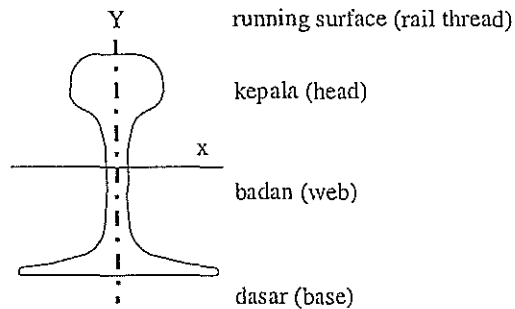


BAB II REL

2.1 UMUM

Rel untuk kereta api berbentuk I, dengan bagian-bagian sebagai berikut :



Gambar 2.1 Rel

Penamaan rel disesuaikan dengan berat/meter, misalnya :

R-54, adalah rel dengan berat sekitar 54 kg/meter.

R-42, adalah rel dengan berat sekitar 42 kg/meter

Fungsi rel adalah :

- Menerima langsung beban-beban dari kendaraan rel sebelum didistribusikan ke komponen-komponen lainnya
- Mengarahkan jalannya kendaraan rel
- Unsur pengikat dalam membentuk struktur jalan rel

2.2 DIMENSI REL

2.2.1 Geometri Rel

Pertimbangan dalam membuat geometri rel adalah sebagai berikut :

- 1) Permukaan kepala rel harus cukup lebar untuk membuat tegangan kontak sekecil mungkin
- 2) Kepala rel harus cukup tebal, untuk memberikan umur yang panjang
- 3) Badan rel harus cukup tebal, untuk menjaga dari korosi dan tegangan lentur serta tegangan horizontal

- Pertimbangan lain dari kriteria di atas adalah dengan berat rel yang sama, dapat dibuat geometri yang berbeda sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Sebagai contoh adalah ARA (*American Railways Association*) membagi menjadi jenis A dan jenis B. Jenis A kepala rel dibuat tipis dengan tujuan momen inersia tinggi, rel ini dipakai untuk kecepatan tinggi. Jenis B kepala dibuat tebal dengan momen inersia cukup, untuk menahan bahaya aus karena beban gandar yang tinggi dan kecepatan sedang.

R-54: $A=69,34 \text{ cm}^2$; $I_x=2346 \text{ cm}^4$; $W_{\text{top}}=283 \text{ cm}^3$; $W_{\text{base}}=308 \text{ cm}^3$
 R-60: $A=60,34 \text{ cm}^2$; $I_x=3055 \text{ cm}^4$; $W_{\text{top}}=336 \text{ cm}^3$; $W_{\text{base}}=377 \text{ cm}^3$

2.2.2 Pemilihan Dimensi

Penentuan dimensi rel didasarkan kepada tegangan lentur yang terjadi di dasar rel, akibat beban dinamis roda kendaraan rel. Tegangan lentur di dasar rel ini, tidak boleh melebihi tegangan ijin baja (S_i), jadi jika suatu dimensi rel dengan beban roda tertentu, menghasilkan $S_{base} < S_i$, maka dimensi ini dianggap cukup.

2.2.2.1. Tegangan Ijin

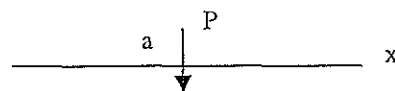
Besarnya tegangan ijin sangat tergantung kepada mutu rel yang dipakai, tetapi pada umumnya mutu rel yang dipakai bertegangan 'ultimate' di atas 7000 kg/cm. Dalam menentukan tegangan ijin, beberapa negara memakai dasar kelas jalan (Jepang dan Jerman misalnya), dan ada negara yang memakai metoda pemasangan rel, rel pendek atau rel panjang (Amerika misalnya). Perumka dalam peraturan barunya, memakai dasar kelas jalan, sehingga tegangan ijin di dasar rel, makin besar untuk kelas di bawahnya. Untuk jelasnya dapat dilihat pada tabel-2.1, perhitungan dimensi rel.

2.2.2.2. Tegangan Lentur

Seperti dijelaskan pada contoh perhitungan dimensi sebelumnya, tegangan lentur dihitung berdasarkan balok di atas tumpuan elastis (*beam on elastic foundation*) beban yang bekerja adalah beban roda-roda kendaraan rel. Perhitungan tegangan adalah sebagai berikut:

$$Mx = \frac{P}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x)$$

2.2.2.2.1 Beban 1 Gandar



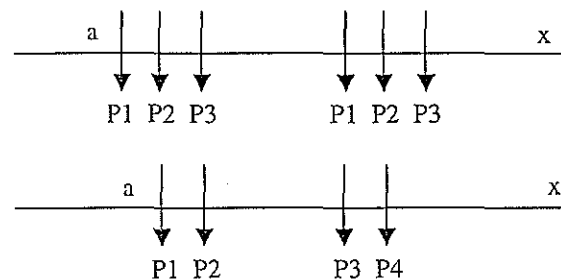
jika $x=0$, maka :

$$M_a = \frac{P}{4\lambda}$$

Gambar 2.3 beban roda

Pada kenyataannya kereta dengan roda-roda tunggal dengan jarak antar roda yang cukup jauh pada saat ini hampir tidak ada, kebanyakan roda-roda digabung dalam satu kesatuan (bogi) dalam 2 atau 3 roda. Akibatnya terjadi reduksi momen, perhitungan untuk keadaan 4 roda dan 6 roda adalah:

2.2.2.2.2 Beban 6 gandar (CC) dan 4 gandar (BB)



Gambar 2.4 Konfigurasi 6 roda dan 4 roda

$$M_a = \sum_{i=1}^6 \frac{P}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) = 0,82 \frac{P}{4\lambda}$$

$$M_a = \sum_{i=1}^4 \frac{P}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) = 0,75 \frac{P}{4\lambda}$$

2.2.2.2.3 Perancangan Rel

Dalam perancangan rel, maka persamaan yang diambil :

$$M_a = 0,85 \frac{P}{4\lambda}$$

Sehingga persamaan tegangan yang terjadi di dasar rel adalah :

$$S_{base} = \frac{M_a}{W_b} = 0,85 \frac{P}{4W_b\lambda}$$

Di mana :

$$P = \text{Tekanan roda dinamis} = P_s \times I_p$$

$$P_s = \text{Tekanan roda statis}$$

$$I_p = \text{faktor dinamis} = 1 + 0,01 (v / 1,609 - 5)$$

$$v = \text{Kecepatan rencana (km/jam)}$$

- λ = damping factor
 $= \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$
 k = Kekakuan jalan rel (kg/cm^2)
 I = Momen inersia rel (cm^4)
 W_b = Section modulus base (cm^3)
 E = Modulus elastisitas jalan rel (kg/cm^2)

CONTOH PERHITUNGAN

Jalan rel kelas V pada PD-10, dengan data-data sebagai berikut :

- Daya angkut lintas < 2,5 juta ton/tahun
- Tekanan gandar 18 ton; $P_s = 9000 \text{ kg}$
- Kecepatan rencana 100km/jam; $I_p = 1 + 0,01(100/1,609 - 5)$
- Kekakuan jalan rel(k)= 180 kg/cm^2
- Momen inersia rel R-42 (I) = 1369 cm^4
- Tahanan Momen dasar (W_b) = 200 cm^3
- Modulus elastisitas rel (E) = $2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$

Dengan memasukkan nilai-nilai data

$$M_a = 0,85 \times \frac{1800 \times \{1 + 0,01 \times (100/1,609 - 5)\}}{4 \times \{180 / (4 \times 2,1 \times 10^6 \times 1369)\}^{0,25}}$$

$$= 268,700 \text{ kgcm}$$

$$S_{base} = M_a / W_b = 268700 / 200 \text{ kg/cm}^2 = 1343,5 \text{ kg/cm}^2$$

Jadi rel R-42 dianggap cukup untuk kelas jalan V.

Dengan cara yang sama, tegangan yang terjadi di dasar rel untuk kelas jalan yang lain dapat di lihat pada Tabel-2.1

Tabel 2.1 Contoh Perhitungan Dimensi Rel
Pada Kelas Jalan Rel Perumka

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (juta ton/thn)	Kecepatan rencana (kph)	Beban gandar (ton)	Beban roda dinamis (kg)	Jenis Rel	Tegangan dasar rel (kg/cm ²)	Tegangan ijin (kg/cm ²)
I	> 20	150	18	19940	R-60	1042,3	1325
					R-54	1176,8	
II	10-20	140	18	16241	R-54	1128,2	1325
					R-50	1231,8	
III	5-10	125	18	15542	R-54	1097,7	1663
					R-50	1178,8	
					R-42	1476,3	
IV	2.5-5	115	18	14843	R-54	1031	1843
					R-50	1125,8	
					R-42	1410	
V	>2,5	100	18	14144	R-42	1343,5	2000

2.3 UMUR REL

Umur rel sangat dipengaruhi oleh mutu rel, keadaan lingkungan dan beban yang bekerja (daya angkut lintas). Pada jalan lurus umur rel banyak yang lebih besar dari 40 tahun, studi lain umur rel bisa mencapai 60 tahun, tetapi biasanya umur 40 tahun dijadikan sebagai dasar umur.

Umur rel dapat ditentukan dari :

- Kerusakan ujung rel
- Keausan baik di lurus maupun lengkung
- Lelah

2.3.1 Kerusakan Ujung Rel

Sebelum dikenal rel panjang (*long welded rails*), maupun rel panjang menerus (*continuous welded rails, CWR*), panjang rel adalah 6,8 meter sampai 10 meter, sehingga pembatas umur rel adalah di sambungan, kerusakan rel di sambungan diakibatkan oleh :

- Beban gandar yang tinggi
- Lebar Celah
- Mutu rel
- Beda tinggi rel
- Diameter roda yang kecil

- Kondisi kendaraan rel (pemegasan)
- Jari-jari permukaan rel
- Kekakuan jalan rel
- Kecepatan kendaraan rel

Akibat kerusakan tersebut yang timbul adalah cacat, akibat hantaman roda pada sambungan, dari kerusakan rel ini, maka kerusakan terhadap struktur jalan rel (*track deterioration*), dimulai. Beberapa contoh kerusakan adalah:

- Tercabutnya tirpon dari bantalan
- Retaknya pelat sambungan rel
- Longgarnya baut-baut sambungan rel
- Naiknya lumpur di bawah bantalan sehingga umur bantalan rendah (lapuk atau patah)
- Ketidakstabilan geometri (angkatan maupun alinyemen)

Untuk mengatasi kerusakan di ujung (sambungan) rel diatasi dengan jalan :

- Pengerasan pada ujung rel
- Pemeliharaan yang baik
- Mengelas sambungan

Sebagai contoh dapat dilihat pada gambar-2.5, mengenai pengerasan ujung rel (*end-hardened rails*)

2.3.2 Umur Rel Berdasarkan Keausan

Pada umumnya rel dihitung berdasarkan keausan, tetapi dengan makin meningkatnya beban gandar (tegangan kontak), maka umur rel tidak bisa dihitung hanya dengan keausan, tetapi harus juga memperhatikan masalah 'shelling' dan lelah.

2.3.2.1. Data tipikal rel 50 N

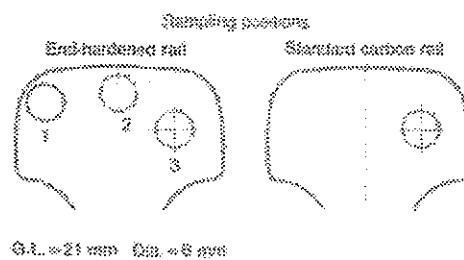
1. Komposisi kimia

(wt %)

C	Si	Mn	P	S
0.68	0.24	0.89	0.017	0.011

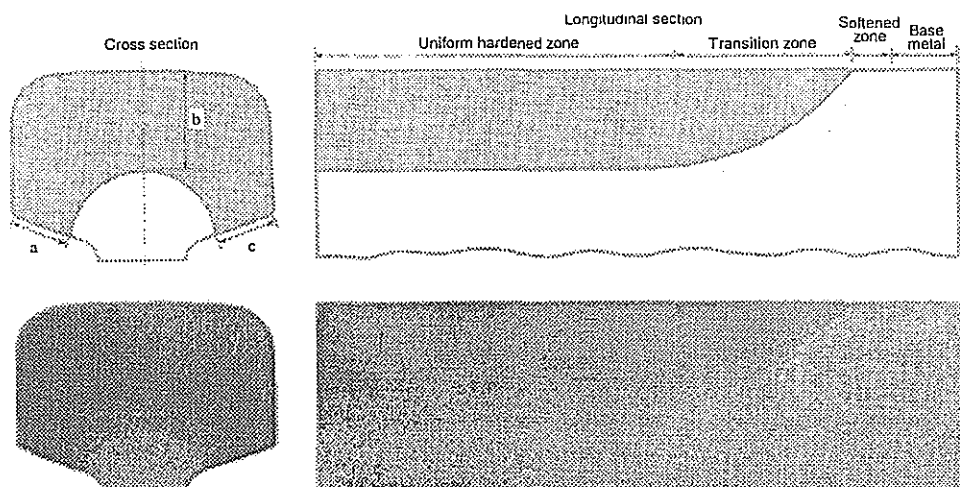
2. Bahan

Contoh no	Test items	Yield Strength (0.2%) (kgf/mm ²)	Tensile strength N/mm ²	Elongation %	Reduction of area %
End-hardened rail	1	75.2	1084	17.7	44.8
	2	75.4	1075	18.1	45.1
	3	71.3	1034	19.0	46.3
Standard carbon rail		50.0	876	15.8	22.7



3. Properties of end-hardened layers

a. Macrostructure



Depth of head-hardened zones

Cross-section	mm (in.)
a	19.0 (0.75)
b	32.5 (1.28)
c	19.5 (0.77)

longitudinal section	mm (in.)
Uniform hardened zone	96.5 (3.80)
Transition zone	36.0 (1.42)
Softened zone	1.0 (0.04)

Gambar 2.5, Rel dengan pengerasan ujung ⁽⁸⁾

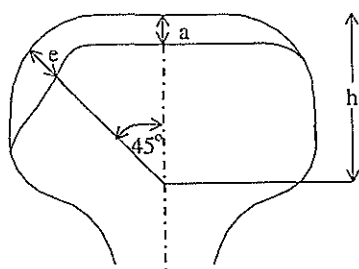
(J Hardened Rails)

2.3.2.1.1 Percobaan Keausan

Banyak studi dilakukan untuk menentukan umur rel akibat aus ini, diantaranya :

- Universitas Illinois :
 - 115RE besarnya aus 0,056 in /100 mgt
 - 132RE besarnya aus 0,058 in /100 mgt
 Sehingga perkiraan umur 115RE adalah 969 mgt dan 132RE 1386 mgt.
- Zarembski dan Abbot :
 - 136RE besarnya aus 0,028 in/100 mgt
 - 119RE besarnya aus 0,034 in/100 mgt
- Umumnya batas aus rel diambil 25% dari luas kepala rel
- Studi AREA, aus rata-rata 0,03 in/100 mgt
- Perumka, membatasi besarnya keausan berdasarkan asumsi bahwa pada saat rel dan roda pada aus maksimum, roda tidak menumbuk sambungan.

Besarnya aus rel-rel di PJKA dapat digambarkan sebagai berikut :



a = aus maksimum vertikal
e = aus maksimum pada arah 45° dari h

Tabel 2.2 Aus maksimum Rel

Jenis Rel	a-maks (mm)	e-maks (mm)
R-42	10	13
R-50	12	15
R-54	12	15
R-60	12	15

Gambar 2.6 pengukuran aus

2.3.2.1.2 Persamaan Umur Rel

Dengan berdasarkan percobaan-percobaan yang dilakukan seperti di atas, maka AREA membuat model persamaan umum, untuk menentukan umur rel berdasarkan keausan yaitu :

$$T = K W D^{0.565}$$

Dimana:

T = umur rel (juta ton)

K = konstanta, tergantung lokasi rel

W = berat rel (lb/yd)

D = Daya angkut lintas (juta ton/tahun)

Besarnya harga K :

Jalan baru = 0,9538

CWR = 1,3544 - 1,3930

rel > 123RE = 0,9810

High silicon rail = 1,4210 - 1,4616

Jika tidak ada data lain dapat diambil harga 0,545, Untuk jalan di lengkung, dipakai harga perbandingan terhadap jalan lurus, seperti pada tabel-2.3 berikut:

Tabel 2.3 Hubungan Jari-jari Lengkung dengan Nilai K ⁽⁵⁾

Jari-jari Lengkung	Perbandingan dengan umur jalan lurus	
	Tanpa Pelumasan	Dengan Pelumasan
0-3500	1	1
3500-1165	0,87	1
1165-700	0,74	0,88
700-500	0,61	0,73
500-390	0,49	0,70
390-320	0,38	0,62
320-270	0,30	0,55
270-230	0,22	0,48
230-200	0,16	0,44
200-185	0,12	0,40
<185	0,10	0,37

CONTOH PERHITUNGAN KEAUSAN

- Jalan rel baru kelas IV; rel R-54; 5juta ton/tahun (5,5 mgt)
- Panjang jalan 50 km :
 - 10 km lurus ; 10 km R = 800 m
 - 10 km R=500 m ; 15 km R = 300 m
 - 5 km R=150 m ;

Teknik Jalan Rel

- Untuk jalan baru $K = 0,9538$ (lurus)
- Karena tidak semua lurus, maka harga K dihitung jika jalan tanpa pelumasan sebagai berikut :

10 km lurus	:	$10 \times 0,9538 \times 1,0$	=	9,538
10 km R = 800	:	$10 \times 0,9538 \times 0,74$	=	7,058
10 km R = 500	:	$10 \times 0,9538 \times 0,61$	=	5,818
15 km R = 300	:	$15 \times 0,9538 \times 0,30$	=	4,292
5 km R = 150	:	$5 \times 0,9538 \times 0,22$	=	1,049
				27,755

$$K = 27,755 / 50 = 0,555$$

$$T = 0,555 \times 109 \times 5,5 \text{ mgt} = 158,5 \text{ mgt} = 144,14 \text{ juta ton}$$

$$U = (158,5 \text{ juta ton}) / (5 \text{ juta ton/tahun}) = 28,8 \text{ tahun}$$

Jadi umur rel 28,8 tahun.

2.3.3 Umur Rel Berdasarkan Lelah (Fatigue)

Jalan rel adalah struktur yang elastis, ini berakibat rel akan terbebani cyclic (tegangan yang terjadi tarik dan tekan), dengan beban seperti ini maka bahaya lelah sangat mungkin terjadi. Ciri dari kerusakan ini adalah dengan timbulnya retakan yang makin lama makin membesar dan diakhiri dengan patah. Jika tegangan total di kepala rel, akibat kombinasi tegangan lentur, kontak dan suhu ($St = Sl + Sk + Ss$), melebihi tegangan lelah ($St > Sf$), maka umur rel dihitung berdasarkan umur lelah.

2.3.3.1. Tegangan Yang Bekerja

2.3.3.1.1 Tegangan Lentur (Sl)

Tegangan lentur di kepala rel adalah :

$$Sl = \frac{M}{W_a}$$

Dimana :

Sl = Tegangan lentur

M = Momen lentur

W_a = Tahanan momen atas

2.3.3.1.2 Tegangan Kontak (Sk)

Persamaan dalam menghitung tegangan kontak adalah persamaan H.R Thomas :

$$S_k = \frac{23500 \times P^{1/3}}{2 \times (R_1/R_2)^{0,271} \times R_2^{2/3}}$$

Di mana :

- S_k = tegangan kontak (psi)
- P = beban dinamis (lb)
- R_1 = jari-jari roda kereta (inch)
- R_2 = jari-jari rel (inch)

Jari-jari roda akan semakin kecil dengan bertambahnya keausan, sedangkan jari-jari kepala rel akan semakin besar, pembesarannya adalah 15%, pada saat aus maksimum.

2.3.3.1.3 Tegangan Suhu (Ss)

Tegangan suhu diakibatkan oleh perubahan suhu, dimana ada perbedaan suhu dengan suhu pemasangan.

$$\Delta L = L \alpha \Delta t = L \alpha (t - t_p)$$

Dimana :

- Δt = perbedaan suhu = $(t - t_p)$
- t_p = suhu pemasangan
- t = suhu maksimum di lapangan
- L = panjang rel
- α = koefisien muai panjang = $1,15 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

Menurut Hukum Hooke :

$$\Delta L = PL/AE = S_s L/E$$

$$S_s = E \Delta L/L = E \alpha (t - t_p)$$

Contoh : $t_p = 25^\circ\text{C}$; $t = 50^\circ\text{C}$; $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$

Rel R-42; $A = 54,26 \text{ cm}^2$, sehingga;

$$S_s = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2 \cdot 1,15 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C} (50 - 25)^\circ\text{C} = 603,75 \text{ kg/cm}^2$$

2.3.3.2. Tegangan Lelah (Sf)

Tegangan lelah adalah batas dimana umur rel dihitung dengan analisis keausan atau umur rel dihitung dengan analisis lelah.

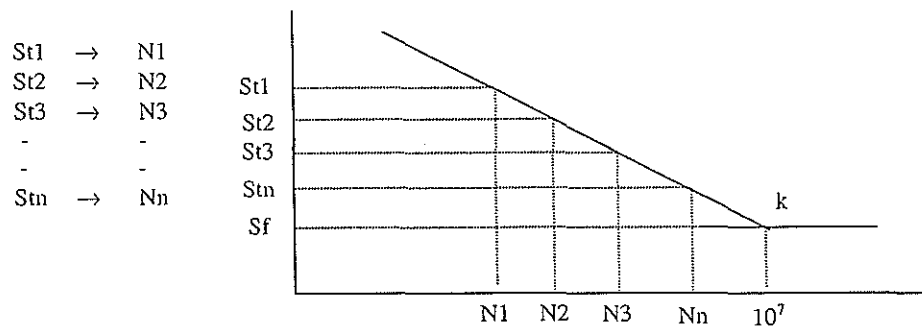
Besarnya tegangan lelah, tergantung kepada mutu rel dan standar pembuat rel, dan disajikan dalam grafik tegangan vs siklus (SN Curve).

2.3.3.3. Perhitungan Umur Lelah

Perhitungan umur lelah berdasarkan 'linier cumulative damage theory' dari Miners, dengan asumsi :

- Tegangan kombinasi < tegangan lelah
- Akibat beban dianggap terus
- Tidak ada retak awal
- Tidak ada bahaya negatif-negatif siklus beban
- Asumsi beban :
 - Grafik S-N linier
 - Batas umur lelah 10^7 siklus

Linier Cumulative Damage Theory :



Gambar 2.7 Linier Cumulative Damage Theory

$$N_i = \frac{N_e}{(St_i / S_f)^{1/k}}$$

N_i = siklus penyebab failure pada tegangan St_i (siklus)

k = slope pada S-N diagram rel

N_e = Batas berulangnya beban jika lelah terjadi

$$\begin{aligned}\text{Total damage : } D &= \beta_1 / N_1 + \beta_2 / N_2 + \beta_3 / N_3 + \beta_4 / N_4 + \beta_n / N_n \\ &= \sum \beta_i / N_i\end{aligned}$$

β_i = cycle yang bekerja untuk masing-masing beban (S_{ti})

N = siklus per waktu (siklus/tahun)

Kerusakan terjadi jika $D = 1$

Jadi umur rel : $L = 1 / D = 1 / (\sum \beta_i / N_i)$ tahun

2.3.4 Rel Dengan Pengerasan di Kepala (Head Hardened Rails)

Rel dengan pengerasan di kepala pada saat ini banyak digunakan terutama di lintas yang berat dan padat. Besarnya tegangan kontak pada rel, dengan distribusi geser yang mencapai beberapa milimeter saja di permukaan dapat menyebabkan kerusakan kepala rel yang sangat cepat, baik karena aus maupun lelah, terutama pada jalan rel dengan radius kecil, sehingga umur rel menjadi pendek.

Untuk mengatasi besarnya tegangan tersebut, seperti halnya dengan mengatasi mutu rel di sambungan dengan memakai perkerasan ujung (*end hardened rails*), maka dipakailah rel dengan pengerasan di kepala (*head hardened rails*). Keuntungan dari penggunaan rel ini adalah dapat meningkatkan umur hingga 2 kali lipat, dengan harga yang lebih rendah dari nilai peningkatannya.

Kepala rel dengan kedalaman sampai 10 mm, mempunyai kekuatan minimal 13.000 kg/cm², dan bagian badan berkekuatan 9000 kg/cm², sehingga dapat menurunkan besarnya keausan, maupun kemungkinan kerusakan akibat lelah (*fatigue*). Penggunaan di Indonesia, dipasang pada angkutan batubara di Sumatra Selatan (KA Babaranjang), dengan beban gandar 18 ton, kecepatan maksimum 60 km/jam, lengkung luar dengan radius kecil ($R < 300$ meter).

Sebagai contoh rel dengan perkerasan di kepala dapat dilihat pada gambar-2.8

Specifications

1. Komposisi Kimia

(wt %)

C	Si	Mn	P	S
0.68	0.24	0.89	0.017	0.011

2. Mechanical properties

Yield Strength N/mm ² (kgf/mm ²)	Tensile strength N/mm ² (kgf/mm ²)	Elongation %	Hardnes		
			HS	HB	HV
785	1180	10 min.	50	341	410 max.
(80)	(120)		~ 56	~ 388	

Typical Data Of 136 Lb NKK-NHH Rail

1. Chemical composition

(wt %)

C	Si	Mn	P	S
0.77	0.25	0.90	0.017	0.008

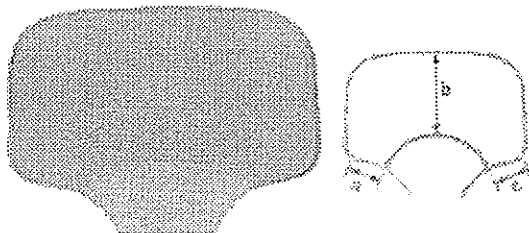
2. Mechanical properties

Yield Strength N/mm ² (kgf/mm ²)	Tensile strength N/mm ² (kgf/mm ²)	Elongation %	Reduction area %	Hardnes	
				Hs	HB
877	1293	15.3	36.5	53	365
(89.4)	(131.8)				



3. Properties of head-hardened layers

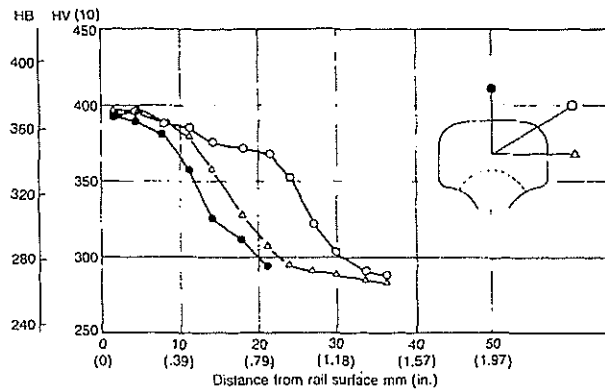
a. Macrostructure



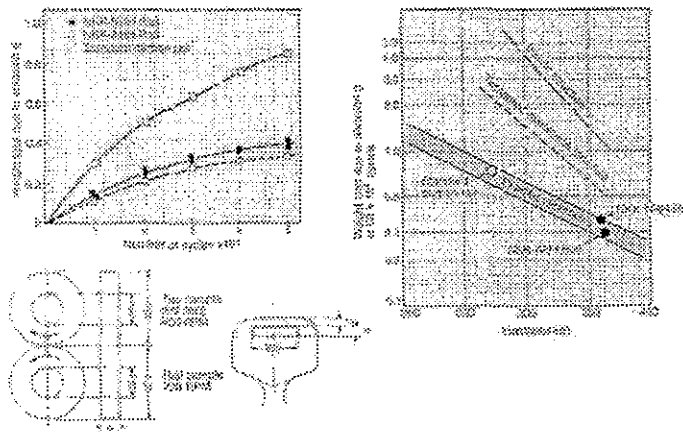
Depth of head hardened layer

Cross-section	Depth mm (in.)
a	16.5 (0.65)
b	36.0 (1.42)
c	16.0 (0.63)

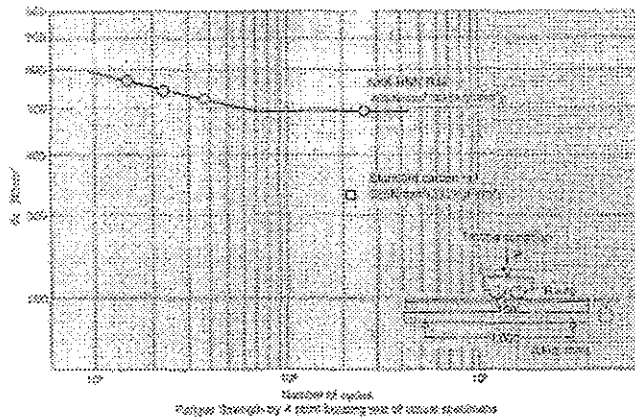
b. Hardness distribution



4. Wear resistance



5. Fatigue strenght



Gambar 2.8 Rel dengan Perkerasan di kepala (*Head Hardened Rails*) ⁽⁸⁾

2.4 STABILITAS REL PANJANG MENERUS (STABILITY OF LONG WELDED RAILS)

Rel menurut panjangnya dibedakan atas 3 jenis, yaitu

- a. Rel standar, pada saat ini panjangnya 25 meter, sebelumnya 6 meter-10 meter.
- b. Rel pendek, adalah rel yang panjangnya maksimal 100 meter, atau 4 x 25 meter, dilakukan dengan pengelasan di Balai Yasa, sebelum diangkut ke lokasi pemasangan.
- c. Rel panjang, adalah rel yang mempunyai panjang statis (*static length*), yaitu daerah yang tidak terpengaruh pergerakan sambungan rel, biasanya panjangnya minimal 200 meter.

Sambungan jalan rel adalah titik-titik lemah, karena terjadi kejutan yang besar, yang dapat merusak struktur. Dengan kemajuan teknologi maka rel dari pabrik (25 meter), diangkut ke balai yasa, untuk dilas dengan 'flash butt welding', menjadi 100 meter, kemudian diangkut ke lapangan, dan dilas dengan 'thermit welding', hingga panjangnya mencapai minimal 200 meter.

Persoalan yang timbul adalah mengatasi bahaya tekuk (*buckling*), akibat gaya longitudinal, karena perubahan suhu. Rel tidak boleh berkembang bebas, gaya yang timbul harus bisa didistribusikan ke struktur-struktur di bawahnya, yaitu bantalan dan balas. Mekanismenya adalah pada saat rel akan memuai, akan membawa bantalan bergerak, jika rel diikat dengan baik ke bantalan oleh penambat.

Bantalan akan sulit bergerak jika dihambat oleh balas, baik ke arah lateral maupun longitudinal, sehingga tekuk ke arah lateral apalagi vertikal akan sulit terjadi. Sebagai ilustrasi bagaimana gaya akibat suhu (pemuaian), akan menekuk jalan rel dapat dilihat pada gambar-2.9.

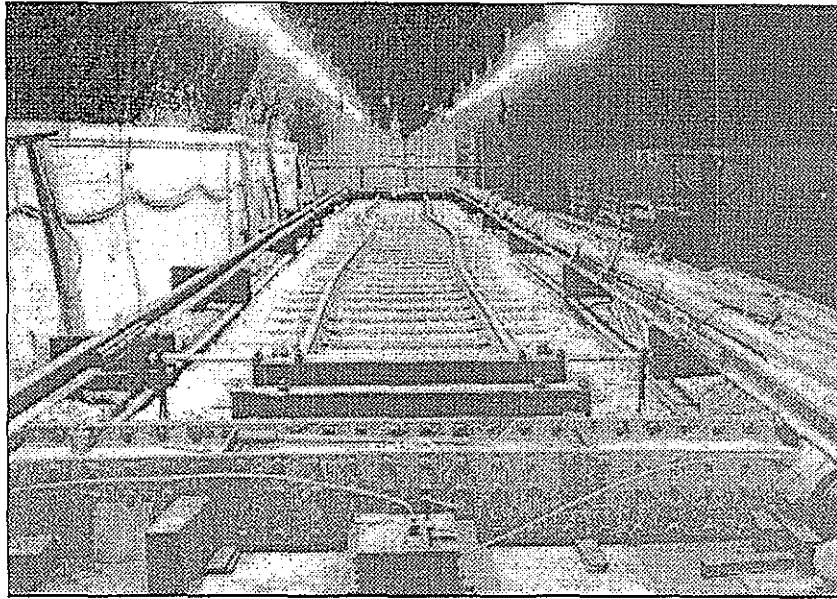
2.4.1 Longitudinal Creep Resistance (Gaya Longitudinal)

2.4.1.1. Gaya Akibat Suhu

$$\Delta L = L \alpha (t - t_p)$$

$$\Delta L = PL/AE$$

$$\text{Sehingga : } P = EA \alpha (t - t_p)$$



Gambar 2.9 Kondisi jalan Rel Tertekuk Akibat Gaya Suhu ⁽²⁾

2.4.1.2. Pergerakan sambungan (Gap)

Pada saat pemasangan sambungan rel diberi celah, sesuai dengan peraturan, jadi pada saat suhu mulai meningkat, rel merayap yang ditahan oleh bantalan dan balas, sampai menutup sambungan, sehingga ada daerah yang dapat bergerak (*breathing length, movable*) dan ada daerah tetap (*static, unmovable*). Persamaan celah (*gap*), G :

$$G = E A \alpha^2 (t - t_p)^2 / 2r$$

2.4.1.3. Distribusi Gaya Longitudinal

Distribusi gaya longitudinal, dapat dilihat pada contoh berikut :

Rel R-42, dengan $A = 54,26 \text{ cm}^2$; $E = 2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

Suhu pemasangan rel ; $t_p = 26^\circ \text{ C}$

Bantalan beton, dengan tahanan balas $r = 450 \text{ kg/m}$

Lebar celah ; $G = 13 \text{ mm}$; pergerakan satu sisi = $6,5 \text{ mm}$

Suhu pada saat celah tertutup ($G=0$); t_1

Suhu maksimum $t_{\text{mak}} = 50^\circ \text{ C}$

$$\begin{aligned} P_{\text{maks}} &= E A \alpha (t_{\text{maks}} - t_p) \\ &= E A \alpha (50^\circ - 26^\circ) \\ &= 31.175,6 \text{ kg} \end{aligned}$$

Suhu dimana celah tertutup (t_1)

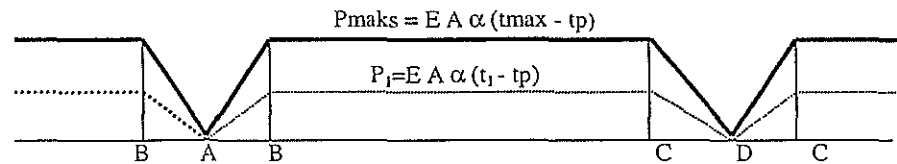
$$e = G/2 = E A \alpha^2 (t_1 - t_p)^2 / 2r = 0,65 \text{ cm}$$

$$t_1 - t_p = t_1 - 26^\circ = 19,9^\circ$$

$$t_1 = 44,9^\circ$$

$$\begin{aligned} P_1 &= E A \alpha (t_1 - t_p) \\ &= E A \alpha (44,9^\circ - 26^\circ) \\ &= 25.842 \text{ kg} \end{aligned}$$

Secara grafis dapat digambarkan seperti gambar-2.10 berikut :



Gambar 2.10 Distribusi Gaya akibat suhu

A ; D sambungan rel

AB-CD daerah bergerak (*movable, breathing length*)

BC daerah statis (*unmovable, static area*)

———— Tegangan pada suhu maksimum $T_{\text{maks}} = 50^\circ\text{C}$
 $P_{\text{maks}} = 31,175 \text{ ton}$

..... Tegangan pada suhu $t_1 = 25,85^\circ\text{C}$ (celah = 0 mm)
 $P_1 = 25,842 \text{ ton}$

———— Tegangan pada suhu pasang $t = 26^\circ\text{C}$
 $P = 0 \text{ ton}$

2.4.2 Gaya tekuk (*Buckling Force*)

2.4.2.1. Formula umum gaya tekuk (P_b)

$$P_b = \frac{\pi^2}{l^2} E I_s + \frac{\pi^2 C}{16D} \sqrt{\frac{\pi l}{q_b}} + \frac{W l^2}{D \pi^2 q_b}$$

Dimana :

I_s = momen ineria rel ($2I_y$) (cm^4)

E = modulus elastisitas rel = $2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$

C = koefisien torsi penambat (*torsional fastening coefficient*)
 (tm/rad; kg-m/rad)

- D = jarak bantalan (cm)
W = tahanan lateral balas (*ballast resistance*) (kg/meter, kg/bantalan)
l = panjang ketidak lurusan (*length of misalignment*) (meter, cm)
 q_b = ketidak lurusan (*misalignment*) (meter, cm, mm)

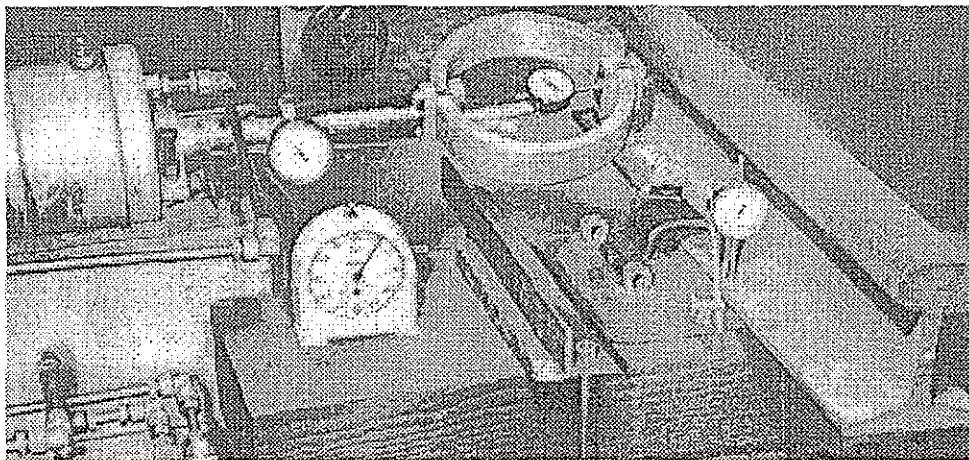
2.4.2.2. Tahanan Torsi Penambat (*Torsional Fastening Resistance*)

Jika jalur rel karena gaya suhu, akan tertekan dan berdefleksi kearah lateral, menurut kekakuan rel dan bantalan, dengan defleksi secara lateral ini, maka rel akan berotasi terhadap bantalan, dan rotasi ini ditahan oleh kekuatan penambat.

Berbagai jenis penambat baik penambat kaku maupun elastis, akan mempunyai kekuatan terhadap torsi dari penjepitannya, dan dengan :

- Penambat yang memanfaatkan jepitan dari paku
- Penambat yang memanfaatkan kekuatan dari baut
- Penambat dengan penjepitan kuat (elastis) baik vertikal maupun longitudinal

Untuk mendapatkan besarnya nilai tahanan ini, maka dilakukan tes terhadap penambat seperti pada gambar-2.11. Hasil dari test adalah nilai koefisien torsi penambat (C , *torsional fastening coefficient*), dengan satuan ton inch/rad^{0.5} atau ton meter/radial^{0.5} (tm/rad^{0.5})

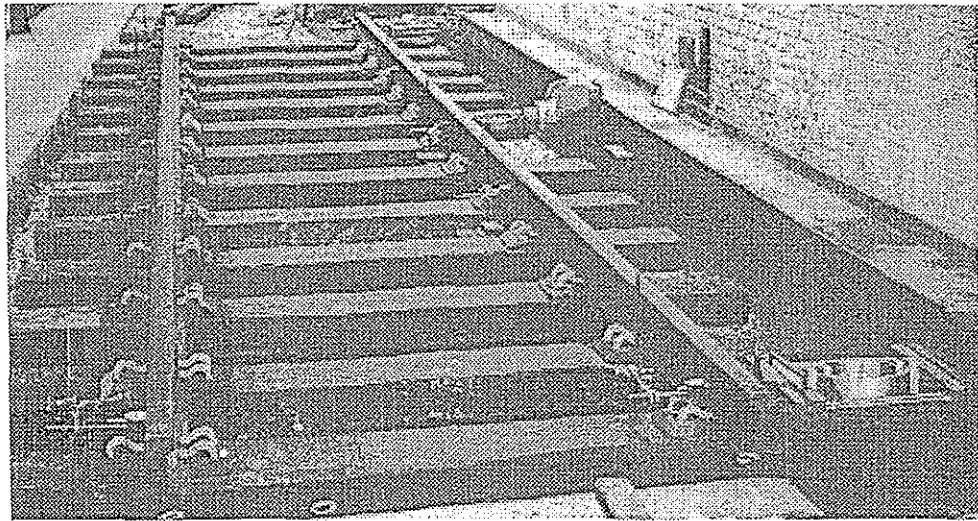


Gambar 2.11 Test Tahanan Torsi penambat ⁽²⁾

2.4.2.3. Tahanan Momen Lateral

Defleksi kearah lateral, kekuatan sangat ditentukan pula oleh kekakuan lateral dari kesatuan rel dan bantalan, yang diikat oleh penambat, sehingga tiga komponen ini merupakan komponen utama dalam memberikan besarnya gaya lateral yang terjadi.

Sebagai gambaran bagaimana test kekuatan tahanan lateral dari struktur rel, penambat dan bantalan, dapat dilihat pada gambar-2.12.



Gambar 2.12 Test Tahanan Momen Lateral (Lateral Momen Resistance) ⁽²⁾

2.4.2.4. Tahanan Balas (*Ballast Resistance*)

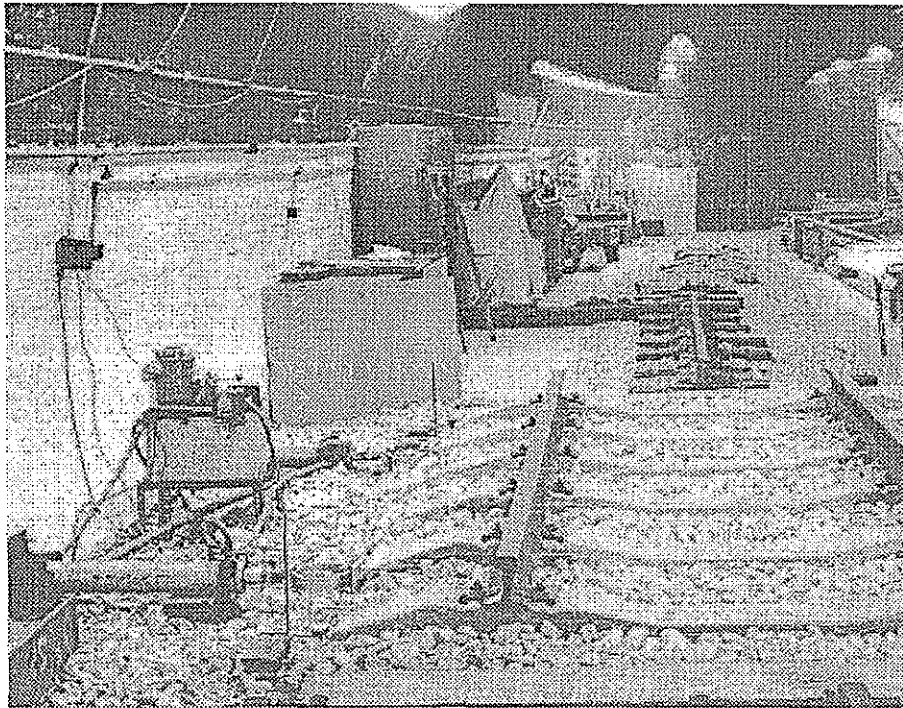
Balas merupakan komponen utama dalam menahan pergerakan (defleksi) dari track, baik kearah longitudinal, maupun ke arah lateral.

Banyak cara untuk memperbesar tahanan lateral balas ini, tetapi secara prinsip bahwa cara balas menahan pergerakan track ke arah lateral adalah dengan gesekan di sisi, di bawah dan pemindahan volume balas di ujung bantalan.

Dengan analisis sistem tersebut, maka cara-cara memperbesar tahanan lateral adalah dengan memperberat bantalan, menggemukkan bahu jalan, memakai safety caps, dsb.

Tahanan balas dinyatakan dalam ton/bantalan atau ton/meter (t/m).

Sebagai gambaran bagaimana tes tahanan lateral dan longitudinal balas, dapat dilihat pada gambar-2.13 berikut.



Gambar 2.13 Tes Tahanan Balas ⁽²⁾

2.4.2.5. Ketidaklurusan (Misalignment)

Ketidak lurus pada alinyemen track, sangat berpengaruh terhadap bahaya tekuk, ketidakrataan ini disebabkan karena pemeliharaan, atau karena ketidakstabilan jalan rel, terutama pada tanah dasarnya.

Perubahan beberapa milimeter saja, sudah sangat dominan untuk penurunan kekuatan tekuk, hal ini menjadi penyebab mengapa pemeliharaan geometri pada pemakaian rel panjang menerus lebih mahal dibandingkan pada konstruksi bukan panjang menerus.

Ketidakrataan geometri selain dibatasi oleh pembatas bahaya tekuk, juga dibatasi oleh parameter kenyamanan, keamanan perjalanan (pembatas akselerasi penumpang kereta).

2.4.2.6. Contoh Perhitungan Gaya Tekuk

Sebagai contoh perhitungan untuk mencari besarnya gaya tekuk adalah sebagai berikut :

$$\text{Rel ; R-54 ; } I_x = 2346 \text{ cm}^4; \quad I_y = 417,5 \text{ cm}^4; \quad I_s = 835 \text{ cm}^4$$

Bantalan kayu; jarak (d) = 60 cm

Kekuatan lateral bantalan = 310 kg/bantalan

Penambat; Elastis ; Koefisien torsi penambat (C) = 1,2 ton-meter/rad^{0.5}

$$P_b = \frac{\pi^2}{l^2} EI_s + \frac{\pi^2 C}{16D} \sqrt{\frac{\pi l}{q_b}} + \frac{W l^2}{D \pi^2 q_b}$$

$$P_b = \frac{1.73 \times 10^{10}}{l^2} + 2186,7 \sqrt{\frac{l}{q_b}} + 0,523 \frac{l^2}{q_b}$$

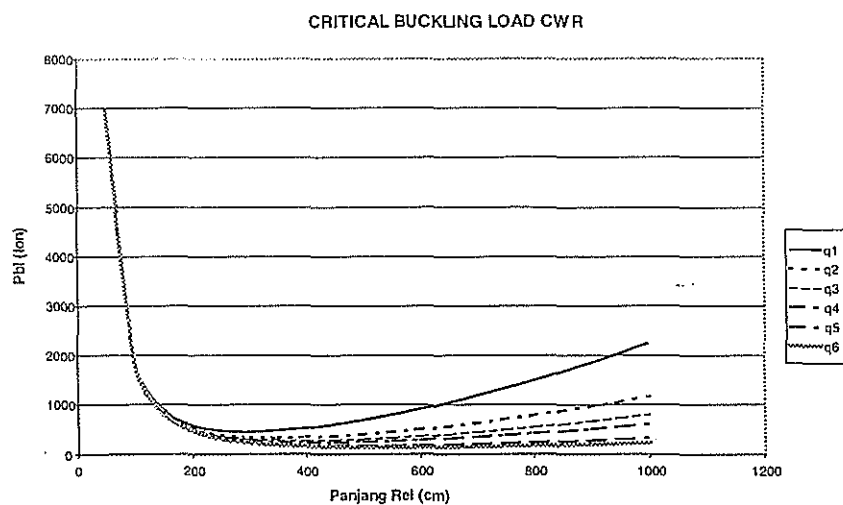
Dengan P_b dalam kg
 l dalam cm
 q_b dalam cm

Untuk mendapatkan besarnya nilai masing-masing maka dibuat grafik, dengan :

- Absis adalah panjang ketidaklurusan (l) (*misalignment*).
- Ordinat adalah Gaya tekuk (P_b) dalam kg atau ton
- Variasi panjang ketidaklurusan (l) dari 0,5 meter sampai 10 meter
- Variasi besarnya misalignment (q_b) dari 1 mm sampai 25 mm

Sebagai contoh dapat dilihat pada gambar-2.14

Dan untuk $q_b = 5$ mm, $l = 3,5$ meter; $P_b = 327,4$ ton



Gambar 2.14: Grafik Gaya Tekuk Rel Panjang Menerus

Sumber-sumber dan Referensi :

1. Abbott, R.A, "Fatigue Analysis of Rail Subject to Traffic and Temperature Loading", Four International Rail Track Conference, Paper I-2, New Castle, Australia, September 1982.
2. British Railways, "Long welded Rails", British Transport Commision, London, 1959
3. British Tansport Commision " Experiment on the Stability of Long Welded Rails", London, 1961
4. Esveld Coenraad, "Modern Railway Track", Graphics Department of Thyssen Stahl Ag, Duisburg, 1989.
5. Hay. W.W "Railroad Engineering", John Wiley and Sons, Second Edition, New York, 1982
6. Japan National Railways, " Track Maintenance", Japan International Cooperation Agency, 1980.
7. Nippon Steel Corporation " Rails" 1980
8. NKK Corporation " Rail ", Japan, April 1991
9. PJKA, "Penjelasan Peraturan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel, (Penjelasan PD No 10)", PJKA, April 1986
10. PJKA, "Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10)", PJKA, April 1986