 (2), Peraturan Menteri No. 94 Tahun 2018

Suara harus memenuhi syarat teknis: Isyarat suara sebagaimana dimaksud berupa sirene atau suara (<i>announcer</i>) yang harus memenuhi persyaratan teknis dimana nada suara 85 (delapan puluh lima) sampai dengan 115 (seratus lima belas) desibel pada jarak 1 m (satu meter).	Peraturan Menteri No. 94 Tahun 2018
Mekanisme <i>fail-safe</i> yang harus diimplementasikan: Isyarat lampu peringatan / larangan dalam keadaan menyala bergantian apabila terjadi gangguan peralatan keselamatan Perlintasan Sebidang. Isyarat Suara harus menginformasikan sistem sedang mengalami gangguan apabila terjadi gangguan peralatan keselamatan perlintasan sebidang.	Peraturan Menteri No. 94 Tahun 2018
Berdasarkan undang-undang perlindungan data pribadi: 1. Diperbolehkan mengambil data yang bukan data biometrik di ruang publik 2. Data biometrik yang didapatkan tidak boleh disimpan	UU No. 27 Tahun 2022 tentang Pelindungan Data Pribadi

1.2.2 Usulan Solusi

Berdasarkan permasalahan tingginya risiko kecelakaan di perlintasan kereta api sebidang di Kota Padang akibat tidak adanya pengamanan, dibutuhkan solusi yang sesuai dengan karakteristik yang telah dijabarkan pada bagian 1.2.1. Dalam pembahasan ini, akan diuraikan tiga usulan solusi yang dapat mendeteksi kereta api sebelum melewati perlintasan sebidang.

1.2.2.1 Solusi 1: Pendeteksian Kereta Api dengan Sensor Vibrasi dan Proximity berbasis Real Time Clock [10]

Pada solusi pertama yang ditawarkan ini, digunakan dua macam sensor yang akan digunakan untuk mendeteksi kedatangan kereta. Sensor vibrasi digunakan untuk mendeteksi kedatangan kereta, sementara sensor *proximity* digunakan untuk memperhitungkan kecepatan kereta api yang akan melintas. Pada solusi ini juga diimplementasikan *real-time clock* untuk memastikan pembacaan sensor dan pengiriman data terjadi secara *real-time*.

Sensor vibrasi merupakan alat yang digunakan untuk mendeteksi getaran yang diubah menjadi sinyal listrik. Sensor vibrasi bekerja berbanding terbalik dengan cara kerja speaker, dimana membran pada sensor digunakan untuk menangkap getaran dari luar dan mengubahnya menjadi besaran listrik.

Sensor vibrasi akan bereaksi terhadap getaran dari berbagai sudut. Pada kondisi statis atau diam (tanpa getaran) sensor ini akan berfungsi sebagai saklar yang berada pada posisi menutup dan bersifat konduktif. Sebaliknya pada posisi terguncang atau mendeteksi getaran, saklar akan membuka atau menutup dengan pengalihan proporsional dengan besaran guncangan.

Ketika kereta bergerak di atas rel, interaksi roda baja dengan permukaan rel menimbulkan gaya dinamis periodik yang menghasilkan getaran. Getaran ini tidak hanya merambat pada rel, tetapi juga ditransmisikan ke tanah dan struktur sekitarnya. Amplitudo getaran akan meningkat seiring dengan mendekatnya kereta, sehingga pola sinyal vibrasi dapat dimanfaatkan sebagai indikator kedatangan [10].

Sensor *proximity* merupakan salah satu jenis sensor yang bekerja berdasarkan jarak objek terhadap sensor ataupun berfungsi sebagai pendeteksi keberadaan objek dalam jarak dekat. Sensor *proximity* dapat mengukur jarak objek dari ukuran 1 mm hingga beberapa cm, bergantung pada jenis dari sensor yang digunakan. Sensor *proximity* juga memiliki tegangan kerja mulai dari 10-30 V/dc, dan ada juga yang memiliki tegangan antara 100-200 V/ax.

Sensor *proximity* memiliki dua jenis variasi, yaitu *Proximity Inductive* yang berfungsi untuk mendeteksi objek yang berbahan dasar besi ataupun logam. Ketika

objek terhalang oleh benda yang berbahan non-logam, sensor akan tetap mendeteksi selama masih jarak nilai normal atau dalam jangkauan. Variasi lainnya yaitu *Proximity Capacitive* yang berfungsi sebagai sensor yang mendeteksi semua objek yang terbuat dari bahan logam ataupun non-logam.

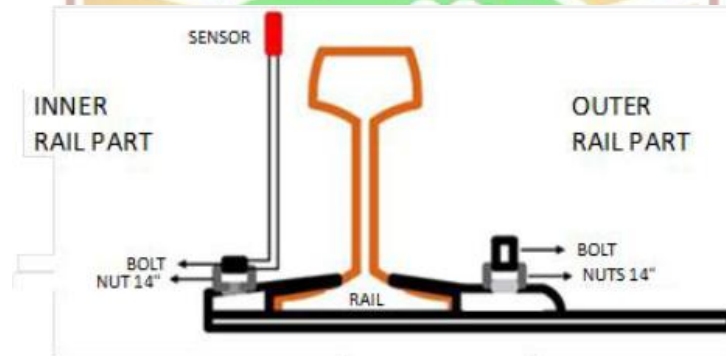
Selain getaran, keberadaan kereta dapat dideteksi melalui fenomena elektromagnetik. Sensor magnetik atau *hall-effect* memanfaatkan perubahan fluks magnetik akibat keberadaan massa logam besar dari kereta. Sensor induktif bekerja dengan menghasilkan medan elektromagnetik lokal; ketika material konduktif (seperti roda baja) melintas, medan ini berubah dan memberikan sinyal keberadaan. Selain itu, sensor *proximity* berbasis ultrasonik dan inframerah juga dapat digunakan, dengan prinsip pantulan gelombang suara atau cahaya dari badan kereta. Teknologi *proximity* ini efektif untuk konfirmasi kehadiran langsung (*exact presence*) kereta pada titik tertentu [10].

Solusi ini membuktikan bahwa kombinasi dari kedua sensor ini dengan *real-time clock* dapat digunakan untuk mendeteksi kedatangan kereta dengan cukup efektif. Selain itu, sensor hanya perlu ditempel atau ditempatkan dekat dengan rel kereta, sehingga tidak memerlukan elemen yang bersentuhan langsung dengan kereta atau ditanamkan di dalam rel, sehingga ini berkaitan dengan kemudahan dalam implementasi. Selain itu, sensor – sensor ini cukup andal terhadap perubahan kondisi eksternal. Namun dari hasil penelitian juga ditemukan bahwasannya solusi ini memiliki kekurangan. Sensor getar dan sensor *proximity* rawan terkena *noise* dan interferensi, seperti getaran dari sumber eksternal (kendaraan, mesin atau aktivitas tanah) yang dapat mengganggu perolehan sinyal oleh sensor. Selain itu, diperlukan pemrosesan sinyal yang kompleks untuk membedakan pola getaran kereta dari *noise*, diperlukan analisis frekuensi, filter, dan algoritma yang kuat. Kedua sensor ini juga memiliki jarak yang sangat terbatas, sehingga kurang ideal untuk deteksi jarak jauh.

1.2.2.2 Solusi 2: Pendeteksian Kereta Api dengan *Axle Counter* [11]

Pada solusi kedua yang ditawarkan ini, digunakan penghitung gandar atau *axle counter* yang memiliki fungsi yang sama seperti *track circuit* sebagai alat pendeteksi.

Axle counter merupakan perangkat yang terpasang pada jalur rel untuk mendeteksi perjalanan kereta api antara dua titik tertentu. Pada setiap bagian jalur rel, terdapat alat penghitung yang dipasang, sehingga setiap poros kereta melewati alat penghitung pada awal bagian tersebut. Perangkat ini berfungsi untuk menghitung jumlah gandar yang melewatinya, dengan tujuan mendeteksi gerbong kereta yang sedang melintas. Dengan adanya sensor ini, pendeteksian kereta dapat dilakukan dengan lebih akurat. Gambar 1.4 menunjukkan instalasi *axle counter* pada kereta.



Gambar 1.4 Instalasi Axle Counter Pada Rel Kereta

Peralatan pendeteksi jenis *axle counter* terbagi menjadi peralatan dalam ruangan dan peralatan luar ruangan. Peralatan dalam ruangan dikenal sebagai evaluator, sedangkan peralatan luar ruangan terdiri dari *wheel sensor* dan *trackside connection box*. Terdapat sebuah counting head yang fungsinya memberikan catu daya dan mengirimkan informasi yang relevan ke unit evaluator, seperti jumlah gandar yang melintas, ke unit evaluator. Hubungan ini memungkinkan transfer data yang diperlukan antara *counting head* dan evaluator guna memantau dan mendeteksi pergerakan kereta api dengan akurat dan efisien. Sementara *Connection box* yang berfungsi untuk mendeteksi dan menghitung poros yang melewati atau pendeteksi dan mengirim status data yang diterima dari counting head kemudian dikirim ke unit evaluator secara berkala.

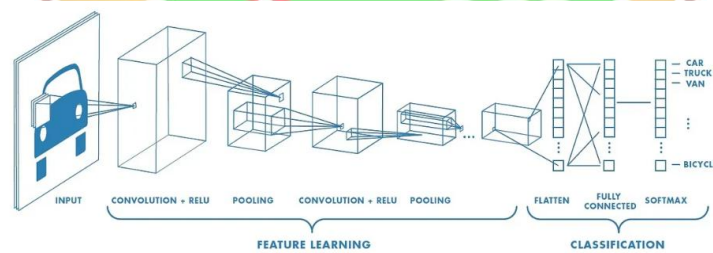
Prinsip kerja *axle counter* adalah melakukan perhitungan jumlah gandar (*axle*) roda kereta api yang memasuki suatu bagian jalur rel tertentu dan membandingkannya dengan jumlah gandar yang keluar. Jika jumlah gandar yang masuk terhitung lebih banyak daripada jumlah gandar yang keluar, maka bagian jalur rel tersebut akan dianggap terduduki (*occupied*). Jika jumlah gandar yang masuk terhitung sama dengan jumlah gandar yang keluar, maka bagian jalur rel tersebut akan dinyatakan *clear*. Namun, jika terjadi situasi di mana jumlah gandar yang keluar dan track section terhitung lebih sedikit dari jumlah gandar yang masuk, dapat dipastikan bahwa *counting head* mengalami gangguan (*error counting*). Kalkulasi dan penentuan apakah *track section* terduduki (*occupied*) atau *clear* dilakukan pada evaluator.

Prinsip kerja *axle counter* yang sederhana namun efektif membuatnya unggul dibandingkan *track circuit*. Teknologi ini tidak membutuhkan isolasi rail joint, sehingga lebih mudah diterapkan pada jalur modern dengan *continuous welded rail*. *Axle counter* juga relatif tahan terhadap pengaruh lingkungan eksternal seperti genangan air, pelumas, maupun kotoran di sekitar rel, sehingga cocok untuk kondisi geografis yang menantang. Selain itu, sistem ini dapat bekerja secara konsisten tanpa terganggu oleh variasi konduktivitas tanah atau rel, yang sering menjadi masalah pada sistem *track circuit* [11].

Meskipun demikian, *axle counter* juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan. Salah satu tantangan utamanya adalah potensi kegagalan pembacaan sensor, misalnya akibat gangguan elektromagnetik atau pemasangan sensor yang tidak presisi. Jika terjadi kesalahan hitung jumlah gandar, maka sistem harus dilakukan *reset* atau sinkronisasi ulang secara manual, yang dapat memengaruhi kelancaran operasional. Pada versi awal, *axle counter* bahkan memiliki keterbatasan jumlah gandar yang dapat dihitung, yaitu maksimal 255 gandar per kereta, sehingga jika lebih dari itu, sistem berpotensi mengalami *error* [12].

1.2.2.3 Solusi 3: Pendeteksian Kereta Api dengan Computer Vision berbasis Convolutional Neural Network [13]

Computer vision merupakan teknologi pengolahan citra digital yang memungkinkan komputer mengenali dan memahami objek dalam gambar atau video. Pada konteks deteksi kereta api, kamera dipasang di sekitar perlintasan dengan sudut pandang ke arah jalur rel. Kamera akan menangkap citra secara terus-menerus. Data citra tersebut diproses menggunakan *Convolutional Neural Network* (CNN). CNN merupakan arsitektur jaringan saraf dalam yang dirancang khusus untuk mengenali pola visual. CNN terdiri dari lapisan konvolusi yang mengekstraksi fitur, lapisan *pooling* yang mereduksi dimensi, serta lapisan klasifikasi untuk menentukan hasil akhir. Lapisan awal CNN mengenali fitur sederhana seperti garis, sudut, dan tekstur. Lapisan lebih dalam mengenali pola kompleks seperti bentuk badan kereta. Dengan hierarki ini, CNN mampu membedakan kereta dari objek lain secara otomatis [14]. Arsitektur CNN ditunjukkan pada Gambar 1.5 berikut.



Gambar 1.5 Arsitektur CNN

Tahapan sistem deteksi kereta berbasis CNN dimulai dengan pengambilan citra dari kamera. Setiap citra atau potongan *frame* video dikirim ke unit pemrosesan. CNN yang telah dilatih sebelumnya akan mengklasifikasikan citra tersebut apakah mengandung objek kereta atau tidak. Jika kereta terdeteksi, sistem akan mengeluarkan sinyal keluaran yang dapat digunakan untuk mengaktifkan alarm, menurunkan palang, atau mengirimkan informasi ke pusat kendali. Proses ini berlangsung dalam waktu sangat singkat sehingga dapat memenuhi kebutuhan deteksi secara efisien [15].

Dalam penelitian berbasis CNN, performa model biasanya dievaluasi dengan confusion matrix (*True Positive, False Positive, True Negative, False Negative*).

Salah satu aspek penting yang perlu diperhatikan dalam algoritma CNN adalah keakuratan yang tinggi. Sehingga pengujian secara berkelanjutan dan perhitungan keakuratan perlu dilakukan dalam implementasi CNN. Keakuratan CNN dapat dihitung dengan Persamaan 1.1 berikut [16].

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad [1.1]$$

Kelebihan utama metode ini adalah akurasi yang tinggi. CNN dapat mencapai tingkat ketelitian lebih baik dibandingkan sensor konvensional karena sistem belajar langsung dari data visual. Selama pelatihan, CNN memproses ribuan citra kereta dalam berbagai kondisi. Hal ini membuat model mampu mengenali kereta meskipun terdapat variasi bentuk, warna, maupun ukuran. Akurasi ini menjadikan CNN efektif dalam mengurangi risiko keterlambatan deteksi atau kesalahan pengenalan objek. Selain itu, CNN dapat dilatih ulang dengan data baru sehingga dapat menyesuaikan diri terhadap kondisi lapangan yang berbeda. Misalnya, jika pada lokasi tertentu pencahayaan sangat rendah, maka model dapat diperbaiki dengan menambahkan data citra malam hari. Dengan sifat adaptif ini, CNN lebih unggul dibanding metode sensor statis seperti *axle counter* atau getaran, yang tidak dapat diperbarui kecuali perangkat keras diganti. Metode ini juga memiliki kemampuan multipel. Selain mendeteksi kedatangan kereta, sistem dapat diperluas untuk mendeteksi objek lain yang membahayakan di sekitar lintasan, seperti kendaraan yang berhenti terlalu dekat, hewan, atau manusia. Dengan cara ini, satu sistem dapat menjalankan berbagai fungsi sekaligus. Hal ini mendukung konsep perlintasan cerdas yang tidak hanya memberi peringatan ketika kereta datang, tetapi juga menjaga keselamatan dari hambatan eksternal [17].

Walaupun memiliki banyak keunggulan, pendekatan ini juga memiliki beberapa kelemahan penting. Pertama adalah ketergantungan pada kualitas citra. Kamera harus mampu merekam dengan jelas agar CNN dapat mengenali kereta. Kondisi pencahayaan yang buruk, hujan deras, kabut tebal, atau pantulan cahaya dapat mengurangi akurasi deteksi. Masalah ini menuntut penggunaan kamera dengan spesifikasi yang baik, yang berarti menambah biaya instalasi. Kelemahan kedua

adalah kebutuhan data latih yang besar. Agar CNN mampu mengenali kereta dalam berbagai kondisi nyata, diperlukan ribuan hingga jutaan data citra yang representatif. Ketersediaan dataset sering kali menjadi kendala, terutama di negara yang belum memiliki basis data citra kereta. Tanpa data latih yang memadai, sistem berisiko mengalami bias atau gagal mengenali variasi tertentu. Selain itu, sistem berbasis citra rentan terhadap gangguan fisik. Lensa kamera dapat terhalang debu, air, atau kotoran yang menempel. Hal ini dapat menurunkan kualitas citra yang diterima CNN dan menyebabkan kesalahan deteksi. Oleh sebab itu, perawatan rutin diperlukan untuk memastikan kamera selalu dalam kondisi optimal.

Secara keseluruhan, solusi pendeteksian kereta berbasis CNN memiliki keunggulan berupa akurasi tinggi, fleksibilitas untuk diperbarui, serta kemampuan multipel dalam mengenali kereta dan hambatan lain. Di sisi lain, metode ini memiliki kelemahan berupa kebutuhan data yang besar, ketergantungan pada kualitas citra, dan kebutuhan perangkat keras komputasi tinggi.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Berdasarkan tiga usulan solusi yang telah ditawarkan sebelumnya, perlu dilakukan analisis untuk menentukan solusi yang akan dipilih untuk membantu dalam proses pendeteksian kereta api pada perlintasan sebidang ini. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode *House Of Quality* untuk membandingkan setiap solusi yang ditawarkan berdasarkan parameter yang telah ditentukan, yaitu fitur dasar dan fitur tambahan, yang telah dijelaskan pada bagian 1.2.1.

Tabel 1.1 House Of Quality

Fitur Dasar Fitur Tambahan			▲	▲	▲	▲	▼	
	Importance Rating	Rating Percentage	Detecting Capability	Warning Capability	Notification Capability	Communication	Computation Method	
Hemat Daya	3	13%	⊙	⊙	⊙	○	⊙	
Kokoh	4	17%	△	○		△		
Waktu Pengembangan Singkat	3	13%	○	⊙	⊙	△	⊙	
Low Cost	5	21%	⊙	⊙	○	○	⊙	
Adaptif	4	17%	⊙	△	△			
Sesuai Standarisasi dan Regulasi	5	21%	○	⊙	△			
Jumlah	24	100%						
Importance Rating			88	96	54	31	55	324
Rating Percentage			27%	30%	17%	10%	17%	100%
Solusi 1 (Sensor Vibrasi + Proximity)			△	⊙	△	○	⊙	3,055556
Solusi 2 (Axle Counter)			⊙	⊙	○	○	○	4,135802
Solusi 3 (Computer Vision + CNN)			⊙	⊙	⊙	○	○	4,469136

Tabel 1.2 Keterangan Simbol *House Of Quality*

Simbol	Nilai	Hubungan
⊙	5	Berhubungan erat
○	3	Berhubungan normal
△	1	Berhubungan jauh
Kosong	0	Tidak berhubungan

Pada Tabel 1.1, memperlihatkan usulan solusi yang membandingkan pemenuhan kriteria yang dianalisa melalui fitur dasar dan fitur tambahan yang dijabarkan sebelumnya. Setiap hubungan digambarkan dalam suatu simbol yang merepresentasikan nilai dari hubungan tersebut, yang dijelaskan pada Tabel 1.2.

Fitur hemat daya berhubungan erat dengan *Detecting Capability*, *Warning Capability*, *Notification Capability* dan *Computation Capability* karena keempat

dikembangkan. Setiap fitur utama ini akan memberikan beban pada daya yang akan digunakan, sehingga semakin tinggi. Fitur hemat daya berhubungan normal dengan *communication* karena komunikasi tidak terlalu mempengaruhi daya yang digunakan.

Fitur kokoh berhubungan normal dengan *Warning Capability*, karena sistem *warning* yang akan dikembangkan harus dapat tahan dengan berbagai kondisi yang terjadi di sekitar, sehingga peringatan tetap dapat diberikan dan solusi dapat digunakan dalam jangka waktu yang lebih panjang. Fitur kokoh berhubungan jauh *Detecting Capability* dan *Communication* karena tidak mempengaruhi secara langsung kedua fitur utama ini. Fitur kokoh tidak berhubungan dengan fitur *Notification Capability* dan *Computation Method*, karena kedua fitur ini tidak dipengaruhi oleh kekokohan sistem.

Fitur waktu pengembangan singkat erat dengan *Warning Capability*, *Notification Capability*, dan *Computation Method*, karena semakin kompleks implementasi dari ketiga fitur utama ini, maka waktu pengembangan dari solusi juga akan semakin panjang. Fitur waktu pengembangan singkat berhubungan normal dengan *Detecting Capability* karena kemampuan deteksi lebih besar dipengaruhi oleh jenis hardware yang digunakan, dan berhubungan jauh dengan *Communication* karena komunikasi antarsistem tidak dipengaruhi oleh lama waktu pengembangan.

Fitur *low cost* berhubungan erat dengan *Detecting Capability*, *Warning Capability*, dan *Computation Method* karena ketiga fitur utama ini akan mempengaruhi *cost* yang perlu dikeluarkan dalam membuat solusi. Sebagai contoh kemampuan deteksi akan semakin baik jika menggunakan sensor yang lebih mahal, sistem peringatan akan lebih efektif jika menggunakan *hardware* yang lebih mumpuni, dan kemampuan komputasi yang tinggi akan memerlukan spesifikasi komponen yang tinggi. Fitur *low cost* berkaitan normal dengan *Notification Capability* dan *Communication*, karena kedua fitur utama ini tidak terlalu memerlukan komponen dengan harga yang tinggi.

Fitur adaptif berhubungan erat dengan *Detecting Capability* karena sistem akan lebih baik dalam menangani kondisi yang tidak menentu jika memiliki kemampuan deteksi yang baik. Fitur adaptif berkaitan jauh dengan *Warning Capability* dan *Notification Capability* karena kedua fitur ini akan sangat baik jika mampu bekerja pada kondisi yang tidak menentu, namun tidak terlalu mendesak. Fitur adaptif tidak berhubungan dengan fitur *Communication* dan *Computation Method*.

Kriteria sesuai dengan standarisasi dan regulasi berhubungan erat dengan *Warning Capability*, karena terdapat standar dalam pengimplementasian sistem peringatan di perlintasan kereta api sebidang. Kriteria sesuai dengan standarisasi dan regulasi berhubungan normal dengan *Detecting Capability* karena terdapat regulasi yang mengatur penggunaan data di ruang publik, namun tidak *strict*. Kriteria sesuai dengan standarisasi dan regulasi berhubungan jauh dengan *Notification Capability* karena terdapat regulasi terkait pemberian *feedback* jika terjadi gangguan pada sistem. Kriteria sesuai dengan standarisasi dan regulasi tidak berhubungan dengan *Communication* dan *Computation Method*.

Berikut merupakan perhitungan menggunakan *House Of Quality* dari ketiga solusi yang ditawarkan terhadap fitur dasar, yaitu:

1. Solusi 1

$$= (1 * 27\%) + (5 * 30\%) + (1 * 17\%) + (3 * 10\%) + (5 * 17\%) \\ = 3,05$$

2. Solusi 2

$$= (5 * 27\%) + (5 * 30\%) + (3 * 17\%) + (3 * 10\%) + (3 * 17\%) \\ = 4,13$$

3. Solusi 3

$$= (5 * 27\%) + (5 * 30\%) + (5 * 17\%) + (3 * 10\%) + (3 * 17\%) \\ = 4,46$$

Solusi 1, yaitu sistem pendeteksian kereta dengan menggunakan sensor vibrasi dan *proximity* berhubungan jauh dengan fitur *Detecting Capability*, karena penggunaan kedua sensor ini untuk mendeteksi kereta sangat rawan mengalami gangguan atau

pengaruh input dari lingkungan sekitar. Sistem ini berhubungan jauh dengan *Notification Capability*, dimana kesalahan pendeteksian kereta akan berpengaruh juga pada notifikasi dan mekanisme *fail-safe* yang diberikan, memberikan efek *False Positive*. Sistem ini berhubungan erat dengan *Computation Method* yang seminimal mungkin, karena solusi ini hanya memanfaatkan *Real-Time Clock* dan Fuzzy Logic untuk pengambilan keputusan.

Solusi 2, yaitu sistem pendeteksian kereta dengan menggunakan *axle counter* berhubungan erat dengan *Detecting Capability*, karena mekanisme dari *axle counter* sendiri memang terkhusus dirancang untuk mendeteksi jumlah gandar kereta api yang melintas. Sistem ini berhubungan erat dengan *Warning Capability* karena pemberian peringatan bisa sangat akurat jika kereta berhasil terdeteksi dengan mekanisme ini. Sistem ini berhubungan normal dengan *Computation Method* karena meskipun terbukti mampu mendeteksi kereta dengan baik, *axle counter* memiliki keterbatasan untuk menghitung gandar hanya maksimal sebanyak 255 per kereta.

Solusi 3, yaitu sistem pendeteksian kereta dengan menggunakan *computer vision* berbasis CNN berhubungan erat dengan *Detecting Capability*, karena pendeteksian bisa sangat akurat karena menggunakan *deep learning* yang sangat andal dalam mendeteksi kereta secara spesifik, didukung dengan penelitian terbaru yang membuktikan keakuratan CNN yang mampu menangkap citra dengan baik dan tahan berbagai kondisi. Sistem ini berhubungan erat dengan *Notification Capability* karena deteksi yang akurat akan memberikan notifikasi serta mekanisme *fail-safe* yang lebih akurat. Sistem ini berhubungan normal dengan *Computation Method*, karena meskipun akurat, sistem ini memerlukan kemampuan komputasi yang cukup tinggi.

Berdasarkan analisis, perhitungan dan penjabaran yang dilakukan dalam membandingkan ketiga solusi yang ditawarkan, didapatkan perolehan solusi 1 dengan *rating* 3.05, solusi 2 dengan *rating* 4.13, dan solusi 3 dengan *rating* 4.46.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan menggunakan *House Of Quality* dengan menganalisa seluruh hubungan seluruh usulan solusi terhadap fitur dasar dan fitur tambahan, diperoleh solusi 3, yaitu sistem pendeteksian dengan menggunakan *computer vision* berbasis CNN merupakan solusi terbaik untuk menyelesaikan permasalahan ini. Solusi 3 memiliki *rating* yang lebih unggul jika dibandingkan dengan solusi lainnya. Solusi 3 dipilih karena memanfaatkan *deep learning* dalam pendeteksian kereta api, membuatnya bisa sangat akurat dan tidak terpengaruh dengan kondisi eksternal yang tidak menentu. Keakuratan ini akan berdampak pada notifikasi serta mekanisme *fail-safe* yang jauh lebih tepat sasaran jika terjadi gangguan pada sebagian atau keseluruhan sistem. Meskipun memiliki metode komputasi yang cukup tinggi, namun ini dapat ditoleransi karena sistem hanya perlu dapat mendeteksi kereta api secara spesifik. Dengan terpilihnya solusi 3 ini, diharapkan dapat menyelesaikan permasalahan yang diangkat pada topik ini.

