

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Rel Kereta Api

Rel merupakan dua batang besi baja lurus yang disusun secara paralel serta digunakan sebagai pemandu jalur kereta api. Rel merupakan dua batang besi baja yang disusun secara rapi dengan kegunaan sebagai pemandu jalannya roda kereta api dengan menggunakan pengikatan pada bantalan rel. Rel ditumpu oleh beberapa komponen yang disusun secara rapi agar rel tidak bergerak secara liar, hal ini juga bertujuan untuk menjaga kenyamanan dan keamanan penumpang. Rel tersebut ditumpu dengan bantalan-bantalan khusus yang dibuat dengan perhitungan yang telah ditentukan. Rel kereta api ini biasanya menggunakan bantalan tumpu yang terbuat dari semen[4].

Pembangunan infrastruktur rel kereta api terus menjadi perhatian khusus sebagai penelitian untuk kebutuhan industri, produksi terus dilakukan dengan menghasilkan jenis-jenis rel yang ditemukan di Industri saat ini. Jenis rel tersebut ada melalui perkembangan dan kebutuhan daerah, jenis rel yang umum ditemukan di Indonesia adalah tipe R42, R50, R54, R60. Pengelompokan jenis rel tersebut dikelompokkan berdasarkan tingkat berat rel. Dari berbagai jenis tipe rel ini memiliki kandungan kimia yang sama secara umum yaitu Karbon (C), Silikon (Si), Mangan (Mn), Fosfor (P), Sulfur(S)[5].

Sejarah mencatat bahwa pada awal penemuan rel kereta api menggunakan papan kayu sebagai jalur rel. Rel pertama kali ditemukan pada tahun 1630 di Inggris, hal ini bertujuan untuk pembangunan dan peningkatan angkutan pertambangan dan batu bara dengan menggunakan kuda sebagai tenaga penarik[4]. papan kayu sebagai jalur rel juga menggunakan bantalan-bantalan yang melintang dari kayu. Penggunaan papan kayu sebagai rel cepat mengalami kerusakan dan pelapukan, sehingga pada tahun 1734 inovasi

dilakukan dengan penggunaan batang besi. Tahun 1776 digunakan besi cor sebagai sumber pembuatan rel, awalnya roda rel yang digunakan pada batang besi menggunakan *flens* yang berada di bagian luar rel dan diganti menjadi flens sebelah dalam rel. Perkembangan bentuk rel berbentuk T ditemukan oleh Robert L. Stevens, seorang kepala insinyur berkebangsaan Amerika Serikat di stasiun Camden dan Amboy *Railroad*.

Perkembangan pembangunan jalur rel kereta api di Indonesia masih tertinggal jauh dibandingkan negara lain. sistem jaringan rel ini masih termasuk yang minim baik dari segi kualitas dan kuantitas. Kuantitas jalur dilihat dari panjang jalur rel baik *double track* maupun kelas 1 dengan lebar rel 1435 mm dan 1067 mm. dari data statistik (Badan Pusat Statistik) BPS menunjukkan bahwa panjang rel di Indonesia, panjang rel di Indonesia memiliki total 8.357 km dengan total beroperasi 5.107 km. dari data tersebut, Indonesia masih termasuk sangat minim transportasi kereta api dibandingkan negara lain, Jepang memiliki infrastruktur rel sepanjang 23.670 km dan China memiliki 75.000 km. Dilihat dari total penduduk Indonesia yang mencapai 270 juta, maka rel bisa menjadi solusi angkutan yang ramah lingkungan[7].

Perkembangan rel di Lampung tidak lepas dari pembangunan yang dilakukan oleh pihak Belanda melalui perusahaan *Zuid Soematera Spoorwegen* (ZSS). Pada tahun 1914 pertama kali penggunaan jalur rel dari panjang hingga Tanjung Karang sepanjang 12 km. diwaktu bersamaan juga dilakukan pembukaan jalur rel Kertapati menuju Prabumulih sepanjang 72 km. Pembangunan jalur Sumatera Selatan-Lampung dirampungkan tahun 1927 dengan jarak 529 km.

Panjang Jalur Kereta Api	Panjang Jaringan Jalan Rel Kereta Api Di Indonesia (km)		
	2015	2016	2017
Beroperasi	5200.00	5107.00	5107.00
Tidak Beroperasi	3157.00	3250.00	3250.00
Total	8357.00	8357.00	8357.00
Sumber: Buku Informasi Transportasi 2016, Statistik Perhubungan Buku I 2015, Kementerian Perhubungan Source Url: https://www.bps.go.id/indicator/17/1195/1/panjang-jaringan-jalan-rel-kereta-api-di-indonesia-.html Access Time: October 4, 2021, 1:43 pm			

Gambar 2. 1. Perbandingan panjang rel kereta api di Indonesia

(Sumber : Badan Pusat Statistik)

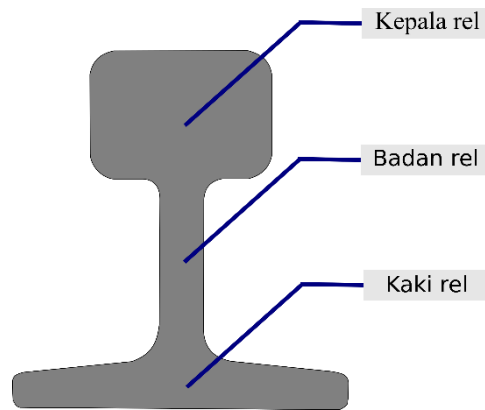
2.2.1. Bagian-Bagian Rel

Rel dibagi atas tiga bagian yang disusun secara sempurna. Rel dirancang dengan komposisi kimia yang berbeda hal ini bertujuan untuk menghindari kegetasan di setiap bagian. Potongan rel memiliki sifat yang berbeda, hal ini berguna untuk menahan tekan dan perlakuan beban yang diterima oleh rel. Sifat rel tersebut harus memiliki kekakuan, durabilitas, kekuatan dan lainnya.

1. Kepala Rel (*Head*)

Kepala rel dirancang dengan baik sehingga cocok dengan roda kereta api. Pada susunan kimia kepala rel kereta api sengaja dibuat lebih keras dan komposisi kimia yang lebih banyak dibandingkan pada bagian lainnya. Kekerasan pada kepala rel biasa memiliki kekerasan sebanyak 240 HB, kekerasan tersebut merupakan kekerasan standar yang telah disesuaikan dengan tekanan roda kereta api. Untuk memberikan kekerasan yang lebih maka diberikan perlakuan panas untuk meningkatkan performa umur rel. Dengan memberikan perlakuan panas pada rel, maka tingkat ketahanan, kekerasan serta umur rel akan bertambah dengan nilai keras antara 320-388 HB. Dengan perlakuan panas ini akan menambah umur dua hingga tiga kali lebih panjang dibandingkan umur rel biasa[7]. Selain hal tersebut, kepala rel sengaja dibuat lebih tebal karena

bagian tersebut merupakan tempat tumpuan roda serta agar mendapatkan umur yang lebih panjang akibat keausan yang diterima oleh rel akibat gesekan yang terus menerus dari roda rel, bentuk rel ini dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2. 2 Kepala rel

2. Badan Rel (*Web*)

Badan rel dirancang untuk menahan beban yang diterima oleh rel bagian atas maupun bagian bawah. Rel ini berbentuk datar dengan bagian ujung sengaja dibuat melengkung transisi. Hal ini bertujuan untuk memudahkan badan rel menerima besarnya tegangan yang timbul dari bagian rel atas dan bagian rel bawah akibat berbentuk miring serta roda yang miring. Pada bagian rel ini dapat dilihat pada gambar 2.2 diatas[9].

3. Kaki Rel (*Foot*)

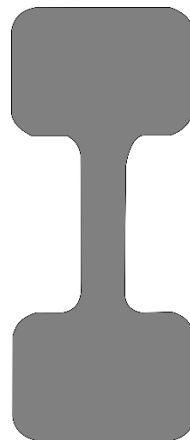
Lebar kaki rel bagian bawah yang berbentuk datar sengaja dirancang agar menerima kestabilan terhadap tekan dan dorongan yang diberikan oleh roda. Bagian atas kaki rel dirancang sebagai tempat pengikat rel dengan bantalan dan berbentuk datar agar tekanan pada penambat rel diterima secara minimum. Pada bagian rel ini dapat dilihat pada gambar 2.2 diatas memiliki posisi bagian bawah yang datar [9].

2.2.2. Rel Berdasarkan Bentuk

Rel berdasarkan bentuk dapat dikelompokkan pada tiga bentuk yang berbeda yaitu :

1. Rel berkepala dua (*Double Head Rail*)

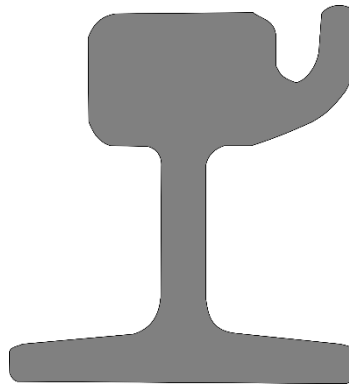
Rel ini memiliki dua bentuk sama antara atas dan bawah, hal ini sengaja dirancang agar lebih mudah untuk pergantian ketika terjadi aus pada bagian rel. Jenis rel ini akan diganti ketika kepala bagian atas telah aus maka dengan mudah dibalik dengan bagian bawah seperti terlihat pada gambar 2.3 memiliki 2 bentuk yang sama. Tetapi yang menjadi permasalahannya adalah bahwa setelah dilakukan pemakaian ternyata pada bagian bawah kepala yang belum dipakai telah terjadi aus atau karat akibat lingkungan.



Gambar 2. 3 Rel berkepala dua (*Double Head Rail*)

2. Rel alur (*Grooved rail*)

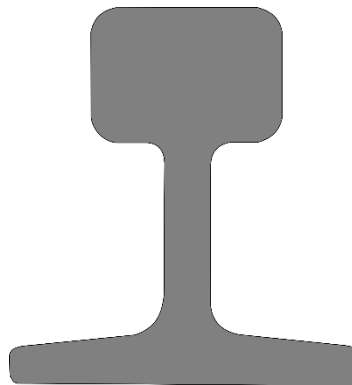
Rel ini memiliki bagian bawah kaki yang lebar mirip rel berkaki datar, tetapi pada bagian atas memiliki bagian yang lebih besar dengan bentuk yang sedikit tebal seperti terlihat pada gambar 2.4. Hal ini bertujuan untuk memperpanjang umur pemakaian akibat terjadinya keausan rel.



Gambar 2. 4 Rel alur (*Grooved rail*)

3. Rel berkaki Datar (*Flat footed Rail*)

Rel *Vignola* merupakan rel yang paling banyak ditemukan khususnya di Indonesia. Sesuai dengan nama relnya, rel *vignola* merupakan rel yang ditemukan pada tahun 1836 oleh Charles Vignola. Rel ini terdiri dari tiga bagian yang tersusun yaitu badan, kepala, dan kaki. Banyaknya penggunaan rel ini karena dinilai lebih efisien dan mudah dipasang. Kaki bagian bawah yang lebih memberikan efek ketahanan pada beban yang diterima oleh rel [9].



Gambar 2. 5 Rel berkaki datar

2.2.3. Rel Berdasarkan Lebar

Dalam peraturan pemerintah tentang lebar jalur rel kereta api diatur melalui peraturan Kementerian Perhubungan No.60 tahun 2012. Dalam peraturan tersebut ada dua jenis pilihan lebar jalur rel yang diijinkan yaitu ukuran 1067 mm dan 1435 mm. Lebar jalur merupakan suatu ukuran

lebar diantara kedua sisi kepala rel yang diukur antara 0-14 mm di bawah permukaan teratas kepala rel tersebut. Lebar jalur disesuaikan dengan bantalan-bantalan yang terbuat dari kayu, beton serta baja. Bantalan-bantalan ini dibuat berdasarkan kondisi lapangan serta keakuratan yang tinggi.

1. Untuk lebar rel 1067 mm memiliki kekuatan tekan pada karakteristik beton tidak lebih dari 500 kg/cm^2 . Beban gandar yang diterima pada semua kelas jalur memiliki nilai berat sebesar 18 ton. Syarat toleransi yang diterima pada rel ini berjumlah 2 mm pada rel berjenis baru dan 4 mm sampai -2 mm pada rel berjenis lama.

Nilai mutu baja yang diterima pada tegangan putus (*tensile strength*) sebesar 16.876 kg/cm^2 atau setara (1.655 MPa). Pada bantalan bagian bawah dudukan rel harus mampu memikul momen minimum sebesar +1500 kg dan pada bagian tengah rel harus memiliki nilai momen minimum sebesar -930 kg/m. Pada bagian bantalan memiliki dimensi panjang sebesar 2 m, tinggi maksimum bantalan 220 mm serta lebar rel sebesar 260 mm [10].

2. Lebar rel 1435 mm memiliki nilai kekuatan tekanan dengan karakteristik beton tidak lebih dari 600 kg/cm^2 . Beban gandar yang diterima rel pada semua kelas jalur memiliki nilai berat 22,5 ton. Syarat toleransi yang diterima pada rel ini -3 dan +3. Nilai mutu baja yang diterima pada tegangan putus (*tensile strength*) sebesar 16.876 kg/cm^2 atau setara (1.655 MPa). Pada bantalan bagian bawah dudukan rel harus mampu memikul momen minimum sebesar +1500 kg/m dan pada bagian tengah rel harus memiliki nilai momen minimum sebesar -930 kg/m.

Ada dua jenis panjang bantalan yang digunakan pada rel ini yaitu 2440 dan 2740 mm. Pada bagian bantalan yang memiliki dimensi panjang sebesar 2440 mm ini digunakan beban gandar mencapai 22,5 ton, sedangkan untuk panjang rel dengan nilai 2740 mm dengan beban gandar diatas 22,5 ton. lebar maksimum bantalan 330 mm serta tinggi rel sebesar 220 mm[11].

2.2.4. Rel Berdasarkan Kelas

Rel berdasarkan kelas dibagi atas 5 jenis kelas, pembagian jenis tersebut dilakukan menyesuaikan dengan kecepatan rel yang di lintasi. Kecepatan rel memiliki standar maksimum 120 km/jam [10].

Tabel 2. 1 Rel berdasarkan kelas

Kelas jalan rel	Kecepatan maksimum	Beban gandar maksimum (Ton)	Daya Angkut Lintas (ton/tahun)
I	120	18	$> 20.10^6$
II	110	18	$10.10^6 - 20.10^6$
III	100	18	$5.10^6 - 10.10^6$
IV	90	18	$2,5.10^6 - 5.1. 10^6$
V	80	18	$< 2.5.10^6$

(Sumber : Peraturan Kemenhub No.60 tahun 2012)

2.2.5. Jenis Rel Berdasarkan Berat

Penamaan rel untuk pembagian klasifikasi di Indonesia berdasarkan berat rel dalam satuan kilogram. Penamaan tersebut disesuaikan persatuan kilogram pada setiap meternya. Tipe rel yang digunakan di Indonesia dibagi atas 4 tipe yaitu R42, R50, R54, R60. Tipe R54 sebagai salah satu jenis rel di Indonesia memiliki maksud bahwa setiap satu meter rel tersebut memiliki berat 54 kg.

Tabel 2. 2 Jenis rel berdasarkan beban

Tipe rel	Berat (kg/m)	Tinggi rel (mm)	Lebar kaki (mm)	Lebar kepala (mm)	Tebala badan (mm)	Panjang rel standar (m)
R2/R25	25,75	110	90	53	10	6,80-10,20
R3/R33	33,50	134	105	58	11	11,90-13,60
R14/R41	41,52	138	110	68	13,5	11,90-13,60-17,00
R14A/R42	42,18	138	110	68,5	13,5	13,60-17,00
R50	50,40	153	127	63,8	15	17,00
UIC54/R54	53,40	159	140	70	16	18,00/24,00
R60	60,34	172	150	74,3	16,5	

(Sumber : Buku Rekayasa Jalan Kereta Api)

Standar tersebut memiliki ukuran yang berbeda disetiap Negara, India menggunakan satuan *British* sebagai standar seperti 60 kg, 52 kg, 90 R, 75 R, 60 R dan 50 R. Semua jenis rel di Indonesia tersebut memiliki tekanan berat yang diterima sekitar 18 ton untuk lebar 1067 mm serta 22,5 ton untuk 1435 mm [11].

2.2.6. Rel Berdasarkan Panjang

Rel berdasarkan panjang dapat dibagi atas 3 yaitu :

1. Rel Standar

Rel standar merupakan rel yang memiliki panjang 25 m. Rel tersebut merupakan jenis rel dengan panjang rel yang dipakai oleh PT. Kereta Api Indonesia, panjang sebelumnya menggunakan 17 meter rel. Rel standar 25 m ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan rel panjang 17 m yang sebelumnya dipakai oleh PT.Kereta Api Indonesia[9].

- a. Penggunaan sambungan sepanjang rel akan berkurang dengan penggunaan ukuran 25 m. Penggunaan penyambung sepanjang 1 km menggunakan 59 penyambung menjadi 40 penyambung dengan penggunaan ukuran panjang 25 m. Dengan pengurangan

jumlah penyambung maka dapat menghemat biaya, selain hal tersebut penyambungan akan semakin hebat sebanyak 32 %.

- b. Berkurangnya jumlah penambat rel maka menjadikan rel semakin stabil dan nyaman karena di setiap sambungan menimbulkan getaran.
- c. Jenis sambungan ini memiliki sifat isolasi yaitu (*insulated rail joint*). Jenis penyambung rel ini memiliki sifat yang isolator, hal ini bertujuan untuk mengisolasi aliran listrik yang terdapat di setiap ujung sambungan.

2. Rel Pendek

Rel pendek merupakan rel yang disusun dari rel standar dan disambung melalui pengelasan. metode pengelasan rel dilakukan pada dua metode yang berbeda yaitu "*flash butt welding*" dan *thermit welding*. Pengerjaan pengelasan dilakukan di tempat pengerjaan rel, hal ini bertujuan untuk mempermudah pengangkutan rel dari pabrik pembuatan ke lapangan pengerjaan jalur rel, panjang maksimum rel 100 m.

3. Rel Panjang

Rel panjang merupakan kumpulan beberapa rel pendek yang disambung sepanjang jalur rel dengan ukuran rel 100 m. Pada saat penyambungan rel menggunakan pengelasan dengan metode *Continuous Welded Rail (CWR)*. Penentuan panjang rel ini berdasarkan bantalan-bantalan yang digunakan. Beberapa pertimbangan yang harus dilakukan ketika menjadikan jalur rel dengan rel panjang adalah memperhatikan gaya longitudinal rel, kemungkinan terjadinya tekuk (*buckling*), patah rel, serta pemuaian dan penyusutan yang terjadi pada rel. Beberapa keuntungan penggunaan rel panjang adalah berikut.

1. Meminimalisir terjadinya guncangan di setiap sambungan rel sehingga kereta api berjalan secara normal.
2. Berkurangnya getaran serta kebisingan yang terjadi pada rel pendek.

3. Memperlambat terjadinya keausan dan kerusakan pada rel.
- Penentuan panjang rel berdasarkan bantalan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. 3 Bantalan rel berdasarkan tipe rel

Jenis bantalan	Tipe rel			
	R42	R 50	R54	R60
Bantalan kayu	325 m	375 m	400 m	450 m
Bantalan beton	200 m	225 m	250 m	275 m

2.2 Material Rel Kereta Api

Material rel kereta api ditentukan oleh standar yang telah dibuat *Union Internationale des Chemins de Fer* (UIC). Standar tersebut menyebutkan ada 3 jenis standar rel berdasarkan keausan WR (*wear resistance rails*) yaitu WR-A, WR-B, WR-C. Berikut merupakan pembagian serta jumlah kandungan kimia rel:

Tabel 2. 4 Material rel kereta api

Macam Rel	Kadar C (%)	Kadar Mn(%)
WR-A	0,60-0,75	0,80-1,30
WR-B	0,50-0,65	1,30-1,70
WR-C	0,45 -0,60	1,70 -2,10
PT.Kereta Api Indonesia	0,60-0,80	0,90 -1,10

Dilihat dari tabel diatas maka standar rel yang digunakan oleh kereta api Indonesia adalah WR-A. jenis standar ini merupakan jenis standar yang memiliki nilai yang kadar baja karbon yang tinggi. Nilai standar PT.Kereta Api Indonesia adalah 0,60-0,80. Sedangkan jenis WR-B, WR-C, Merupakan jenis baja karbon yang lebih rendah. Berikut merupakan kandungan utama kimia yang terdapat pada rel.

1. Karbon (C)

Zat karbon merupakan suatu unsur kimia yang terdapat didalam baja rel kereta api. karbon dalam sistem tabel periodik merupakan unsur yang terletak pada golongan 14 dengan simbol C dan memiliki nomor atom 6. Unsur karbon banyak ditemukan di alam semesta khususnya pada matahari, bintang-bintang, atmosfer, komet serta memiliki jumlah berada pada urutan ke 4 terbanyak di alam semesta. dilihat dari sifatnya, Karbon merupakan unsur non logam. Unsur non logam memiliki bentuk cair, padat dan gas. Dalam hal ini karbon termasuk ke dalam bentuk padat. Sifat karbon umumnya tidak mengkilap, bukan penghantar listrik yang baik, dan memiliki titik didih atau leleh yang lemah. Dalam kandungan rel ini, menurut standar yang ditetapkan 0,6-0,8%. Tujuan khusus penggunaan unsur karbon adalah sebagai penguat dan pengeras.

2. Silikon (Si)

Silicon merupakan salah satu unsur dalam tabel periodik yang dilambangkan dengan Si dan memiliki nomor atom 14. Dalam material logam, silikon berfungsi sebagai pencegah keausan. Unsur ini ditemukan oleh Jons Jakob Berzelius, seorang ilmuwan yang berasal dari Swedia. Di alam semesta, silikon merupakan unsur terbanyak ke delapan. Dalam material Baja rel, silikon merupakan salah satu penyusun terbesar dengan jumlah kandungan sebanyak 0,15-0,35 %.

3. Mangan(Mn)

Mangan merupakan unsur kimia bernomor 25 dengan simbol Mn. Mangan merupakan logam keempat terbanyak digunakan di Dunia, selain itu mangan juga material kedua paling banyak digunakan dalam kehidupan sehari, hampir 90 % Mangan banyak digunakan dalam industri material baja, hal ini sangat dibutuhkan karena mangan memiliki kegunaan sebagai pencegah sifat getas. Sifat getas merupakan kerusakan yang terjadi pada material tanpa ada tanda-tanda sebelum terjadinya kerusakan.

4. Fosfor(P)

Merupakan unsur kimia yang memiliki nilai atom 15. Fosfor termasuk ke dalam jenis non logam. dalam material baja, fosfor memiliki kegunaan

untuk mencegah keropos serta meningkatkan kekuatan, kemampuan mesin, dan ketahanan dari korosi.

5. Sulfur(S)

Sulfur adalah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang S dan nomor atom 16. Sulfur atau yang biasa disebut belerang merupakan unsur non-logam yang tidak berasa. sulfur dalam bentuk aslinya adalah sebuah zat padat kristalin kuning.

2.3 Baja Karbon

Baja merupakan logam paduan dengan unsur besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur utamanya. Dalam kehidupan sehari-hari, baja karbon didefinisikan sebagai suatu jenis paduan yang paling banyak digunakan manusia sebagai pembuatan alat untuk kebutuhan. Baja tersebut memiliki banyak jenis kegunaan dalam kehidupan sehari-hari sehingga perlu diklasifikasi. Cara pengklasifikasian tersebut dibedakan berdasarkan fungsi serta kegunaan. Klasifikasi dilakukan seperti cara pembuatan, komposisi kimia, penggunaan, struktur mikro serta kekuatan[12].

Baja karbon diklasifikasikan berdasarkan komposisi kimia, hal tersebut bukan menandakan bahwa baja karbon hanya terdiri atas campuran besi dan Karbon tetapi tersusun atas beberapa unsur lainnya tetapi tidak memiliki pengaruh besar yang signifikan terhadap sifatnya. Dalam baja karbon memiliki jumlah komposisi karbon antara 0,2% hingga 2,1 % berat baja tersebut. Selain itu baja juga memiliki unsur lain seperti mangan, silikon serta unsur pengotor lainnya. Unsur karbon memiliki fungsi sebagai bahan pengeras serta untuk mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*) atom besi[13].

2.3.1. Jenis-Jenis Baja Karbon

Baja karbon dapat diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan persentase karbon yang terkandung yaitu baja karbon rendah, baja karbon sedang serta baja karbon tinggi[8].

1. Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah merupakan baja yang memiliki kandungan dengan persentase kurang lebih 0,25% serta memiliki sifat yang kurang responsif terhadap perlakuan panas. Penggunaan jenis baja karbon ini sangat luas karena mudah dibentuk dan *machining*. Jenis karbon ini banyak ditemukan pada atap rumah, kaleng, pipa serta plat. biasanya memiliki kekuatan luluh 275 MPa (40.000 psi), kekuatan tarik antara 415 dan 550 MPa (60.000 dan 80.000 psi).

2. Baja karbon sedang

Baja karbon rendah merupakan baja yang memiliki persentase karbon antara 0,25% hingga 0,6%. Memiliki tingkat kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik dibandingkan baja karbon rendah, tidak mudah dibentuk serta susah dilakukan pengelasan. Penggunaan baja karbon ini sangat luas serta sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari seperti poros, roda gigi, rel kereta api serta berbagai jenis bahan yang membutuhkan kekuatan tinggi.

3. Baja Karbon Tinggi.

Baja karbon sedang memiliki persentase karbon lebih dari 0,6% sehingga merupakan baja paling kuat diantara jenis baja karbon. Baja ini memiliki sifat yang sangat keras, kuat, tangguh sehingga memiliki nilai tahan aus. Memiliki kelemahan yaitu susah dibentuk karena memiliki nilai keuletan yang sangat rendah. memiliki kekuatan tarik yang sangat tinggi sehingga penggunaan jenis baja ini banyak ditemukan di berbagai industri seperti palu, mata bor, kawat berkekuatan tinggi, mata gergaji [14].

2.3.2. Sifat Mekanik Baja Karbon

Sifat mekanik merupakan kemampuan suatu bahan dalam menerima berbagai beban, tekanan, serta gaya yang ditimbulkan. Beban mekanik tersebut dapat berupa beban tarik, tekan, bengkok, geser, puntir, atau beban kombinasi. Kekuatan mekanik ini menjadi tolak ukur baik atau tidaknya suatu material bahan. Dalam proses pembuatan material, ada beberapa bahan yang memiliki sifat yang baik pada satu bahan tapi

tidak memiliki sifat yang baik pada bahan lainya[12]. Berikut ada delapan sifat mekanik baja rel antara lain.

1. Kekerasan (*hardness*)

Kekerasan merupakan sesuatu kemampuan material bahan dalam untuk menahan goresan, kekuatan, pengikisan. Pada sifat ini memiliki kaitan dengan sifat tahan keausan (*wear resistance*) suatu bahan material. Sifat ini memiliki kaitan dengan kekuatan (*strength*).

2. Kekuatan (*strength*)

Kekuatan merupakan suatu kemampuan bahan material dalam menerima tegangan tanpa menyebabkan perubahan sifat material seperti patah. Ada beberapa kekuatan yang ditentukan berdasarkan beban yang bekerja yaitu kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan tekan, kekuatan puntir, dan kekuatan bengkok.

3. Elastisitas (*elasticity*)

Elastisitas merupakan kemampuan bahan material dalam menerima beban tanpa mengalami perubahan bentuk secara permanen. Perubahan yang dimaksud adalah tanpa terjadinya suatu perubahan bentuk permanen setelah tegangan dihilangkan. Hal ini memiliki pertimbangan bahwa jika suatu beban yang diberikan pada material tanpa melampaui batas tertentu tidak akan mengalami perubahan secara permanen dan dapat kembali ke bentuk semula setelah menerima deformasi plastis.

4. Kekakuan (*stiffness*)

Kekakuan merupakan suatu kemampuan material ketika diberikan beban tanpa mengalami perubahan bentuk (deformasi) dan deflasi.

5. Ketangguhan (*toughness*)

Kemampuan suatu material ketika diberikan pembebanan pada saat penyerapan suatu energi tanpa terjadi kerusakan pada material. Selain itu dapat di definisikan bahwa kemampuan suatu material ketika diberikan pembebanan hingga mengalami kegagalan dan patah. Hal ini juga menjadi tolak ukur penggunaan banyaknya energi hingga terjadi kegagalan dan patah.

6. Plastisitas (*plasticity*)

Plastisitas merupakan suatu kemampuan material mengalami deformasi plastis yang permanen tanpa terjadi patah. Sifat ini sangat dibutuhkan pada proses material seperti penempaan, *rolling*, ekstrusi. Suatu material yang mengalami deformasi plastis disebut material yang memiliki nilai keuletan yang tinggi atau biasa disebut bahan yang ulet (*ductile*). sedangkan bahan yang tidak mengalami deformasi plastis termasuk pada material keuletan yang rendah atau biasa disebut getas (*brittle*).

7. Kelelahan (*fatigue*)

Kelelahan merupakan suatu keadaan material ketika mengalami tegangan berulang-ulang (*cyclic stress*) yang nilai elastisitasnya masih berada dibawah batas kekuatan material sehingga terjadi patah. Sebagian besar yang kerusakan-kerusakan yang terjadi pada mesin diakibatkan kelelahan. Dampak kelelahan pada material baja akan mengalami fraktur (gagal).

8. Keretakan (*creep*)

Keretakan merupakan keadaan yang dialami suatu material yang terjadi deformasi plastis dengan nilai pembeban dan waktu pembebanan terjadi bersamaan.

2.3.3. Struktur mikro Baja karbon

Struktur mikro merupakan bentuk fasa-fasa suatu material baja yang dapat diamati melalui bantuan mikroskop. Struktur tersebut menjadi bentuk yang menandakan sifat suatu material. Struktur tersebut terlihat secara jelas dengan metode metalografi[15]. Sehingga material baja merupakan salah satu material yang memiliki sifat-sifat yang mudah diubah sehingga disebut bahan yang kaya akan sifat-sifat logam[16]. Struktur mikro erat kaitannya dengan diagram fase Fe-Fe₃C karena dengan penggunaan diagram ini dapat membaca sifat struktur mikro serta tingkat perlakuan panas material.

Diagram fase merupakan sebuah representasi fase yang terdapat dalam komposisi kimia, suhu, serta sifat suatu material. Gambar diagram menunjukkan komposisi kesetimbangan karbon suatu material besi sehingga membentuk baja yang memiliki sifat yang sangat baik. Tetapi setiap baja karbon memiliki berbagai unsur kimia lainnya. Unsur seperti Si, Mn, P, S serta unsur kimia lainnya tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada diagram fase sehingga diagram fase dapat dipakai tanpa memperhatikan unsur tersebut[16]. Dibawah ini merupakan gambar diagram fase yang dijelaskan sebagai berikut.

1. *Ferrite* (α)

kondisi *ferrite* memiliki padat karbon yang sangat rendah yaitu 0,022 % pada suhu 727 °C, memiliki susunan Kristal BCC (*Body Center Cubic*) dan pada temperatur kamar mempunyai batas kelarutan karbon 0,08 % C. Sesuai dengan sifatnya maka kondisi *ferrite* termasuk ke dalam baja karbon rendah yang memiliki sifat keuletan yang tinggi dan rendah ketangguhan serta memiliki kekerasannya lebih kecil dari 90 HRB[17].

2. *Austenit* (γ)

Kondisi *austenite* memiliki padat karbon yang baik yaitu kelarutan maksimum 2,14 % pada suhu 1147 °C serta memiliki nilai minimum karbon sebesar 0.8 % pada suhu 727 °C. Memiliki susunan kristal FCC (*Face Center Cubic*). Sesuai dengan sifatnya maka kondisi austenit merupakan baja karbon tinggi yaitu memiliki keuletan yang rendah tetapi nilai kekerasan yang sangat baik.

3. *Cementit* (Fe_3C)

Cementit adalah suatu senyawa yang terdiri dari unsur Fe dan C dengan perbandingan tertentu. Dapat ditemukan pada besi paduan yang memiliki nilai karbon 6,7 %.

4. *Lediburite*

Lediburite adalah campuran *Eutectic* antara besi Gamma dengan *Cementid* yang dibentuk pada temperatur 1130°C dengan kandungan Karbon 4,3%.

5. Pearlite

pearlite adalah *Eutectoid mixture* dari ferrite dan cementite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), sifat *perlite* terjadi pada temperatur 723°C dengan kandungan 0,8 % karbon dan dikategorikan baja karbon tinggi.

6. Titik eutectoid ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)

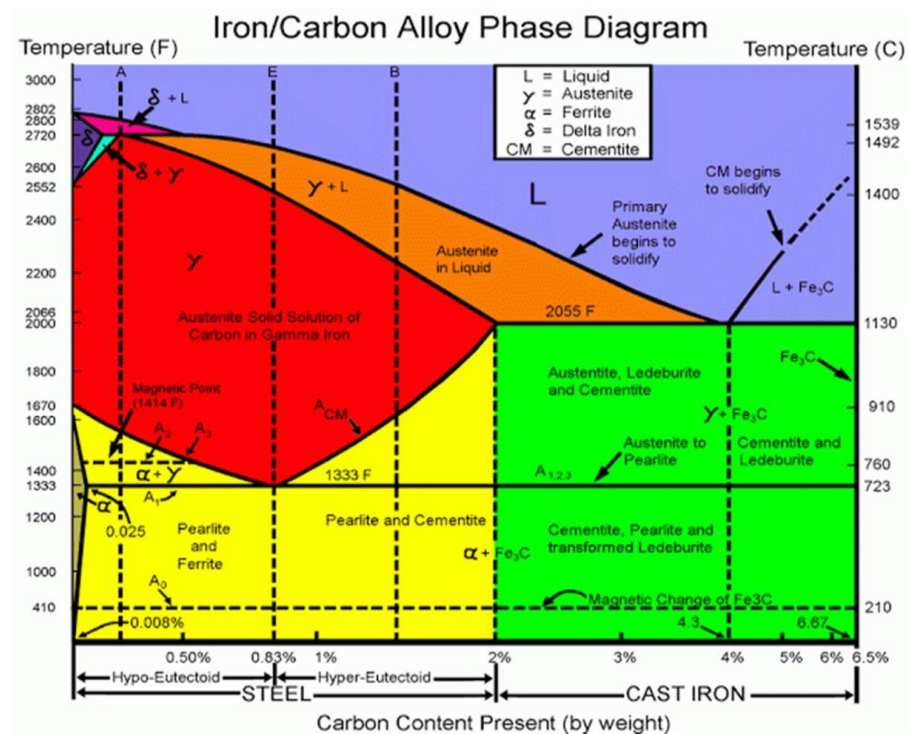
Titik *eutectoid* berada pada titik dengan nilai Karbon 0.76 %. Fase *eutectoid* berada pada titik *ferlit* dan cementit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$).

7. Titik eutektik.

Waktu pendinginan fase γ dengan komposisi E dan *cementit* dalam komposisi F terbentuk dari cairan komposisi C. Dimana fase eutektik disebut dengan *ledeburit*.

8. Feritetic

saat pendinginan *austenite* pada komposisi J, fase γ terbentuk dari larutan padatan δ dalam komposisi H dan cairan komposisi B.



Gambar 2. 6 Diagram Fase

(Sumber : <https://www.sekolah007.com/>)

2.4 Uji Kekerasan

Pada zaman kuno dan abad pertengahan, satu-satunya cara untuk menguji kekerasan suatu bahan adalah dengan uji kinerja kasar senjata dan peralatan yang terbuat dari baja. Pedang dipukul pada kayu atau batu untuk menentukan apakah baja itu cukup keras, menurut sayatan yang dihasilkan. Ketika Abad pertengahan berakhir, pengujian kekerasan kuantitatif berkembang selangkah demi selangkah, pertama kali bidang mineralogi. Dengan pembangunan rel kereta api dan teknik mesin, kebutuhan untuk menguji kekerasan logam muncul pada paruh kedua abad ke-19[18].

Kekerasan merupakan indikator menentukan sifat mekanis uji kekerasan. Kekerasan didefinisikan sebagai ukuran ketahanan material terhadap deformasi plastis daerah lokal, bentuk kerusakan yang sering ditemukan pada akibat deformasi plastis adalah penyok atau goresan pada material. Dalam pengujian kekerasan, indikator utama dapat dilihat adalah kemampuan material dapat merubah bentuk atau merusak bentuk suatu material yang lebih lunak, sehingga hal ini dapat diprediksi dan mencari nilai kekerasan kuantitatif dan kualitatif dengan alat pengujian yang sudah terkoneksi dengan komputer.

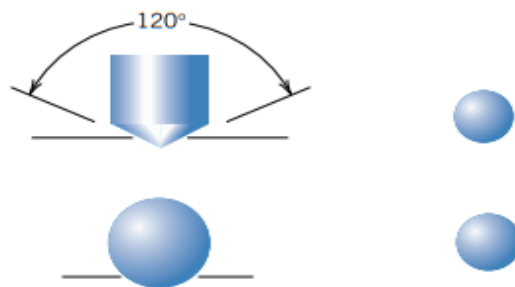
Teknik kekerasan kuantitatif dapat dilakukan dengan memberikan penekan melalui indenter pada material. Nilai penekan dan waktu telah disesuaikan dengan kebutuhan pada material yang diuji. Permukaan yang halus menjadi salah satu pendukung untuk mengetahui kedalaman penekanan. Dalam pengujian kekerasan yang dilakukan di Laboratorium material Itera biasanya memberikan waktu penekan 10 hingga 30 detik. Nilai kekerasan dapat diperoleh setelah memberikan penekan melalui *indenter* yang terkoneksi antara alat uji dan komputer. Uji kekerasan dapat dilakukan berulang sesuai jumlah titik penekan yang dibutuhkan. Uji kekerasan terbagi atas tiga yaitu uji keras *rockwell*, *brinell* dan *vickers*[19].

2.4.1. Pengujian keras *Rockwell*

Uji keras *Rockwell* adalah satu metode yang paling digunakan untuk mengukur nilai kekerasan suatu material. Hal ini dikarenakan penggunaan

yang sederhana dan tidak memerlukan keahlian khusus. Pengujian model ini memiliki kemudahan dalam hal pengoperasian sehingga lebih banyak ditemukan dalam industri namun dalam pengujian benda tipis sulit digunakan[20].

Memiliki nilai skala yang berbeda dan dapat digunakan kombinasi berbagai *indenter* dan beban yang berbeda, yang memungkinkan pengujian hampir semua paduan logam (serta beberapa polimer). Indenter termasuk bola baja bulat dan keras yang memiliki diameter setengah bola dan indenter berlian berbentuk kerucut (*Brale*), yang digunakan untuk bahan yang paling keras[8]. Nilai kekerasan *rockwell* dapat dilihat setelah melakukan pengujian dengan memperhatikan lekukan pada penekanan indenter yang diberikan. Dalam penelitian ini digunakan standar ISO 6508 dan ASTM E 18.



Gambar 2. 7. Indenter uji kekerasan *rockwell*

(Sumber : Calister, 2011) ([8])

Pengujian metode *rockwell* sangat mudah digunakan karena nilai kekerasan dapat dibaca langsung dan setiap pengukuran hanya membutuhkan beberapa detik. Pengujian ini memiliki skala pembebanan yang berbeda-beda, skala tersebut dapat dipilih sesuai kebutuhan yang akan diuji. Skala kekerasan B, C dan A adalah skala yang digunakan untuk bahan logam. Skala A dapat digunakan untuk pengujian yang berbahan yang sangat keras, skala D digunakan pada untuk material yang berbahan plastik dan juga untuk batu gerinda.

Tabel 2. 5 Skala Indentor *Rockwell* dan simbol huruf

Simbol SkalaHuruf Awalan	Indentor	Beban digunakan (kg)	Warna
B	Bola baja 1/16 <i>inchi</i>	100	Merah
C	<i>Brale</i>	150	Hitam
A	<i>Brale</i>	60	Hitam
D	<i>Brale</i>	100	Hitam
E	Bola baja 1/8 <i>inchi</i>	100	Merah
F	Bola baja 1/16 <i>inchi</i>	60	Merah
G	Bola baja 1/16 <i>inchi</i>	150	Merah
H	Bola baja 1/8 <i>inchi</i>	60	Merah
K	Bola baja 1/8 <i>inchi</i>	150	Merah
L	Bola Baja 1/4 <i>inchi</i>	60	Merah
M	Bola Baja 1/4 <i>inchi</i>	100	Merah
P	Bola Baja 1/4 <i>inchi</i>	150	Merah
R	Bola Baja 1/2 <i>inchi</i>	60	Merah
S	Bola Baja 1/2 <i>inchi</i>	100	Merah
V	Bola Baja 1/2 <i>inchi</i>	150	Merah

2.4.2. Pengujian keras *Brinell*

Pengujian Kekerasan *brinell* memiliki kesamaan dengan uji *Rockwell*. Indentor bola yang akan digunakan diarahkan pada material yang akan diuji, semakin keras material yang akan diuji maka pembebanan yang

dibutuhkan semakin besar juga[21]. Selama pengujian beban yang diberikan memiliki waktu pembeban yang relatif konstan yaitu antara 10 detik hingga 30 detik. nilai kekerasan *brinell* (HB) adalah nilai yang dihasilkan dari penekanan *indentor* melalui besaran beban dan diameter lekukan.

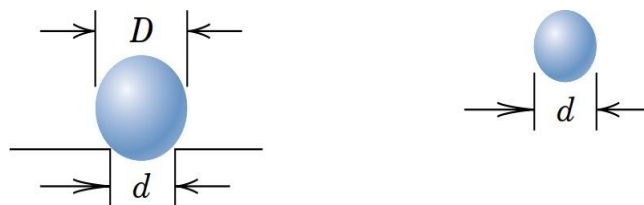
Pada penelitian ini, data yang diambil oleh kamera lensa akan dimunculkan pada komputer uji keras, hal ini untuk menganalisis lekukan, menentukan ukuran, dan kemudian menghitung angka kekerasan *brinell*. Nilai kekerasan *brinell* hasil dari pengujian dapat dilihat pada rumus berikut yang ditetapkan, nilai kekerasan dapat dibaca antara beban indentasi yang diberikan (dalam satuan kg) dibagi luas (mm²). Metode pengujian *brinell* pada penelitian ini mengacu pada standar ISO 6506 dan ASTM E 10. rumus yang digunakan dalam perhitungan *brinell* adalah berikut ini [18]

$$HB = \frac{2p}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad (1)$$

Keterangan : P = beban yang ditetapkan

D = diameter indentor

d = diameter lekukan



Gambar 2. 8 Indentor uji kekerasan *brinell*

(Sumber : Calister, 2011) ([8])

2.4.3. Pengujian keras *Vickers*

Pengujian *vickers* pengujian yang menggunakan indentor yang memiliki bentuk seperti piramida, pada dasarnya berbentuk dari indentor seperti bujur sangkar. Pengujian ini memiliki tingkat

pembebanan dibawah pengujian *brinell* dan *rockwell*. Tingkat pembeban yang dimiliki 1 gram hingga 120 kg. Tingkat pembeban dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesimen. Pengujian *vicker* disebut juga pengujian *mikro indentation* berdasarkan ukuran indentornya. Hal ini karena pengujian *vickers* sangat cocok pada spesimen yang kecil.

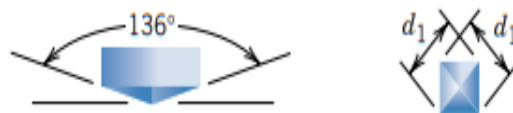
Metode *vickers* memiliki beberapa keunggulan seperti seperti penekanan indentasi kecil, pengukuran yang teliti serta range ukurannya besar[22]. Disisi lain, pengujian ini memiliki kelemahan yaitu sering terjadi kesalahan pengukuran, tidak digunakan pada pengujian yang berulang karena pengujian yang sangat lambat dan pengujian membutuhkan persiapan material yang sangat rumit. Peralatan pengujian kekerasan *microindentation* modern telah diotomatisasi dengan menggabungkan peralatan indentor sebagian analisi gambar yang menggabungkan komputer dan paket perangkat lunak[18]. Metode pengujian *vickers* mengacu pada standar ISO 6507 dan ASTM E 384.

$$HV = \frac{2p \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} = \frac{(1,854)P}{d^2} \quad (2)$$

Dimana : P = beban yang ditetapkan

θ = sudut permukaan antara intan yaitu 136°

d = panjang diagonal rata-rata (μm)



Gambar 2. 9. Indentor uji kekerasan *vickers*

(Sumber : Calister, 2011)([8])

2.5 Uji Struktur Mikro

Struktur mikro adalah gambaran dari beberapa fase yang hanya dapat diamati melalui uji metalografi. Metalografi merupakan ilmu logam yang mempelajari karakteristik dan struktur suatu logam dalam skala mikro menggunakan mikroskop optik. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sifat fase yang terdapat didalam spesimen baja karbon yang akan diuji. Dengan menggunakan spesimen uji yang telah dihaluskan agar dapat terlihat kandungan di dalam benda uji tersebut[23].

Uji struktur mikro melibatkan beberapa metode yang dilakukan sebelum pengujian. Hal ini dapat dilakukan dengan metode pengamplasan dengan kertas amplas atau menggunakan mesin untuk menghasilkan permukaan yang halus. Mesin yang digunakan adalah mesin *polishing grinder*. Penggunaan mesin ini bertujuan untuk memudahkan selama proses persiapan material yang penghalusan sampel. Selain hal ini, material yang sudah halus nantinya akan dilakukan pengujian struktur mikro menggunakan Mikroskop optik.

Mikroskop optik memiliki prinsip kerja sebagai pengujian struktur mikro dapat dilihat pada gambar 2.7 dibawah ini, yaitu memberikan cahaya *horizontal* dari sumber cahaya melalui lensa objektif dan okuler yang dipantulkan oleh reflektor. Lensa objektif dan okuler memiliki fungsi sebagai pemberi pantulan cahaya untuk memberikan pembesaran gambar struktur mikro. Gambar struktur mikro yang didapatkan melalui pantulan cahaya lensa akan memberikan hasil lebih akurat.

Selain penggunaan mesin *grinder polishing* sebagai penghalus permukaan, dalam pengujian ini juga diharuskan memiliki permukaan yang bersih. Permukaan tersebut dilakukan dengan pembersihan permukaan dan kemudian dilakukan pemberian zat kimia. Sampel rel yang sudah bersih direaksikan dengan cairan kimia agar mempermudah pengamatan, proses ini merupakan tahapan persiapan material pengujian.



Gambar 2. 10. Seperangkat Alat uji Struktur Mikro

Uji struktur mikro bertujuan untuk mengetahui sifat melihat dan menganalisis dari jenis serta bentuk struktur mikro. Uji struktur mikro dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik dari suatu logam setelah diketahui struktur mikronya. Karena setiap logam memiliki sifat mekanik yang berbeda, hal tersebut dapat dibedakan dari jenis struktur mikronya. Dalam pengujian mikro struktur dapat dilakukan dengan pertimbangan diagram fase. Hal ini untuk melihat fase melalui temperatur dan komposisi yang digunakan. Pengujian ini nantinya mengetahui ukuran dan bentuk butir dari struktur mikro dan persebaran fase pada material logam serta zat pengotor pada logam[14].