

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA PIKIR

2.1 Pendahuluan

Perawatan prasarana perkeretaapian merupakan kegiatan yang dilakukan untuk mempertahankan keandalan prasarana perkeretaapian agar laik operasi (Kementerian Perhubungan, 2011b), sedangkan penilaian kerusakan jalan rel yang paling mendekati adalah geometri jalan rel, karena geometri jalan rel merupakan salah satu parameter awal yang menunjukkan kerusakan jalan rel dan merupakan petunjuk untuk dilakukan pemeliharaan prasarana jalur kereta api (Jovanovic, 2004).

Pembahasan dalam penelusuran pustaka ini akan menjelaskan lebih rinci mengenai beberapa pengetahuan dengan dua sasaran. Pertama mengutarakan pengetahuan, dan pengalaman yang memberikan kejelasan dan penguatan pernyataan yang telah disampaikan di pendahuluan. Kedua memuat hasil penelusuran berbagai pengetahuan teoritis dan konseptual yang relevan dengan penelitian ini, seperti teori-teori perawatan jalan rel, perawatan yang berjalan di perkeretaapian Indonesia, kondisi prasarana perkeretaapian dan *track quality index (TQI)*. Serta pembentukan model dan metode pengukuran dalam menyusun kerangka teoritis model kategori TQI untuk prasarana kereta api di Pulau Jawa, Indonesia.

2.1.1 Kondisi Umum Infrastruktur Jalan Kereta Api

Penyelenggaraan perkeretaapian di Indonesia diselenggarakan dengan dasar asas adil, manfaat, dan merata dengan memperhatikan keseimbangan antara keterpaduan moda serta kepentingan umum. Perkeretaapian juga bertujuan untuk meningkatkan mobilitas perpindahan orang, dan atau barang secara massal, pertumbuhan ekonomi sebagai motor pembangunan nasional sehingga dapat menunjang pemerataan (Pemerintah Republik Indonesia, 2007b). Fenomena yang terjadi saat ini adalah perkembangan perkeretaapian tumbuh hanya di Pulau Jawa, dan sebagian pulau Sumatera. Kontribusi moda kereta api berdasarkan pangsa angkutan secara nasional tergolong masih rendah dibandingkan dengan moda transportasi angkutan lainnya.

Dalam pengembangan kereta api nasional, pemerintah memegang peran sangat penting karena melibatkan pendanaan, investasi, regulasi, serta kebijakan pengembangan.

Perkeretaapian di Indonesia memiliki keterbatasan dalam pengembangannya yaitu berhubungan dengan pendanaan, SDM, kelembagaan bidang kereta api. Dalam hal kondisi fisik sarana, dan prasarana kereta api memiliki banyak kendala dalam hal pemeliharaan, perencanaan, pengoperasian, dan pendanaan yang terbatas. Pengembangan sistem perawatan sarana dan prasarana yang didukung peralatan yang memadai, penjaminan ketersediaan alat bantu keselamatan fasilitas perkeretaapian, beserta prosedur penggunaannya. Alat bantu keselamatan harus terjamin ketersediaannya, juga kondisinya selalu siap untuk digunakan pada kondisi darurat dengan prosedur yang telah ditetapkan (Kementerian Perhubungan, 2018).

Perkeretaapian saat ini memiliki dua wilayah operasional meliputi Pulau Jawa dengan sembilan Daerah Operasi yang disingkat Daop, dan Pulau Sumatera memiliki empat Divisi Regional (Divre). Baik Daop dan Divre memiliki kewenangan operasi dan pemeliharaan prasarana kereta api seperti terlihat pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Data Prasarana Jalan Rel di Pulau Jawa dan Pulau Sumatera

No.	Uraian	Pulau Jawa	Pulau Sumatera	Jumlah
1.	Jalan rel beroperasi (km'sp)	4.183,23	1.451,12	5.634,36
2.	Jalan rel tidak beroperasi (km'sp)	1.099,16	298,51	1.397,67
3.	Stasiun beroperasi (sta.)	460,00	123,00	583,00
4.	Stasiun tidak beroperasi (sta.)	56,00	81,00	137,00
5.	Wesel beroperasi (unit)	3.581,00	1.031,00	4.612,00
6.	Wesel tidak beroperasi (unit)	12,00	110,00	122,00
7.	Lengkung (km)	905,27	411,17	1.316,40
8.	Perlindungan sebidang (JPL)	3.518,00	1.162,00	4.680,00
9.	Perlindungan tidak sebidang (JPL)	360,00	36,00	396,00

(Sumber: Buku aset prasarana PT.KAI Persero, 2019)

Perawatan prasarana jalan rel di lintas raya dan cabang menjadi dilematis dimana kewenangan pembangunan jalan rel oleh regulator dalam hal ini yang ditunjuk pemerintah adalah Kementerian Perhubungan, Direktorat Jenderal Perkeretaapian (DJKA), dan PT. Kereta Api Indonesia sebagai operator, sekaligus perusahaan yang harus merawat prasarana milik pemerintah. Walaupun dana perawatan dibebankan kepada pemerintah, kadangkala pengadaan material oleh DJKA belum tentu sesuai dengan kebutuhan pemeliharaan prasarana jalan rel di lapangan (Kementerian Perhubungan, 2018). Sesuai dengan konteks penelitian ini, berikut pada Tabel 2.2 disajikan kondisi jalan KA dengan nilai *Track Quality Index* (TQI) sebagai acuan untuk mengukur performansi layanan prasarana jalan rel.

Tabel 2.2 Realisasi Pengukuran Kondisi Jalan Rel di Pulau Jawa

No.	Uraian	Panjang Rel (km'sp)				Keterangan
		2019	2020	2021	2022	
1.	Kategori 1 ($TQI \leq 20$)	1.989,41	2.039,36	2.349,96	2.689,52	Baik/Nyaman
2.	Kategori 2 ($20 \leq TQI \leq 35$)	1.492,66	1.915,74	1.681,46	1.468,43	Sedang/Aman
3.	Kategori 3 ($35 \leq TQI \leq 50$)	244,88	284,59	185,41	206,86	Rusak ringan/Waspada
4.	Kategori 4 ($TQI > 50$)	42,70	50,97	15,68	21,48	Rusak berat/Bahaya
	Jumlah	3.769,65	4.290,66	4.232,51	4.386,29	

(Sumber: Laporan realisasi *TQI* PT.KAI Persero)

Pada Tabel 2.2 dapat dilihat realisasi pengukuran kondisi jalan rel di Pulau Jawa, dimana belum semua jalur kereta api di lintas raya dan cabang terukur. Realisasi pengukuran menerangkan kondisi geometri jalan rel disebutkan dengan nilai Indeks Kualitas Jalan Rel atau *Track Quality Indeks* (TQI). Nilai TQI tersebut menjelaskan kondisi dan kualitas jalan rel yang memiliki parameter geometri antara lain:

1. Peninggian (*super elevation*);

Perbedaan ketinggian antara bagian kepala rel kanan dan kiri bagian dalam yang bersentuhan dengan *flens* roda kereta api dalam milimeter.

2. Angkatan (*levelling*);

Ketidakrataan secara vertikal bagian kepala rel dalam milimeter.

3. Listringan (*lining*);

Ketidakrataan secara horizontal bagian kepala rel dalam milimeter.

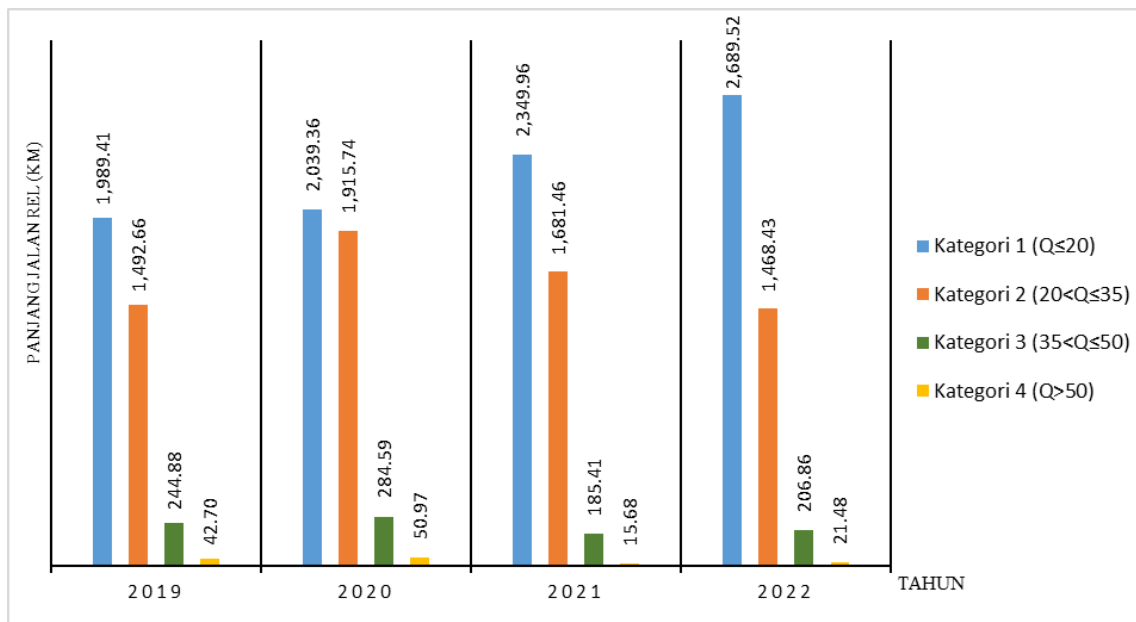
4. Lebar sepur (*track gauge*).

Jarak bagian dalam antara kedua kepala rel dalam milimeter.

Data hasil pengukuran parameter geometri jalan rel oleh kereta ukur, diolah untuk mendapatkan nilai *track quality index* jalan rel. Hasil pengolahan data dari kereta ukur di peroleh nilai TQI yang memuat nilai kualitas dari parameter geometri pada jalan rel. Nilai dari setiap parameter tersebut kemudian dijumlahkan dan dibuat nilai rata-rata per 200 m, sehingga akan muncul angka yang merupakan indeks nilai kualitas jalan rel di suatu tempat. Jalan rel yang memiliki nilai dengan $TQI < 20$ artinya kondisi jalan rel tersebut berada dalam kondisi baik sekali sehingga dapat dilewati oleh KA dengan kecepatan 100 s/d 120 km/ jam. Jalan rel dengan nilai $TQI < 20 \leq 35$ kondisi jalan rel artinya jalan rel dalam kondisi baik dan sehingga dapat dilewati KA dengan kecepatan 80 s/d 100 km/jam. Index TQI dengan nilai $35 < TQI \leq 50$ menunjukkan bahwa kondisi geometri jalan rel yang

sedang dan sehingga dapat dilewati oleh KA dengan kecepatan 60 s/d 80 km/jam. Angka index dengan nilai TQI > 50 memiliki arti bahwa jalan rel ada dalam kondisi yang jelek sehingga kecepatan yang diizinkan untuk melewatinya adalah 40 s/d 60 km/jam.

Tabel 2.2 dan Gambar 2.1 menunjukkan pada tahun 2022 kondisi geometri jalan rel dengan kondisi baik cukup mendominasi sebesar 2.689,52 km'sp atau 61,32% namun terlihat juga jalan rel dalam kondisi rusak ringan sebesar 4,72% atau 206,86 km'sp, dan rusak berat sebesar 0,49% atau 21,48 km'sp.



Gambar 2.1 Grafik Kondisi Jalan Rel Berdasarkan Kategori TQI

Penelitian kerusakan jalan rel, contoh yang paling tepat adalah mengenai geometri jalan kereta api, hal tersebut tertuang dalam *Railway Track Quality Assesment and Related Decision Making*. Geometri jalan kereta api dapat menjelaskan indikasi awal salah satu kerusakan jalan kereta api sehingga menjadi dasar dilakukan penggantian dan perawatan prasarana jalan kereta api (Jovanovic, 2004).

2.1.2 Struktur Organisasi Perkeretaapian di Indonesia

Sejarah perkeretaapian di Indonesia sudah ada sebelum Indonesia merdeka, tercatat sejak tanggal 17 Juni 1864 di bawah perusahaan kereta api swasta milik pemerintah Hindia Belanda, dan pada tahun 1942 – 1945 perkeretaapian Indonesia diambil alih oleh Pemerintah Jepang, dan berubah nama menjadi Rikuyu Sokyuku. Awal kemerdekaan Indonesia di bentuk badan Djawatan Kereta Api (DKA) pada tanggal 28 September 1945 serta terjadi perubahan struktur organisasi menjadi Perusahaan Negara Kereta Api pada

25 Mei 1950, Perusahaan Jawatan Kereta Api (PJKA) tahun 1971, Perusahaan Umum Kereta Api (PERUMKA) tahun 1991, PT. Kereta Api bertransformasi menjadi PT. Kereta Api Indonesia Persero (PT. KAI) pada tahun 1998. Pada tahun 2005 dibentuklah Direktorat Jenderal Perkeretaapian di bawah Kementerian Perhubungan selaku wakil pemerintah sebagai regulator (Juraid dkk., 2020).

Pada tahun 2005 setelah terbentuknya Direktorat Jenderal Perkeretaapian (DJKA) di bawah Kementerian Perhubungan sebagai regulator atau penyedia prasarana dan sarana kereta api di Indonesia, pada tahun 2007 ditetapkan Undang-Undang Nomor 23 Tahun 2007 tentang Perkeretaapian sehingga ada pemisahan fungsi PT. Kereta Api Indonesia hanya sebagai operator hanya mengoperasikan perjalanan kereta api, perawatan prasarana, dan sarana kereta api.

2.2 Perawatan Jalur Kereta Api

Perawatan jalur kereta api merupakan kegiatan mempertahankan keandalan konstruksi yang terbuat dari baja, beton atau konstruksi yang terletak dipermukaan tanah, di bawah, dan diatas atau bergantung beserta perangkatnya yang mengarahkan jalannya kereta api. Jalur kereta api sendiri mempunyai makna sebagai jalur yang terdiri dari rangkaian petak jalan rel yang meliputi ruang manfaat jalur kereta api, ruang milik jalur kereta api, dan ruang pengawasan jalur kereta api, termasuk bagian atas dan bawahnya yang diperuntukkan bagi lalu lintas kereta api, sedangkan jalan rel merupakan suatu kesatuan konstruksi yang terbuat dari baja, beton, atau konstruksi lainnya yang terletak di permukaan, di bawah, dan di atas tanah atau bergantung beserta perangkatnya yang mengarahkan jalannya kereta api (Kementerian Perhubungan, 2011c). Perencanaan perawatan jalur kereta api bertujuan untuk mengetahui dasar perawatan jalan rel, kebutuhan material jalan rel beserta kondisi fisiknya, kemudian frekuensi penilaian jalur kereta api bertujuan untuk merancang perawatan jalan kereta api agar tepat guna dan efektif di dalam pelaksanaannya (Lutfi, 2011).

2.2.1 Definisi Perawatan Jalan Rel

Kata rawat dalam kamus besar bahasa Indonesia mempunyai makna pelihara, urus dan jaga, sedangkan perawatan bermakna proses, cara, perbuatan merawat, pemeliharaan dan penyelenggaraan untuk kata pelihara sendiri memiliki arti jaga dan rawat, sedangkan kata pemeliharaan berarti proses, cara, perbuatan memelihara, penjagaan dan perawatan.

Dengan demikian perawatan dan pemeliharaan memiliki makna yang sama untuk proses, cara, urus dan jaga, dapat dinyatakan bahwa perawatan merupakan proses untuk mempertahankan, menjaga kondisi kemampuan pelayanan jalan rel yang laik untuk operasi kereta api, sehingga dapat memberikan kenyamanan dan keamanan bagi pengguna moda transportasi kereta api. Perawatan memiliki beberapa definisi seperti yang terlihat pada Tabel 2.3 di bawah ini:

Tabel 2.3 Definisi Perawatan Jalan Rel

Menurut	Definisi
Kementerian Perhubungan	Perawatan prasarana perkeretaapian adalah kegiatan yang dilakukan untuk mempertahankan keandalan prasarana perkeretaapian agar tetap laik operasi (<u>Kementerian Perhubungan, 2011b</u>).
Sistem perawatan jalan rel dan jembatan terencana, PT. Kereta Api Indonesia (Persero)	Perawatan jalan rel adalah kegiatan yang dilakukan untuk mempertahankan, memperbaiki, dan mengembalikan material dan geometri jalan rel agar kondisinya tetap laik untuk operasi sehingga kereta api dapat berjalan dengan aman dan nyaman pada kecepatan yang diijinkan (<u>PT. Kereta Api Indonesia, 2012a</u>).
Standar pemeliharaan dan keselamatan jalur kereta api, Departemen Pertahanan, Amerika Serikat	Perawatan adalah perbaikan yang dilakukan sebelum kondisi kerusakan yang melebihi standar keselamatan menjadi lebih parah (UFC, 2008).
Coenraad Esveld	Perawatan jalan rel berarti keseluruhan proses pemeliharaan dan penggantian yang diperlukan untuk menjamin bahwa jalan rel memenuhi standar minimum kualitas dan keamanan dengan biaya minimum (Esveld, 2001).
Sedghi dan tim	Perawatan adalah mengembalikan kondisi komponen jalan rel ke kondisi sebaik mungkin, dan kondisi minimal jalan rel sesaat sebelum terjadi kegagalan (Sedghi dkk., 2021).

Perawatan jalan rel dapat dinyatakan sebagai kegiatan yang dilakukan untuk mempertahankan, memperbaiki dan mengembalikan kondisi jalan rel pada kondisi sebaik mungkin, untuk menjamin keamanan, kenyamanan dan keandalan agar dapat laik operasi pada kecepatan yang diizinkan.

2.2.2 Klasifikasi Perawatan Jalur Kereta Api

Perawatan jalur kereta api dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu perawatan yang terencana, dan perawatan tidak terencana, secara detail dijelaskan berikut ini:

1. Perawatan Terencana

Perawatan terencana merupakan sebuah kegiatan perawatan yang direncanakan yang bertujuan untuk mencegah terjadinya kegagalan pada sistem jalur kereta api (*preventive*

maintenance) dan memperbaiki kerusakan jalur kereta api (*corrective maintenance*) (PT. Kereta Api Indonesia, 2012e). Perawatan terencana dibagi lagi menjadi dua bagian perawatan yaitu: yang bersifat pencegahan, dan perawatan yang bersifat korektif:

- a. Perawatan pencegahan (*preventive maintenance*) merupakan perawatan dengan tujuan untuk menjaga kondisi konstruksi jalan rel yang dilakukan dengan berkala agar mempunyai ketahanan sesuai dengan usia teknis yang direncanakan. Perawatan pencegahan merupakan pemeriksaan dan perbaikan ringan yang tidak membutuhkan pengadaan material dalam jumlah besar, serta dapat dilakukan oleh tenaga regu pemeliharaan.
- b. Perawatan korektif (*corrective maintenance*) merupakan perawatan yang dilakukan pada kerusakan jalur rel yang bertujuan mengembalikan fungsi dengan cara penambahan, pergantian ataupun perbaikan material dan geometri berdasarkan hasil pengecekan kerusakan atau umur teknis material yang telah usang. Perawatan ini membutuhkan pengadaan material dengan jumlah tenaga skala besar, dengan pelaksanaan pekerjaan membutuhkan pihak ketiga dengan kontrak pekerjaan.

2. Perawatan Tidak Terencana

Perawatan tidak terencana dilakukan untuk menangani kegiatan yang belum terprogram dan harus segera ditangani guna mencegah atau menanggulangi gangguan yang berdampak terhadap operasional dan keselamatan perjalanan kereta api. Perawatan ini dilakukan oleh regu perawatan yang bersifat tetap dan siap sedia, regu satuan kerja ini memiliki lingkup kegiatan meliputi:

- a. Perawatan yang bersifat darurat, seperti kegiatan perbaikan karena bencana alam yang perlu segera ditindaklanjuti agar jalur kereta api dapat beroperasi dengan kecepatan yang diizinkan.
- b. Pemeliharaan yang bersifat spesifik/teknis, merupakan kegiatan yang membutuhkan kompetensi dan keterampilan yang spesifik.

Berbeda juga dengan perawatan tidak terencana (*reaktif maintenance*) dengan perawatan terencana (*prediktif maintenance*), perawatan terencana dapat menghindari biaya berlebihan yang biasanya dikeluarkan oleh biaya perawatan tidak terencana, karena dapat mencegah komponen jalan rel sebelum terjadi kerusakan dan memastikan dapat berfungsi dengan baik selama umur layan (White, 1998).

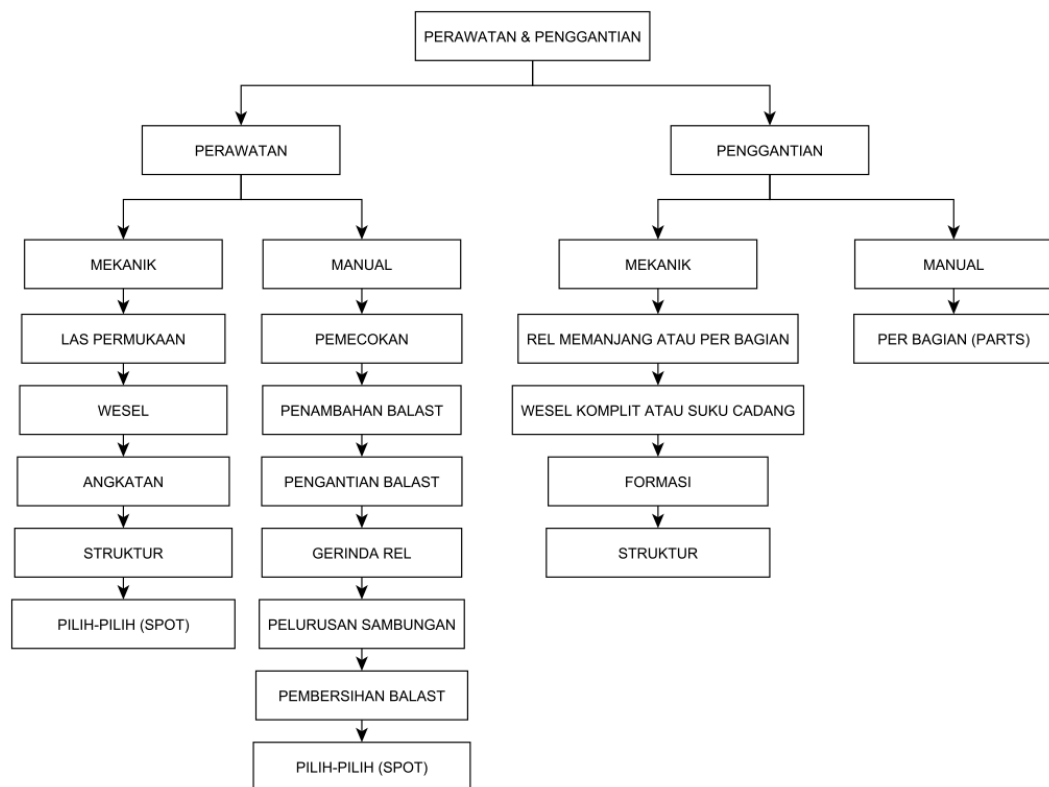
2.3 Perawatan Jalan Rel

Pengeluaran biaya terbesar dalam industri perkeretaapian adalah biaya perawatan dan biaya operasi. Apabila anggaran perawatan dapat dihemat, secara finansial keuntungan akan lebih besar didapat oleh perusahaan kereta api. Dengan keuntungan yang besar maka pelayanan kepada masyarakat dapat tercapai dengan baik dan biaya yang dikeluarkan rendah (Lutfi, 2011).

Jalan rel harus dipelihara dengan baik agar kereta api dapat melintas aman dengan kecepatan maksimum yang diizinkan serta dapat memberikan kenyamanan yang tinggi untuk penumpang selama perjalanan (Chandra & Aqarwal, 2013). Setiap penyelenggara prasarana perkeretaapian wajib melaksanakan perawatan prasarana perkeretaapian untuk mempertahankan keandalan prasarana agar tetap laik operasi. Perawatan prasarana perkeretaapian, harus dilaksanakan oleh tenaga yang memiliki kompetensi untuk melaksanakan perawatan prasarana perkeretaapian (Dwiatmoko, 2013).

Untuk mencapai kondisi dimana jalan rel mampu dilewati kereta api dengan kecepatan dan beban gandar yang diizinkan, kualitas prasarana kereta api tidak hanya ditentukan oleh mutu suatu material prasarana dan metode perawatannya, tetapi juga perlu didukung oleh individu yang memiliki profesionalitas dalam bekerja (PT. Kereta Api Indonesia, 2012f).

Pemeliharaan jalan rel merupakan serangkaian tindakan prediktif, preventif, dan korektif dalam mengidentifikasi, dan mengatasi penurunan nilai elemen jalan rel dengan tujuan memperpanjang masa layan prasarana, dan meningkatkan keandalan operasi kereta api (Zhang dkk., 2013). Perawatan jalan rel juga diartikan sebagai aktifitas yang direncanakan dengan tujuan meminimalkan keausan, kerusakan, dan resiko kegagalan pada jalan rel melalui pendekatan berbasis kondisi dan jadwal rutin (Profillidis, 2014). Perawatan jalan rel juga merupakan pendekatan multidisiplin yang mengevaluasi geometri jalan rel, material, sistem drainase, dan stabilitas batu balas untuk memastikan kelaikan optimal prasarana kereta api (Jovanovic, 2004). Gambar 2.2 di bawah ini merupakan sebuah proses perawatan dan proses penggantian jalan rel.



Gambar 2.2 Skema perawatan dan proses penggantian (Esveld, 2001)

Proses perawatan pada jalan rel harus mempertimbangkan keamanan jalan rel, karena sifat perawatan pada jalan rel adalah untuk mencegah (*preventive*) kejadian yang tidak diinginkan. Perawatan jalan rel yang terkait dengan kenyamanan maka sifat perawatannya adalah memperbaiki (*corrective*), dengan pertimbangan ekonomi agar solusi yang ditawarkan dapat efektif sehingga keamanan dalam perawatan dapat terjamin dan dapat mencegah kerusakan jalan rel lebih awal (Andrade, 2008).

Perkeretaapian memiliki sebuah sistem yang cukup rumit dari moda transportasi yang lain. Pengoperasian antara sarana kereta api dan prasarana merupakan kedua hal yang saling mempengaruhi. Poin yang pertama, kualitas sarana kereta api (*rolling stock*) mempengaruhi tingkat kerusakan prasarana kereta api, maka diperlukan strategi dalam perawatan dan perbaikan infrastruktur yang teliti. Poin yang kedua adalah kerusakan infrastruktur jalan rel, masuk dalam kategori perawatan yang telah direncanakan sebelumnya, oleh sebab itu akan mempengaruhi tingkat reliabilitas operasional kereta api (Zoeteman, 2001). Perawatan merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari suatu subsistem operasi. Pemeliharaan yang tidak teratur dan terencana dapat mengakibatkan

keandalan operasi terhambat, bahkan dalam beberapa hal dapat bersifat fatal (Kramadibrata, 2006).

Pemeliharaan jalan rel harus memiliki suatu manajemen pemeliharaan. Suatu manajemen pemeliharaan jalan rel yang efisien bergantung pada ketersediaan data yang dihasilkan dengan cara manual atau dengan pemeriksaan lapangan dengan alat bantu kereta ukur. Kerusakan jalan rel memiliki model kesesuaian antara perencanaan perawatan jalur rel yang telah ada dengan penerapan perawatan di lapangan. Model tersebut mempertimbangkan biaya serta ketersediaan sumber daya yang tersedia.

Data dari hasil kereta ukur, pengamatan langsung lapangan serta ketersediaan anggaran yang telah ditetapkan, digunakan sebagai dasar pemeliharaan dan penggantian komponen jalan rel. Kondisi jalan rel yang baik atau biasa disebut *Acceptable* memiliki definisi yang tertuang pada *American Public Transportation Association* (APTA) dan *American Railway Engineering and Maintenance of Way Association* (AREMA) adalah jalan rel harus memenuhi persyaratan agar dapat dilewati oleh kereta api yang sesuai dengan kecepatan operasi yang telah direncanakan sebelumnya, jika ditemukan cacat pada jalan rel yang tidak memenuhi standar perencanaan, maka kondisi jalan rel yang dinilai tersebut masuk dalam kategori tidak dapat diterima (*unacceptable condition*) untuk beroperasi (Arema, 2007).

Perkeretaapian merupakan sebuah sistem transportasi yang membutuhkan proses perawatan infrastruktur yang kompleks, serta tidak mudah ditangani. Sarana kereta api mengalami proses perusakan dimulai saat terjadi interaksi diantara sarana dengan prasarana, kemudian proses perusakan semakin cepat karena beban lintas yang tinggi. Oleh karena itu kegiatan perawatan jalan rel yang baik serta memiliki perencanaan yang sesuai, diharapkan mampu mencegah kerusakan yang terjadi dengan minimal dan dapat dipertahankan selama umur layan jalan rel (Esveld, 2001). Kegiatan pemeliharaan jalan rel terbagi antara lain yaitu geometri rel, kemudian pemeliharaan bantalan dan penambat, selanjutnya adalah pemeliharaan tubuh jalan, dilanjutkan pemeliharaan lapisan batu balas, perlintasan sebidang, dan terakhir adalah pemeliharaan lingkungan, kebersihan sekitar jalan rel.

Proses pemeliharaan pada geometri jalan rel dikelompokkan menjadi pemeliharaan sewaktu-waktu dengan tujuan untuk memperbaiki kerusakan setempat saja atau biasa disebut *spot maintenance* dan kegiatan pemeliharaan secara sistematis atau terencana

yang dilaksanakan dengan bantuan mesin berat yang biasa disebut pemeliharaan secara mekanis atau *mechanized maintenance*. Perawatan dengan cara mekanisasi terbagi menjadi beberapa kegiatan yaitu:

1. Pemecokan atau *tamping* merupakan perawatan dengan tujuan memperbaiki tingkat kerataan rel, kemudian pertinggian serta alinyemen rel menggunakan bantuan mesin pecok.
2. Perbaikan profil batu balas, adalah proses pengembalian kondisi profil lapisan batu balas yang telah disesuaikan dengan persyaratan serta menggunakan alat bantu *plasser ballast regulator (PBR)*.
3. Menggerinda rel, memiliki berfungsi untuk membuang karat serta perbaikan profil sambungan pada las rel dengan alat bantu mesin gerinda khusus untuk rel.
4. Perkuatan pada sambungan rel berfungsi untuk memperkuat sambungan las yang terletak pada rel.
5. Pembersihan lapisan batu balas, bertujuan untuk pembersihan lapisan batu balas dari benda asing seperti lumpur, debu, tanah, dan lainnya menggunakan alat bantu mesin *ballast cleaner*.

Kegiatan perawatan pencegahan dilakukan pada kondisi jalan rel yang mengarah pada kondisi kegagalan namun belum terjadi sehingga dapat langsung ditangani. Perbaikan yang dilakukan pada kondisi kegagalan telah terjadi maka selanjutnya segera dilakukan perbaikan jalan rel. Pendekatan perawatan tersebut dapat disamakan dengan *spot maintenance*. Kegiatan *spot maintenance* secara umum dilakukan dengan cara manual, dengan bantuan alat mesin bantu dan regu pekerja lapang dengan jumlah kecil. Kegiatan perawatan yang dilaksanakan merupakan perbaikan kerataan rel dan pemadatan lapisan batu balas dengan bantuan mesin *compactor* dan didukung dengan dongkrak untuk mengangkat rel. Selanjutnya kegiatan perawatan dengan cara sistematis diusahakan pelaksanaannya menggunakan bantuan mesin berat. Proses pelaksanaannya perlu dilakukan penutupan lintas atau jalan kereta api karena merupakan salah satu kegiatan penting pada proses pelaksanaan perawatan (Esveld, 2001). Pekerjaan perawatan dengan cara manual terbagi menjadi beberapa pelaksanaan yaitu:

1. Kegiatan pengangkatan rel dan pemecokan menggunakan alat bantu pemadat getar atau belincong atau gancu
2. Pemadatan batu balas menggunakan metode *measured shovel packing*.

3. Pengelasan elektrik dan thermit.

4. Perbaikan lebar sepur (*gauge*).

Geometri jalan rel yang rusak dapat menyebabkan terjadinya beban dinamis yang sangat besar. Cacat geometri terjadi biasanya ada dua hal yang mempengaruhi, yang pertama terjadi pada proses pembuatan rel yang biasa disebut dengan cacat pabrik, dan kedua terjadi setelah dioperasikan dalam bentuk lekukan rel. Cacat geometri tersebut dapat diperbaiki dengan cara menggerus rel dengan bantuan alat gerinda/*abrasive stone*. Proses menggerinda rel secara umum terdapat dua cara yaitu menggunakan gerinda putar dan menggunakan alat gerinda bergerak secara bolak balik arah longitudinal. Mesin gerinda Matisa MP12 yang terlihat pada Gambar 2.3, dengan cara batu gerinda diletakkan pada rangka sepanjang 1,0 m yang bergerak secara bolak-balik dengan arah longitudinal. Gerakan ini akan menggerus permukaan rel yang bersentuhan dengan gerinda. Batu gerinda secara perlahan akan menyesuaikan profil kepala rel menjadi rata dan halus.



Gambar 2.3 Mesin gerinda Matisa MP12
Sumber: dokumentasi penulis

Pekerjaan perbaikan geometri rel ini biasanya dilakukan bersamaan dengan perbaikan hasil pengelasan sambungan rel agar memenuhi bentuk profil rel yang ada.

2.3.1 Perawatan Geometri

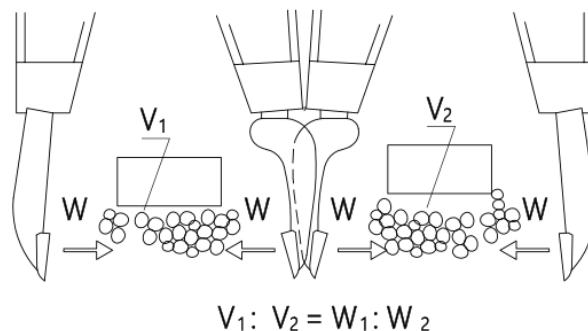
Pemeliharaan jalan rel dengan tujuan untuk memperbaiki geometri jalan rel menggunakan peralatan mekanis merupakan suatu teknologi baru pada bidang pemeliharaan. Alat bantu berupa mesin pemeliharaan memiliki kemajuan teknologi yang dapat menghasilkan kinerja pemeliharaan yang baik terhadap keandalan operasi jalan rel, kualitas jalan rel dan produktivitas perawatan jalan rel. Pemecokan jalan rel untuk memperbaiki angkatan, listringan, pertinggian dan lebar sepur dengan tepat, untuk memperbaiki posisi geometris pada jalan rel (rel dan bantalan) (Marschnig dkk., 2021). Gambar 2.4 memperlihatkan

salah satu mesin pemecokan batu balas yang digunakan untuk pemeliharaan jalan rel jenis KA *Plasser Theurer 09-32 CSM*.

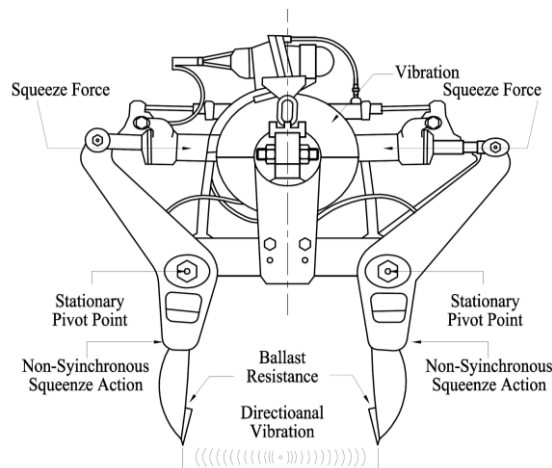


Gambar 2.4 Mesin untuk merawat jalan rel tipe Plasser Theurer 09- 32 CSM
Sumber: dokumentasi penulis

Mesin *multi tie tamper* merupakan sebuah mesin pecok (*tamping*) untuk mengangkat rel sampai ketinggian yang telah ditetapkan oleh sistem pengukuran dan memadatkan batu balas di bawah bantalan beton. Mesin tersebut juga mampu menempatkan rel secara lateral. Proses selanjutnya adalah meletakkan batu balas di bawah bantalan yang telah dipadatkan dengan mata pecok. Gambar 2.5 menunjukkan cara kerja pemecokan menggunakan alat bantu mesin *duomatic* yang memecok batu balas di bawah dua bantalan dengan waktu bersamaan. Cara kerja pemecokan ganda dinamis Gambar 2.5, dan pemecokan konsep tunggal dapat terlihat pada Gambar 2.6. Poin penting dari mesin pecok adalah kualitas proses pemecokan dan kinerja pemecokan yang terlihat dari panjang hasil pemecokan. Proses pemecokan dilakukan dengan cara tidak sinkron serta getaran alat yang terarah. Maksud dari tidak sinkron yaitu masing-masing mata pecok bergerak dengan kekuatan sama namun tidak saling berhubungan. Hal tersebut dilakukan untuk memastikan kegiatan pemadatan yang seragam. Pada lapisan batu balas di bawah bantalan pemadatan dilaksanakan dengan setara. Tenaga pemadatan diatur dengan menyesuaikan kondisi yang ada di lapisan batu balas (Esveld, 2001).



Gambar 2.5 Prinsip pemecokan ganda dinamis

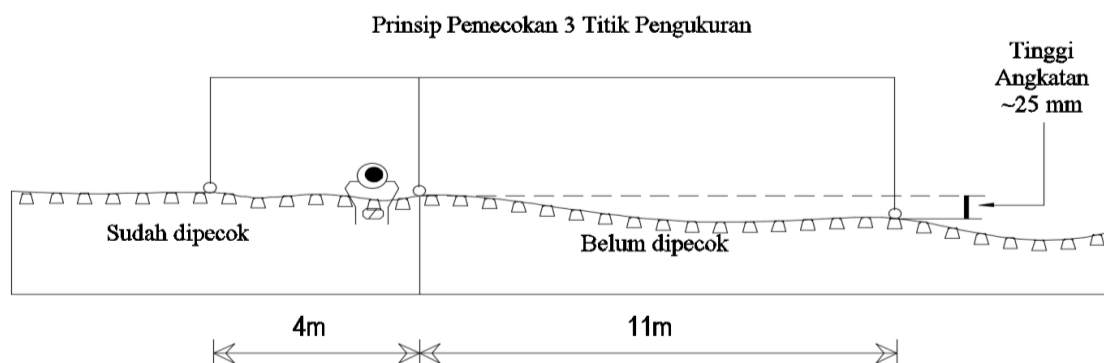


Gambar 2.6 Unit pemecok tunggal dengan *tamping unit*

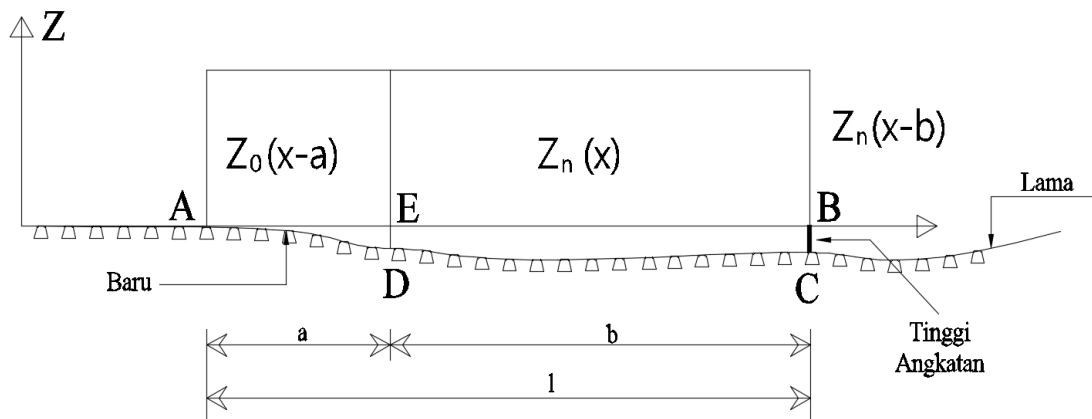
Proses perawatan geometri pada jalan rel bagian wesel menggunakan alat bantu berupa mesin pemeliharaan yang dilengkapi dengan alat pemecok khusus. Pada Gambar 2.6 diatas merupakan alat untuk memadatkan batu balas di bawah bantalan wesel dengan getaran terarah. Getaran terarah adalah getaran yang arah gerakannya menuju ke bawah bantalan beton, sehingga membantu proses pemadatan batu balas namun tidak berfungsi untuk melonggarkan batu balas (Esveld, 2001). Konsep pekerjaan perawatan untuk jalan rel menggunakan mesin pemecokan bertujuan untuk:

a. Angkatan

Konsep pemecokan atau angkatan dengan arah vertical secara skematis terlihat di Gambar 2.7. Proses pengukuran dengan system tiga titik terlihat pada Gambar 2.8. Gambar tersebut menjelaskan titik A terletak pada jalur rel yang telah dilakukan perbaikan. Proses tersebut diberikan kelebihan angkatan (*overlift*) yang setara dengan tinggi angkatan BC. Pada titik D selanjutnya diangkat kemudian pada batu balas yang terletak di bawah bantalan selanjutnya dipadatkan sehingga titik tersebut sampai berada pada garis lurus AB di E.



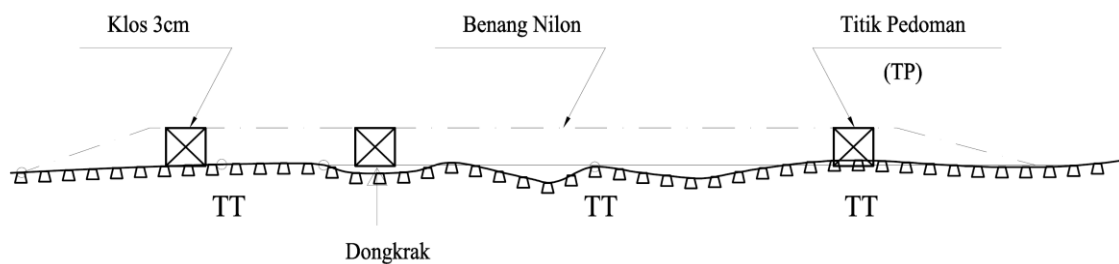
Gambar 2.7 Prinsip angkatan jalan rel



Gambar 2.8 Prinsip pengukuran untuk angkatan

- Menggunakan bantuan mistar atau benang

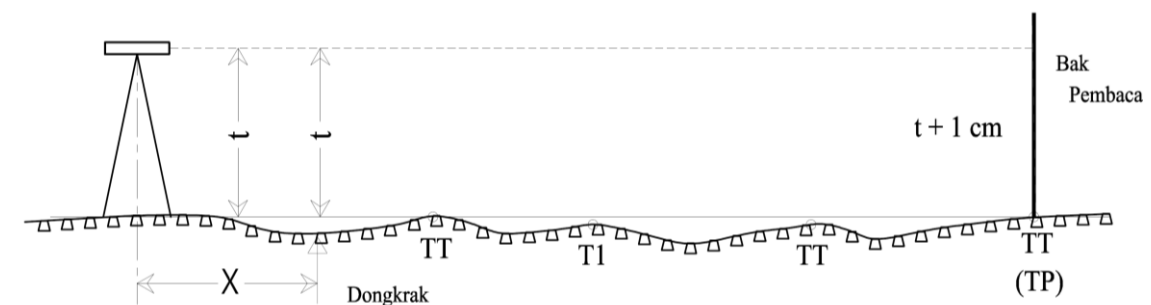
Rel yang diangkat setinggi 3 cm, maka klos terletak di atas rel tersebut harus menyentuh benang atau jarak antara benang dan rel sebesar 3 cm, maka rel tersebut akan lurus sesuai garis benang yang terlihat di Gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2.9 Pelaksanaan angkatan dengan bantuan benang

- Menggunakan bantuan alat *waterpass*

Apabila rel yang berada pada jarak X di dongkrak setinggi t maka rel yang ada diatas dongkrak akan lurus selurus garis arah teropong Gambar 2.10 di bawah ini.

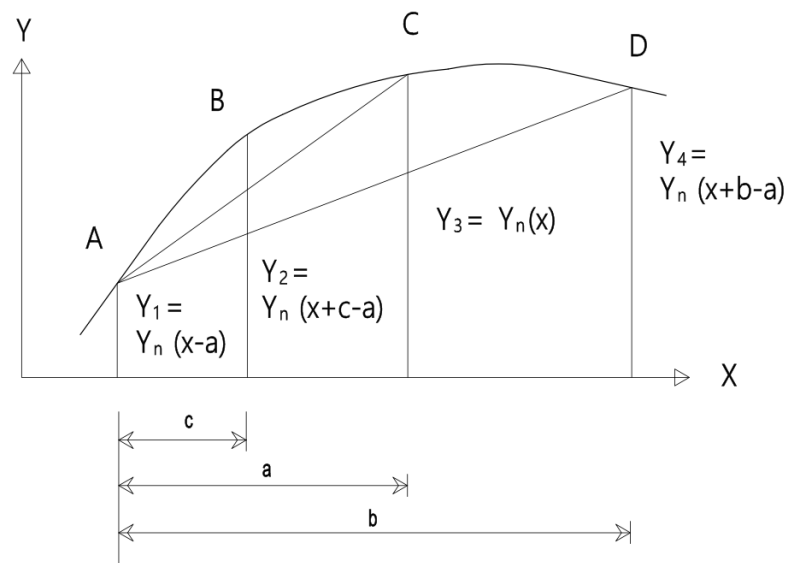


Gambar 2.10 Pelaksanaan angkatan dengan bantuan waterpass

Kerusakan angkatan secara memanjang didefinisikan sebagai kerusakan geometris dalam bidang vertikal, dinyatakan dengan selisih (dalam milimeter) antara titik bagian atas rel dengan garis rata-rata pada profil memanjang rel (Andrade & Teixeira, 2011).

b. Listringan atau pelurusan

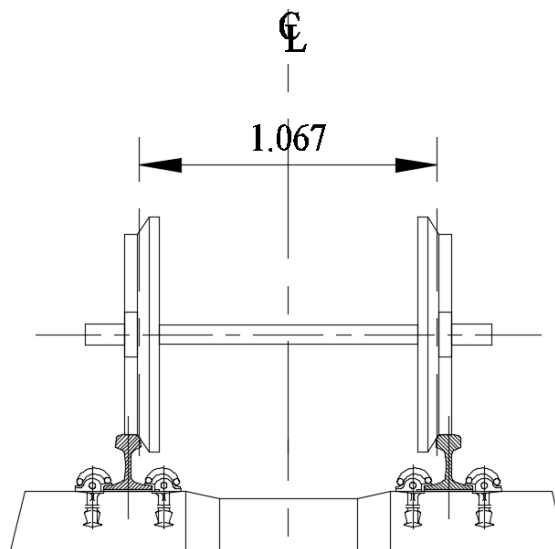
Mesin pemeliharaan jalan rel dengan sistem yang modern memiliki sistem pelurusan atau listringan yang didasarkan pada 4 titik yang diukur, atau dengan bantuan alat laser maka yang digunakan selanjutnya adalah sistem 3 titik yang terlihat seperti pada profil vertikal atau angkatan. Sistem 4 titik, menggunakan mesin yang mengukur tiga ordinat disebut Y_1 , Y_2 dan Y_3 yang terlihat di Gambar 2.11. Menentukan lengkung dengan bersamaan ditentukan menggunakan pelurusan setempat. Titik C yang terletak di rel selanjutnya diluruskan sehingga berada pada lengkung tersebut. Letak titik yang tepat kemudian diperiksa menggunakan metode ukur anak panah yang besarnya statis.



Gambar 2.11 Prinsip pelurusan 4 titik

c. Lebar Sepur

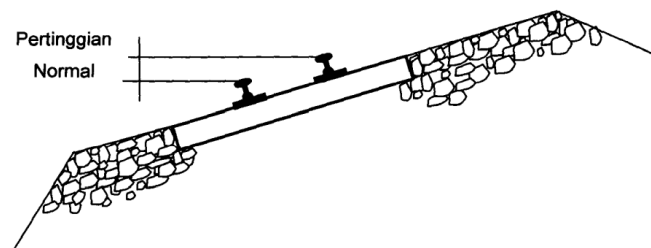
Lebar sepur merupakan jarak antara dua kepala rel, untuk di Indonesia lebar sepur normal adalah 1067 mm, atau dikenal dengan lebar sepur sempit seperti terlihat pada Gambar 2.12 di bawah ini. Toleransi lebar sepur normal yang harus dijaga agar tetap dalam keadaan baik antara -2 mm sampai dengan +5 mm.



Gambar 2.12 Lebar sepur
Sumber: PT. KAI, 2012

d. Perteingian

Parameter geometri jalan rel hasil kereta ukur pada penyimpangan posisi sisi rel kiri dan rel kanan pada jalan rel rata-rata diperoleh dari panjang gelombang yang diperoleh dengan perbedaan elevasi yang didefinisikan sebagai penyimpangan pengukuran (Weston dkk., 2007). Perteingian merupakan perbedaan elevasi antara rel kiri dan rel kanan, atau lebih dikenal dengan istilah super elevasi mulai dari lengkung transisi sampai pada lengkung penuh, seperti terlihat pada Gambar 2.13 di bawah ini:



Gambar 2.13 Perteingian jalan rel
Sumber: PT. KAI, 2012

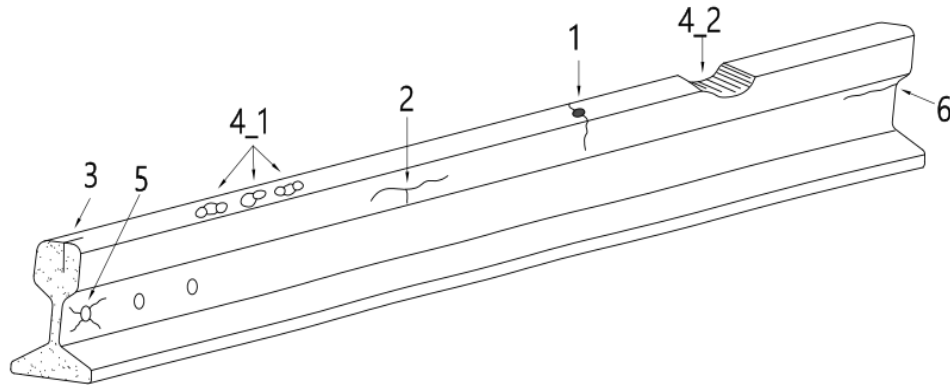
2.3.2 Perawatan Pada Komponen Jalan Rel

Perawatan yang dilakukan pada komponen jalan rel meliputi rel, bantalan, alat penambat, batu balas dan wesel.

a. Rel

Kerusakan yang biasa terjadi di beberapa rel disebabkan terjadi karena *fatigue* atau kelelahan material rel, keausan, dan cacat produksi dari pabrik. Proses untuk mengetahui

kerusakan yang terdapat pada rel yang tidak dapat terdeteksi oleh pengamatan langsung, selanjutnya dilakukan menggunakan alat *detector ultrasonic* yang terlihat pada Gambar 2.14.

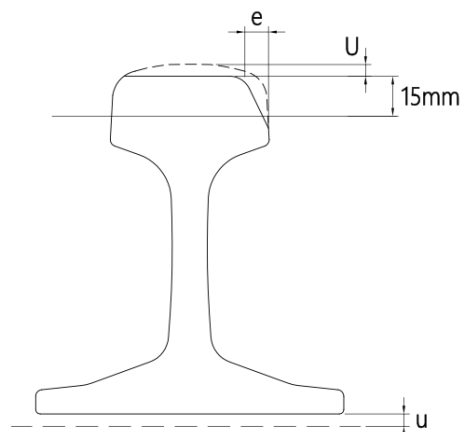


Gambar 2.14 Contoh kerusakan pada rel.

Jenis kerusakan pada rel antara lain adalah:

1. Retakan melintang.
2. Retakan memanjang di kepala rel.
3. Retakan vertical di kepala rel.
4. Kerusakan di permukaan atau *shelling*.
5. Legokan atau *douslaag*.
6. Retakan berbentuk melintang.

Selain kerusakan di atas, rel mengalami keausan di bagian kepala yang terjadi akibat dari gesekan antar roda kereta api. Ambang batas keausan yang diizinkan terlihat di Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Skema keausan rel

Keterangan:

U = Keausan kepala rel

u = Keausan kaki rel

n = Faktor jumlah siklus beban

e = Keausan samping

$$\text{Keausan} = u + n + \frac{e}{2}$$

Batas keausan rel kereta api yang diizinkan sebagai dasar untuk penggantian material rel berdasarkan tonase kereta api penumpang dan kereta api tanpa penumpang (kereta angkutan barang) berdasarkan (PT. Kereta Api Indonesia, 2012g) dapat terlihat pada Tabel 2.4 di bawah ini:

Tabel 2.4 Batas keausan rel yang diizinkan

Tipe Rel	Batas Keausan: $u + n + \frac{e}{2}$	
	Group UIC	
	Dengan KA Penumpang	Tanpa KA Penumpang
R.25	7	8
R.33	10	11
R.41/R.42	15	16
R.50	18	19
R.54	20	22

(Sumber: Perjana, 2012)

Pemeriksaan keausan yang dilakukan pada rel antara lain:

1. Pengamatan di bidang permukaan atas kepala rel atau di tempat roda lewat, kemudian sisi yang berada di samping rel, selanjutnya adalah bidang peralihan diantara badan dan kepala rel yang berada di bagian peralihan antara badan dan kaki rel atau dengan menggunakan cermin kecil untuk memeriksa bagian peralihan tersebut.
2. Pengamatan las thermite pada Rel Panjang Menerus (RPM).
3. Pemeriksaan dengan uji suara, menggunakan palu dengan berat 500 gram, dan panjang tangkai 0,7 m. Pemeriksaan dilaksanakan pada bidang permukaan penyambung, Pukulan pertama diberikan ruang 2 cm dari ujung rel, selanjutnya di setiap 10 cm sepanjang bidang di permukaan penyambung rel.
4. Untuk mengetahui letak retakan horizontal, langkah yang dilakukan adalah dengan cara memegang palu di bagian ujung tangkai, selanjutnya palu dijatuhkan di bidang permukaan kepala rel dengan suatu ketinggian tertentu yang cukup rendah.
5. Untuk mengetahui lokasi retakan vertikal, pukul kepala rel pada kedua sisi kepala rel. Jika palu memantul dan pukulan menghasilkan suara nyaring, tidak ada kerusakan.

Jika palu tidak memantul dan pukulan menghasilkan suara kosong maka buat pemeriksaan yang lebih lengkap.

Terkait dengan sulitnya mendapat material rel baru, karena harus mengikuti mekanisme pengadaan material import oleh Kementerian Perhubungan, membuat PT KAI melaksanakan pergantian letak rel jika kondisi fisik terjadi keausan atau rel sebelah kanan dipindahkan posisi ke sebelah kiri dan sebaliknya, sehingga bagian dalam rel berubah posisi menjadi bagian luar. Cara tersebut sebenarnya kurang tepat jika melihat bahwa material rel yang tetap difungsikan tersebut diduga telah terjadi kelelahan, sehingga bisa terjadi kegagalan tanpa prediksi waktu yang tepat.

Kerusakan kepala rel yang diakibat selip roda KA, dapat menimbulkan lekukan pada permukaan kepala rel, dan mengakibatkan rel bengkok. Lekukan pada permukaan rel dapat diperbaiki dengan cara mengisi lekukan dengan material las elektroda, dan kerusakan rel bengkok dapat diperbaiki dengan cara memanaskan rel kemudian diluruskan dengan alat mekanik. Tindakan perbaikan tersebut memiliki sisi negatif, karena sifat kimia baja pada rel menjadi berubah dan kualitas baja menurun.

b. Bantalan

Bantalan rel yang biasa dipergunakan oleh DJKA, dan PT KAI merupakan jenis bantalan kayu, besi, dan beton. Kerusakan bantalan memiliki beberapa jenis antara lain sebagai berikut:

1. Bantalan kayu

Kerusakan yang sering terjadi adalah pelapukan karena umur bantalan yang telah mencapai usia tua. Jenis kayu yang dipilih dan digunakan untuk bantalan menentukan pula umur pakai bantalan rel, contohnya bantalan menggunakan kayu jati yang telah berumur 20 tahun, sementara yang lain menggunakan kayu hutan kelas I berumur 10 tahun. Bantalan kayu saat ini hanya digunakan pada jembatan rangka baja, dan *mechanical joint*. Negara-negara maju bahkan sudah menggantikan peran bantalan kayu, menjadi bantalan sintetis yang berasal dari campuran karet dan plastik. Penggunaan bantalan sintesis memiliki pertimbangan mudah perawatannya, dan umur penggunaan relatif lama daripada bantalan kayu.

2. Bantalan besi

Kerusakan bantalan besi yang sering terjadi yaitu bengkok akibat kesalahan pada saat *tamping* dan lubang penambat yang membesar atau menjadi longgar. Saat ini bantalan

besi sudah tidak digunakan lagi, karena biaya pengadaan dan perawatannya yang sangat tinggi. Bantalan besi yang ada di lapangan saat ini merupakan peninggalan masa pemerintahan Belanda.

3. Bantalan beton

Kerusakan pada bantalan beton terjadi apabila struktur bantalan yang pecah. Penyebab kerusakan karena *rubber pad* sebagai peredam rel rusak sehingga gaya dinamis KA yang terus menerus dapat menghancurkan bantalan, dan penyebab lainnya yang diakibatkan pecah karena kesalahan *tamping*.

Penggantian bantalan beton dilaksanakan dengan cara-cara sebagai berikut ini:

1. Menggorek batu balas pada sekitar bantalan beton.
2. Melepaskan alat penambat.
3. Pelat andas dikeluarkan dari tempatnya.
4. Bantalan yang rusak dikeluarkan.
5. Batu balas tempat bantalan lama dibersihkan.
6. Meletakan bantalan baru.
7. Lebar sepur diukur kembali.
8. Alat penambat dipasang kembali.
9. Tamping batu balas;
10. Batu balas dimasukan kembali.

c. Alat Penambat

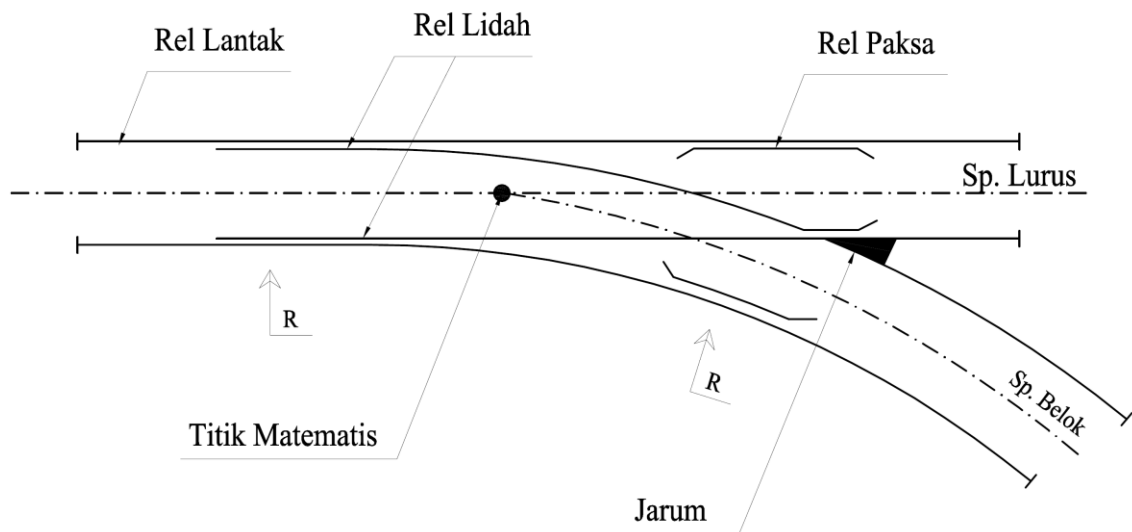
Jenis-jenis alat penambat yang biasa digunakan oleh PT Kereta Api yaitu:

1. Penambat jenis kaku yang meliputi tipe *Tirepond* dan paku rel;
2. Penambat jenis elastis yang meliputi tipe *Pandrol*, *DE Clip* dan *KA Clip*.

Pemeriksaan dilaksanakan dengan tujuan untuk menjamin kekencangan penambat yang berfungsi untuk mengikat rel dengan bantalan. Faktor yang mempengaruhi pengencangan penambat adalah, usia rel, jumlah kereta api yang lewat, kondisi perawatan, dan tahun dilaksanakannya pengencangan terakhir.

d. Wesel

Wesel berfungsi untuk mengarahkan perjalanan kereta api agar dapat berpindah dari satu jalur ke jalur yang lain. Pada wesel tidak di ijinakan adanya peninggian elevasi. *Schematic* wesel normal dengan sudut standar dapat dilihat pada Gambar 2.16 bawah ini:



Gambar 2.16 Skema wesel

Wesel memiliki beberapa permasalahan antara lain:

1. Jarum pada wesel merupakan bagian yang paling banyak menerima beban karena roda KA dari seluruh arah menginjak jarum, sehingga rentan mengalami aus.
2. Rel Paksa merupakan bagian dari rel yang memaksa arah atau kedudukan roda, dikarenakan sering terjadi gesekan dengan roda KA sehingga membuat ukuran lebar antara rel paksa dengan rel menjadi renggang.
3. Kurang padatnya batu balas di bawah jarum wesel sering mengakibatkan terjadi penurunan.
4. Lidah rel akan lebih cepat aus dikarenakan terjadinya gaya sentrifugal dari gerakan KA menuju arah luar.

Perawatan pada wesel yang rusak tanpa penggantian *spare part* tentunya tidak akan menambah umur layan wesel dalam waktu yang lama, sebaiknya komponen wesel yang rusak diganti dengan *spare part* yang baru. Jika tidak dilakukan penggantian maka perawatan pada kerusakan wesel dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Keausan jarum wesel dapat dilas dengan *elektroda manganis*;
2. Baut – baut wesel di lakukan pemeriksaan, dan di lakukan pengencangan pada baut yang sudah longgar;
3. Melakukan pemadatan batu balas dengan *tamping* di bagian bantalan di bawah jarum, dan pemadatan harus dilakukan dari segala arah;
4. Lidah wesel yang aus maksimum harus diganti.

Pemeriksaan kondisi wesel dilakukan setiap tiga bulan sekali untuk lintas utama, dan enam bulan sekali untuk lintas cabang (PT. Kereta Api Indonesia, 2012b).

2.4 Manajemen Perawatan Jalan Rel di Indonesia

Manajemen perawatan rel di Indonesia dalam Perjana 2012 menyatakan bahwa pelaksanaan perawatan pada prasarana perkeretaapian secara khusus adalah jalan rel di Indonesia dilaksanakan oleh operator KA. Perawatan tersebut di danai oleh pemerintah (regulator). Untuk proses pencairan dana, pemerintah bersama operator yaitu PT Kereta Api (Persero) membuat kontrak pelaksanaan pekerjaan perawatan dan pelaksanaan operasi prasarana kereta api milik pemerintah yang dinamai *Infrastructure Maintenance and Operation (IMO)* dan penerimaan biaya atas penggunaan prasarana kereta api atau *Track Access Charges (TAC)*. Jenis pekerjaan perawatan pada komponen jalan rel antara lain adalah:

1. Pekerjaan perbaikan rel.
2. Pekerjaan perbaikan bantalan.
3. Pekerjaan penambahan batu balas.
4. Pekerjaan pemecokan.
5. Pekerjaan lingkungan.
6. Wesel.

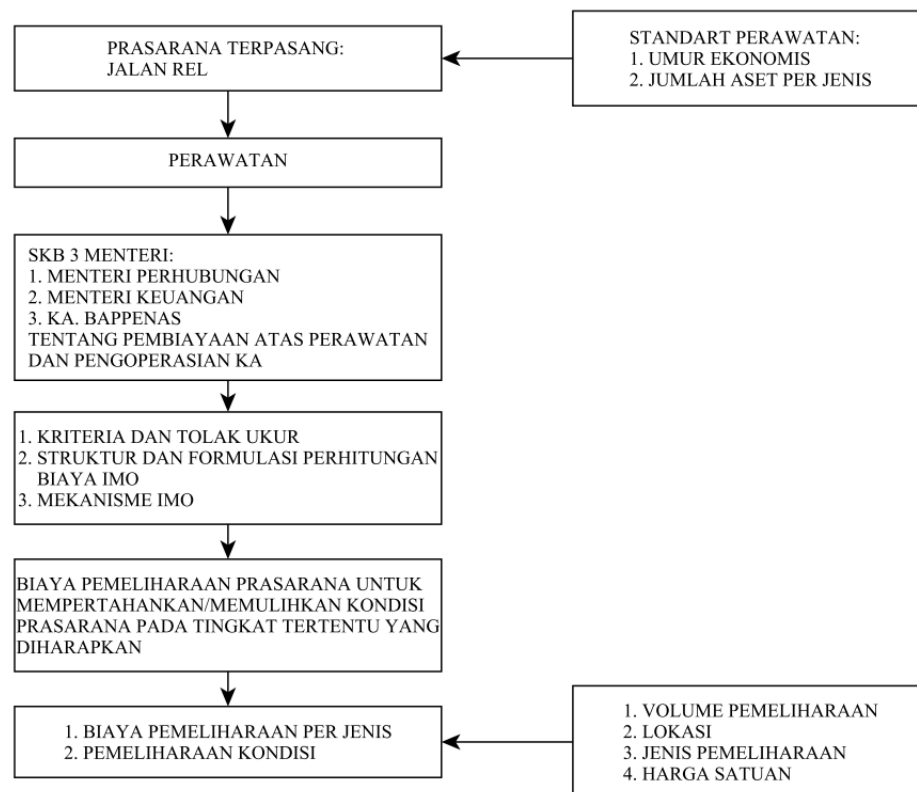
2.4.1 Usulan Biaya Perawatan Jalan Rel

Nilai indeks kualitas jalan rel menjadi tolak ukur, dan dasar pengusulan biaya perawatan prasarana jalan rel dari operator dalam hal ini PT. Kereta Api Indonesia kepada Kementerian Perhubungan, Direktorat Jenderal Perkeretaapian. Nilai TQI per triwulan hasil kereta ukur jalan rel disampaikan PT. KAI melalui satuan kerja *Infrastruktur Maintenance and Operation (IMO)* untuk mendapatkan persetujuan anggaran perawatan dari pemerintah.

Selain nilai TQI, data dukung pengajuan biaya perawatan juga dihitung berdasarkan kelas jalan rel, jumlah *passing tonnage*, type bantalan, dan type rel yang digunakan. Perhitungan tersebut untuk memperkirakan kebutuhan biaya perawatan yang diperlukan sesuai kebutuhan aktual di lapangan, sehingga diperoleh nilai patokan biaya perawatan sesuai hasil analisis dan volume pekerjaan.

Proses perhitungan untuk IMO bertujuan memprediksi biaya yang diperlukan untuk perawatan jalan rel sesuai dengan standar yang telah ada yaitu berupa standar biaya berdasarkan hasil analisis pekerjaan, dan standar volume pekerjaan. Standar perhitungan volume meliputi asset, *passing tonnage* atau kelas jalan yang dilewati, jenis rel, dan jenis bantalan yang digunakan.

Inti dari pemeliharaan prasarana jalan rel yang dilaksanakan harus sesuai dengan standar dan pengecekan fisik serta wajib untuk mendapatkan persetujuan biaya IMO dari pemerintah. Pekerjaan perawatan dilaksanakan sesuai dengan hasil pemeriksaan kerusakan yang terjadi di lapangan, serta ketersediaan biaya perawatan yang ada, dan sesuai dengan skala prioritas utama kebutuhan minimal untuk mendukung keselamatan perjalanan kereta api. Pada Gambar 2.17 menunjukkan skema perawatan prasarana kereta api sesuai dengan standar.



Gambar 2.17 Skema perawatan sesuai standar

Skema diatas sebagai acuan dasar pengajuan biaya perawatan IMO dari PT Kereta Api kepada pemerintah, yang berlaku di setiap daerah operasi, dan divisi regional dalam melakukan perencanaan program kerja perawatan jalan rel, selanjutnya pengajuan biaya perawatan diajukan ke kantor pusat PT. KAI dalam bentuk rencana kerja anggaran (PT.

Kereta Api Indonesia, 2012c). Tahapan penyusunan perencanaan perawatan jalan rel meliputi:

1. Data jalan kereta api dan ketersediaan sumber daya manusia setiap distrik dan resort.
Data yang disajikan meliputi luaran kondisi teknis, ketersediaan personil perawatan dan jumlah kerusakan jalan rel.
2. Hasil analisis data dari distrik dan resort digunakan untuk mengetahui seberapa besar volume dan jenis pekerjaan yang akan dilaksanakan. Pengajuan rencana perawatan jalan rel apakah menggunakan tenaga regu dengan perawatan manual atau menggunakan mesin perawatan berat berupa *Multi Tie Tamper* (MTT).
3. Analisis perawatan selanjutnya menjadi sebuah keputusan perencanaan perawatan berupa perencanaan perbaikan jalan rel dan rencana anggaran biaya perawatan pada setiap jenis pekerjaan perawatan.
4. Hasil perencanaan perawatan diajukan oleh PT. KAI untuk mendapat persetujuan biaya perawatan oleh satuan kerja IMO.
5. IMO akan memprioritaskan biaya perawatan berdasarkan jenis dan kondisi jalan rel
6. Pengajuan biaya perawatan ke IMO berdasarkan volume pekerjaan perawatan, lokasi pekerjaan perawatan, analisis harga satuan perawatan dan jenis perawatan.

Tahap-tahap pembuatan data kebutuhan material jalan rel berserta proses penyusunan data kebutuhan disajikan pada Tabel 2.5 di bawah ini.

Tabel 2.5 Tahapan pembuatan data kebutuhan material jalan rel

Jenis Kegiatan	Pembuatan Data	Penerima Data	Monitoring Data	Keterangan
Pengambilan data material jalan rel (DMJR)	Kepala Distrik (DK)	Kepala Resort (SK)	- SK - Pengawas jalan rel - Manager jalan rel dan jembatan	DJMR per jarak bantalan
Pembuatan DMJR dan kebutuhan material jalan rel	Kepala Resort (SK), Pengawas Jalan Rel	Manajer jalan dan jembatan	- Pengawas jalan rel - Manager jalan rel dan jembatan	DMJR per jarak bantalan dan rekapitulasi per 100 m'sp
1. Grafik dan matrik kebutuhan material jalan rel: 2. Penentuan Kelas jalan	Manajer jalan dan jembatan	DK, SK, Pengawas jalan rel, Kantor pusat	Ka. Sub Direktorat Jalan Rel dan Jembatan	Grafik kebutuhan material jalan rel per 1000 m'sp dan 200 m'sp

Sumber: Perjana, 2012

2.4.2 Perawatan Jalan Rel

Perawatan kereta api yang lazim dilaksanakan di Indonesia memiliki banyak persamaan seperti perawatan yang dilakukan oleh negara yang telah maju. Melihat kondisi existing perkeretaapian Indonesia, sistem jalan kereta api di Indonesia tergolong dalam jalan konvensional. Secara struktur jalan rel terdiri beberapa lapisan, susunan struktur jalan rel meliputi: lapisan sub grade, lapisan sub batu balas, lapisan batu balas, bantalan, serta penambat, dan paling atas adalah rel. Metode pelaksanaan perawatan jalan rel masih dilakukan dengan cara manual, cara setengah mekanis yaitu dengan menggunakan alat bantu mesin pemecok yang ringan, dan cara mekanis yang biasa dilakukan dengan menggunakan alat mesin pemeliharaan *Multi Tie Tamper* (MTT). Pekerjaan perawatan jalan rel meliputi pelaksanaan perawatan geometri jalan rel atau juga bisa termasuk penggantian terhadap material jalan rel.

2.4.3 Waktu Perawatan Jalan Rel

Waktu Perawatan jalan rel dilakukan di sela-sela waktu operasi kereta api atau yang lebih dikenal dengan istilah *Window Time*. Waktu perawatan jalan rel harus mendapatkan ijin dari tim *supreme commander*. Tim *supreme commander* terdiri dari tim *quality control* jalan, dan jembatan KA, sinyal, telekomunikasi, listrik serta operasi KA dalam bentuk warta maklumat (WAM) yang di keluarkan oleh asisten manajer perjalanan kereta api daerah operasi kereta api setempat.

Waktu luang (*window time*) merupakan suatu periode waktu tertentu secara tidak terputus pada suatu petak jalan tertentu untuk keperluan perawatan/pemeliharaan prasarana (Supriyadi, 2008b). Menetapkan waktu luang secara khusus pada grafik perjalanan kereta api sangat sulit dilakukan, karena:

- Jumlah perjalanan kereta api setiap tahun semakin bertambah, sehingga untuk mencari periode waktu secara tidak terputus selama 60 menit sangat sulit, kecuali untuk lintas-lintas tertentu.
- Perjalanan kereta api tidak dapat terputus begitu saja untuk keperluan perawatan/pemeliharaan dalam gapeka, karena setiap kereta api berjalan bukan hanya di petak atau di lintas tersebut saja, tetapi berjalan dari sebelum dan sesudah petak atau lintas tersebut juga.

Waktu luang idealnya disediakan dalam jangka waktu 24 jam sebesar antara 10 sampai dengan 20 persen atau 2,4 jam sampai 2,8 jam, namun tidak hanya terbatas pada angka tersebut diatas saja, karena sangat tergantung dari sistem pemeliharaan dan panjang kilometer jalan rel suatu petak jalan. Jika suatu petak jalan rel tidak diberikan waktu luang untuk perawatan yang cukup, maka risiko kemungkinan terjadinya suatu kegagalan kelancaran perjalanan, dan keamanan operasi kereta api akan menjadi lebih besar (Supriyadi, 2008a).

2.5 Perawatan Jalur Kereta Api Tahunan

Perawatan jalur kereta api yang akan dilakukan melalui tahapan-tahapan pendataan, pemeriksaan, rencana anggaran, realisasi dan pengendalian, dengan uraian sebagai berikut:

a. Pendataan (*Inventory*)

Pendataan merupakan tahapan menginventarisir seluruh data aset yang ada (jalan rel, jembatan dan fasilitas operasi) di unit jalan rel dan jembatan berdasarkan data aset atau penggantian material/komponen dari tahun sebelumnya atau hasil pemeriksaan lapangan. Dalam *inventory* aset ini dipisahkan antara aset milik negara dan aset perusahaan. Dari *inventory* ini diharapkan dapat diketahui jumlah aset yang harus dirawat.

b. Pemeriksaan (*Inspection*)

Pemeriksaan merupakan tahapan untuk mengetahui kondisi/kerusakan aset jalan rel dan jembatan, pemeriksaan yang dilakukan meliputi pemeriksaan kerusakan suatu geometri, material/komponen jalan rel, umur teknis material, jembatan serta kelengkapan fasilitas operasi sedangkan pemeriksaan khusus dilakukan untuk mengetahui perubahan kondisi selama tahun perawatan berjalan atau kondisi/kerusakan yang perlu perhatian khusus yang dapat mengganggu operasi kereta, hasil pemeriksaan khusus bersifat darurat perlu segera ditangani.

c. Rencana Anggaran (*Budgeting Plan*)

Rencana anggaran ini dimulai dari penyusunan rencana kerja dan anggaran (RKA) dengan menggunakan data dari hasil *inventory*, dan data *inspection* pada tahap pemeriksaan kerusakan yang dikelompokkan menjadi:

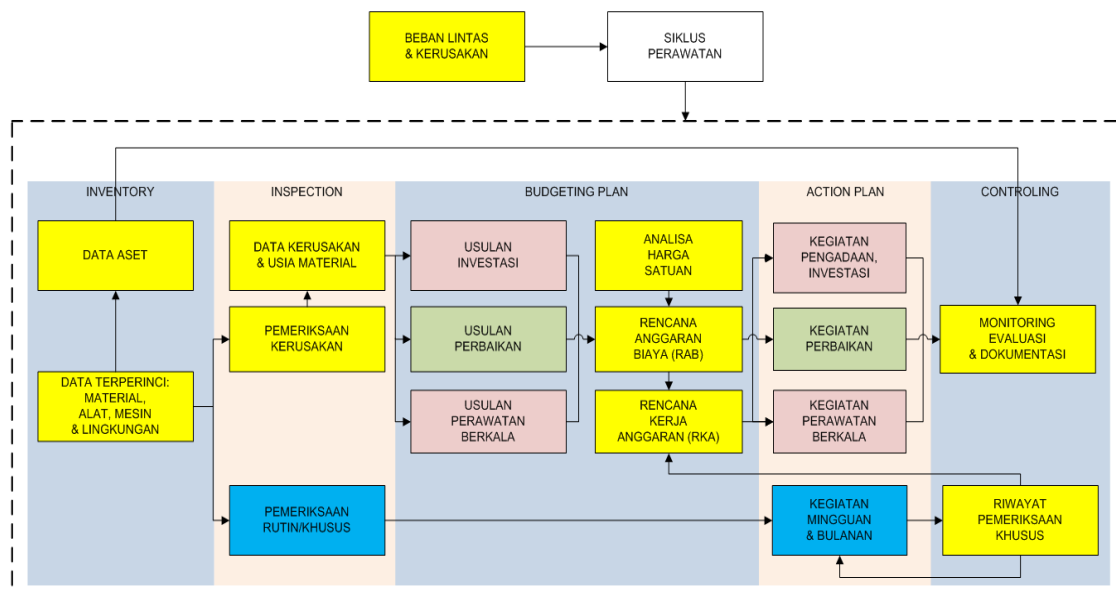
- Usulan bersifat investasi yang sifatnya pengadaan material untuk meningkatkan/memperbaiki kondisi karena kerusakan, menambah aset, yang disebabkan karena kebutuhan penambahan aset, umur teknis dan kerusakan visual.
- Usulan yang bersifat perbaikan (*corrective maintenance*) merupakan usulan pekerjaan yang bersifat pengadaan, penggantian material, membutuhkan keahlian khusus dan tidak mampu dilakukan oleh tenaga dinas.
- Usulan bersifat perawatan berkala (*preventive maintenance*) merupakan usulan pekerjaan untuk menjaga kondisi konstruksi jalan rel dan jembatan yang dilakukan secara berkala agar memiliki ketahanan sesuai umur teknis yang direncanakan.

d. Realisasi (*Action Plan*)

Tahapan realisasi merupakan pelaksanaan dari rencana kerja dan anggaran yang disusun sebelumnya. Jenis kegiatan yang dilakukan antara lain meliputi pengadaan alat, material dan pekerjaan investasi oleh bagian investasi. Kegiatan perbaikan, dan perawatan berkala dapat diberikan kepada pihak ketiga, serta perawatan yang bersifat darurat dapat dilakukan oleh regu satuan kerja.

e. Pengendalian (*Controlling*)

Pengendalian meliputi kegiatan pemantauan dan evaluasi pekerjaan agar pelaksanaan dapat berjalan dengan baik sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Pemantauan pelaksanaan pekerjaan dan pemantauan perubahan kondisi dilakukan secara periodik yang kemudian dibandingkan dengan program yang telah dibuat dengan tujuan untuk mengetahui jika terjadi penyimpangan-penyimpangan sejak dini. Sedangkan evaluasi dilakukan dengan menganalisis penyimpangan yang terjadi dan mencari solusi sebagai koreksi, antisipasi dan penyesuaian terhadap perubahan situasi yang terjadi di lapangan. Perawatan jalur kereta api dapat digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 2.18 berikut ini:



Gambar 2.18 Diagram alir siklus perawatan jalur kereta api (PT. Kereta Api Indonesia, 2012a)

2.6 Sistem Perawatan Jalur Kereta Api

Perawatan jalan rel di Indonesia menerapkan sistem dasar manajemen perawatan dengan pendekatan perencanaan (*plan*), pengorganisasian (*organizing*), pelaksanaan (*actuating*) dan pengendalian (*controlling*) untuk masa perawatan satu tahun (PT. Kereta Api Indonesia, 2012e). Sistem manajemen perawatan meliputi:

- Perencanaan perawatan jalur kereta api dimulai dari perhitungan beban lintas hingga siklus perawatan menyeluruh, pendataan aset, pemeriksaan kondisi aset sampai pada penyusunan rencana kegiatan dan anggaran (RKA).
- Pengorganisasian perawatan dimulai dengan membentuk struktur organisasi perawatan jalur kereta api beserta pembagian tugas pokok dan fungsinya.
- Pelaksanaan perawatan meliputi serangkaian pelaksanaan yang telah disusun perencana, dilakukan oleh tenaga kerja terampil, terorganisir sesuai tugas, fungsi, keahlian dan kompetensi nya mengacu pada metode kerja dan spesifikasi teknis di perkeretaapian.
- Pengendalian merupakan kegiatan monitoring dan evaluasi dari semua kegiatan mulai dari perencanaan, pengorganisasian dan pelaksanaan untuk dapat diketahui jika terjadi penyimpangan dan ketidak sesuaian yang terjadi sejak dini. Pengendalian dilakukan dalam bentuk pengawasan, inspeksi dan audit sehingga penyimpangan dapat dilakukan koreksi, antisipasi dan penyesuaian perubahan situasi yang terjadi.

2.7 Siklus Perawatan Jalur Kereta Api Berdasarkan Beban Lintas

Perawatan jalan rel dimulai dengan menghitung siklus perawatan secara menyeluruh yang ditentukan berdasarkan beban lintas yang melewati suatu koridor jalan kereta api dalam periode satu tahun atau disebut daya angkut lintas. Daya angkut lintas yang dimaksud dihitung menggunakan pendekatan rumus pada persamaan 2.1 dan 2.2 berikut:

$$T = 360 \times S \times TE \quad (2.1)$$

$$T = Tp + Kb.Tb + K1.T1 \quad (2.2)$$

Dimana:

T = Daya angkut lintas (ton/tahun)

TE = Tonase ekuivalen (ton/hari)

Tp = Tonase penumpang dan kereta harian

Tb = Tonase barang dan kereta harian

T1 = Tonase lokomotif harian

Kb = koefisien yang nilainya tergantung pada beban gandar

Kb = 1,5 untuk beban gandar < 18 ton

Kb = 1,3 untuk beban gandar > 18 ton

K1 = Koefisien dengan nilai 1,4

S = Koefisien yang besarnya tergantung pada kualitas lintas

S = 1,1 untuk lintas dengan kereta penumpang yang berkecepatan maksimum 120 km/jam

S = 1,0 untuk lintas tanpa kereta penumpang

Nilai perhitungan daya angkut lintas suatu koridor dijadikan acuan dasar dalam penentuan kelas jalan rel, dan siklus perawatan secara keseluruhan di jalan rel berdasarkan kelas jalan seperti terlihat pada Tabel 2.6 berikut:

Tabel 2.6 Siklus Perawatan Jalan Rel Berdasarkan Kelas Jalan

Daya Angkut (juta ton/tahun)	Golongan UIC	Pembagian kelas jalan		Bantalan (Tahun)	
				Kayu	Beton
>42,00	1	I		4	6
29,75 – 42,00	2				
17,50 – 29,75	3				
9.80 – 17,50	4	II		4	6
4,90 – 9,80	5				
2,45 – 4,90	6	III		6	6
1,225 – 2,45	7	IV		6	6
0,525 – 1,225	8				
<0,525	9				
		V	Dengan KA Penumpang	8	10
			Tanpa KA Penumpang	8	12

(Sumber: Perjana, 2012)

Perawatan jalan rel berdasarkan siklus perawatan terbagi menjadi perawatan menyeluruh dan perawatan pilih-pilih. Perawatan menyeluruh merupakan perawatan yang dilakukan dengan tujuan untuk mengembalikan kondisi jalan rel, jembatan, dan fasilitas sesuai standarnya dengan menormalkan kembali ukuran geometri jalan rel dan jembatan, perbaikan atau penggantian seluruh kerusakan, penggantian material yang mencapai umur teknis dan melengkapi tanda lintas, semboyan sebagai kelengkapan jalan rel, dan jembatan. Sedangkan perawatan pilih-pilih merupakan pekerjaan perawatan yang dilakukan untuk menjaga kondisi jalan rel, jembatan, dan fasilitas operasi agar tetap laik operasi hingga mencapai masa ulang perawatan menyeluruh. Perawatan pilih-pilih dilakukan pada petak perawatan yang tidak dilakukan pada perawatan menyeluruh. Material bekas perawatan menyeluruh yang masih baik, dan layak pakai dapat digunakan kembali pada pekerjaan perawatan pilih-pilih (PT. Kereta Api Indonesia, 2012d).

Perawatan jalan rel secara keseluruhan dilakukan sesuai dengan siklus atau bertahap. Hal tersebut bertujuan supaya kegiatan perawatan dapat berjalan efektif sesuai dengan beban lintas dan dapat efisien dalam hal pengelolaan anggaran. Perawatan jalan rel dengan skema tersebut sejalan dengan kebutuhan anggaran perawatan yang akan terbagi sesuai dengan siklus perawatan secara keseluruhan. Maka tidak akan terjadi penumpukan dalam satu periode waktu pelaksanaan perawatan. Perawatan sesuai yang dilakukan sesuai siklus dengan cara membagi menjadi petak perawatan, dan pelaksanaan perawatan secara menyeluruh dilakukan pada petak tersebut, dan yang lain terpilih sesuai karakteristiknya. Pada kegiatan di tahun yang mendatang dilakukan pemeliharaan di petak lainnya.

2.8 Pemeriksaan

Pemeriksaan prasarana perkeretaapian adalah kegiatan yang dilakukan untuk mengetahui kondisi dan fungsi prasarana perkeretaapian (Kementerian Perhubungan, 2011a). Kontrol kualitas sistem, dan infrastruktur pengukuran melalui inspeksi penting untuk memastikan standar keselamatan dan kualitas yang telah ditetapkan. Inspeksi tidak hanya mengukur kerusakan yang akan diperbaiki dalam pemeliharaan perkeretaapian, tetapi juga mengukur percepatan untuk kenyamanan pengguna kereta api, mengukur gaya-gaya yang bekerja pada kereta api, bahkan memeriksa fasilitas. Dalam hal inspeksi di bidang infrastruktur, tujuan inspeksi tidak hanya untuk memastikan tidak ada cacat yang dapat menyebabkan kecelakaan, tetapi juga untuk memantau degradasi/kerusakan yang terjadi

pada infrastruktur perkeretaapian untuk menghindari kecelakaan, dan menyediakan data untuk infrastruktur. Nilai kualitas jalan rel dibutuhkan manajer jalan rel untuk merencanakan pemeliharaan jangka pendek, dan jangka panjang (Ekberg dkk., 2022).

Sistem pemeliharaan yang efektif, dan efisien secara langsung berkaitan dengan kualitas sistem pemantauan serta inspeksi perkeretaapian. Ketepatan pada saat pemeriksaan akan menentukan teknik/pendekatan perawatan yang benar-benar sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan. Untuk mendukung pemantauan dan pemeriksaan prasarana perkeretaapian yang baik, perlu didukung dengan sistem pemantauan yang cepat, berkesinambungan sehingga data yang diperoleh dari pemeriksaan, perencanaan akan lebih akurat, dan dapat diandalkan untuk kegiatan pemeliharaan.

Sampai saat ini, tidak ada sistem pemantauan khusus untuk sub struktur jalan rel. Kenyataannya adalah bahwa pemantauan sub struktur jalan rel sering diabaikan, meskipun sub struktur jalan rel memiliki dampak besar pada biaya pemeliharaan jalan rel. Hal ini dikarenakan secara visual, sulitnya ditemukan kerusakan pada saat pemeriksaan sub struktur jalan rel, sehingga perawatan yang dilakukan hanya untuk mengatasi gejala kerusakan tanpa mencari penyebab kerusakan tersebut. Kerusakan serius hanya terjadi ketika tingkat kerusakan sangat cepat sehingga tidak dapat di toleransi, dan perbaikan sistematis dari sub struktur mutlak diperlukan. Kondisi sub struktur merupakan parameter penting untuk membagi jalan kereta api menjadi bagian perawatan khusus. Agar lebih terukur, jalan rel dianggap terdiri dari bagian yang sama (seragam) pada seluruh lintasan berdasarkan penilaian kondisi geoteknik sekitarnya dengan menggunakan georadar, kekakuan lintasan, dan perubahan yang terjadi selama periode inspeksi (Andrade, 2008).

Dapat diketahui bahwa proses pemeriksaan kepadatan rel (*quasi-homogen*) harus didasarkan pada data infra merah, dan tingkat kerusakan komponen rel. Komponen infrastruktur jalan rel menurut Esveld, (2001) adalah:

1. Tipe rel, pabrik, data pemasangan rel;
2. Tipe bantalan, pabrik, waktu pemasangan;
3. Tipe alat penambat;
4. Tipe *rubber pad*, waktu penggantian;
5. Tipe batu balas, waktu penggantian, waktu pembersihan;
6. Rel panjang menerus atau sambungan rel-rel pendek;
7. Jenis lalu lintas (angkutan penumpang, barang, atau gabungan);

8. Tonase tahunan;

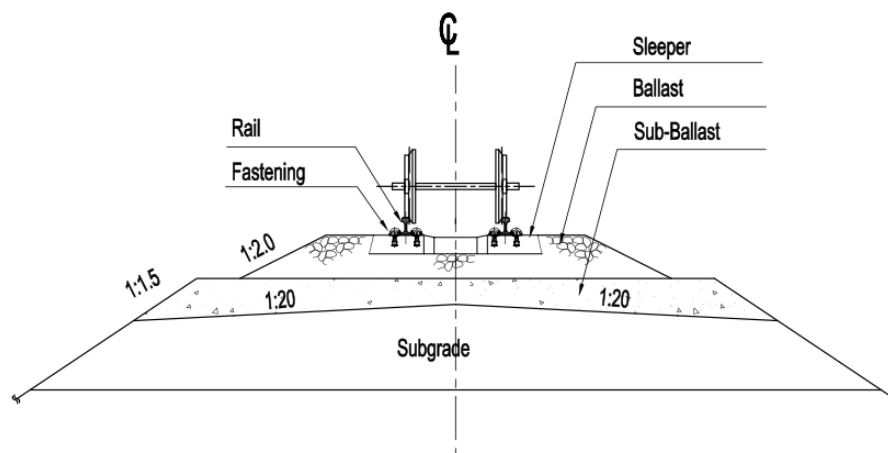
9. Total tonase.

Komponen-komponen tersebut merupakan inti dari informasi yang akan digunakan untuk merawat, dan mengganti material rel kereta api yang rusak. Selain perkeretaapian, dan komponennya serta struktur khusus (jembatan dan terowongan), komponen rancangan juga memiliki sistem pemantauannya sendiri. Wesel memberikan kontribusi alokasi biaya pemeliharaan hingga 25% dari total biaya pemeliharaan, dan penggantian. Namun, sejauh ini tidak ada metode umum untuk memelihara wesel yang dikembangkan di perkeretaapian. Metode umum harus mengandung elemen perawatan kritis yang dapat mengantisipasi kegagalan/kerusakan fatal pada wesel.

Kebutuhan pemeriksaan tergantung pada beberapa faktor seperti kecepatan tertinggi kereta api, kepadatan lalu lintas kereta api, jenis lalu lintas, iklim, lingkungan, spesifikasi teknis, usia, dan kualitas komponen kereta api. Sistem manajemen inspeksi membagi jaringan kereta api menjadi beberapa tingkatan sesuai dengan persyaratan inspeksi, dan prioritas inspeksi (Andrade, 2008).

2.9 Struktur Jalan Rel

Pada dasarnya, struktur jalan rel secara tradisional terdiri dari rel, penyangga/bantalan (beton atau kayu), penambat, batu balas, *sub-ballast*, badan jalan, dan tanah dasar. Struktur ini merupakan bentuk tradisional dari struktur *ballast track* terlihat seperti Gambar 2.19 di bawah ini.



Gambar 2.19 Potongan Melintang Jalan Rel (Esveld, 2001)

Susunan rel, penambat, isolator, peredam karet (*rubber pad*), bantalan, batu balas, dan *sub-ballast* merupakan sub sistem yang disebut struktur atas, sedangkan badan utama tubuh baan (badan jalan) atau *road bed* disebut *sub-structure* atau struktur bawah. Struktur jalan kereta api dapat memburuk karena tingginya lalu lintas kereta api, perubahan iklim (cuaca), perubahan kondisi tanah, dan pergerakan geoteknik (Faiz & Singh, 2009). Terdapat komponen pelengkap lainnya seperti *turnout* dan perlintasan sebidang yang merupakan bagian dari jalan kereta api. Pada dasarnya struktur jalan kereta api ini merupakan susunan rel, dan bantalan yang dihubungkan dengan alat penambat, disusun pada lapisan batu balas, dan *sub-ballast*, untuk mendistribusikan beban-beban dari gaya kereta api di atas rel ke bagian tanah dasar.

Jalan rel konvensional memiliki beberapa keuntungan (Esveld, 2001) antara lain:

1. Teknologi yang terbukti keandalannya
2. Biaya perawatan relative rendah.
3. Kemudahan pada proses pelaksanaan penggantian komponen jalan rel.
4. Perawatan pada perbaikan geometri lebih mudah dilakukan.
5. Dimungkinkan untuk dilakukan penyesuaian pada perubahan layout jalan rel.
6. Elastisitas tinggi
7. Bisa meredam kebisingan yang dihasilkan dari getaran roda kereta api terhadap rel.

2.9.1 Sub Grade

Pada struktur tanah dasar, badan jalan memiliki kemiringan, sistem drainase, dan bila perlu dapat dilakukan konstruksi perkuatan tanah dasar agar tanah dasar tetap stabil serta mempunyai daya dukung yang cukup untuk memikul beban (dinamis, dan statis) di atasnya. Beban statis kereta api merupakan beban konstan yang bergerak, dan dihitung sebagai beban frekuensi rendah atau getaran rambat alami pada lapisan *sub grade* (Auersch, 2022).

Kondisi geologi di lintas utara dan selatan Pulau Jawa, sangat dipengaruhi oleh beban dinamis, dan statis, dimana beban tersebut pada tanah yang lunak (*soft clay*) yang terdapat di sepanjang lintas utara berpengaruh pada daya dukung tanah, yang menyebabkan penurunan tanah dasar, tentunya akan mempengaruhi parameter geometri jalan rel pada bagian angkatan. Kondisi geologi di lintas selatan Pulau Jawa berbeda, karena berada didaerah pergunungan, perbukitan, dan lereng dengan tanah dasar berbutir halus, sebagian berpasir hasil endapan letusan gunung api, pengaruhnya lebih besar ke

stabilitas tanah (longsor). Pada tanah dasar yang buruk atau tidak stabil, hal ini biasanya dilakukan dengan memperbaiki kondisi tanah (memberikan perkuatan tanah melalui penerapan *geotekstil*), dan memperbaiki drainase (Kementerian Perhubungan, 2021). Tetapi pada *sub grade* yang memiliki tanah sangat lunak dengan frekuensi operasi kereta api yang cukup tinggi, menjadi penyebab kerusakan lebih cepat pada geometri jalan rel, dan mempengaruhi keamanan kereta yang beroperasi (Huang, 2021).

Secara umum persyaratan teknis jalur kereta api yang harus dipenuhi pada bagian *sub grade* sebagai berikut:

1. *California Bearing Rate* (CBR) > 6%;
2. *Compaction* 95% Proctor;
3. Kadar air optimum +1%
4. Indeks plastisitas tidak lebih dari 30%
5. Penyimpangan desain yang diizinkan kurang dari 10 mm.

2.9.2 Lapisan Batu Batu Balas

Lapisan batu balas adalah partikel batu kasar yang lepas (ukuran 30/60) yang menopang rel, dan struktur bantalan di atasnya. Selain itu, batu balas digunakan untuk mentransfer, dan mendistribusikan beban yang diterima oleh *track* serta *bearing* ke tanah di bawahnya. Daya dukung batu balas pada arah vertikal besar, dan elastis, tetapi lemah dalam mereduksi gaya lateral. Ketebalan batu balas yang optimal biasanya antara 25, dan 30 cm diukur dari bagian bawah bantalan.

Hal yang perlu diperhatikan dalam menggunakan batu balas adalah kontaminasi batu balas oleh benda asing yang dapat mengganggu kinerja batu balas. Salah satunya adalah pecahan halus batu balas bisa berubah menjadi debu atau abu batu (*fly ash*), yang bisa menjadi masalah saat hujan, debu batu bisa berubah menjadi lumpur, mengurangi elastisitas lapisan balas. Batu balas menjadi kotor, akibat dari air yang terperangkap di lapisan tanah dasar (*sub grade*), dan keluar melalui sub batu balas kemudian ke permukaan batu balas berakibat negatif terhadap jalan rel (*pumping*). fenomena ini terjadi pada saat kondisi hidrolik tanah berbeda, sering terjadi antara musim kemarau, dan penghujan (Fontul dkk., 2018).

Kondisi seperti ini di Indonesia lebih dikenal dengan istilah gejrotan (*pumping*) yang menyebabkan air tersebut membawahi material halus dalam bentuk lumpur, masuk ke sela-sela batu balas sehingga batu balas saling mengikat, dan menjadi kaku, sehingga

fungsi peredam jalan rel menjadi berkurang. Kekurangan batu balas (*ballast less*) pada jalan rel akan menyebabkan kerusakan geometri jalan rel pada tahap transisi dari struktur batu balas ke struktur jalan rel (Libor dkk., 2017).

2.9.3 Bagian Rel

Rel adalah suatu bagian yang penting dari komponen jalan rel, dan memiliki fungsi (Esveld, 2001):

1. Menerima beban dari roda dan mendistribusikan beban ke bantalan.
2. Roda mengarah secara lateral untuk menyalurkan, dan mendistribusikan gaya horizontal lateral yang bekerja pada kepala rel ke bantalan atau penyangga.
3. Sebagai jalan antara permukaan yang halus, mudah untuk dilalui, dan mendistribusikan gaya akselerasi serta pengereman.
4. Sebagai penghantar arus untuk jaringan kereta api listrik
5. Sebagai penghantar arus sinyal.

Tipe Rel dapat terlibat pada Gambar 2.20 di bawah ini:

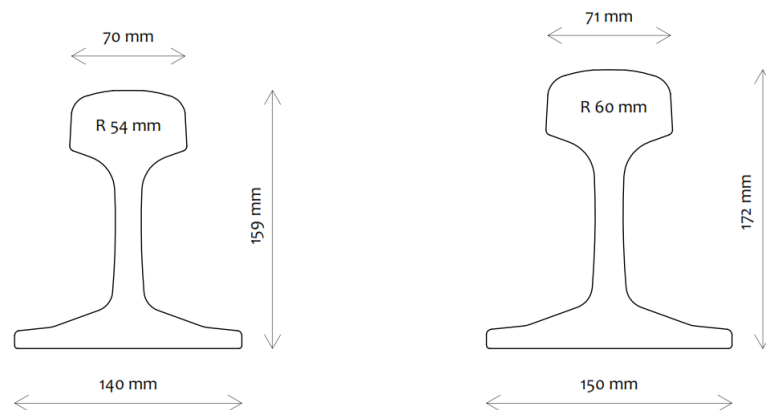


Gambar 2.20 Tipe Rel untuk jalan KA (Esveld, 2001)

Penggunaan tipe rel untuk jalan kereta api, disesuaikan terhadap kebutuhan di lapangan, berikut kegunaan tipe rel sesuai Gambar 2.20 di atas:

- a. *Flat bottom rail* (rel standar) adalah rel yang profilnya digunakan sebagai standar aturan umum untuk jalan rel jenis konvensional.
- b. *Non-standard profile* (rel tidak standar) merupakan rel yang memiliki badan lebih tebal dari rel standar biasanya, berfungsi untuk bagian wesel normal (*turnout*) serta wesel silang (*scissor crossing*), dan perangkat untuk pemuaian (*mechanical joint*);
- c. *Grooved rail* adalah sebuah rel yang memiliki lekukan di atas permukaan yang berfungsi sebagai alur pada struktur jalan rel. rel tipe ini sangat terbatas sering digunakan pada emplasemen, dan perlintasan sebidang di jalan raya.

Rel yang lazim dipakai Indonesia dengan kode R-XX, arti XX adalah angka yang menunjukkan berat rel (kg) setiap satuan meter panjang. Contohnya adalah R54 artinya berat rel yaitu 54 kg/ meter satuan panjang. Jenis rel yang digunakan di Indonesia antara lain: R25, R33, R41/42, R54 dan R60. Sebagian rel tersebut (R25 sampai dengan R41) merupakan peninggalan Belanda. Berikut profil potongan melintang rel ditunjukkan pada Gambar 2.21 di bawah ini:



Gambar 2.21 Dimensi potongan rel tipe R54 dan R60
Sumber: Perjana 2012

Dari gambar diatas tipe R pada rel menunjukkan berat rel per meter, sedangkan pemilihan jenis rel di lintas menunjukkan bahwa akan lebih murah, dan ekonomis dengan cara memilih rel yang lebih berat daripada menggunakan rel yang lebih ringan atau menambah bantalan untuk menahan gaya-gaya yang berkerja (Kramadibrata, 2006).

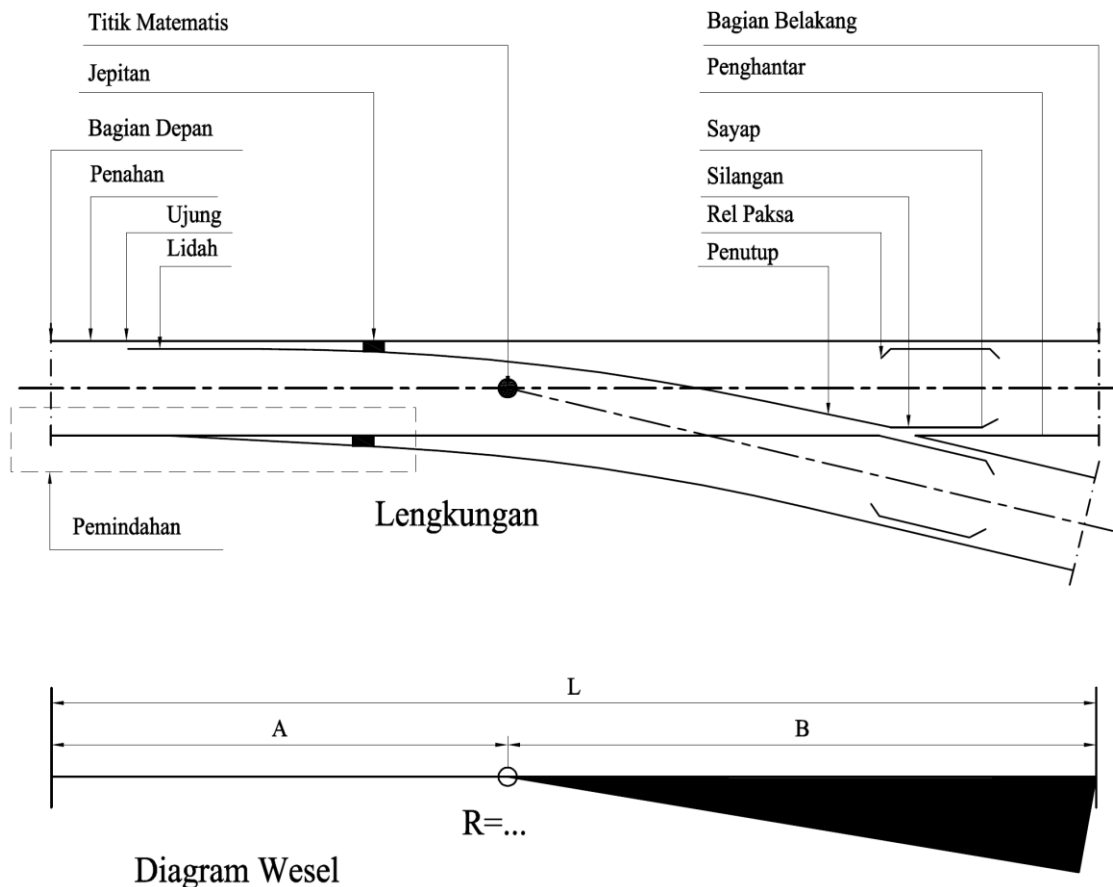
2.10 Bagian Jalan Rel

Bagian jalan rel (*device*) dalam penilaian TQI meliputi wesel, jembatan, perlintasan, lurus dan lengkung. Penilaian TQI menjadi indikator terhadap kondisi jalan rel secara keseluruhan yang berpengaruh langsung terhadap keamanan, dan kenyamanan perjalanan kereta api. Penilaian TQI dilihat dari permukaan kepala rel yang merupakan parameter geometri jalan rel baik berupa pertinggian, angkatan, listring, dan lebar sepur pada berbagai bagian jalan rel.

2.10.4 Wesel (*Turn Out*)

Wesel merupakan sebuah alat untuk membagi jalur rel pada rel kereta api, menjadi bisa dua bagian atau lebih. Wesel memiliki elemen-elemen yang terdiri dari dua jalur, jalur lurus sebagai jalur utama, dan jalur simpang sebagai jalur belok (Heirich, 2019). Tujuan

adanya persilangan pada wesel, agar kedua jalur atau lebih dapat berpotongan/bersilangan pada elevasi permukaan rel yang sama. Wesel merupakan konstruksi jalan rel yang paling rumit dengan beberapa persyaratan, dan ketentuan pokok yang harus dipatuhi (Kementerian Perhubungan, 2012). Gambar 2.22 berikut adalah sebuah wesel pada jalur tunggal.



Gambar 2.22 Wesel standar untuk jalur tunggal

Wesel memiliki susunan 3 bagian yaitu:

1. Bagian Pengarah, yang memiliki 2 buah lidah wesel, dapat bergerak secara bersamaan yang digunakan untuk mengarahkan, dan merubah jalannya kereta api (perjalanan sarana di atasnya).
2. Jarum wesel memiliki sebuah jarum (*frog area*), serta rel sayap (*guard rail*) yang dibuat dengan elevasi geometri yang sama, agar tetap mengarahkan roda yang melintas di atasnya, dan menjamin adanya celah bagi *flens* roda. Jarum wesel merupakan pertemuan rel yang saling berpotongan membentuk sudut yang runcing.

3. *Closure rail*, bagian tersebut menghubungkan antara lidah, dan jarum wesel. Secara struktural bagian lengkung tidak diberi pertinggian (*super elevasi*), agar dapat mengikuti arah jalur yang ditentukan.

Sebagian besar kecelakaan di jalan rel terjadi pada wesel, anjlokan pada wesel terjadi ketika rangkaian kereta melalui wesel yang tidak stabil akibat kegagalan komponen wesel secara mekanis yang di sebabkan jarum wesel, dan lidah wesel yang sudah rusak (Dindar dkk., 2019). Pengoperasian wesel juga membutuhkan biaya perawatan yang sangat besar karena tingkat kerusakan akibat gesekan *flens* roda kereta api terhadap jarum, dan lidah wesel jauh lebih besar dibandingkan gesekan *flens* roda pada jalan rel biasa (Milosevic, 2021).

2.10.5 Jembatan

Jembatan dalam istilah di perkeretaapian Indonesia lebih dikenal dengan Bangunan Hikmat disingkat dengan BH sebagai kode sebelum penomoran jembatan, baik untuk jembatan baja maupun jembatan beton, dengan bentang jembatan diatas 10 m, jembatan di bawah 10 m, dan terowongan diberi kode BH. Jembatan KA adalah suatu konstruksi bangunan sipil yang gunanya untuk meneruskan jalan rel melalui suatu rintangan yang berada lebih rendah (Suwandi, 2021).

Jembatan kereta api merupakan bagian dari suatu sistem operasi yang utuh di bidang prasarana jalan rel yang mendukung langsung moda transportasi perkeretaapian. Jembatan kereta api memiliki dua tipe bangunan atas (*super structure*) berdasarkan jenis material:

- **Jembatan baja**

Konstruksi jembatan baja yang umum digunakan di kereta api terdiri dari jenis material dengan profil I, H, kanal, siku, plat dan pipa dengan sambungan menggunakan paku keling, baut dan las. Tumpuan pada jembatan kereta api dikenal dengan sebutan andas baja, memiliki sistem rol dan sendi berbentuk mekanik. Jalan rel di jembatan baja menumpu pada bantalan kayu pada *base plate* yang di ikat menggunakan baut *tier pon* pada bantalan kayunya.

- **Jembatan beton**

Jembatan beton pada kereta api merupakan konstruksi beton bertulang dengan metode pengecoran di tempat atau menggunakan beton pra cetak. Tipe jembatan beton bertulang

yang sudah di terapkan di lapangan seperti balok girder tipe I, tipe T, tipe kotak (*box girder*), tipe balok berongga (*voided slab*) dan *slab on pile*. Tumpuan jembatan beton menggunakan karet dengan lapisan plat baja atau lebih dikenal dengan *elastomer bearing pad*, dan *lead rubber bearing (LRB)*. Jalan rel yang berada diatas jembatan beton terdiri dari dua tipe yaitu *balasted* dan *slab track* yang posisinya berada di as konstruksi jembatan beton.

- Jembatan komposit

Jembatan komposit merupakan kombinasi dari material baja, dan material beton yang digabungkan untuk memperoleh dimensi yang lebih tipis dengan bentang yang panjang, memiliki kekuatan struktur yang lebih baik, serta memenuhi kaidah teknis yang berlaku. Aplikasi jembatan komposit diantaranya menggunakan gabungan rangka baja dengan plat beton sebagai lantai jembatannya.

2.10.6 Perlintasan

Perlindungan merupakan perpotongan sebidang antara jalan rel kereta api dengan jalan raya. Namun perpotongan sebidang dapat dibuat untuk kecepatan operasi kereta api kurang dari 120 km/jam, dan kepadatan lalu lintas di jalan raya tidak terlalu ramai atau persilangan sangat dibutuhkan karena alasan topografi yang tidak memungkinkan. Perpotongan merupakan suatu persilangan jalan kereta api dengan bangunan lain baik sebidang maupun tidak sebidang, sedangkan persinggungan merupakan keberadaan bangunan lain di jalur kereta api, baik seluruhnya maupun sebagian yang tidak berpotongan. Perawatan di perlindungan sangat diperlukan agar perpotongan maupun persinggungan antara jalur kereta api dengan bangunan lain dapat berfungsi dengan baik (Kementerian Perhubungan, 2011c).

Perlindungan sebidang memiliki kriteria yang ditetapkan dalam Permenhub No. 36 Tahun 2011 sebagai berikut:

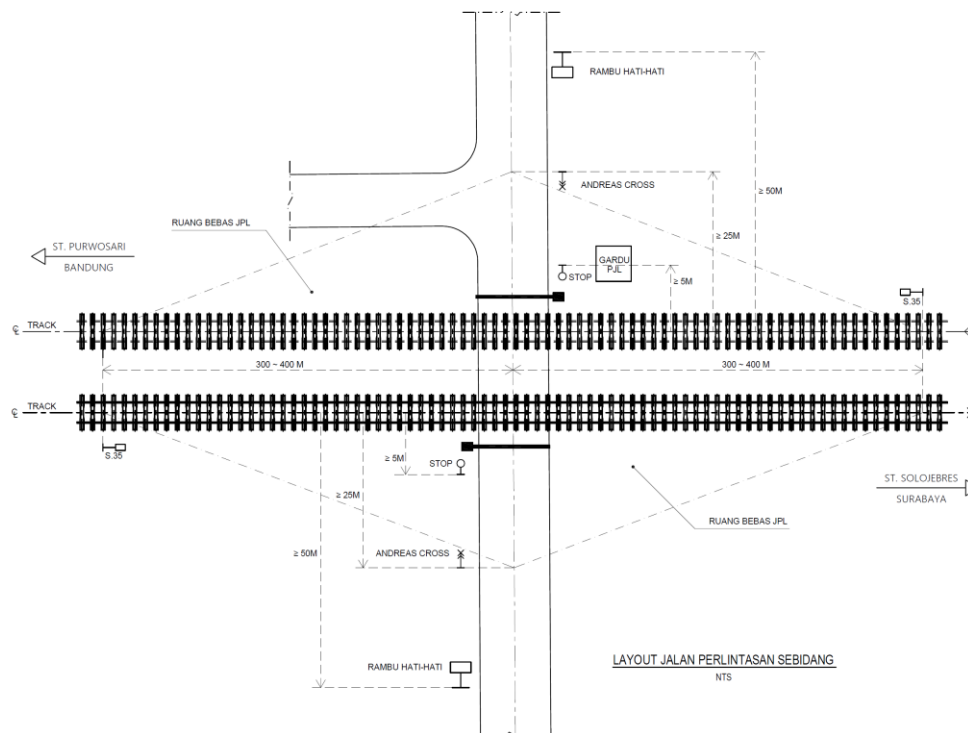
- Kecepatan kereta api yang melewati perlindungan kurang dari 60 km/jam.
- Setidaknya ada 30 menit antara satu kereta dengan kereta berikutnya (perjalanan pertama) yang melewati lokasi.
- Jalan yang lewat merupakan jalan tersier.
- Jarak perlindungan satu ke perlindungan lain di jalur kereta api tidak kurang dari 800 m.
- Persimpangan tidak berada di atas rel atau tikungan jalan.

- Jarak pandang ke perlintasan minimal 500 m untuk masinis kereta api, dan 150 m untuk pengendara kendaraan bermotor.

Perlintasan sebidang dijaga, dan dilengkapi oleh *guard rail* untuk menjamin tetap adanya alur *flens* roda kecuali pada beberapa konstruksi lain yang tidak memerlukan *guard rail* dengan mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut:

- Lebar alur *flens* roda sebesar 40 mm, dan harus bersih dari benda-benda yang menghalangi.
- Panjang *guard rail* selebar jalan perlintasan sampai 0,8 m diluar lebar jalan perlintasan, dan dibengkokkan ke arah bagian dalam agar tidak terjadi tumbukan dengan roda dari rangkaian kereta, serta perlintasan tidak diizinkan adanya sambungan rel.

Perlintasan sebidang kereta api terhadap jalan raya dapat dilihat pada Gambar 2.23 di bawah ini:



Gambar 2.23 Perlintasan sebidang kereta api terhadap jalan raya

Sumber: Permenhub No.36, 2011

2.10.7 Lurusan

Geometri jalan rel direncanakan berdasarkan kecepatan rencana serta dimensi sarana kereta api yang akan melewatinya dengan memperhatikan faktor-faktor keamanan, kenyamanan, ekonomis, dan kesesuaian dengan lingkungan. Pada bagian lurus jalan

rel, elevasi kepala rel pada bagian kiri dengan bagian kanan harus sama. Bagian lurus merupakan bagian horizontal jalan rel yang berada diantara dua lengkung peralihan. Panjang lurus jalan rel minimum sebesar 20 m'sp atau minimal sama dengan panjang satu gerbong kereta api.

2.10.8 Lengkung

Lengkung merupakan perubahan arah jalan rel secara beraturan dari arah lurus menuju ke arah belok atau disebut dengan lengkung horizontal, sedangkan perubahan arah jalan rel dari datar ke arah naik atau turunan dinyatakan sebagai lengkung vertikal (PT. Kereta Api Indonesia, 2012g). Perawatan pada lengkung jalan rel bertujuan untuk mengembalikan kondisi geometri jalan rel pada lengkung yang rusak akibat gerakan kereta api. Perawatan yang sering dilakukan pada lengkung akibat beban tekanan dari *flens* roda kereta api, meliputi:

- Lengkung peralihan
- Peninggian (superelevasi)
- Perubahan jari-jari lengkung (listring)
- Lebar sepur atau jarak antara dua kepala rel

Nilai kerusakan sangat berhubungan dengan lengkung, tempat dimana sering terjadi keausan rel (Aulia & Parikesit, 2017). Rel meskipun dengan jenis yang sama umur layanannya belum tentu sama. Umur layan pada rel dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti keausan, daya angkut lintas yang menyebabkan frekuensi gesekan antara *flens* roda dengan kepala rel, dan rel itu sendiri yang berhubungan dengan dimensi rel.

2.11 Kerusakan Jalur Kereta Api

Kerusakan jalur kereta api, banyak terjadi pada keausan kepala rel akibat gesekan rel dengan flens roda kereta api, kerusakan material jalan rel meliputi bantalan, penambat, batu balas, dan geometri baik alinyemen horizontal, dan alinyemen vertikal. Kerusakan jalur kereta api juga disebabkan oleh kondisi geologi, cuaca, dan faktor yang disebabkan oleh manusia (pengrusakan, dan kelalaian).

2.11.1 Kerusakan Jalan Rel

Model kerusakan rel didasarkan pada parameter rel, badan jalan, mengukur perbedaan kondisi kerusakan, dan membedakan mode kerusakan. Dua klasifikasi umum dari

parameter ini adalah: parameter geometris, dan parameter mekanis (Andrade & Teixeira, 2015).

Kerusakan geometri merupakan penyimpangan yang terjadi di jalan rel pada kondisi aktual yang tidak memenuhi syarat geometri terencana. Parameter kerusakannya adalah:

1. Kerusakan longitudinal,
2. Cacat samping (*transverse defect*),
3. Kerusakan horisontal,
4. Kerusakan pada lebar sepur, dan
5. Kerusakan akibat perbedaan ketinggian antara kepala rel sisi kiri, dan sisi kanan pada jalan rel (meliuk/skilu).

Kerusakan jalan rel masih merupakan hal yang kompleks karena memiliki beberapa faktor, diantaranya beban dinamis kereta api, sub struktur, sifat material, dan kondisi lingkungan yang sangat mempengaruhi mekanisme kerusakan (Guler, 2014). Kerusakan material (mekanikal) merupakan kerusakan yang disebabkan oleh kejadian mekanis, dan alami elemen *track* (rel, *bearing*, *fastener*, *ballast*), hanya dapat diperbaiki dengan mengganti elemen yang rusak. Kerusakan pada jalan rel yang melengkung akibat gerakan radial atau rel memuai karena beban termal, terutama di bawah kondisi resistensi lateral yang lemah ketika adanya perubahan suhu rel yang diakibatkan musim panas cenderung menggerakkan *track* ke arah luar. Demikian juga beban susut di musim hujan/dingin akan menarik *track* melengkung ke arah dalam (Kish & Samavedam, 2013).

2.11.2 Kerusakan Material Jalan Rel

Seperti disebutkan di atas, kerusakan material jalan rel disebabkan oleh proses alami penggunaan material tersebut, dan terdapat cacat pada proses produksi pabrik. Sebagian kerusakan masih dapat diperbaiki untuk membuatnya berfungsi, namun kerusakan yang terjadi telah mencapai akhir masa pakai, sehingga satu-satunya cara yang dapat dilakukan adalah menggantinya dengan material rel yang baru. (PT. Kereta Api Indonesia, 2012b).

2.11.3 Kerusakan Rel

Kerusakan pada rel biasanya merupakan proses kelelahan material rel selama masa pakai. Itu dimulai sebagai retakan kecil, kemudian menjadi retakan besar, dan akhirnya pecah.

Selain itu, rel juga akan aus di kepala rel, membuat kereta api tidak aman. Peralatan untuk pemeriksaan kerusakan rel menggunakan ultrasonic.

Bentuk kerusakan telah diklasifikasikan oleh *Union Internationale Des Chemins De Fer (UIC)* atau *International Union of Railway* merupakan organisasi internasional yang berperan sebagai badan kerjasama di industri perkeretaapian. UIC menjadi rujukan standar teknis industri, operasional, komersial yang berlaku secara global dalam interoperabilitas keselamatan, dan efisiensi perkeretaapian. Kerusakan rel berdasarkan klasifikasi UIC pada lembaran No 712 R [115] (UIC, 2002). Penetapan kode UIC ini berdasarkan skema pada Tabel 2.7 di bawah ini.

Tabel 2.7 Kodefikasi kerusakan rel versi UIC

Angka Pertama		Angka Kedua		Angka Ketiga	
No	Posisi	No	Posisi	No	Posisi
1	Ujung Rel	0	seluruh bagian	1	melintang
		1	kepala rel dalam	2	horizontal
		2	badan	3	longitudinal vertikal
		3	kaki	4	retakan pada lubang plat sambung
2	Jauh Dari Ujung	0	seluruh bagian	1	melintang
		1	kepala rel dalam	2	horizontal
		2	badan	3	longitudinal vertikal
		3	kaki	4	retakan pada lubang plat sambung
		2	permukaan kepala rel	0	karat/aus
				2	mengelupas
				5	akibat slip
4	Pada Sambungan Las	1	Flash butt	1	melintang
		2	Thermit	2	horizontal
		7	Tambalan		
		8	Lain-lain		

Sumber: UIC, 2002

Idealnya, untuk mendapatkan gambaran kerusakan rel dengan memeriksa sarana kereta, dan kemudian memeriksanya kembali rel dengan detektor ultrasonik. Dengan demikian dapat diketahui secara pasti yang memerlukan perawatan terhadap kerusakan adalah sarana (kereta) atau prasarannya (jalan rel).

2.11.4 Kerusakan Bantalan & Alat Penambat

Jika bantalan dan/atau alat pengikat tidak dapat menahan gaya lateral, longitudinal, dan vertikal dari rel di atasnya, maka bantalan, dan alat pengikat tersebut dapat dinyatakan rusak. (ARTC, 2016). Hal tersebut disebabkan karena:

1. Bantalan rusak atau retak di tempat pemasangan perangkat penambat, yang melemahkan kekuatan cengkeraman alat pengikat pada rel, dan bantalan;
2. Bantalan retak, dan terjadi pelapukan;
3. Jarak pemasangan bantalan yang tidak sesuai;
4. Spesifikasi peralatan penambat tidak sesuai dengan rencana (bagian peralatan penambat hilang, dll);
5. Pengencang penambat yang longgar, hilang atau terkorosi

Selain itu bantalan juga dapat dikatakan rusak apabila *rubber pad* yang berfungsi untuk meredam getaran dari rel sudah pecah/getas.

2.11.5 Kerusakan Batu Balas

Struktur *ballast* yang baik terdiri dari material batu balas yang bersih dengan struktur berongga yang dapat ditembus untuk sirkulasi udara, evaporasi, dan drainase dari *ballast base*. Lapisan batu balas yang rusak di mana ukuran, dan bentuk partikel batu balas terdegradasi atau hancur sebagian.

Kerusakan lapisan *ballast* tidak hanya disebabkan oleh pergerakan kereta api, tetapi juga oleh kegiatan pemadatan yang bertujuan untuk memperbaiki geometri jalan rel. Perangkat pemecok secara langsung menghancurkan bentuk batu balas, dan batu balas hancur atau rusak akibat digetarkan oleh mesin *tamping*, untuk memadatkan batu balas di bawah bantalan. Debu atau material halus yang muncul akibat gerusan partikel batu balas menjadi material yang mencemari lapisan *ballast*, dan debu tersebut menjadi lumpur bila terkena air hujan, yang akan melemahkan struktur rel kereta api. Selanjutnya faktor yang dapat mencemari lapisan *ballast*, pada bagian permukaan balas adalah elemen dengan partikel kecil, dan kotoran (batubara, bahan bubuk seperti semen, minyak, minyak, dll), dan dapat membuat lapisan *ballast* di bawah bantalan menjadi menggumpal. Akibat lapisan *ballast* yang berlumpur dapat membuat struktur jalan rel menjadi terikat atau kaku, sehingga lapisan *ballast* tidak dapat menahan beban dinamis, yang menyebabkan bantalan dapat pecah. Kerusakan pada batu balas menyebabkan beban getaran yang di terima badan jalan rel menjadi lebih besar, meningkatkan perilaku dinamis badan jalan rel akan memperpanjang siklus umur layan, sehingga akan menghemat biaya perawatan (Ferreira & López-Pita, 2015).

2.11.6 Kerusakan Geometri

Kondisi jalan rel yang dibebani oleh kereta api, menyebabkan lapisan batu balas, dan tanah dasar (*sub grade*) akan mengalami deformasi non-elastis. Kondisi jalan rel tidak kembali ke posisi semula (sebelum dibebani) ketika beban kereta api telah lewat (setelah dibebani). Ini berulang, dan terakumulasi yang mengakibatkan deformasi pada struktur jalan rel.

Perbaikan jalan rel dilakukan dengan pemadatan kembali lapisan balas (pemecokan/tamping) sehingga elevasi jalan rel diharapkan kembali seperti semula. Namun, hal ini tidak berlangsung lama, sehingga setiap kali dilakukan pemecokan, penurunan elevasi jalan rel juga akan semakin besar. Jika setiap titik mengalami penurunan yang sama besar maka akan terjadi ketidakteraturan alinyemen vertikal. Akan tetapi jika penurunan yang terjadi tidak seragam karena tidak homogenya daya dukung tubuh baan, dan distribusi beban maka penurunan yang tidak seragam tersebut menimbulkan gelombang pada kerataan jalan rel yang berpengaruh pada sarana yang melewatinya.

Kerusakan geometri jalan rel dengan penyebab utama yaitu (Esveld, 2001):

1. Penurunan lapisan *ballast* yang tidak merata disebabkan oleh kondisi batu balas itu sendiri atau perbedaan kekakuan badan jalan
2. Rel yang tidak simetris
3. Perbedaan beban dinamis yang disebabkan oleh sarana.

Penurunan kualitas jalan dapat dilihat dari perubahan yang dimulai dengan pengurangan tamping untuk efisiensi, dan kategori kerusakan. Kedua hal yang mempengaruhi frekuensi kegiatan pemecokan, dimana periode pemecokan menjadi lebih singkat dari sisi waktu. Akhirnya, akibat pemecokan yang tidak rutin di awal, menyebabkan aktivitas pemecokan menjadi sangat sering sehingga menjadi tidak efisien, dan mempengaruhi aktivitas perawatan lain, seperti penggantian atau pembersihan batu balas.

2.12 Track Quality Index (TQI)

Konstruksi jaringan jalur kereta api membutuhkan dukungan finansial yang sangat besar, tidak hanya pada tingkat konsepsi, dan desain, tetapi juga selama masa operasi, yang menuntut estimasi lengkap, serta ketat dari total biaya yang dibutuhkan dalam sistem operasi kereta api. Selain itu, karena kereta berjalan dengan kecepatan tinggi dengan

tonase yang sangat berat, jalur kereta api lebih sering rusak, yang dapat menimbulkan ancaman keselamatan dalam pengoperasiannya. Perawatan jalan kereta cenderung mahal serta sulit dikelola secara efektif. Hal tersebut dikarenakan banyaknya parameter yang mempengaruhi laju penurunan umur jalur kereta api. Oleh karena itu, industri kereta api berusaha meningkatkan produktivitas tim pemeliharaan mereka melalui kontrol yang lebih efektif atas kerusakan jalan rel (Sadeghi & Askarinejad, 2012).

Kualitas jalan rel (nilai untuk kebutuhan pemeliharaan) umumnya dinilai dengan menjalankan kereta ukur jalan rel dengan *sensor accelerometer* yang dipasang pada as kereta. Data akselerasi yang diperoleh diproses dengan integrasi, dan penyaringan berlapis untuk mengevaluasi geometri jalan rel yang dimuat secara diferensial (Abadi dkk., 2018). Ketika *track geometry* melebihi ambang batas kecepatan maksimum yang diizinkan oleh standar pemerintah, itu dianggap gagal. Dalam keadaan gagal, kualitas perjalanan yang baik akan hilang, dan akan mempengaruhi keselamatan (L. Caetano & Teixeira, 2016).

Track quality index beberapa negara di tentukan berdasarkan besarnya lebar sepur yang di gunakan di negara tersebut, kondisi topografi, iklim, beban kereta yang digunakan, dan tipe profil kepala rel. Tabel 2.8 berikut merupakan definisi *track quality index* berbagai negara di dunia:

Tabel 2.8 Definisi *Track Quality Index* di Dunia

No.	Negara	Istilah	Definisi
1.	UK dan Australia	<i>Standar Deviation Index (SD Index)</i>	Nilai yang diambil dari standar deviasi 7 parameter, dari panjang segmen antara 100 – 200 m.
2.	Netherland	<i>Quality Index (Q Index)</i>	Nilai konversi dari ke 80 percentile standar deviasi. Nilai Q Index dari 10-0, dengan keterangan semakin besar semakin baik.
3.	Jepang	<i>P Index</i>	Nilai rasio dari nilai <i>sampling point</i> dimana parameter pengukuran ± 3 mm terhadap nilai total <i>sampling point</i> satu segmen. Semakin besar P Index, maka semakin buruk.
4.	Amerika	<i>Track Roughness Index</i>	Nilai rata-rata dari nilai pengukuran yang dikuadratkan sepanjang satu segmen.
5.	India	<i>Track Geometry Index</i>	Nilai pengukuran panjang lintasan aktual yang dibandingkan dengan panjang segmen. Semakin kecil nilai TQI, maka semakin baik.
6.	Kanada	Canadian TQI	Nilai 2 nd polynomial dari standar deviasi pada panjang segmen tertentu. Semakin besar nilai TQI maka semakin baik.

Cara mengevaluasi kualitas, dan meningkatkan pemeliharaan jalur kereta api secara ilmiah menjadi masalah yang mendesak untuk memastikan keselamatan operasi kereta api, keandalan, dan alokasi sumber daya rasional. *Track Quality Index* (TQI) adalah angka prestasi yang secara objektif mengukur kondisi jalur kereta api. TQI dapat memantau operasi degradasi, pemeliharaan jalur kereta api, dapat merangkum, menampilkan kondisi sebagian besar jalur KA, berkorelasi dengan standar keselamatan, dan nilai kualitas perjalanan (Hamid & Gross, 1981).

Kualitas jalur kereta api dapat diukur dengan parameter yang berbeda, beberapa parameter terkait dengan kualitas jalan rel, kekasaran horizontal, kekakuan jalan rel. Saat ini penilaian kualitas jalan rel didasarkan pada data geometri yang diukur saja, baik dengan membandingkan kerusakan dengan nilai batas yang telah ditentukan atau dengan menghitung standar deviasi (Berggren dkk., 2008). Sedangkan pengukuran kekasaran permukaan jalan rel merupakan penilaian indeks kualitas jalan rel untuk merencanakan pemeliharaan (Roghani dkk., 2015b). Kualitas lintasan jalan rel (*track*) didefinisikan sebagai nilai numerik yang mewakili kondisi relatif dari geometri permukaan jalan rel (Berawi dkk., 2010b). Dalam definisi tersebut, metrik penilaian kualitas jalan rel didasarkan pada standar deviasi. Standar Deviasi (S) memberikan gambaran tentang kualitas keseluruhan dari lintasan yang dihitung (Rizwan, 2010). Indeks kualitas jalan rel dihitung menggunakan nilai standar deviasi dari setiap segmen yaitu:

$$S = \sqrt{\frac{\sum xi^2 - \frac{\sum xi^2}{n}}{n-1}} \quad (2.3)$$

dengan:

S = nilai standar deviasi

$\sum xi^2$ = jumlah nilai x dikuadratkan

n = jumlah data

Metode pengukuran *Track Quality Index* (TQI) terdiri dari 4 parameter pengukuran yaitu pertinggian, angkatan, listringan, dan lebar sepur. Selain parameter tersebut, selama pengukuran juga dicatat kecepatan operasional pengukuran. Pengambilan data ukur dilakukan secara kontinyu sepanjang segmen (200 m). Untuk angkatan, listringan dan pertinggian satu segmen mewakili panjang 40 meter, sedangkan lebar sepur satu segmen

mewakili panjang 20 meter (PT. Kereta Api Indonesia, 2012d). Tiap segmen dihitung nilai standar deviasinya.

$$TQI = Sw + Sz + Sy + Se \quad (2.4)$$

dimana:

Sw = standar deviasi pertinggian (mm)

Sz = standar deviasi angkatan (mm)

Sy = standar deviasi listringan (mm)

Se = standar deviasi lebar spur (mm)

2.13 Kereta Ukur Jalan Rel

Kereta Ukur Jalan Rel digunakan untuk mengukur geometri jalur kereta api. Hasil pengukuran geometri akan tergantung pada kondisi material jalan rel. Kondisi material yang buruk akan mengurangi umur lintasan yang dihitung dari tanggal pengukuran terakhir, sedangkan faktor dinamis kereta api akan mempengaruhi stabilitas jalan rel. Hasil pengukuran geometri oleh kereta ukur jalan rel, memperoleh nilai kategori TQI yang di distribusikan ke lapangan untuk di tindaklanjuti apakah perlu melakukan pengurangan kecepatan operasi dengan pembatasan kecepatan tetap (Taspat), pemeliharaan langsung, atau preservasi jalan rel. Kereta ukur jalan rel digunakan untuk mengukur geometri jalan rel meliputi lebar sepur, alinyemen dan pertinggian rel (Santos & Barbosa, 2016). Ada berbagai nilai toleransi hasil kereta ukur yang diberikan di beberapa negara, dengan konsekuensi bahwa semakin kecil nilai toleran, semakin tinggi biaya perawatan (Setiawan & Rasyidi, 2016).

Saat penelitian ini dilakukan, Kereta ukur jalan rel yang digunakan oleh PT. Kereta Api Indonesia (Persero) adalah EM 120 yang hanya dimiliki satu unit di Pulau Jawa, dan TPKLW satu unit di pulau Sumatera. Kecepatan kereta ukur jalan rel merupakan variabel yang sangat tergantung pada masinis, beban kereta api, kondisi cuaca, dan batas kecepatan yang ada pada jalur kereta api. Namun, pada kecepatan yang berbeda akan mempengaruhi pembacaan nilai kualitas jalan rel yang diuji, tetapi posisi pembacaan data masih dapat di identifikasi (Barbosa, 2016). Sedangkan untuk pengelompokan data TQI berdasarkan jenis kereta ukur yang digunakan adalah sebagai berikut:

- KA Ukur EM 120 yang dioperasikan di Pulau Jawa untuk mengukur kondisi geometri jalan rel secara keseluruhan (pertinggian, angkatan, listring, dan lebar sepur) dengan waktu pengukuran setiap tiga bulan sekali dalam satu tahun. Hasil kereta ukur jalan rel juga digunakan untuk menilai kinerja unit jalan rel, dan jembatan berupa nilai *Total Quality Index* (TQI) pada petak jalan yang dilalui. Pengelompokan nilai TQI dapat dilihat pada Tabel 2.9 sebagai berikut:

Tabel 2.9 Klasifikasi Kategori TQI

No.	Kategori	TQI	Kecepatan Operasi	Keterangan
1.	I	$TQI \leq 20$	$100 \leq V < 120$ km/jam	Baik Sekali/Nyaman
2.	II	$20 \leq TQI \leq 35$	$80 \leq V < 100$ km/jam	Baik/Aman
3.	III	$35 \leq TQI \leq 50$	$60 \leq V < 80$ km/jam	Sedang/Waspada
4.	IV	$TQI > 50$	$40 \leq V < 60$ km/jam	Jelek/Bahaya

Sumber: Perjana, 2012

- KA Ukur TKPLW adalah Kereta ukur jalan rel dengan dasar pengukuran akselerasi getaran (horizontal, vertical, dan longitudinal) dengan menggunakan accelerometer. Makin baik kondisi jalan rel maka makin kecil getaran yang dihasilkan. Khusus jalan rel, pengukuran hanya pada arah horizontal dan vertikal dengan skala gravitasi 0,4G. Dari pengukuran terhadap 2 arah tersebut kemudian diproses menjadi angka dengan menggunakan metode JL Koffman. Karena akselerasi sangat berkaitan dengan kecepatan, maka angka yang dihasilkan dari grafik horizontal, dan vertikal dirumuskan dengan memperhitungkan kecepatan GAPEKA, kecepatan kereta pada saat pengukuran sampai memperoleh nilai “N” (Norma) yaitu NH (Norma Horisontal), dan NV (Norma Vertikal) setiap kilometer. Norma pengukuran sebagai berikut:

$N \geq 115$	: baik sekali
$100 \leq N < 115$	: baik
$85 < N < 100$	: sedang
$70 \leq N \leq 85$	: jelek

Pengukuran geometri menggunakan kereta ukur jalan rel EM 120 akan menghasilkan beberapa parameter, seperti pertinggian, angkatan, listringan, dan lebar sepur. Empat parameter tersebut kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan nilai TQI. TQI memiliki satuan kumulatif dalam milimeter (mm) yang sama tetapi berbeda dalam vektor. TQI Indonesia diklasifikasikan menjadi 4 kategori, dan dikonversi sebagai kondisi jalan rel kategori I, II menunjukkan nyaman, dan aman dengan kecepatan operasi 120-80 km/jam, sedangkan kategori III, IV dengan pembatasan kecepatan tetap serta

dikualifikasikan sebagai kondisi waspada, dan berbahaya sehingga jalan rel dengan kategori tersebut harus segera dilakukan perawatan. Kualifikasi kategori kondisi jalan rel dimaksudkan sebagai rujukan untuk perawatan dan penentuan kecepatan operasi maksimum pada jalan rel.

Tabel 2.10 Parameter dan Toleransi Pekerjaan Perawatan Track

Parameter	Kategori I	Kategori II	Kategori III	Kategori IV
Lebar Spoor (gauge)	0 – 5 (mm)	6 – 10 (mm)	11 – 15 (mm)	> 15 (mm)
Angkatan (levelling);	0 – 5 (mm)	6 – 10 (mm)	11 – 15 (mm)	> 15 (mm)
Listrangan (lining);	0 – 5 (mm)	6 – 10 (mm)	11 – 15 (mm)	> 15 (mm)
Pertinggian (<i>cant</i>);	0 – 5 (mm)	6 – 10 (mm)	11 – 15 (mm)	> 15 (mm)
Jumlah TQI	0 – 20	21 – 35	36 – 50	> 50 (mm)
Kecepatan (km/jam)	$100 \leq V_{maks} \leq 120$	$80 \leq V_{maks} \leq 100$	$60 \leq V_{maks} \leq 80$	$V_{maks} < 60$
Kondisi	Nyaman	Aman	Waspada	Bahaya
Tindakan	Perawatan Rutin	Perawatan Rutin	Perawatan Segera	Perawatan Mendesak

Sumber: Perjana, 2012

Pada Tabel 2.10 di atas, dapat dilihat bahwa hanya kategori I, dan II yang dapat mencapai kecepatan operasi yang diizinkan grafik perjalanan kereta api serta dapat melintas dengan kecepatan operasi maksimum sesuai dengan jenis sarana kereta api. Namun pada kategori II masih perlu dilakukan perawatan sebagai tindakan untuk memperbaiki kerusakan kecil dengan tujuan meningkatkan kondisi jalan rel agar dapat menjadi nyaman. Namun demikian, hasil pengukuran oleh kereta ukur jalan rel, pada kenyataannya tidak mewakili seluruh kondisi jalur kereta api, sedangkan pengukuran ini sangat penting untuk menentukan pekerjaan perawatan yang harus dilakukan agar kecepatan operasi maksimum pada jalur KA tersebut dapat tercapai.

2.14 Statistik

Kata Statistik berasal dari kata Latin “status” atau Italia “statista” yang bermakna “negara politik” atau “pemerintah”. Gottfried Achenwall mendefinisikan statistik sebagai ilmu yang mengajarkan kita mengenai deskripsi komprehensif dari sosial, politik dan ekonomi suatu negara, sehingga statistik merupakan suatu kegiatan yang berkorelasi dalam proses analisis data kenegaraan (Putri dkk., 2021). Menurut (Khotimah & Nasrulloh, 2020) statistik merupakan kumpulan fakta berbentuk angka yang disusun dalam daftar atau tabel, yang menggambarkan suatu persoalan.

Statistik digunakan pula untuk menyatakan ukuran sebagai wakil dari kumpulan data mengenai suatu hal. Ukuran ini didapat berdasarkan hasil perhitungan sebagai

kumpulan data tentang persoalan tersebut. Statistika adalah ilmu yang mempelajari metode pengumpulan data, manipulasi, penyajian, analisis, penarikan kesimpulan, dan pengambilan keputusan yang adil berdasarkan fakta yang ada. Statistik dibagi menjadi dua berdasarkan cara pengolahannya (Fadli, 2021), yaitu:

1. Statistik deskriptif

Statistik deskriptif hanya dimaksudkan untuk menjelaskan atau memberikan gambaran tentang subjek penelitian, bukan untuk memberikan arti/kesimpulan. Dalam statistik deskriptif, data dapat direpresentasikan menggunakan tabel atau grafik. Biasanya dasar untuk mendeskripsikan data dalam statistik deskriptif adalah mean, median, modus dan simpangan baku.

2. Statistik inferensial (induktif)

Statistik inferensial bertujuan untuk menarik suatu kesimpulan dari suatu himpunan data terhadap data yang lebih besar. Diperlukan statistik inferensial untuk memberikan dugaan awal sebelum dilakukannya pemeriksaan kesimpulan

2.14.1 Hipotesis

Hipotesis dalam statistik merupakan suatu anggapan atau pertanyaan penelitian, yang mungkin benar atau salah, dalam suatu populasi atau lebih. Untuk mengetahui apakah pertanyaan penelitian yang dilakukan benar atau salah untuk menerima atau menolak hipotesis, dibuktikan dengan pengujian data sampel (Krisanti & Santosa, 2008).

Hipotesis berasal dari kata hipo, dan thesis. Hipo berarti sementara lemah kebenarannya, dan *thesis* berarti pernyataan atau teori. Dengan demikian hipotesis dapat diartikan pernyataan sementara yang perlu di uji kebenarannya. Untuk mengguji sebuah kebenaran hipotesis digunakan pengujian yang disebut uji hipotesis. Dalam penelitian ini uji hipotesis dilakukan terhadap 2 jenis hipotesis, yaitu hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_a), dimana:

- a. Hipotesis nol (H_0)

Hipotesis yang menyatakan tidak ada perbedaan sesuatu kejadian antara dua kelompok, atau hipotesis yang menyatakan tidak ada hubungan antara variabel satu dengan variabel lainnya.

b. Hipotesis alternatif (H_a)

Hipotesis yang menyatakan ada perbedaan suatu kejadian antara kedua kelompok, atau hipotesis yang menyatakan ada hubungan variabel satu dengan variabel lainnya.

Arah atau bentuk hipotesis alternatif akan menemukan arah uji statistik apakah satu arah (*one tail*), atau dua arah (*two tail*). Dimana *one tail* (satu sisi) terjadi bila hipotesis alternatifnya menyatakan adanya perbedaan, dan ada pernyataan yang mengatakan hal yang satu lebih tinggi atau rendah dari hal yang lain. Sedangkan *two tail* (dua sisi) merupakan hipotesis alternatif yang hanya menyatakan perbedaan tanpa melihat apakah hal yang satu lebih tinggi atau rendah dari hal yang lain.

2.14.2 Error Type 1, dan 2

Dalam pengujian hipotesis akan ditemui suatu kesalahan dalam pengambilan keputusan penelitian. Terdapat dua jenis kesalahan pengambilan keputusan dalam uji statistik, yaitu:

a. Error type 1 (α)

Merupakan kesalahan menolak H_0 padahal sesungguhnya H_0 benar, artinya ada perbedaan padahal sesungguhnya tidak ada perbedaan. Peluang *error type 1* adalah α atau tingkat signifikansi (*significance level*). Begitu juga sebaliknya peluang untuk tidak membuat *error type 1* adalah sebesar $1-\alpha$, yang disebut dengan tingkat kepercayaan (*confidence level*).

b. Error type 2 (β)

Error type 2 merupakan kesalahan tidak menolak H_0 padahal sesungguhnya H_0 salah. Hal ini dapat diartikan bahwa tidak ada perbedaan padahal sesungguhnya ada perbedaan. Peluang untuk membuat *error type 1* ini sebesar β . Peluang untuk tidak membuat *error type 2* ini sebesar $1-\beta$, dan dikenal sebagai tingkat kekuatan uji (*power of the test*).

Kekuatan uji (*power of the test*) merupakan peluang untuk menolak hipotesis nol (H_0) ketika H_0 terbukti salah. Atau dengan kata lain, kemampuan untuk mendeteksi adanya perbedaan bermakna antara kelompok yang diteliti ketika perbedaan-perbedaan itu memang ada ($power = 1-\beta$). Dalam pengujian hipotesis diharapkan nilai α dan β kecil atau ($1-\beta$) besar, namun hal tersebut sulit dicapai karena bila α makin kecil maka nilai β akan semakin besar. Dalam mengambil keputusan harus menolak atau tidak menolak H_0 , maka harus diputuskan memilih satu yaitu α atau β . Untuk amannya dipilih nilai α .

Confusion matrix, atau matrik kebingungan merupakan sebuah tabel yang digunakan untuk menampilkan jumlah data uji yang diprediksi dengan benar atau salah, serta jenis kesalahan yang dibuat oleh model, sehingga memudahkan dalam mengevaluasi akurasi suatu sistem. *Confusion matrix* juga dapat melihat secara detail kinerja suatu sistem klasifikasi dan mengidentifikasi dimana terjadi kesalahan klasifikasi (Normawati & Prayogi, 2021). *Confusion matrix* merupakan teknik yang mudah dan efektif dalam mengukur kinerja sistem klasifikasi. Tujuan dari *confusion matrix*, untuk menilai performa atau akurasi dari suatu sistem klasifikasi dalam mengklasifikasikan data uji (Amardita dkk., 2022). Tabel confusion matrix nilai prediksi terhadap nilai aktual seperti terlihat pada Tabel 2.11 dibawah ini.

Tabel 2.11 *Confusion Matrix*

<i>Confusion Matrix</i>		Nilai Prediksi	
		1	0
Nilai Aktual	1	TP	FN
	0	FP	TN

Elemen-elemen dalam *confusion matrix*:

- TP (*True Positive*) = Jumlah data positif yang diprediksi dengan benar sebagai positif
- TN (*True Negative*) = Jumlah data negatif yang diprediksi dengan benar sebagai negatif
- FP (*False Positive*) = Jumlah data negatif yang diprediksi salah sebagai positif (*error type 1*)
- FN (*False Negative*) = Jumlah data positif yang diprediksi salah sebagai negatif (*error type 2*)

Rumus confusion matrix untuk menghitung accuracy, precision, dan recall sebagai berikut:

$$accuracy = \frac{TP+TN}{Total} \quad (2.5)$$

$$precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2.6)$$

$$recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2.7)$$

Level of significance merupakan *error type 1* suatu uji yang biasanya diberi notasi α (alpha). Tujuan dari pengujian hipotesis adalah untuk membuat suatu pertimbangan

tentang perbedaan antara nilai sampel dengan keadaan populasi sebagai suatu hipotesis. Selanjutnya setelah menentukan hipotesis nol dan hipotesis alternatif adalah menentukan kriteria atau batasan yang digunakan untuk memutuskan apakah hipotesis nol ditolak atau gagal ditolak yang disebut dengan tingkat kemaknaan (*level of significance*). Tingkat kemaknaan, atau sering disebut dengan nilai α , merupakan nilai yang menunjukkan besarnya peluang salah dalam menolak hipotesis nol. Atau dapat dikatakan, nilai α merupakan batas toleransi peluang salah dalam menolak hipotesis nol. Penentuan nilai α (alpha) tergantung dari tujuan dan kondisi penelitian. Nilai α yang sering digunakan adalah 10%, 5% dan 1%, untuk penelitian ini nilai α yang digunakan sebesar 5%.

Analisis uji statistik adalah menghitung data sampel kedalam uji hipotesis yang sesuai. Dari analisis tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai populasi untuk mengetahui apakah data hipotesis ditolak atau gagal menolak hipotesis. Hasil analisis statistik menghasilkan dua kemungkinan keputusan yaitu menolak hipotesis nol dan gagal menolak hipotesis nol. Keputusan uji statistik dapat dicari dengan dua pendekatan yaitu pendekatan klasik, dan pendekatan probabilistik yaitu:

a. Pendekatan klasik

Memutuskan apakah H_0 ditolak maupun gagal tolak, dapat digunakan dengan cara membandingkan nilai analisis uji statistik dengan nilai pada tabel. Nilai tabel yang dilihat sesuai dengan jenis distribusi uji yang dilakukan, untuk uji z maka nilai tabel dilihat dari tabel z (tabel kurva normal). Besarnya nilai tabel sangat tergantung dari nilai alpha (α) yang digunakan dan juga tergantung dari apakah uji satu sisi / satu arah atau uji dua sisi / dua arah. Bila nilai uji statistik lebih besar dibandingkan nilai yang berasal dari tabel (nilai analisis > nilai tabel), maka keputusannya : H_0 ditolak. Sebaliknya juga, jika nilai analisis < nilai tabel, maka keputusannya : H_0 gagal tolak.

b. Pendekatan *probabilistic*

Uji statistik dengan alat bantu perangkat lunak RStudio sudah dapat diperoleh nilai p (p-value). Dengan nilai p ini dapat digunakan untuk keputusan uji statistik dengan cara membandingkan nilai p-value dengan nilai alpha (α). Dengan ketentuan yang berlaku, bila nilai p-value < nilai alpha (α) maka keputusannya adalah H_0 ditolak, jika nilai p-value > nilai alpha (α) maka keputusannya adalah H_0 gagal tolak.

2.14.3 Exploratory Data Analysis (EDA)

Exploratory Data Analysis (EDA) merupakan salah satu strategi dalam menganalisis data. Karena bersifat fleksibel, EDA mengeksplorasi data dengan berbagai perspektif tanpa terpaku dengan satu teknik yang baku (Behrens, 1997). Cara kerja EDA adalah dengan menghasilkan hipotesis, serta menemukan *outlier* dan asumsi yang dapat mempengaruhi *validitas Confirmatory Data Analysis* (CDA). Berbeda dengan EDA, CDA sangat terbatas dengan pemikiran bahwa semua jenis data memiliki model probabilitas yang cukup baik, dengan pertanyaan yang formalitas sama untuk semua jenis data dan hanya melakukan penilaian atas apa yang sudah pasti pada data tersebut (Cleveland & Devlin, 1988). Melihat kondisi data yang ada, CDA kurang efektif jika tanpa dikombinasi dengan EDA.

Tujuan EDA adalah untuk melengkapi hasil analisis klasifikasi data mining yang digunakan dalam mengenali pola data. Menurut (Wendy dkk., 2017) EDA digunakan untuk tujuan pengurangan dimensi data atau memperkaya pemahaman atas analisis data melalui visualisasi data. “*International Journal of Psychological Research*” (2010) menjelaskan bahwa untuk memperkaya analisis data dan mengoptimalkan hasil klasifikasi, EDA dapat membantu memaksimalkan pengetahuan mengenai data, menghasilkan variabel yang penting, mendeteksi *outlier* dan anomali, dan menguji asumsi awal melalui data *mining*.

2.14.4 Uji Normalitas

(Haniah, 2013) menyebutkan uji normalitas adalah ketika data empiris yang didapatkan dari lapangan sesuai dengan distribusi teoritik tertentu. Dalam penelitian ini, dimana distribusi normal pada variabel bebas dan variabel terikat penelitian diharapkan keduanya berdistribusi normal, dan mendekati normal atau tidak. Tujuan dari uji normalitas adalah untuk mengetahui data yang diperoleh dari hasil penelitian berdistribusi normal, yaitu distribusi data dengan bentuk lonceng. Maksudnya data tersebut memiliki pola berdistribusi normal atau mendekati normal dimana data tersebut tidak terlalu menghadap ke kanan atau pun ke kiri.

Berikut beberapa jenis uji normalitas yang umum digunakan dalam beberapa penelitian menurut (Widhiarso, 2012).

1. *D'Agostino - Pearson Omnibus test.*

Selama proses ini, nilai *skewness* dan kurtosis dihitung untuk mengukur seberapa mirip data dengan distribusi Gaussian dalam hal asimetri dan bentuk. Prosesnya adalah menghitung berapa banyak setiap nilai dalam data berbeda dari nilai yang diharapkan berdasarkan distribusi *Gaussian*. Selanjutnya akan menghasilkan nilai p tunggal dari sejumlah perbedaan yang didapatkan dari analisis.

2. *Uji Shapiro - Wilk.*

Uji ini bekerja optimal untuk data yang sifatnya unik atau independen, tetapi tidak bekerja dengan baik ketika data tersebut memiliki keterkaitan.

3. *Uji Kolmogorov - Smirnov, dengan koreksi Dallal - Wilkinson - Lilliefors.*

Uji ini bekerja dengan cara membandingkan antara distribusi kumulatif dengan distribusi normal yang diharapkan. Karena merupakan uji beda, jika nilai p yang dihasilkan tidak signifikan ($p > 0,05$) maka tandanya tidak ada perbedaan antara kedua distribusi yang dibandingkan tersebut.

Widhiarso, (2012) menambahkan pula bahwa semua uji normalitas yang dilakukan hanyalah untuk menunjukkan seberapa jauh distribusi data yang menyimpang dari distribusi normal, bukan suatu kebetulan. Hal ini dapat dipastikan jika ukuran sampel yang besar digunakan. Namun, di sisi lain, dengan menggunakan sampel yang kecil, maka uji normalitas tidak memiliki kekuatan yang cukup untuk mendeteksi bias tersebut.

2.14.5 Uji Beda

Sesuai dengan namanya, uji beda, maka uji ini dipergunakan untuk mencari perbedaan, baik antara dua sampel data atau antara beberapa sampel data. Begitu juga menurut Santoso & Tjiptono (2001) bahwa pada dasarnya uji dua sampel adalah ingin mengetahui apakah ada perbedaan rata-rata (*mean*) antara dua populasi, dengan melihat rata-rata dua sampelnya.

Jika variabel bebas memiliki 2 kategori, maka uji statistik yang sesuai untuk digunakan adalah uji beda t. Untuk lebih dari 2 kategori, uji statistik yang cocok digunakan adalah analisis *varians* (Anova). Namun, jika terdapat lebih dari satu variabel terikat, maka yang paling sesuai adalah analisis *multivariat varians* (Manova) (Ghozali, 2006).

2.14.6 *Outlier*

Jika suatu pengamatan dilakukan secara tidak benar atau gagal dilakukan pada salah satu satuan percobaan, maka data tersebut menjadi *outlier*. Ini disebut sebagai data yang hilang dalam desain eksperimental. Akibatnya, data yang hilang juga dapat disebut sebagai *outlier*. (Weisberg, 2005) mendefinisikan *outlier* sebagai data yang ganjil dan tidak sesuai dari data lain atau data yang menyimpang dari pola keseluruhan. (Draper, 1992) juga menyebutkan bahwa *outlier* (pencilan) merupakan titik data yang sama sekali tidak sama dari data lain dan dianggap sebagai keganjilan. Untuk menentukan penyebab keganjilan, suatu *outlier* harus dianalisis secara cermat. Karena adanya data *outlier* ini akan mendistorsi analisis sekumpulan data atau dapat menyebabkan tidak tercerminkannya suatu fenomena secara akurat, yang dapat berdampak signifikan pada hasil penelitian.

Menurut Soemartini (2007) dalam analisis regresi, *outlier* dapat menyebabkan fenomena berikut:

1. Penyimpangan yang signifikan dari model yang dibangun.
2. Variabilitas data meningkat.
3. Rentang yang lebar dalam taksiran interval

Dalam analisis kelompok, kehadiran *outliers* perlu di deteksi, sebab akan mengganggu analisis. Zuliyanti & Noeryanti, (2021) mengemukakan bila data telah tersedia, untuk mendeteksi keberadaan *outliers* dapat dilakukan dengan menggunakan dua cara berikut ini:

1. Menggunakan *z-score*

Mendeteksi *outlier* dapat dilakukan dengan menentukan batas yang akan dikategorikan sebagai data *outlier* yaitu dengan cara mengkonversi nilai data ke dalam skor *standardized* (*z-score*). *Z-score* memiliki nilai *means* (rata-rata) nol dan standar deviasi satu. Jika ditemui sebuah data memiliki *z-score* lebih besar dari 3 maka perlu dicurigai sebagai *outliers*. Untuk menangani data *outliers* yang lebih dari satu, data *outliers* tersebut dapat dihilangkan atau dipertahankan. Dihilangkan apabila data *outliers* didapat karena kesalahan pengambilan data dan dipertahankan apabila tidak terdapat kesalahan dalam proses sampling maupun memasukan data. Berikut rumus persamaan untuk memperoleh nilai *z-score*.

$$z = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (2.8)$$

dimana :

z = nilai standar/z-score

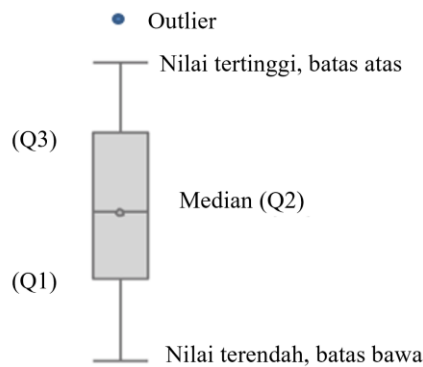
x_i = nilai observasi/data

$\bar{x}$ = mean data

s = deviasi standar sampel

2. Membuat *boxplot*

Box plot atau *boxplot* (yang biasa dikenal sebagai diagram *box-and-whisker*) adalah suatu *box* (kotak berbentuk bujur sangkar) yang berguna untuk melihat derajat penyebaran data (dilihat dari tinggi *box* untuk grafik vertikal) dan untuk menilai kesimetrisan data.



Gambar 2.24 Ilustrasi *outlier*

dengan :

Outlier = nilai ekstrim, nilai yang di atas atau di bawah *whisker*

Whisker = garis perpanjangan *box*

Q3 = *Quartil* tertinggi, yang memotong 25% dari data tertinggi

Q2 = Median

Q1 = *Quartil* terendah, yang memotong 25% dari data terendah

IQR = bagian dari *box* yang berupa bidang atau bagian pertengahan dari 50% observasi, IQR berguna untuk mengukur penyebaran data

Suatu nilai dikatakan *outlier* jika :

$$Q3 + (1,5 \times IQR) < Q3 + (3 \times IQR) \quad (2.9)$$

$$Q1 - (1,5 \times IQR) > Q1 - (3 \times IQR) \quad (2.10)$$

2.14.7 Multikolinearitas

Istilah multikolinearitas ditemukan pertama kali oleh Ragnar Frisch. Mulanya *multikolinearitas* dipahami untuk menandakan bahwa semua atau beberapa variabel

bebas dalam model regresi berganda memiliki hubungan linier yang sempurna atau tidak ambigu (D. C. Gujarati dkk., 2010). Menurut (Nurhasanah dkk., 2012) *multikolinearitas* terjadi apabila terdapat hubungan atau korelasi di antara beberapa atau seluruh variabel bebas.

Gejala multikolinearitas menghadirkan masalah dalam model regresi. Korelasi yang sangat tinggi antar variabel bebas dapat menyebabkan penduga model regresi menjadi bias, tidak stabil, dan mungkin jauh dari nilai prediksinya (Bilfarsah, 2010). Selain itu, Kutner (2005) juga menyatakan bahwa adanya *multikolinearitas* pada model regresi tentu dapat memberikan dampak terhadap model tersebut, yaitu sebagai berikut :

1. Menghasilkan varians besar dari penduga kuadrat terkecil, yang akan menghasilkan kesalahan standar yang lebih besar dan dengan demikian interval kepercayaan yang lebih besar untuk parameter model regresi.
2. Adanya variabel prediktor yang saling berkorelasi berakibat pada penjelasan yang diberikan terhadap variabel respon menjadi tidak akurat (memberikan pengaruh yang sama terhadap variabel respon).
3. Hasil pengujian hipotesis parameter berdasarkan metode kuadrat terkecil menjadi tidak valid.

Masalah *multikolinearitas* dapat diselesaikan dengan menggunakan berbagai cara, antara lain regresi komponen utama, regresi ridge, metode kuadrat terkecil parsial (*partial least square*) dan beberapa metode lainnya. Metode *Partial Least Square* (PLS) merupakan proses pendugaan yang dilakukan secara iteratif dengan melibatkan struktur keragaman variabel bebas dan variabel tak bebas. Metode regresi komponen utama yaitu regresi dengan mengambil komponen utama sebagai variabel bebas.

Kuantitas (*quality*) yang dapat digunakan untuk mendeteksi adanya multikolinearitas adalah *Variance Inflation Factor* (VIF). VIF digunakan sebagai kriteria untuk mendeteksi multikolinearitas dalam regresi linier yang melibatkan lebih dari dua variabel bebas. Nilai VIF lebih besar dari 10 menunjukkan masalah multikolinearitas yang parah (Ryan, 1997). VIF untuk koefisien regresi- j diidentifikasi sebagai berikut:
$$VIF_j = \frac{1}{1-R_j^2}$$
, dengan : R_j^2 adalah koefisien determinasi antara X_j dengan variabel bebas lainnya pada persamaan / model dugaan ; dimana $j = 1, 2, \dots, p$.

2.14.8 Autokorelasi

Definisi yang paling umum dalam literatur menyatakan bahwa korelasi silang dari suatu atribut dengan dirinya sendiri biasanya disebut sebagai autokorelasi (Stojanova, 2013). Menurut (Legendre, 1993) *Autokorelasi* merupakan sifat statistik yang sangat umum dari suatu variabel ekologi yang diamati di seluruh ruang geografis, bentuk dari autokorelasi biasanya berupa tambalan dan gradien. Autokorelasi merupakan salah satu pelanggaran terhadap asumsi pada metode OLS yang terjadi pada pengamatan-pengamatan yang berbeda antar error (Aprianto dkk., 2020).

Salah satu penyebab autokorelasi adalah manipulasi dan penyederhanaan data. Berdasarkan (Tinungki, 2016) data mentah seringkali dimanipulasi dan disederhanakan, misalkan pada proses penjumlahan data triwulan yang kemudian dibagi tiga. Proses rata-rata tersebut akan mengakibatkan kurva dari data triwulan terlihat lebih *smooth*, penghalusan ini yang menimbulkan pola sistematis dalam kesalahan pengganggu, yang berarti akan menimbulkan autokorelasi.

Aprianto dkk., (2020) juga menambahkan salah satu pengujian yang digunakan untuk mendeteksi autokorelasi dalam model regresi adalah dengan menjalankan pengujian. Menjalankan tes memberikan kesimpulan yang lebih jelas, dengan hanya dua kemungkinan, autokorelasi atau tidak ada autokorelasi. Jika terjadi autokorelasi pada model regresi *Ordinary Least Squares* (OLS) maka akan menyebabkan model regresi yang dihasilkan memiliki penduga parameter yang tidak bias. Hal ini mengakibatkan hasil estimasi uji parametrik OLS tidak digunakan untuk mengevaluasi hasil regresi. Oleh karena itu, perlu dilakukan tindakan untuk mengatasi terjadinya autokorelasi. Metode untuk mengatasi autokorelasi adalah *Cochrane-Orcutt*, metode dua langkah *Durbin* dan *Hildret-Lu*.

Metode *Cochrane-Orcutt*, digunakan pada proses awal penelitian yaitu dengan terlebih dahulu data dianalisis menggunakan metode regresi, dan model regresi diperoleh dari data yang diestimasi dengan OLS. Kemudian dilakukan uji hipotesis klasik yaitu uji normalitas, uji multikolinearitas, uji heteroskedastisitas, dan uji autokorelasi. Pengujian autokorelasi dilakukan dengan menggunakan *running test* dari model regresi yang diperoleh untuk mengetahui apakah data tersebut memiliki autokorelasi. Dalam hal ini data yang digunakan harus memiliki autokorelasi, jika tidak berarti data tersebut harus diganti dengan data baru yang mengandung autokorelasi. Selain itu, data yang

mengandung autokorelasi dikoreksi menggunakan metode *Cochrane-Orcutt*. Langkah selanjutnya adalah mengecek kembali uji autokorelasi dengan *run test*. Jika model regresi tidak memiliki autokorelasi, langkah terakhir adalah menginterpretasikan.

2.14.9 Heteroskedastisitas

Menurut Ghazali (2006), heteroskedastisitas berarti terdapat varians yang tidak sama dalam model regresi. Jika sebaliknya, maka varians dari variabel-variabel dalam model regresi memiliki nilai yang sama, disebut homoskedastisitas. Untuk mendeteksi masalah heteroskedastisitas, pada data TQI maka dapat menggunakan uji heteroskedastisitas atau menggunakan metode analisis grafis.

Berdasarkan (D. N. Gujarati, 2021), uji *heteroskedastisitas* menguji perbedaan residual dari satu periode pengamatan ke periode pengamatan lainnya, atau deskripsi hubungan antara nilai prediksi dan nilai residu dihapus yang dipelajari. Regresi yang baik adalah regresi yang minim masalah heteroskedastisitas .

Metode analisis grafis dilakukan dengan mengamati nilai prediksi variabel dependen yaitu kurva antara ZPRED dan residual SRESID (Ghozali, 2017). Analisis metode ini didasarkan pada:

1. Jika terdapat pola tertentu, seperti titik-titik yang membentuk pola tertentu yang teratur (bergelombang, melebar, lalu menyempit), menunjukkan telah terjadi heteroskedastisitas.
2. Jika tidak ada pola yang jelas, dan titik-titik terdistribusi secara acak pada sumbu Y di atas dan di bawah angka 0, tidak terjadi heteroskedastisitas.

2.15 Variabel

Salah satu tahapan dalam melakukan sebuah penelitian adalah menentukan dan mengidentifikasi sebuah variabel. Sugiyono (2013a), mendefinisikan variabel penelitian sebagai atribut, kuantitas atau kualitas, dari suatu objek, orang/kegiatan yang menunjukkan perbedaan tertentu satu sama lain, yang ditentukan sendiri oleh peneliti untuk menyelidiki dan mengambil informasi serta menarik kesimpulan. Tujuan ditetapkannya variabel adalah untuk mempersiapkan alat dan metode analisis/pengolahan data, dan untuk pengujian hipotesis.

Sesuai pada hubungan antara satu variabel dengan variabel lainnya, jenis variabel yang dipelajari yaitu variabel bebas, variabel ini sering disebut sebagai variabel stimulus,

variabel prediktor, dan variabel anteseden. Di Indonesia disebut variabel bebas. Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi atau menjadi penyebab berubahnya atau terjadinya suatu variabel (batas). Variabel ini disebut juga sebagai variabel eksogen. Variabel terikat disebut juga variabel keluaran, kriteria, dan hasil. Dalam bahasa Indonesia disebut variabel terikat. Variabel terikat adalah variabel atau hasil yang dipengaruhi oleh variabel bebas.

2.16 Data Split

Split validation merupakan teknik validasi yang membagi data (*data split*) menjadi dua bagian secara acak, sebagai data *training* dan lainnya sebagai data *testing* yang digunakan untuk proses *training* dan *testing* dalam suatu program. Metode *split training/testing* ini akan memberikan hasil prediksi yang lebih akurat untuk data pelatihan dan data uji. Hasil pencarian dimaksudkan untuk menentukan kriteria mana yang menghasilkan keputusan dan kinerja terbaik berdasarkan nilai akurasi tertinggi dari setiap kelompok data. Metode selanjutnya adalah menghitung kinerja aturan yang dibentuk dengan menjalankan tes yang telah melewati proses pemisahan data. Skenario pengujian yang dilakukan untuk perhitungan performansi ini menggunakan 4 skenario persentase *split*, yaitu:

1. Data keseluruhan akan dibagi menjadi 60% data pelatihan: 40% data pengujian. Data latih yang diperoleh di dalamnya akan digunakan untuk proses pembentukan model, sedangkan data uji akan digunakan untuk pengujian model.
2. Data keseluruhan akan dibagi menjadi 70% data pelatihan: 30% data pengujian. Data latih yang diperoleh akan digunakan untuk proses pembentukan model, dan data uji akan digunakan untuk pengujian model.
3. Data keseluruhan akan dibagi menjadi 80% data pelatihan: 20% data uji. Data latih yang diperoleh di dalamnya akan digunakan untuk proses pembentukan model, sedangkan data uji akan digunakan untuk pengujian model.

Berdasarkan dari hasil penelitian di beberapa jurnal, menyebutkan bahwa data *split* sebesar 80% data pelatihan dan 20% data uji hampir selalu menunjukkan hasil akurasi tertinggi daripada *split* data yang lain. Hal ini mendasari dalam penelitian ini menggunakan prosentase *split* data 80% data pelatihan dan 20% data uji.

2.17 Pemodelan *Multinomial*

2.17.1 Model

Model merupakan representasi dari suatu objek, benda, atau ide-ide dalam bentuk yang di sederhanakan dari kondisi atau fenomena alam (Ahmad, 2008). Model berisi informasi tentang fenomena yang dirancang untuk mempelajari fenomena sistem yang sebenarnya. Model dapat berupa tiruan dari suatu objek, sistem, atau kejadian nyata, dan hanya berisi informasi penting yang dianggap perlu untuk dipelajari. Kata "model" berasal dari kata Latin cetakan atau pola.

Penelitian ini akan menghasilkan model prediksi kategori TQI, untuk itu perlu dilakukan penelurusan teori dan konsep model, pembentuk dan pengembangannya Definisi model menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KKBI) adalah:

1. Pola (contoh, acuan, ragam dan sebagainya) dari sesuatu yang akan dibuat dan dihasilkan.
2. Barang tiruan yang kecil dengan bentuk (rupa) persis seperti yang ditiru.

Model merupakan gambaran, penjelasan dan perkiraan dari suatu kenyataan yang diprediksi. Model juga merupakan representasi sederhana dari suatu realitas. Realitas yang terlalu kompleks untuk dapat dideskripsikan secara tepat dapat disederhanakan dengan model, karena banyak dari kompleksitas itu secara aktual tidak relevan dalam memecahkan suatu permasalahan (Waluyo, 2014).

Teori dan konsep model juga dapat dirumuskan sebagai berikut:

- a. Representasi ringkas dari kondisi nyata dan berwujud suatu bentuk rancangan yang dapat menjelaskan atau mewakili kondisi nyata tersebut untuk suatu tujuan tertentu (Morlok & Riddle, 1999).
- b. Alat bantu atau media yang dapat digunakan untuk mencerminkan, dan menyederhanakan suatu realita secara terukur (Tamin, 1997).
- c. Representasi suatu formalisasi dalam bahasa tertentu yang disepakati dari suatu kondisi nyata (Simatupang, 1995).
- d. Realistik dari elemen perspektif atau gambaran nilai (Ortúzar dkk., 2011).
- e. Kerangka utama atau formulasi informasi data tentang kondisi nyata yang dikumpulkan untuk mempelajari atau menganalisis sistem nyata tersebut (Gordon dkk., 1978).

2.17.2 Pemodelan

Pemodelan berasal dari kata model yang dapat dipandang sebagai tiga jenis kata (Arif, 2017). Asal kata-kata model tersebut meliputi:

1. Sebagai kata benda yang berarti gambaran, perwakilan atau perlambangan.
2. Sebagai kata sifat berarti ideal, idaman, teladan.
3. Sebagai kata kerja berarti memperagakan, mempertunjukan, atau memamerkan.

Dalam pemodelan, model dibuat untuk menggambarkan operasi sistem nyata guna menjelaskan hubungan-hubungan yang terkait. Kata pemodelan merupakan terjemahan dari kata *modelling*. Oleh karena itu untuk menghindari berbagai macam pengertian maka kata pemodelan dapat diartikan sebagai suatu rangkaian aktivitas pembuatan model. Menurut (Arif, 2017) tujuan dari studi pemodelan ialah menentukan informasi yang dianggap penting untuk dikumpulkan sehingga tidak ada model yang kurang jelas. Model memiliki bentuk berbeda-beda tergantung pada sudut pandang

2.17.3 Regresi

Analisis regresi merupakan salah satu analisis yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh suatu variabel terhadap variabel lain. Analisis regresi digunakan untuk mempelajari hubungan antara dua variabel atau lebih, dengan tujuan untuk memperkirakan besarnya pengaruh kuantitatif suatu perubahan suatu peristiwa terhadap peristiwa lain dari hubungan tersebut.

Menurut modulus hubungannya, analisis regresi dibagi menjadi dua jenis, yaitu analisis regresi linier dan analisis regresi nonlinier. Regresi logistik dan regresi linier memiliki tujuan yang sama, yaitu mempelajari variabel terikat dengan satu atau lebih variabel bebas. Keduanya memperkirakan parameter model yang diharapkan. Perbedaan antara model regresi logistik dan model regresi linier adalah variabel respon regresi logistik bersifat dikotomis. Untuk variabel respons Y biner, sedangkan (x) adalah probabilitas nilai sukses untuk variabel prediktor X . Probabilitas ini merupakan parameter dari distribusi binomial.

2.17.4 Regresi Linear

Dalam model regresi linier, probabilitas variabel independen X dalam sampel acak di asumsikan tetap, bukan nilai variabel acak, dan probabilitas variabel dependen Y adalah probabilitas acak kontinu yang di asumsikan independen dan terdistribusi normal.

Kadang-kadang probabilitas variabel dependen datang dalam bentuk peluang dikotomis. Probabilitas dikotomis adalah probabilitas indikatif yang terdiri dari data biner dengan nilai 1 atau 0. Data dihasilkan dari peta numerik dari satu tindakan atau eksperimen yang mengarah ke hanya dua kemungkinan peristiwa.

2.17.5 Regresi Non-Linear (*Logistic*)

Regresi logistik adalah metode analisis statistik yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara variabel dependen dengan dua kategori atau lebih, dimana satu atau lebih variabel independen berada pada skala kategoris atau kontinu. Regresi logistik merupakan salah satu bentuk regresi nonlinier yang memiliki variabel dependen diskrit dengan distribusi binomial, sedangkan variabel independen dapat terdiri dari variabel kontinu, diskrit, dikotomis, atau gabungan. Ada dua jenis regresi logistik, regresi logistik biner dan regresi logistik *multinomial*.

1. Regresi Logistik Biner

Regresi logistik biner merupakan analisis regresi yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara variabel independen dan satu set variabel dependen, di mana variabel dependen adalah biner atau dikotomis. Model regresi logistik biner digunakan untuk menganalisis hubungan antara variabel respon dan variabel dependen ganda. Variabel respon berupa data kualitatif dikotomis, dengan nilai 1 menunjukkan adanya fitur dan 0 menunjukkan tidak adanya fitur. Jika variabel respon menghasilkan dua kelas dengan nilai 0 dan 1 maka digunakan model regresi logistik biner, sehingga mengikuti distribusi Bernoulli

Data yang mengandung probabilitas respons biner tidak dapat dianalisis dengan regresi linier biasa karena penduga parameter dalam regresi linier menggunakan metode kuadrat terkecil (*least square*), yang mengasumsikan bahwa data berdistribusi normal dan memiliki varians yang homogen. Oleh karena itu, model yang tepat untuk mempelajari hubungan antara probabilitas respons biner dan probabilitas penjelasnya adalah dengan menggunakan analisis regresi logistik.

2. Regresi Logistik *Multinomial*

Variabel kategori tak beraturan disebut variabel nominal dan variabel berurut disebut variabel ordinal. Kedua jenis variabel ini, termasuk variabel nominal dan variabel ordinal, sering disebut sebagai variabel *multinomial*. Regresi logistik *multinomial* tidak

memperhitungkan sifat ordinal data dan juga dapat digunakan untuk menguji variabel ordinal atau untuk mengeksplorasi sifat ordinal data untuk meningkatkan kesederhanaan dan kekuatan model (Agresti, 2002). Model regresi logistik *multinomial* efektif digunakan untuk variabel dependen yang terdiri dari banyak kategori (Zulkifli, 2014).

Nilai n observasi independen dengan p variabel independen, dan variabel dependen kualitatif memiliki k kategori, untuk membangun logit dalam model multinomial, salah satu kategori dianggap sebagai acuan atau level dasar, dan semua logit dibangun relatif terhadap kategori tersebut. Kategori apa pun dapat diambil sebagai level dasar, jadi kategori k sebagai level dasar. Karena tidak ada pengurutan, jelas bahwa kategori apa pun dapat diberi label k. Jika P_j menunjukkan probabilitas multinomial dari sebuah observasi yang termasuk dalam kategori j, untuk menemukan hubungan antara probabilitas ini, dan p variabel independen atau prediktor, $x_1, x_2, \dots, x_p$, model regresi logistik berganda adalah:

$$\text{Log} \left[\frac{P_j(x_i)}{P_k(x_i)} \right] = \alpha_{0i} + \beta_{1j}x_{1i} + \beta_{2j}x_{2i} + \dots + \beta_{pj}x_{pi} \quad (2.11)$$

dimana:

$P_j(x)$ = Probabilitas terjadinya kategori j, dengan di beri input x.

$\beta_{1j}, \beta_{2j}, \dots, \beta_{nj}$ = Koefisien parameter untuk kategori j

$x_1, x_2 \dots x_n$ = Variabel input

Karena semua p berjumlah satu, maka dapat di reduksi menjadi:

$$\text{Log} \left(\pi_j(x_i) \right) = \frac{\exp(\alpha_{0i} + \beta_{1j}x_{1i} + \beta_{2j}x_{2i} + \dots + \beta_{pj}x_{pi})}{1 + \sum_{j=1}^{k-1} \exp(\alpha_{0i} + \beta_{1j}x_{1i} + \beta_{2j}x_{2i} + \dots + \beta_{pj}x_{pi})} \quad (2.12)$$

Untuk $j = 1, 2, \dots, (k-1)$, maka parameter model dalam penelitian ini akan di estimasi dengan metode *machine learning*, dengan perangkat lunak RStudio. Regresi logistik *multinomial* merupakan metode pemodelan yang dapat digunakan untuk menggambarkan hubungan antara variabel bebas majemuk dan variabel terikat berganda. Skala *multinomial* merupakan suatu pengukuran yang dikategorikan menjadi lebih dari dua kategori. Data ordinal merupakan data yang menunjukkan tingkat variabel terikat. Logit merupakan cara untuk mentransformasi antara probabilitas dan abilitas (kemampuan) dalam matrik linier melalui skala logit, tingkat abilitas dinyatakan dalam bentuk eksponen model (Agresti dkk., 2000). Model regresi logistik *multinomial* memudahkan dalam mengklasifikasikan subjek yang kita teliti kedalam beberapa

kategori berdasarkan nilai dari *variabel predictor*, sehingga variabel respon tidak dibatasi dalam dua kategori saja (Lee dkk., 2018).

2.17.6 Validasi Model

Validasi model terkomputerisasi (*computerized*) mengacu pada memastikan bahwa program komputer dan implementasinya dari model terkomputerisasi adalah valid (legal dan dapat diterima) atau tidak valid. Menurut Hoover & Perry, (1989) Validasi adalah proses menentukan apakah suatu model, sebagai konseptualisasi atau abstraksi, merupakan representasi yang bermakna dan akurat dari sistem nyata. Law & Kelton (2007), menyatakan bahwa verifikasi adalah penentuan apakah model konseptual yang disimulasikan (sebagai lawan dari program komputer) adalah representasi akurat dari sistem nyata yang dimodelkan. Verifikasi bertujuan untuk membuat sesuatu secara resmi diterima atau disetujui, terutama setelah pemeriksaan dengan verifikasi: membuat sesuatu secara resmi diterima atau disetujui, terutama setelah pemeriksaan (Cambridge, 2011).

Selama verifikasi, diperlukan metode untuk menentukan kapan model simulasi valid atau tidak valid. Setiap pendekatan membutuhkan pengembangan model untuk melakukan validasi dan validasi selama pengembangan model. Metode yang paling umum digunakan dalam pengembangan model adalah untuk menentukan apakah suatu model valid. Hal ini merupakan suatu keputusan subjektif berdasarkan berbagai tes dan evaluasi yang dilakukan sebagai bagian dari proses pembentukan model.

2.17.7 Software RStudio

“RStudio” merupakan salah satu bahasan pemrograman yang telah dikembangkan selama 10 tahun terakhir. Sebagai pengembangan dari bahasa pemrograman “S” di Bell Laboratories, RStudio didesain ulang sedemikian rupa supaya memudahkan analisis statistika. Begitu juga menurut situs RStudio project, RStudio adalah bahasa dan lingkungan untuk komputasi statistik dan grafis. RStudio merupakan proyek berjenis *open source* GNU. Saat ini, RStudio telah berkembang lebih jauh lagi sehingga dapat melakukan manipulasi data spasial serta menampilkannya secara dinamis dalam situs web.

Menurut (Gio & Irawan, 2016), perintah dasar dalam bahasa RStudio menyediakan alat untuk pemodelan statistik linier dan nonlinier, analisis deret waktu, klasifikasi, analisis klaster, dan analisis grafis. Keuntungan lain dari aplikasi RStudio adalah ukuran

file yang disimpan jauh lebih kecil daripada perangkat lunak lain, operator perhitungan array lengkap, dan mencakup kumpulan alat statistik yang komprehensif untuk analisis data, yang dapat dikembangkan sesuai kebutuhan, dan keterbukaannya memungkinkan semua orang untuk menambahkan fungsionalitas tambahan pada perangkat lunak RStudio berupa paket yang dapat diinstal pada sistem operasi Windows, Mac OS, Mac OS X, Linux, Free BSD, NetBSD, unix, Solaris, AIX, dan HP-UX (Sihombing dkk., 2019).

2.18 Kerangka Berpikir

Dalam mengolah data dibutuhkan dasar pemikiran dari peneliti yang kemudian disatukan dengan fakta-fakta, observasi, dan kajian pustaka yang disebut kerangka berpikir. Kerangka berpikir berguna bagi peneliti dalam menjelaskan secara komprehensif variabel-variabel yang akan diteliti dan teori asal rujukan dari variabel-variabel yang diturunkan.

Terdapat 3 tipe kerangka dalam proses penyusunannya menurut Hamdi & Bahrudin (2015):

1. Kerangka teoritis

Gambaran yang mengandung penjelasan dari semua hal yang berkaitan dengan bahan penelitian dan berlandaskan pada hasil dari penelitian tersebut. Biasanya berisikan relasi antara sebuah variabel dengan variabel lainnya mengenai sebab akibat dari kedua variabel atau lebih.

2. Kerangka konseptual

Hubungan antara konsep yang satu dengan konsep yang lainnya dari masalah yang ingin diteliti (Setiadi, 2013).

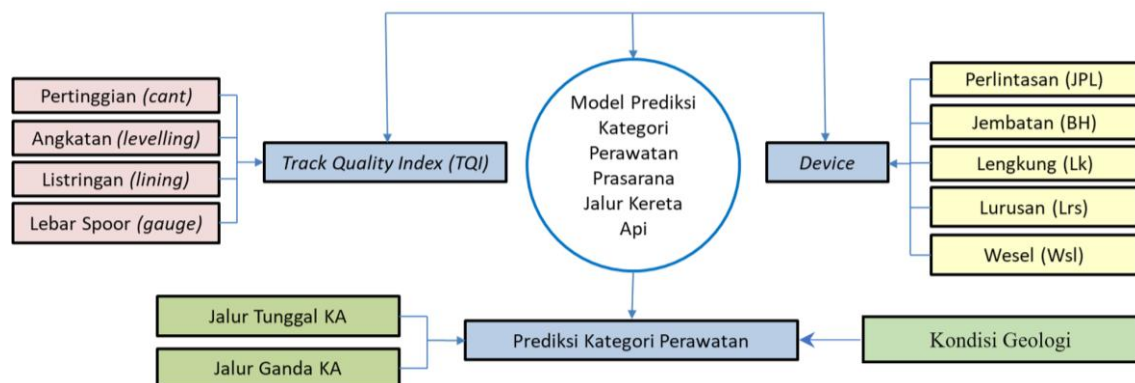
3. Kerangka operasional

Uraian mengenai variabel-variabel yang telah diturunkan dari konsep-konsep yang terpilih, hubungan antar variabel-variabel, serta hal-hal mengenai indikator dalam mengukur variabel-variabel tersebut.

Pada penelitian ini menggunakan tipe kerangka operasional menggunakan hasil pengukuran dari data kereta ukur jalan rel berupa variabel kategori *track quality index* geometri jalan kereta api di Pulau Jawa meliputi angkatan, pertinggian, listring dan lebar sepur terhadap hubungan dengan *cluster* bagian jalan rel (*device*) yang terdiri dari perlintasan, wesel, lurus, lengkung, dan jembatan untuk memperoleh model prediksi

kategori perawatan prasarana jalan rel di Lintas Utara dan Lintas Selatan Pulau Jawa pada jalur ganda dan jalur tunggal yang tidak terukur oleh kereta ukur jalan rel.

Dari berbagai pustaka diatas, dapat dinyatakan bahwa perawatan prasarana jalan rel memiliki banyak faktor yang mempengaruhi secara langsung maupun tidak langsung. Faktor-faktor yang mempengaruhi prediksi kategori perawatan memiliki dimensi dan satuan yang beragam, sehingga dalam membangun model harus mengetahui pondasi konstruksi model prediksi kategori perawatan prasarana jalan rel terlebih dahulu. Pembangunan struktur prediksi kategori perawatan prasarana jalan rel dapat dilihat pada Gambar 2.25 mulai dari data variabel TQI terhadap *cluster/device* jalur kereta api yang dimodelkan di jalur tunggal dan jalur ganda, setelah itu akan dilakukan tahapan selanjutnya yaitu validasi model dengan bantuan komputer dan perangkat lunak RStudio program. Pendekatan dengan data *mining* untuk mengetahui dan menemukan pola dari suatu data *track quality index* diduga sangat membantu dalam memecahkan masalah model prediksi ini.



Gambar 2.25 Kerangka Berpikir, Faktor Yang Memiliki Pengaruh dalam Model Prediksi Kategori TQI
Sumber: Penulis, 2022

Mengetahui konsep model dan bentuknya, penelitian ini akan membangun model prediksi yang akan dituangkan secara aktual ke dunia nyata, dan dapat diaplikasikan dilapangan dengan sangat sederhana melalui ide dan gagasan yang digambarkan ke dalam bagan alir model diagram diatas, variabel, dan parameter akan dianalisis melalui model probabilistik kemudian dilakukan validasi model secara menyeluruh untuk membangun model prediksi kategori TQI yang akan digunakan untuk pengajuan perawatan jalan rel.