

Peran Sistem Kendali Berbasis Komunikasi dan *Automatic Train Protection* pada Kereta Perkotaan dan Jarak Jauh

Antoni S. Sitorus¹, Email: antoni.postel@gmail.com

Budi Sitorus², Email: budi.sitorus76@gmail.com

Christina Natalia Sitorus³, Email: kitin_maniez@yahoo.com

Tulus Irpan H Sitorus⁴, Email: tulus.sitorus@yahoo.com

¹Kementerian Komunikasi dan Informatika

^{2,4} Kementerian Perhubungan

³IDI Kota Bekasi

ABSTRAK

Keselamatan perjalanan kereta api menjadi indikator utama pelayanan transportasi publik. Kemajuan teknologi perkeretaapian di berbagai negara membawa perubahan bagi perkeretaapian di Indonesia agar perjalanan kereta api semakin terjamin, melalui peningkatan sistem komunikasi suara maupun komunikasi data dan pemasangan *Automatic Train Protection* (ATP). Kebutuhan ATP perkeretaapian belum terpenuhi karena biaya relatif mahal dan komunikasi yang digunakan melalui radio analog frekuensi VHF dengan banyak kanal. Hasil penelitian adalah sistem komunikasi kereta api menggunakan radio analog frekuensi VHF (150-174) dengan banyak kanal frekuensi dapat ditingkatkan menggunakan Digital Mobile Radio (DMR) Tier III dan/atau Tetra, pemasangan ATP untuk kereta komuter dan jarak jauh terus diupayakan, penggunaan RAMS menilai produk maupun keselamatan untuk segera dapat digunakan oleh Regulator maupun Operator.

Kata kunci: Keselamatan Kereta Api; sistem komunikasi radio digital; Teknologi Perkeretaapian Indonesia

ABSTRACT

Rail travel safety is a key indicator of public transport services. Advances in Railway Technology in various countries bring changes to perkeretaapian in Indonesia so that train travel is more secure, through the improvement of voice communication and data communication systems and the installation of Automatic Train Protection (ATP). The need for ATP Railways has not been met due to the relatively expensive cost and communication used via VHF frequency analog radio with many channels. The results of the research are railway communication systems using analog radio frequency VHF (150-174) with many frequency channels can be increased using digital mobile Radio (DMR) Tier III and/or Tetra, ATP installation for commuter and long-distance trains continue to be pursued, the use of RAMS assess the product and safety to be immediately usable by regulators and operators.

Keywords: Railway Safety systems; digital radio communication system; Indonesian Railway Technology

1. INFORMASI UMUM

Kemajuan teknologi perkeretaapian dunia demikian pesat memberi dampak terhadap perkembangan perkeretaapian di Indonesia. Lompatan teknologi perkeretaapian Indonesia dimulai sejak tahun 2015 sampai tahun 2022 yang dimulai dengan *Light Rapid Transit (LRT) Palembang*, *LRT Jakarta*, *Mass Rapid Transit (MRT) Jakarta* dan Kereta Cepat Jakarta-Bandung (KCJB), mewarnai teknologi perkeretaapian membawa transfer ilmu pengetahuan bagi Sumber Daya Manusia (SDM) Indonesia dan penyerapan tenaga kerja dengan adanya pembangunan perkeretaapian Indonesia.

Seperti diketahui bahwa jumlah penumpang moda transportasi kereta api perkotaan (*urban transport*) MRT Jakarta, LRT Palembang mengalami peningkatan setiap tahunnya. Kenaikan penumpang MRT Jakarta hingga 237% dengan total penumpang mencapai 383.885 orang sepanjang September 2021 atau rata-rata penumpang harian mencapai 14.218 orang perhari (Dihni, 2021), sedangkan LRT Palembang sejak beroperasi tahun 2018 penumpang LRT Palembang mencapai 5,1 juta penumpang (Siregar, 2020).

Kemajuan moda transportasi perkeretaapian tersebut tertuang dalam Rencana Induk Perkeretaapian Nasional (RIPNAS) yang disusun tahun 2011 (Kementerian Perhubungan Ditjen Perkeretaapian, 2011), bahwa arah pengembangan perkeretaapian

nasional sebagai perwujudan perkeretaapian nasional 2030, untuk mewujudkan: 1) pelayanan prasarana dan sarana perkeretaapian yang handal (*prima*) mengutamakan keamanan dan keselamatan (*safety and security first*), terintegrasi dengan moda lain, terjangkau oleh seluruh lapisan masyarakat serta tersebar di pulau-pulau besar (Jawa- Bali, Sumatera, Kalimantan, Sulawesi dan Papua), 2) Teknologi perkeretaapian yang modern, ramah lingkungan, daya angkut besar dan berkecepatan tinggi, 3) penyelenggaraan perkeretaapian nasional yang mandiri dan berdaya saing, menerapkan prinsip *good governance* serta didukung oleh SDM yang unggul, industri yang tangguh, iklim investasi yang kondusif, pendanaan yang kuat dengan melibatkan peran swasta. Selain itu Pemerintah memiliki sasaran dan target penyelenggaraan perkeretaapian nasional 2030 yaitu “Mewujudkan layanan transportasi perkeretaapian yang memiliki pangsa pasar penumpang 7 persen-9 persen dan barang sebesar 11 persen-13 persen dari keseluruhan transportasi nasional.

Dalam memenuhi kebutuhan perjalanan kereta api dan keselamatan maka perkeretaapian Indonesia harus dapat mengikuti perkembangan teknologi perkeretaapian global yang diperlukan untuk menjamin keselamatan perjalanan kereta api, yang semula sistem komunikasi masih menggunakan radio analog frekuensi VHF (150-174) dengan banyak kanal frekuensi dapat ditingkatkan menjadi sistem komunikasi teknologi *Digital Mobile Radio (DMR)* menjadi pilihan sistem kendali kereta berbasis komunikasi kereta perkotaan dan kereta jarak jauh, dan pemasangan *Automatic Train Protection (ATP)*, serta meningkatkan sistem persinyalan menggunakan *Safety Integrity Level (SIL)*.

Sistem radio trunking secara umum merupakan grup sistem yang terdiri dari satu *Base Transceiver Station (BTS)* atau lebih yang menggunakan beberapa frekuensi sehingga memungkinkan pembagian kanal untuk komunikasi diantara grup-grup yang diatur oleh *Control Channel*, dengan tujuan memberikan efisiensi frekuensi melalui sistem pembagian frekuensi sehingga pengguna dapat menggunakan kanal yang kosong untuk diduduki.

Dalam menunjang keselamatan perjalanan kereta api fungsi dari *Automatic Train Protection (ATP)* berfungsi untuk mencegah kereta melewati sinyal dalam bahaya, kecepatan berlebih, atau melewati *buffer stop* (Evans, 1996), memantau dan mengontrol pergerakan kereta (Young & Naweed, 2017), mengurangi peran manusia dalam mengendalikan kereta api apabila terjadi gangguan visual terhadap sinyal muka dan sinyal masuk, mencegah terjadinya anjlok dan/atau tergulingnya kereta api yang

disebabkan karena pelanggaran batas kecepatan, dan ATP juga berfungsi sebagai system pengaman kereta otomatis (Wijaya et al., 2015).

Pemerintah telah melakukan uji coba penerapan ATP sejak tahun 2010 di 18 (delapan belas) stasiun di lintas Kutoarjo-Solo-Yogyakarta dan tujuh lokomotif, di antaranya kereta Prameks dipasang 3 unit, kereta Madiun Jaya 2 unit, dan kereta inspeksi 2 unit, juga dipasang di 424 stasiun kereta api di seluruh Indonesia, 350 lokomotif kereta rel diesel dan 400 kereta rel listrik, dengan biaya pemasangan 1 unit ATP di lokomotif sebesar Rp1 miliar (Biro Komunikasi dan Informasi Publik, 2012a)

Tanpa kehadiran ATP, peristiwa kecelakaan akibat kelalaian manusia (*human error*) tidak dapat dihindarkan. Menurut *human error* menjadi penyebab utama kecelakaan kereta api, dengan persentase mencapai 24% (Biro Komunikasi dan Informasi Publik, 2012b). *Human error* ini dapat disebabkan oleh kelalaian petugas pengatur jalur, pelanggaran sinyal, dan pelanggaran perlintasan, pemeliharaan infrastruktur meliputi rem kereta api blong, bantalan rel bergeser, besi bantalan rem hilang, gerbong jatuh, dan lain sebagainya. Musibah kecelakaan kereta api tahun 2010 akibat *human error* terjadinya tabrakan kereta api dari belakang yang terjadi di sebelah barat Stasiun Petarukan di Desa Serang, Kabupaten Pemalang, Jawa Tengah antara Kereta Api (KA) Senja Utama jurusan Jakarta-Semarang yang berhenti ditabrak dari belakang oleh KA Argo Bromo Anggrek jurusan Jakarta-Surabaya (Tamtomo, 2019)

Permasalahan penelitian adalah kebutuhan ATP sarana perkeretaapian belum terpenuhi karena biaya relatif mahal, dan sistem komunikasi masih menggunakan radio analog frekuensi VHF membutuhkan banyak kanal. Tujuan penelitian adalah melakukan evaluasi terhadap sistem komunikasi kereta komuter dan kereta jarak jauh dan memberikan rekomendasi terhadap kebutuhan sistem komunikasi, persinyalan dan ATP.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Peraturan (Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2015) tentang Standar Keselamatan Perkeretaapian, yaitu:

- i. Standar keselamatan adalah ketentuan yang digunakan sebagai acuan agar terhindar dari risiko kecelakaan.
- ii. Peralatan telekomunikasi perkeretaapian merupakan fasilitas pengoperasian kereta api yang berfungsi menyampaikan informasi dan/atau komunikasi bagi kepentingan operasi perkeretaapian yang dipasang pada tempat tertentu.

- iii. Sinyal adalah alat atau perangkat yang digunakan untuk menyampaikan perintah bagi pengaturan perjalanan kereta api dengan peragaan dan/atau warna

Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 45 Tahun 2018 tentang Persyaratan Teknis Peralatan Telekomunikasi Perkeretaapian, telekomunikasi perkeretaapian terdiri atas komunikasi suara dan komunikasi data (Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2018).

Modernisasi adalah sebuah proses ketika sistem kehidupan berubah dari tradisional (sederhana) menjadi modern. Modernisasi terjadi melalui tahapan-tahapan tertentu memberikan dampak positif dan negative (Hashina, 2022)

3. METODOLOGI

3.1. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data diperoleh dengan menggunakan data sekunder, dari instansi terkait juga melalui Webinar Direktorat Jenderal Perkeretaapian, *Focuss Group Discussion (FGD)* Kementerian Perhubungan dengan Kementerian Komunikasi dan Informatika, dan penelitian sebelumnya, beserta literatur penelitian sebelumnya yang menunjang penelitian ini.

3.2. Pengolahan Data

Pengolahan data pada kajian ini dengan penyajian berupa tabel dan gambar yang diolah dengan menggunakan formula.

Melalui penelitian ini menggambarkan sistem hubungan antara kereta pertama dan kedua dengan *headway* yang telah ditentukan dan kecepatan kereta yang diperlukan untuk mencapai *headway* yang diinginkan.

3.3. Analisis Data

Metode penelitian adalah menggunakan metode deskriptif yang berdasarkan pada filsafat *postpositivisme* digunakan untuk meneliti pada kondisi objek yang alamiah (sebagai lawannya adalah eksperimen) dimana peneliti sebagai instrument kunci teknik pengumpulan data dilakukan secara trigulasi (Astalini et al., 2018). Permasalahan yang ada dijabarkan melalui analisis pohon masalah, yang menerangkan hubungan sebab akibat (Asmoko, 2014) dari pohon di bawah menuju pohon di atas.

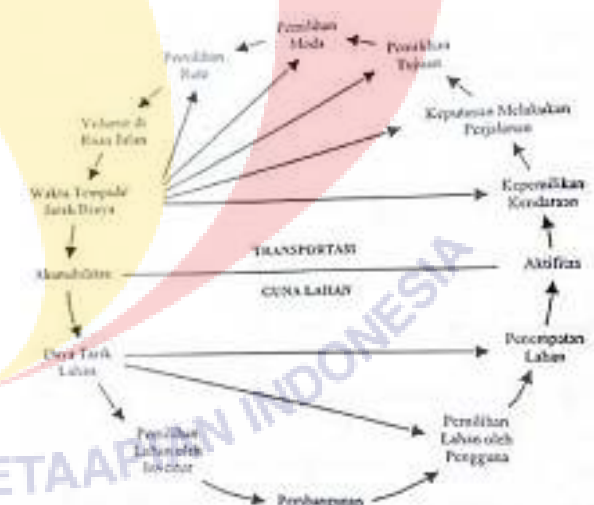
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Transportasi merupakan alat untuk memacu pertumbuhan ekonomi dan wilayah, mempercepat pertumbuhan ekonomi baru di daerah yang dilewati oleh transportasi, dan menjangkau daerah pariwisata.

Dengan semakin majunya transportasi di suatu daerah maka berdampak pada kemajuan daerah tersebut dibandingkan dengan daerah yang minim akan sarana transportasinya. Melalui Nawa Cita yang menjadi landasan sasaran pembangunan Jokowi-Ma'aruf Amin (2020-204) yaitu memajukan daerah dari pinggiran, atau lebih dikenal dengan daerah 3TP (Terpencil-Tertinggal-Terluar dan Perbatasan), maka pembangunan infrastruktur dan suprasuktur di daerah tersebut menjadi prioritas pembangunan.

Berdasarkan asal kata transportasi berasal dari bahasa latin (*trans-portare*), *trans* berarti seberang atau sebelah dan *portare* berarti mengangkut atau membawa (Kamaluddin & Krisnawati, 2003). Menurut (Miro & Hardani, 2005) transportasi sebagai usaha yang memindahkan, menggerakkan, mengangkut, atau mengalihkan suatu objek dari satu tempat ke tempat lain, dimana di tempat lain objek tersebut lebih bermanfaat atau dapat berguna untuk tujuan-tujuan tertentu. Sedangkan menurut (Hennes, 1969) mendefinisikan transportasi sebagai suatu sistem yang terdiri dari fasilitas tetap (prasarana), sarana dan sistem pengendalian yang memungkinkan orang atau barang dapat berpindah dari satu tempat ke tempat lain secara efisien setaip waktu untuk mendukung aktivitas manusia.

Transportasi merupakan kebutuhan turunan (*derived demand*) dari kegiatan ekonomi dan sosial, sehingga pertumbuhan ekonomi suatu negara atau wilayah tercermin dari meningkatnya intensitas transportasinya. Hubungan antara transportasi dan tata guna lahan yaitu memiliki hubungan yang kuat baik sebagai pembentuk aksesibilitas, aktifitas (pola pergerakan) dan daya tarik lahan untuk dapat menghasilkan investasi, dapat dilihat pada Gambar 1. (Aditianata, 2014)



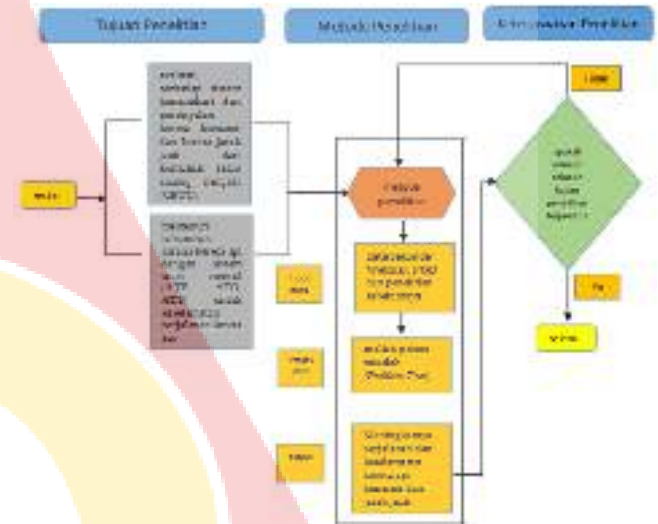
Gambar 1. Interaksi Tata Guna Lahan-Transportasi

Sumber: (Aditianata, 2014)

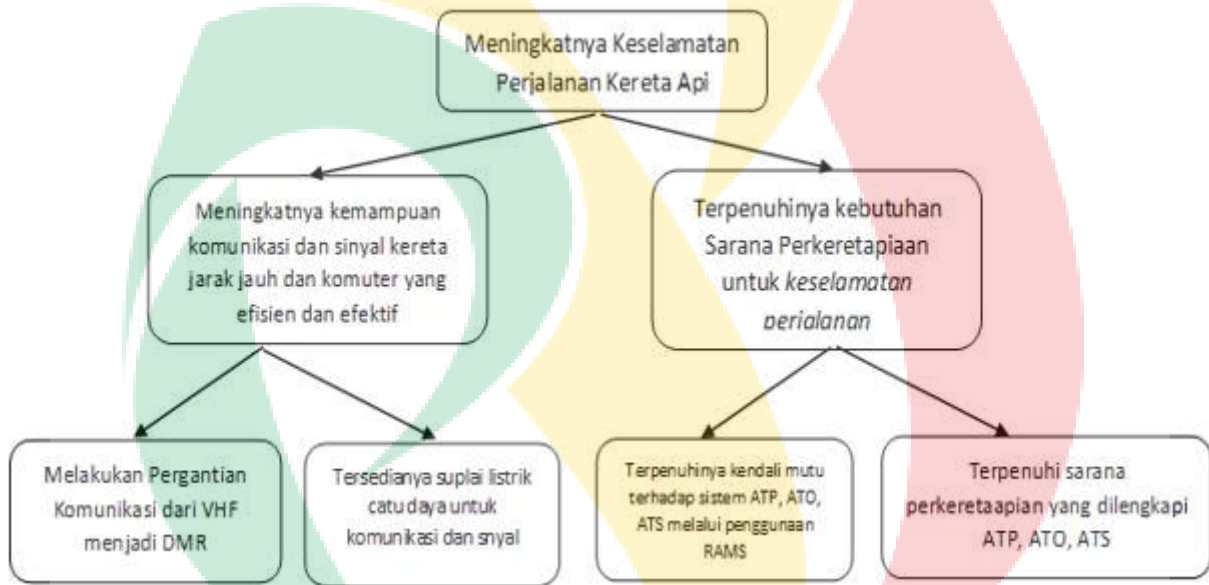
Hal yang tidak dapat dihindari pertumbuhan penduduk di kota besar negara berkembang yaitu kemacetan jalan, kebutuhan akses transportasi publik, minat untuk menggunakan transportasi publik yang dipengaruhi oleh keamanan, kenyamanan dan biaya yang dikeluarkan menggunakan transportasi publik. Untuk memenuhi kebutuhan akan transportasi publik maka Pemerintah memiliki kewajiban untuk menyediakan transportasi publik yang aman, nyaman, ramah lingkungan dan biaya terjangkau. Sementara di Jabodetabek target perpindahan moda transportasi publik (share moda) tahun 2020 sebesar 35,6% (Subarkah, 2019).

Modernisasi teknologi perkeretaapian Indonesia tak lepas dari kekurangan yang menjadi tugas semua stakeholder untuk menciptakan keselamatan perjalanan kereta api dan meningkatnya jumlah perjalanan kereta api, hal inilah memerlukan riset, rekayasa teknologi dan lain sebagainya. Permasalahan penelitian, terkait sistem komunikasi dengan penataan komunikasi dari frekuensi VHF yang memerlukan membangun relay-relay untuk dapat diteruskan menjadi frekuensi UHF

agar dapat berkomunikasi dengan Pusat Kendali (OCC) maupun dengan kereta lainnya, suplai catu daya listrik untuk kebutuhan sinyal dan komunikasi, penyediaan sarana perkeretaapian akan sistem train control, hal tersebut dapat digambarkan melalui Analisis Pohon Analisis pada Gambar 3.



Gambar 2. Alur Pikir Penelitian



Gambar 3. Analisis Pohon Masalah

A. Sistem Persinyalan dan Komunikasi Perkeretaapian

1. LRT Jabodebek

Pembangunan LRT Jabodebek merupakan solusi untuk mengurangi kemacetan, kemandirian teknologi dalam negeri, memberikan kemudahan akses dan pilihan transportasi publik yang ramah lingkungan.

LRT Jabodebek menggunakan teknologi CBTC-Moving Block yang menjadikannya sebagai LRT

tanpa masinis atau driverless ke-3 di Indonesia setelah Skytrain Bandara Soekarno Hatta dan MRT Jakarta (*semi driverless*), sedangkan ka layang Bandara Soekarno Hatta menggunakan teknologi sistem persinyalan SiLSafe 5000 milik PT Len Industri.

Moda transportasi perkotaan seperti LRT, sistem persinyalan dibagi menjadi 3 bagian, yakni *wayside signaling equipment* (di sepanjang jalur), *on board signalling equipment* (di dalam kereta), dan *indoor signaling equipment*. Sistem persinyalan berfungsi

mengatur pergerakan lalu lintas kereta di rel, dimana Sistem *CBTC-Moving Block* memiliki tingkat keamanan yang tinggi serta dapat mencegah terjadinya tumbukan antar kereta api dapat bergerak dengan jarak minimum antar kereta untuk memaksimalkan jumlah keberangkatan kereta dalam batas aman

2. Kereta Cepat Jakarta-Bandung (KCJB)

Pembangunan kereta cepat Jakarta-Bandung memberikan manfaat yaitu meningkatkan perekonomian masyarakat yang dilalui jalur kereta cepat, memunculkan titik-titik ekonomi baru, mengangkat sektor pariwisata, menyerap tenaga kerja.

Persinyalan Kereta Api Cepat menggunakan teknologi GSM-R sebagai teknologi transmisi data (train control data) mengadopsi teknologi yang dipakai di China Railway. CTCS-2 digunakan untuk mendukung pengoperasian Kereta Api Cepat dengan kecepatan maksimum 300 km/jam dan CTCS-3/GSM-R dengan kecepatan maksimum 350 km/jam. Teknologi GSM-R sudah diujicobakan dari sisi keselamatan yang banyak dioperasikan pada kereta cepat di Eropa, China, Arab Saudi, dan Maroko. Teknologi ini juga termasuk teknologi yang stabil dan sudah terstandarisasi oleh UIC atau International Union of Railways (Uni Kereta Api Internasional).

Kereta Api Cepat Jakarta-Bandung dilengkapi dengan backup system dalam teknologi control untuk mengantisipasi apabila terjadi gangguan persinyalan pada frekuensi GSM-R, apabila saat terjadi inferensi sinyal kemudian oleh backup system, dilakukan penyesuaian kecepatan dari 350 km/jam menjadi 300 km/jam

3. MRT Jakarta

MRT memiliki sistem persinyalan dengan menggunakan CBTC yang dikendalikan dari ruangan *Operation Control Center (OCC)* oleh para petugas yang disebut *Traffic Dispatcher*, dengan sistem ini, secara tepat dan akurat menunjukkan posisi kereta, sehingga perjalanan lebih aman dan nyaman.

4. Kereta Jarak Jauh dan Kereta Komuter

Kereta jarak jauh masih menggunakan radio analog frekuensi VHF (150-174) yang menggunakan banyak kanal frekuensi yang dipergunakan untuk sistem komunikasi kereta api di Pulau Jawa

B. Sistem Automatic Train Protection (ATP)

Teknologi train control adalah sistem pengamanan dan operasi perjalanan kereta api yang mencakup

pengendalian sarana kereta api pada sistem pengeremannya maupun pengendalian kecepatan. Perkembangan teknologi perkeretaapian di dunia mengalami kemajuan sangat pesat, berkaitan dengan perlindungan kereta api.

Train control perkeretaapian pada umumnya meliputi (Kim et al., 2012):

- a) ATP (*Automatic Train Protection*) yang berfungsi untuk mensupervisi secara terus menerus kecepatan kereta api.
- b) ATO (*Automatic Train Operation*) yaitu mode kendali otomatis tanpa masinis
- c) ATS (*Automatic Train Supervision*) yaitu berfungsi sebagai Centralized Traffic Control (CTC)

ATP yang berfungsi sebagai sistem pengaman kereta otomatis, saat terjadi sinyal tidak aman dilanggar oleh masinis. Cara kerja ATP induksi berfungsi dengan adanya medan magnet dalam penerapannya perlu adanya sepasang perangkat yang dipasang pada sarana dan prasarana perkeretaapian.

Kecelakaan kereta api di Indonesia masih dijumpai baik tabrakan antar kereta dengan kereta, terguling maupun kecelakaan jalan raya (mobil dan motor). Berdasarkan penelitian ITB, kecelakaan tabrakan antar kereta api dari tahun 2004 sampai dengan tahun 2006 sebanyak 15 kali atau 75 % disebabkan oleh pelanggaran sinyal (Wijaya et al., 2015).

Untuk menjawab permasalahan penelitian maka upaya meningkatkan keselamatan perjalanan, sebagai berikut:

A. Melakukan Pergantian Komunikasi Manual menjadi Digital

Kondisi *Radio Traindispatching (RTDS)* kereta api konvensional meliputi:

1. Base stasiun menggunakan analog pada frekuensi VHF 143-174 MHz, yang digunakan untuk keperluan telekomunikasi suara pada perjalanan kereta api;
2. Menggunakan backbound microwave 8 GHz antar tower/base stasiun rentan terhadap gangguan cuaca dan *coverage/line sight*;
3. Perkembangan unit-unit pada pengoperasian KA (JJ, Sinyal Telekomunikasi, Operasi, Juru Langsir, Petugas JPL, Petugas Pemeriksa)

Berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 45 Tahun 2018 tentang Persyaratan Teknis Peralatan Telekomunikasi Perkeretaapian, dalam Pasal 2 butir (1) peralatan telekomunikasi perkeretaapian terdiri

atas: komunikasi suara dan komunikasi data terdiri dari Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), pengendalian kereta api, peringatan dini (*early warning*), kamera pemantau dan informasi penumpang.

Pasal 7 Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 45 Tahun 2018, transmisi dari media tanpa kabel atau frekuensi radio yang digunakan peralatan komunikasi berupa: a. radio point to point; b. radio trunking; c. GSM-R; d. LTE-R; e. WLAN/WiFi; dan f. komunikasi satelit.

Kebutuhan komunikasi perkeretaapian yang dibutuhkan meliputi kebutuhan komunikasi suara dan komunikasi data. Peralatan komunikasi kereta api jarak jauh masih menggunakan frekuensi radio VHF point to point dengan teknologi analog. Komunikasi yang dapat dikembangkan sebagai komunikasi menggunakan Teknologi Radio Digital (yang lebih dikenal dengan Trunking) seperti *Terrestrial Trunked radio (TETRA)* dan/atau *Digital Mobile Radio (DMR)* merupakan sistem radio digital dengan privasi yang lebih baik, kualitas audio lebih bagus, sistem keamanan enkripsi yang baik dan peningkatan kecepatan dalam transmisi data dan peningkatan kapasitas akses ke jaringan lain serta didukung dengan tracking GPS.

Mobile Radio (DMR) merupakan sistem internasional berstandar terbuka yang dikeluarkan oleh *ETSI (European Telecommunications Standards Institute)* (Hidayat et al., 2016). DMR menggunakan *Time Division Multiple Access (TDMA)* sehingga menghemat penggunaan frekuensi. Terdapat 3 (tiga) tier dalam DMR, trunking digital Digital Mobile Radio (DMR) Tier III dapat sinkronisasi dengan kedua versi DMR sebelumnya (Tier I dan Tier II) dan dengan Teknologi TETRA. Standar DMR membandingkan baik dengan standar GSM-R dan TETRA dengan biaya peralatan yang rendah, kompatibilitasnya dengan peralatan dari berbagai produsen dan kemampuan untuk bekerja secara bersamaan dalam dua mode: analog dan digital (Nikitin et al., 2020).

Peningkatan sistem komunikasi dari frekuensi radio VHF point to point dengan teknologi analog menuju sistem komunikasi berbasis trunking menjadi pilihan yang tepat untuk digunakan perkeretaapian perkotaan (komuter) maupun kereta jarak jauh, selain itu dengan pergantian sistem komunikasi menuju teknologi trunking dapat menghemat penggunaan frekuensi, berdasarkan rekomendasi Kementerian Komunikasi dan Informatika.

B. Memenuhi kebutuhan kereta jarak jauh dan kereta komuter dengan ATP dan persinyalan handal.

Kebutuhan sarana perkeretaapian dalam negeri tiap tahunnya mengalami peningkatan untuk menambah kapasitas maupun mengganti kereta lama (*retrofit*). Penggunaan kereta bekas dari negara pemberi hibah mulai ditinggalkan dikarenakan berbagai alasan salah satunya agar terjadi kebangkitan transfer ilmu pengetahuan dan teknologi dan memajukan industri perkeretaapian dalam negeri.

Kebutuhan sarana perkeretaapian dalam negeri dapat dipenuhi oleh PT INKA (Persero) baik kereta penumpang maupun kereta barang. Dalam Rencana Jangka Panjang Perusahaan PT INKA (2019-2030), perusahaan dalam tahap IV, menyadari kebutuhan akan transportasi massal perkotaan terintegrasi semakin besar baik antar moda jalan raya maupun dengan moda berbasis rel. Dalam RJPP PT INKA untuk menuju tahap V, PT INKA terus berupaya untuk menguasai teknologi *fully automated system*, *light rail vehicle* dan *high speed train* sehingga terwujud sarana transportasi yang efektif, aman dan efisien, pada Gambar 7.

Penyediaan sistem persinyalan perkeretaapian masih sangat dibutuhkan untuk menggantikan sistem persinyalan mekanis, yang dilakukan secara bertahap di sejumlah jalur kereta api yang ada di Pulau Jawa dan Pulau Sumatera. Penyediaan persinyalan perkeretaapian Indonesia dapat dipenuhi melalui PT LEN (Persero). Adapun produk meliputi (Len Industry, 2021):

1. *Railway Signaling System* yaitu: SiLSafe (Interlocking System): Sistem pengontrol keamanan rute kereta, SiLTrack (Trackside Signalling): pengatur keselamatan operasi persinyalan kereta, SiLMove (Train Control System): Sistem kontrol kereta yang mengontrol keamanan pergerakan kereta dan SiLVue (Control Center System): Sistem pengendali pusat untuk mengelola operasi dan pemeliharaan.
2. *Railway Telecommunication System*
3. *Railway Traction System*
4. *Railway Substation System*

Sistem persinyalan yang handal masih terus dikembangkan dengan menggunakan komponen dalam negeri. Persinyalan yang handal untuk kereta jarak jauh dapat ditingkatkan dengan menggunakan sistem persinyalan SIL Safe 4000 yang telah diaplikasikan di lintas Cikarang-Cikampek.

Demikian pula keselamatan kereta api jarak jauh,



Gambar 1. S Curve Business Development and Product Development Sumber: PT INKA (Persero)

belum semua kereta jarak jauh terpasang ATP, untuk itu pemasangan ATP secara bertahap dapat difungsikan pada semua kereta komuter dan kereta jarak jauh, untuk masa mendatang agar persinyalan dan komunikasi dapat terintegrasi.

Permasalahan lainnya yang sering terjadi dengan adanya perlintasan sebidang yang dipengaruhi oleh budaya masyarakat yang kurang tertib (menerbos palang pintu, dan lain- lain), juga pengaruh ruang milik jalan (rumija) dan ruang manfaat jalan (rumaja) yang semakin berkurang dikarenakan masyarakat sekitar memanfaatkan rumija maupun rumaja untuk keperluan masyarakat maka rekayasa lalu-lintas atau pembangunan underpas atau flyover diperlukan untuk segera menutup perlintasan sebidang.

Sebagai ilustrasi perjalanan kereta pertama berangkat dari Stasiun Cikini ke Stasiun Gondangdia memerlukan waktu headway pertama 3 menit dengan jarak 2,5 km maka kereta kedua dengan jarak yang sama, dengan waktu headway kedua 4 menit, sehingga kecepatan kereta ke dua diperoleh sebagai berikut.

Headway (t_1) = 3 menit = 0,05 jam

$S = 2,5 \text{ km}$

$s = v \cdot t \Rightarrow v = 2,5 \text{ km} / 0,05 \text{ jam}$, maka $v_1 = 50 \text{ km/jam}$

$t_2 = 4 \text{ menit} = 0,06 \text{ jam}$

sehingga didapatkan t dan v_2 sebagai berikut.

$t \text{ (total)} = t_1 + t_2$ maka $t \text{ (total)} = 0,06 \text{ jam} + 0,05 \text{ jam} = 0,11 \text{ jam}$

$S_2 = v_2 \cdot t_2$

$v_2 = 2,5 / 0,06 \text{ jam} = 41 \text{ km/jam}$

Jadi untuk kereta kedua dengan waktu headway 4 menit dengan jarak yang sama dengan kecepatan kereta kedua adalah 41 km/jam

Apabila kereta pertama mengalami hambatan pada jarak 1 km maka kereta kedua memperlambat kecepatan, sebagai berikut:

$S = 2,5 \text{ km}$, $V_1 = 50 \text{ km/jam}$

Maka diperoleh t_2 dan V_2 sebagai berikut.

$S_1 = S_2$

$S \text{ total} = 2,5 - S_2 = S_2 = 2,5 \text{ km} - 1 \text{ km} = 1,5 \text{ km}$

$S_2 = v_2 \cdot t_2$

$1,5 \text{ km} = v_2 / 0,06 \text{ jam}$ maka $V_2 = 1,5 \text{ km} / 0,06 \text{ jam} = 25 \text{ km/jam}$

Jadi untuk kereta kedua diperlukan menurunkan akselerasi sebesar 25 km/jam dan jarak pengereman pada 1,5 km

Untuk permasalahan perlintasan sebidang dengan kendaraan bermotor, kereta membutuhkan jarak pengereman cukup jauh untuk dapat berhenti atau mengurangi kecepatannya sampai 25 Km/jam.

C. Penggunaan RAMS dalam Fasilitas Operasi Kereta Api

Perjalanan penumpang dari tahun 2015-2021 mengalami kontraksi pertumbuhan dengan pertumbuhan penumpang Pulau Jawa dan Sumatera mengalami pertumbuhan tertinggi di tahun 2015 sebesar 203 perjalanan, pada Tabel 1.

Tabel 1. Grafik Rata-rata Perjalanan Penumpang Tahun 2015-2021



Sumber : Statistik Tahun 2021 (DJKA, 2018)

Berdasarkan Tabel 1 (Kementerian Perhubungan Direktorat Jenderal Perkeretaapian, 2021) di atas terlihat bahwa jumlah perjalanan kereta api wilayah Sumatera di tahun 2021 mengalami penurunan sebanyak 68 km dibandingkan tahun 2020 sebanyak 80 km atau penurunan 15%. Faktor tersebut salah satunya dipengaruhi oleh penurunan jumlah penumpang Sumatera dan Jawa pada Januari-Juni 2021 secara

kumulatif sebanyak 81,9 juta orang atau turun 25,85% (Badan Pusat Statistik, 2021)

Meningkatnya perjalanan penumpang diperlukan perawatan optimal dengan memelihara persinyalan di tiap wilayah dengan jumlah persinyalan elektrik sebanyak 346 unit. pada Tabel 2.

Tabel 2. Jumlah Persinyalan Elektrik Menurut Wilayah PerBulan Semester 1 Tahun 2021

No.	Wilayah	Jumlah Persinyalan	Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni
1.	Wilayah Jawa Barat	100	18	18	18	18	18	18
2.	Wilayah Jawa Tengah	100	18	18	18	18	18	18
3.	Wilayah Jawa Timur	100	18	18	18	18	18	18
4.	Wilayah Sumatera Utara	100	18	18	18	18	18	18
5.	Wilayah Sumatera Tengah	100	18	18	18	18	18	18
6.	Wilayah Sumatera Selatan	100	18	18	18	18	18	18
7.	Wilayah Kalimantan	100	18	18	18	18	18	18
8.	Wilayah Sulawesi	100	18	18	18	18	18	18
9.	Wilayah Maluku	100	18	18	18	18	18	18
10.	Wilayah Papua	100	18	18	18	18	18	18
11.	Wilayah Irian Jaya	100	18	18	18	18	18	18
12.	Wilayah Nusa Tenggara Barat	100	18	18	18	18	18	18
13.	Wilayah Nusa Tenggara Timur	100	18	18	18	18	18	18
14.	Wilayah Bali	100	18	18	18	18	18	18
15.	Wilayah Yogyakarta	100	18	18	18	18	18	18
16.	Wilayah DKI Jakarta	100	18	18	18	18	18	18
17.	Wilayah Banten	100	18	18	18	18	18	18
18.	Wilayah Lampung	100	18	18	18	18	18	18
19.	Wilayah Bengkulu	100	18	18	18	18	18	18
20.	Wilayah Aceh	100	18	18	18	18	18	18
21.	Wilayah Papua Barat	100	18	18	18	18	18	18
22.	Wilayah Maluku Utara	100	18	18	18	18	18	18
23.	Wilayah Gorontalo	100	18	18	18	18	18	18
24.	Wilayah Sulawesi Barat	100	18	18	18	18	18	18
25.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
26.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
27.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
28.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
29.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
30.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
31.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
32.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
33.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
34.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
35.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
36.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
37.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
38.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
39.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
40.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
41.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
42.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
43.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
44.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
45.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
46.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
47.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
48.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
49.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
50.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
51.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
52.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
53.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
54.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
55.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
56.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
57.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
58.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
59.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
60.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
61.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
62.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
63.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
64.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
65.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
66.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
67.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
68.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
69.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
70.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
71.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
72.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
73.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
74.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
75.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
76.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
77.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
78.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
79.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
80.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
81.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
82.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
83.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
84.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
85.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
86.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
87.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
88.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
89.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
90.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
91.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
92.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
93.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
94.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
95.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
96.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18
97.	Wilayah Sulawesi Tengah	100	18	18	18	18	18	18
98.	Wilayah Sulawesi Tenggara	100	18	18	18	18	18	18
99.	Wilayah Sulawesi Selatan	100	18	18	18	18	18	18
100.	Wilayah Sulawesi Utara	100	18	18	18	18	18	18

Sumber : Statistik Tahun 2021 (DJKA, 2018)

Berdasarkan Tabel 2 di atas, persinyalan elektrik dengan jumlah yang sama dengan bulan sebelumnya, hal ini disebabkan pemeliharaan fasilitas operasi kereta api dilakukan perawatan dengan baik. Perawatan dan pemeliharaan fasilitas oprasi kereta api sebaiknya dilakukan secara rutin dengan mengikuti pedoman perawatannya.

Demikian halnya dengan kelaikan prasarana perkeretaapian yang diujikan seperti jalur dan bangunan dan fasilitas operasi (Fasop) memerlukan sertifikasi untuk keselamatan perjalanan KA, dimana pada Juni 2021 dengan realisasi mencapai 107 sertifikat pada Tabel 3.

Tabel 3. Realisasi Sertifikat Kelaikan Prasarana Perkeretaapian PerBulan Semester I Tahun 2021

No.	Wilayah	Jumlah Sertifikat	Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni
1.	Wilayah Jawa Barat	10	2	2	2	2	2	2
2.	Wilayah Jawa Tengah	10	2	2	2	2	2	2
3.	Wilayah Jawa Timur	10	2	2	2	2	2	2
4.	Wilayah Sumatera Utara	10	2	2	2	2	2	2
5.	Wilayah Sumatera Tengah	10	2	2	2	2	2	2
6.	Wilayah Sumatera Selatan	10	2	2	2	2	2	2
7.	Wilayah Kalimantan	10	2	2	2	2	2	2
8.	Wilayah Sulawesi	10	2	2	2	2	2	2
9.	Wilayah Maluku	10	2	2	2	2	2	2
10.	Wilayah Papua	10	2	2	2	2	2	2
11.	Wilayah Irian Jaya	10	2	2	2	2	2	2
12.	Wilayah Nusa Tenggara Barat	10	2	2	2	2	2	2
13.	Wilayah Nusa Tenggara Timur	10	2	2	2	2	2	2
14.	Wilayah Bali	10	2	2	2	2	2	2
15.	Wilayah Yogyakarta	10	2	2	2	2	2	2
16.	Wilayah DKI Jakarta	10	2	2	2	2	2	2
17.	Wilayah Banten	10	2	2	2	2	2	2
18.	Wilayah Lampung	10	2	2	2	2	2	2
19.	Wilayah Bengkulu	10	2	2	2	2	2	2
20.	Wilayah Aceh	10	2	2	2	2	2	2
21.	Wilayah Papua Barat	10	2	2	2	2	2	2
22.	Wilayah Maluku Utara	10	2	2	2	2	2	2
23.	Wilayah Gorontalo	10	2	2	2	2	2	2
24.	Wilayah Sulawesi Barat	10	2	2	2	2	2	2
25.	Wilayah Sulawesi Tengah	10	2	2	2	2	2	2
26.	Wilayah Sulawesi Tenggara	10	2	2	2	2	2	2
27.	Wilayah Sulawesi Selatan	10	2	2	2	2	2	2
28.	Wilayah Sulawesi Utara	10	2	2	2	2	2	2
29.	Wilayah Sulawesi Tengah	10	2	2	2	2	2	2
30.	Wilayah Sulawesi Tenggara	10	2	2	2	2	2	2
31.	Wilayah Sulawesi Selatan	10	2	2	2	2	2	2
32.	Wilayah Sulawesi Utara	10	2	2	2	2	2	2
33.	Wilayah Sulawesi Tengah	10	2	2	2	2	2	2
34.	Wilayah Sulawesi Tenggara	10	2	2	2	2	2	2
35.	Wilayah Sulawesi Selatan	10	2	2	2	2	2	2
36.	Wilayah Sulawesi Utara	10	2	2	2	2	2	2
37.	Wilayah Sulawesi Tengah	10	2	2	2	2	2	2
38.	Wilayah Sulawesi Tenggara	10	2	2	2	2	2	2
39.	Wilayah Sulawesi Selatan	10	2	2	2	2	2	2
40.	Wilayah Sulawesi Utara	10	2	2	2	2	2	2
41.	Wilayah Sulawesi Tengah	10	2	2	2	2	2	2
42.	Wilayah Sulawesi Tenggara	10	2	2	2	2	2	2
43.	Wilayah Sulawesi Selatan	10	2	2	2	2	2	2
44.	Wilayah Sulawesi Utara	10	2	2	2	2	2	2
45.	Wilayah Sulawesi Tengah	10	2					

- Asmoko, H. (2014). Pengembangan Kepemimpinan Transformasional dan Peran Diklat Kepemimpinan Pola Baru. *Balai Diklat Kepemimpinan Magelang, 1*, 1–9.
- Astalini, A., Maison, M., Ikhlās, M., & Kurniawan, D. A. (2018). the Development of Students Attitude Instrument Towards Mathematics Physics Class. *Edusains, 10*(1), 46–52. <https://doi.org/10.15408/es.v10i1.7213>
- Badan Pusat Statistik. (2021). *Penumpang Kereta Jawa dan Sumatera Turun 2,03% pada Juni 2021*. [https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2021/08/30/penumpang-kereta-jawa-dan-sumatera-turun-203-pada-juni-2021#:~:text=Secara kumulatif%20jumlah penumpang kereta, sebesar 186%20C1 juta orang](https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2021/08/30/penumpang-kereta-jawa-dan-sumatera-turun-203-pada-juni-2021#:~:text=Secara%20kumulatif%20jumlah%20penumpang%20kereta,sebesar%20186%20juta%20orang).
- Barabadi, A., Tobias Gudmestad, O., & Barabady, J. (2015). RAMS data collection under Arctic conditions. *Reliability Engineering & System Safety, 135*, 92–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.11.008>
- Biro Komunikasi dan Informasi Publik. (2012a). *Directorate General of Railway Transportation Tested ATP*. <http://dephub.go.id/post/read/ditjen-perkeretaapian-ujicobakan-atp-10635?language=id>
- Biro Komunikasi dan Informasi Publik. (2012b). *Penyebab Kecelakaan Kereta Api Didominasi Human Error*. <http://dephub.go.id/welcome/readPost/penyebab-kecelakaan-kereta-api-didominasi-human-error-15056>
- Compare, M., Martini, F., & Zio, E. (2015). Genetic algorithms for condition-based maintenance optimization under uncertainty. *European Journal of Operational Research, 244*(2), 611–623. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.057>
- Dihni, V. A. (2021). *Penumpang MRT Jakarta Meningkat 237% pada September 2021*. <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2021/09/30/penumpang-mrt-jakarta-meningkat-237-pada-september-2021>
- Evans, A. W. (1996). The economics of automatic train protection in Britain. *Transport Policy, 3*(3), 105–110. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0967-070X\(96\)00015-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0967-070X(96)00015-7)
- Hashina, N. H. (2022). *Dampak Modernisasi Transportasi Darat dan Sejarah Perkembangan*. <https://tirto.id/dampak-modernisasi-transportasi-darat-dan-sejarah-perkembangan-gbjm>
- Hennes, R. G. (1969). *Fundamentals of transportation engineering*. McGraw-Hill.
- Hidayat, N. A., Usman, U. K., & Indrayanto, A. (2016). Analisis Performansi Teknologi Radio Trunking Digital Studi Kasus PT Pelindo II Tanjung Priok Jakarta Utara. *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SNATi)*, 1–7.
- Kamaluddin, R., & Krisnawati, L. (2003). *Ekonomi transportasi : karakteristik, teori, dan kebijakan*. Ghalia Indonesia.
- Kementerian Perhubungan Direktorat Jenderal Perkeretaapian. (2021). *Buku Statistik Bidang Perkeretaapian Semester I Tahun 2021*.
- Kementerian Perhubungan Ditjen Perkeretaapian. (2011). Rencana Induk Perkeretaapian Nasional (PM No.43 Tahun 2011). In *Rencana Induk Perkeretaapian Nasional* (Issue 8).
- Kim, M., Kim, M., Kim, D., & Lee, J. (2012). Analysis of Distance between ATS and ATP Antenna for Normal Operation in Combined On-board Signal System. *International Journal of Railway, 5*(2), 77–83. <https://doi.org/10.7782/ijr.2012.5.2.077>
- Len Industry. (2021). *SiLVue Len Industri, Persinyalan Kereta Produk Indonesia*. <https://www.len.co.id/silvue-len-industri-persinyalan-kereta-produk-indonesia/>
- Lundteigen, M. A., Rausand, M., & Utne, I. B. (2009). Integrating RAMS engineering and management with the safety life cycle of IEC 61508. *Reliability Engineering & System Safety, 94*(12), 1894–1903. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.06.005>
- Martorell, S., Sanchez, A., & Carlos, S. (2007). A tolerance interval based approach to address uncertainty for RAMS+C optimization. *Reliability Engineering & System Safety, 92*(4), 408–422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.12.013>
- Menteri Perhubungan Republik Indonesia. (2015). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 24 Tahun 2015*.
- Menteri Perhubungan Republik Indonesia. (2018). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia No PM 45 Tahun 2018 Tentang Persyaratan Teknis Peralatan Telekomunikasi Perkeretaapian*.
- Miro, F., & Hardani, W. (2005). *Perencanaan transportasi untuk mahasiswa, perencana, dan praktisi*. Erlangga.

- Nikitin, A., Manakov, A., Kushpil, I., Kostrominov, A., & Osminin, A. (2020). On the issue of using digital radio communications of the DMR standard to control the train traffic on Russian railways. *2020 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2020 - Proceedings*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EWDTs50664.2020.9224707>
- Siregar, R. A. (2020). *2 Tahun Beroperasi, LRT Palembang Angkut 5,1 Juta Penumpang*. <https://news.detik.com/berita/d-5105183/2-tahun-beroperasi-lrt-palembang-angkut-51-juta-penumpang>
- Subarkah, T. (2019). *Modal Share Angkutan Umum 2020 Jadi 35,6%*. <https://mediaindonesia.com/megapolitan/275174/modal-share-angkutan-umum-2020-jadi-356>
- Tamtomo, A. B. (2019). *INFOGRAFIK: Fakta Seputar LRT Jabodetabek yang Beroperasi 2021*. <https://www.kompas.com/tren/read/2019/10/15/200500265/infografik--fakta-seputar-lrt-jabodetabek-yang-beroperasi-2021>
- Torres-Echeverría, A. C., Martorell, S., & Thompson, H. A. (2009). Design optimization of a safety-instrumented system based on RAMS+C addressing IEC 61508 requirements and diverse redundancy. *Reliability Engineering & System Safety*, *94*(2), 162–179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.02.010>
- Wijaya, I., Malkhamah, S., & Subarmono. (2015). *Kajian Automatic Train Protection (ATP) untuk Meningkatkan Keselamatan Perkeretaapian*. Universitas Gadjah Mada.
- Young, T., & Naweed, A. (2017). The Impact of ATP on Ways of Working in Australian Rail: Preliminary Findings from the Driver Perspective. *Contemporary Ergonomics and Human Factors 2017, May*. <https://publications.ergonomics.org.uk/uploads/The-Impact-of-Automatic-Train-Protection-on-Ways-of-Working-in-Australian-Rail-Preliminary-Findings-from-the-Driver-Perspective.pdf>