



ANALISA STRUKTURMIKRO DAN PENGARUHNYA TERHADAP SIFAT MEKANIS BATANGAN REL TIPE R54

Robby Dwiwandono^a, Leksono Firmansyah^a, Satrio Herbirowo^b, M Yunan Hasbi^b, Fatayalkadri Citrawati^{b,*}

^aUniversitas Sultan Ageng Tirtayasa

Jl. Jend. Sudirman Km. 3, Cilegon, Banten, 42434

^bPusat Penelitian Metalurgi dan Material - LIPI

Gedung 470, Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan

*E-mail: taya.citra@gmail.com

Masuk Tanggal : 27-08-2017, revisi tanggal : 07-09-2017, diterima untuk diterbitkan tanggal 30-09-2017

Intisari

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sifat mekanik dan strukturmikro dari beberapa jenis batangan rel bertipe R54 yang digunakan di Indonesia, yaitu yang berasal dari Jerman (Baja Rel G) dan Cina (Baja Rel C). Dalam aplikasinya, ketangguhan tinggi diperlukan agar material batangan rel mampu meredam atau menahan beban roda kereta api saat berjalan. Dalam penelitian ini, beberapa pengujian telah dilakukan, antara lain pengujian komposisi kimia dengan OES (*optical emission spectroscopy*), pengamatan metalografi dengan OM (*optical microscope*), pengujian kekuatan tarik serta uji keras *micro Vickers*. Dari hasil pengujian komposisi kimia didapatkan bahwa kedua batangan rel termasuk ke dalam baja rel (*rail steel*) Fe-C-Mn, dimana Baja Rel G memiliki unsur pepadu mikro Zr lebih besar dari Baja Rel C. Perbedaan komposisi kimia ini tidak mempengaruhi besarnya kekuatan tarik pada kedua material secara signifikan, dimana dari hasil pengujian tarik didapatkan nilai kekuatan tarik untuk Baja Rel G sebesar 1050 MPa dan Baja Rel C sebesar 1044 MPa dengan nilai elongasi yang sama yaitu sebesar 13%. Pengaruh dari perbedaan kandungan unsur-unsur pepadu, dalam hal ini Zr, dimungkinkan dapat mempengaruhi nilai kekerasan rata-rata dari kedua batangan rel melalui pembentukan presipitat, dimana dari hasil pengujian kekerasan pada bagian badan rel, secara keseluruhan, Baja Rel G memiliki nilai kekerasan rata-rata lebih tinggi dibandingkan Baja Rel C, yaitu 341 HV (Baja Rel G) dan 324 HV (Baja Rel C). Perbedaan pada nilai kekerasan juga ditunjukkan untuk bagian kepala dan bagian badan rel dari kedua batangan rel. Pada bagian kepala, terutama di seputaran bagian permukaannya, memiliki nilai kekerasan rata-rata yang lebih tinggi, yaitu 452 HV (Baja Rel G) dan 423 HV (Baja Rel C), dibandingkan dengan kekerasan rata-rata pada bagian badan, baik di area tepi maupun tengah. Perbedaan kekerasan yang terjadi antara bagian kepala dan badan rel pada kedua batangan rel salah satunya dipengaruhi oleh strukturmikronya, yang didominasi oleh fasa perlit.

Kata Kunci: Baja rel, rel kereta, strukturmikro, sifat mekanis, R54, perlit, jarak lamela

Abstract

This study was conducted to observe the mechanical properties and microstructures of two rail tracks type R54 used in Indonesia, which produce in Germany (rail steel G) and China (rail steel C). During its application, it is necessary for rail track to have high toughness to bear the dynamic load from wheel movement. In this study, several examinations and observations have been made, which comprise OES chemical composition analysis, metallography by using OM, tensile test, and micro Vickers hardness test. The OES chemical composition result shows that both rail tracks belong to Fe-C-Mn rail steels, in which, rail steel G has higher Zr micro alloy content than rail steel C. These differences do not significantly affect their tensile strength, which are 1050 MPa and 1044 MPa for rail steel G and rail steel C, respectively. Moreover, both samples were observed to have elongation of 13%. The difference in micro alloys, specifically Zr, may influence the hardness of the samples through precipitate strengthening. The average hardness in the body part of the tracks show that rail steel G has slightly higher hardness value compare to rail steel C. It is 341 HV for rail steel G and 324 HV for rail steel C. This hardness difference was also found between the head part and the body part of both rail tracks. In the head part, the area near the edge of the rail tracks e has an average hardness of 452 HV for rail steel G and 423 HV for rail steel C. These values are higher than the hardness value of the body part of both rail tracks. The difference in hardness of the body part and the head part might be due to the phases in their microstructure, which observed to be dominated

by pearlite.

Keywords: Rail steel, rail track, microstructure, mechanical property, R54, pearlite, lamellar spacing

1. PENDAHULUAN

Negara Indonesia memiliki salah satu modal transportasi darat yang efektif dan efisien, yaitu kereta api. Salah satu komponen penting dalam transportasi kereta api adalah rel kereta api. Rel kereta api berfungsi sebagai pijakan kereta api untuk bergerak atau berpindah. Material yang dipakai dalam pembuatan rel kereta api adalah baja^[1].

Rel yang digunakan harus mempunyai kuat tarik minimum sebesar 90 MPa dan kekerasan pada bagian kepala rel tidak kurang dari 240 HB (*hardness brinell*). Kekerasan pada bagian kepala rel dapat ditingkatkan menjadi sebesar kisaran 320-388 HB dengan diberikan perlakuan panas sehingga umur rel dapat menjadi lebih panjang karena ketahanan aus dari rel pun meningkat^[1].

Saat ini, rel kereta api di Indonesia dibedakan menjadi beberapa tipe yaitu R54, R50, dan R42. Berdasarkan standar dari UIC (*international union of railways*) kode nomor dari tipe-tipe rel tersebut memiliki arti berat rata-rata batangan baja rel di setiap meter panjangnya. Selain perbedaan pada beratnya, perbedaan dari tipe-tipe rel tersebut adalah pada dimensinya. Semakin besar angka pada tipe maka semakin tebal pula dimensinya^[2].

Perbedaan tipe batang rel mempengaruhi beberapa hal yaitu tekanan maksimum yang dapat diterima batang rel pada saat dilintasi oleh kereta api dan menentukan kecepatan maksimum yang diizinkan saat kereta api melintasi batang rel. Semakin besar angka pada tipe rel, maka semakin besar tekanan maksimum dan kecepatan maksimum yang dapat diterima dan diaplikasikan pada batang rel tersebut^[2].

Tipe rel yang saat ini paling banyak digunakan pada moda transportasi kereta api di Indonesia adalah tipe R54 yang digunakan pada jalur dengan kepadatan lalu lintas yang tinggi, dimana saat ini Indonesia menggunakan baja rel R54 yang diproduksi oleh negara Cina dan Jerman.

Perbedaan sifat mekanis diantara beberapa tipe rel, dipengaruhi oleh komposisi kimia, perlakuan panas dan strukturmikro yang terbentuk. Pengaruh komposisi kimia dan perlakuan panas terhadap sifat mekanis telah ditunjukkan pada proses pembuatan rel di

Inggris sejak tahun 1857, dimana setelah material baja rel Fe-C/Mn yang menghasilkan fasa perlit dikenakan proses perlakuan panas, kekuatan tariknya meningkat dari kisaran 618 MPa menjadi 710-880 MPa^[3].

Mengingat besarnya pengaruh strukturmikro terhadap sifat-sifat material serta dalam upaya meningkatkan kualitas dari rel yang ada di Indonesia, maka penelitian dasar dari baja rel R54 yang saat ini umum digunakan dalam moda transportasi kereta api penting untuk dilakukan. Penelitian karakterisasi baja R54 ini dapat menjadi landasan dan acuan dalam upaya meningkatkan kualitas dari baja rel. Adapun karakterisasi yang dilakukan meliputi komposisi kimia dengan OES (*optical emission spectroscopy*), uji keras, uji kekuatan tarik, dan analisis strukturmikro dengan metalografi.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

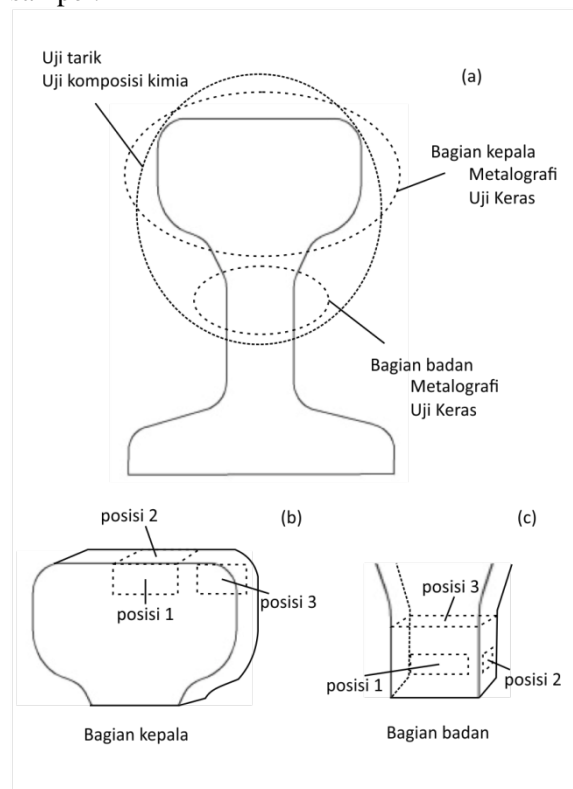
Material yang dikarakterisasi pada penelitian ini adalah batangan rel tipe R54 buatan China (Baja Rel C) dan Jerman (Baja Rel G) yang sudah digunakan. Adapun bagian dari baja rel R54 yang dikarakterisasi pada penelitian ini adalah bagian kepala dan bagian badan dari rel. Posisi pengambilan sampel yang digunakan untuk pengujian ditunjukkan pada Gambar 1.

Analisis komposisi kimia dari baja tersebut dilakukan dengan menggunakan OES. Tujuan dari analisa ini adalah untuk mengetahui kandungan unsur apa saja yang terdapat pada baja tersebut serta persentasenya. Pengamatan metalografi dilakukan pada bagian badan dan kepala baja rel. Pada bagian kepala, pengamatan dibagi menjadi tiga bagian yaitu penampang depan tengah, atas, dan pinggir (lekukan) yang ditunjukkan pada Gambar 1(b). Pada bagian badan, pengamatan dibagi menjadi tiga bagian yaitu penampang melintang, atas, dan samping yang ditunjukkan pada Gambar 1(c).

Sampel yang akan diamati dipotong menggunakan mesin *cutting* kemudian *dimounting*, dipoles, dan dietsa menggunakan dua larutan etsa yaitu 4% picral + 2% nital dengan perbandingan 10:1, dan 10% SMB (*sodium metabisulphite*). Kemudian dilakukan pengamatan dan pengambilan gambar dengan

menggunakan mikroskop optik OLYMPUS DP 12.

Pengujian kekerasan sampel baja R54 dilakukan menggunakan alat uji kekerasan *microvickers* merek MITUTOYO. Pengujian kekerasan dilakukan pada bagian badan dan juga bagian kepala dengan menggunakan standar JIS E1120 untuk mengetahui kekerasan pada Baja Rel G dan Baja Rel C. Pengujian kekuatan tarik dilakukan menggunakan mesin uji tarik merek INSTRON. Pengujian kekuatan tarik dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E8. Tujuan dari pengujian tarik ini adalah untuk mengetahui kekuatan luluh, kekuatan maksimum dan elongasi pada kedua sampel.



Gambar 1. Gambar skematis dari batangan rel (a) pengambilan sampel untuk bagian kepala dan bagian badan dan pengambilan sampel untuk pengamatan metalografi pada tiga lokasi yang berbeda untuk (b) bagian kepala dan (c) bagian badan

3. HASIL DAN DISKUSI

Hasil pengamatan metalografi pada Gambar 2 dan Gambar 3 dari Baja Rel G dan Baja Rel C menunjukkan bahwa strukturmikro kedua material didominasi oleh fasa perlit. Dimana pembentukan fasa ini, selain dipengaruhi oleh proses perlakuan panas juga oleh komposisi kimia dari material.

Pada Tabel 1, hasil pengujian komposisi kimia untuk Baja Rel G dan Baja Rel C, menunjukkan bahwa kadar karbon pada kedua material termasuk dalam kadar C yang tinggi

sebab memiliki kisaran nilai di atas 0,5% berat^[4] dan memiliki kandungan Mn yang relatif tinggi dibandingkan unsur pepadu lain. Kedua unsur ini memiliki peranan yang penting dalam pembentukan fasa perlit, dimana unsur C berperan melalui banyak sedikitnya terbentuknya sementit^[5] sedangkan Mn berperan dalam meningkatkan jumlah kandungan perlit, menurunkan jarak lamela dan meningkatkan ukuran butiran ferit^[5-6]. Adanya kandungan Si di dalam kedua material, bersama dengan unsur C dan Mn, pada aplikasinya diharapkan mampu meningkatkan kekuatan aus dari material baja rel^[5-7].

Tabel 1. Hasil uji komposisi kimia dari Baja Rel G dan Baja Rel C

Unsur (% berat)	Baja Rel G	Baja Rel C
C	0,74	0,71
Si	0,42	0,40
S	0,007	0,005
P	0,007	0,005
Mn	1,12	1,08
Ni	0,02	0,02
Cr	0,04	0,04
Cu	0,02	0,03
Ti	0,002	0,001
Sn	0,002	0,002
Al	0,004	0,003
Nb	0,003	0,002
Zr	0,001	0,0004
Zn	0,002	0,001
Fe	Bal.	Bal.

Dari kedua material baja rel, perbedaan yang cukup signifikan terlihat pada unsur pepadu mikro Zr, dimana Baja Rel G memiliki kandungan Zr yang lebih tinggi dibandingkan Baja Rel C. Kandungan Zr pada Baja Rel G ini dimungkinkan memberikan peningkatan kekuatan melalui pembentukan presipitat.

Secara keseluruhan, kandungan unsur-unsur kimia pada Baja Rel G dan Baja Rel C tidak jauh berbeda, oleh karena itu dari hasil pengujian tarik, kekuatan tarik, kekuatan luluh maupun elongasinya tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan diantara kedua material. Besaran nilai-nilai ini dapat dilihat pada Tabel 2. Selisih nilai kekuatan tarik dan kekuatan luluh dari kedua material menunjukkan bahwa Baja Rel G memiliki nilai kekuatan tarik 6 MPa lebih tinggi dan kekuatan luluh 7 MPa lebih tinggi dibandingkan dengan Baja Rel C. Dengan besaran elongasi yang sama, Baja Rel G memiliki ketangguhan yang sedikit lebih baik dari Baja Rel C.

Tabel 2. Hasil uji tarik Baja Rel G dan Baja Rel C

	Baja Rel G	Baja Rel C
Kekuatan Luluh (MPa)	683	676
Kekuatan Tarik (MPa)	1050	1044
Elongasi (%)	13	13

Besaran nilai kekuatan tarik yang relatif sama ini, selain dipengaruhi oleh kandungan unsur pepadu utama dari kedua baja rel yang tidak jauh berbeda juga strukturmikro pada bagian badan yang sama-sama didominasi oleh fasa perlit. Pada Gambar 2, fasa perlit ditunjukkan oleh area selang seling hitam dan putih (etsa 4% picral dan 2% nital) atau coklat dan putih (etsa 10% SMB).

Hasil pengamatan fasa perlit yang diperoleh dari tiga posisi bagian badan di kedua baja rel menunjukkan adanya variasi lebar jarak antara lamela sementit dalam fasa perlit.

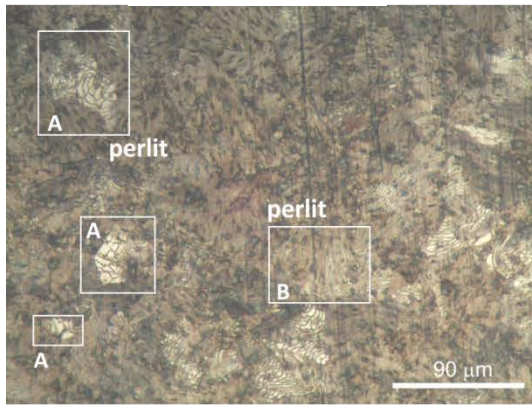
Pada area penampang melintang baja rel, yaitu posisi 1, Baja Rel G (Gambar 2(a) dan (c)) memiliki jarak fasa perlit terkecil yang dapat diamati sebesar $\sim 1,5 \mu\text{m}$, demikian juga pada Baja Rel C (Gambar 2(b) dan (d)) yang memiliki jarak terkecil pada $\sim 1,4 \mu\text{m}$. Jarak terkecil kedua baja rel tidak jauh berbeda, tetapi untuk jarak terlebarnya, fasa perlit pada Baja Rel C menunjukkan adanya jarak sebesar $\sim 7,4 \mu\text{m}$. Jarak ini $3 \mu\text{m}$ lebih lebar dibandingkan dengan jarak terlebar lamela perlit pada Baja Rel G, yang memiliki lebar sebesar $\sim 3,9 \mu\text{m}$. Beberapa fasa perlit yang menunjukkan adanya perbedaan lebar lamela, ditunjukkan dengan area kotak A, untuk lebar lamela yang relatif lebih kecil, dan area kotak B, untuk lebar lamela yang relatif lebih besar pada Baja Rel G. Pada posisi 2, yang ditunjukkan oleh Gambar 2(e) untuk Baja Rel G dan Gambar 2(f) untuk Baja Rel C, variasi lebar lamela perlit masih tetap terlihat. Variasi ini berselang diantara $\sim 0,6 \mu\text{m}$ hingga $\sim 3,5 \mu\text{m}$ untuk Baja Rel G dan $\sim 1,4 \mu\text{m}$ hingga $\sim 6,6 \mu\text{m}$ untuk Baja Rel C.

Pada posisi 3, jarak lamela perlit terbesar yang teramati untuk Baja Rel G, merupakan jarak yang terlebar relatif terhadap dua posisi

sebelumnya (Gambar 2(g)), yaitu sebesar $\sim 4,6 \mu\text{m}$. Jarak terlebar pada Baja Rel G ini masih terbilang lebih kecil dibandingkan jarak terlebar yang teramati pada Baja Rel C untuk posisi yang sama (Gambar 2(h)), yaitu sebesar $\sim 5,7 \mu\text{m}$. Sedangkan untuk jarak terkecil, pada posisi 3, Baja Rel G dan Baja Rel C masing masing memiliki jarak sebesar $\sim 1,1 \mu\text{m}$ dan $\sim 0,8 \mu\text{m}$. Secara keseluruhan, variasi selang jarak lamela pada bagian badan untuk Baja Rel G lebih kecil jika dibandingkan dengan Baja Rel C.

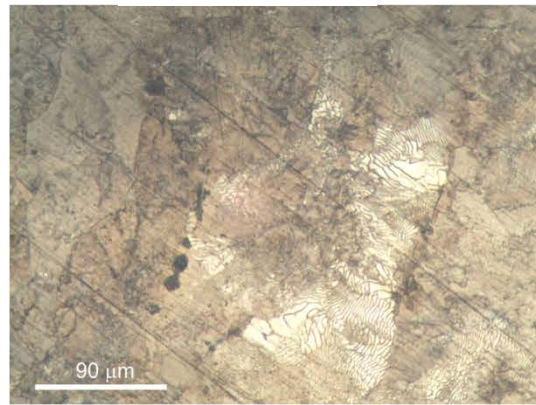
Untuk strukturmikro pada bagian kepala dari kedua baja rel (Gambar 3), perbedaan terbesar antara lebar jarak lamela perlit untuk kedua baja rel adalah sebesar $\sim 1,3 \mu\text{m}$. Dari tiga posisi yang diamati, Baja Rel G memiliki fasa perlit dengan jarak lamela pada selang $\sim 1,6 - \sim 2,4 \mu\text{m}$ untuk posisi 1 (Gambar 3(a)), $\sim 0,8 - \sim 1,5 \mu\text{m}$ untuk posisi 2 (Gambar 3(c)) dan $\sim 1,4 - \sim 2,7 \mu\text{m}$ untuk posisi 3 (Gambar 3(e)). Sedangkan untuk Baja Rel C, kisaran selang jarak lamela ini tidak jauh berbeda, yaitu $\sim 0,7 - \sim 1,9 \mu\text{m}$ untuk posisi 1 (Gambar 3(b)), $\sim 1,5 - \sim 2,7 \mu\text{m}$ untuk posisi 2 (Gambar 3(d)) dan $\sim 1,2 - \sim 2,5 \mu\text{m}$ untuk posisi 3 (Gambar 3(f)). Dari pengamatan pada bagian kepala, kedua baja rel memiliki jarak terlebar lamela perlit yang kurang lebih sama, yaitu $\sim 2,7 \mu\text{m}$. Jika dibandingkan dengan fasa perlit pada bagian badan, jarak ini lebih kecil sebesar $\sim 1,9 \mu\text{m}$ dari jarak lamela perlit terlebar Baja Rel G dan sebesar $\sim 4,7 \mu\text{m}$ dari jarak lamela perlit terlebar Baja Rel C. Perbedaan variasi jarak lamela perlit yang teramati antara bagian kepala dan badan ini baik dari Baja Rel G maupun Baja Rel C akan memberikan hasil pengujian mekanis yang berbeda pula.

Baja Rel G

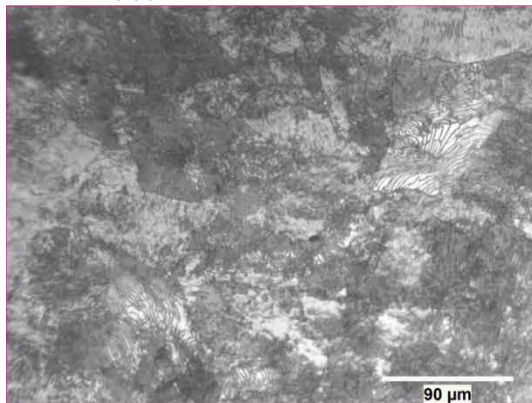


(a) posisi 1, etsa 10% SMB

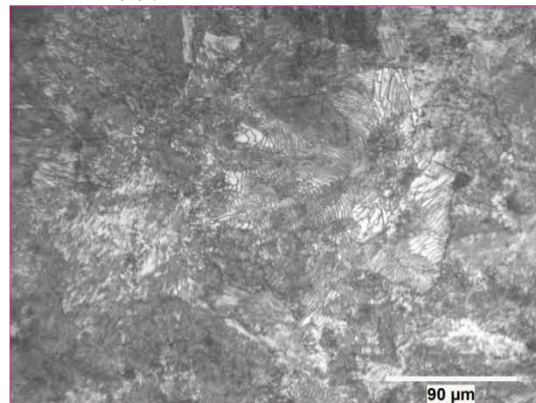
Baja Rel C



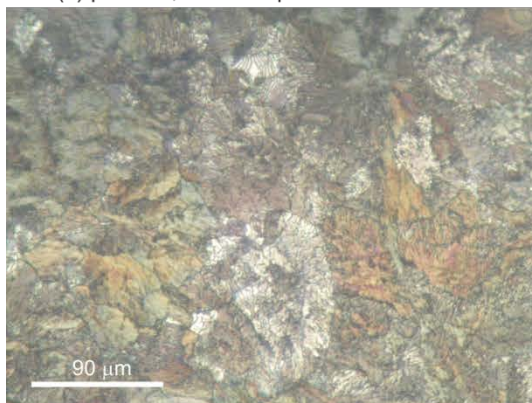
(b) posisi 1, etsa 10% SMB



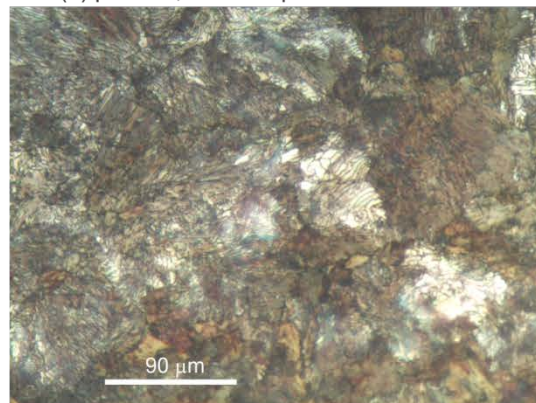
(c) posisi 1, etsa 4% picral + 2% nital



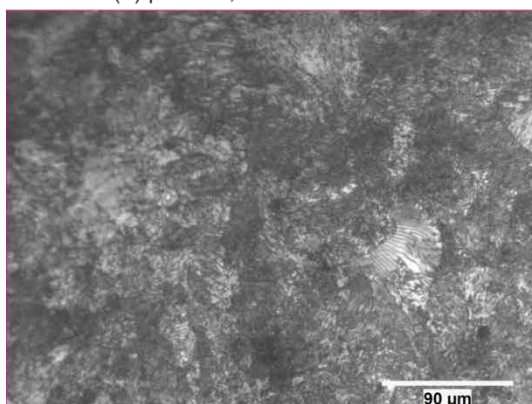
(d) posisi 1, etsa 4% picral + 2% nital



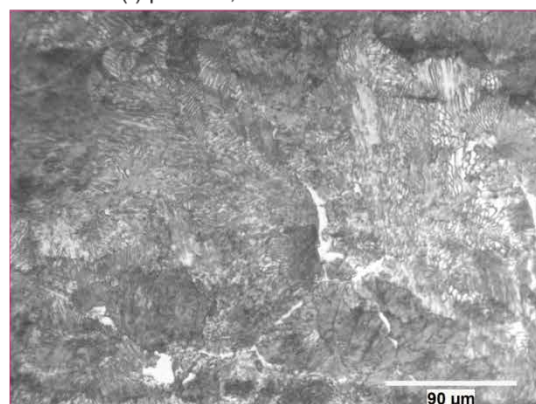
(e) posisi 2, etsa 10% SMB



(f) posisi 2, etsa 10% SMB

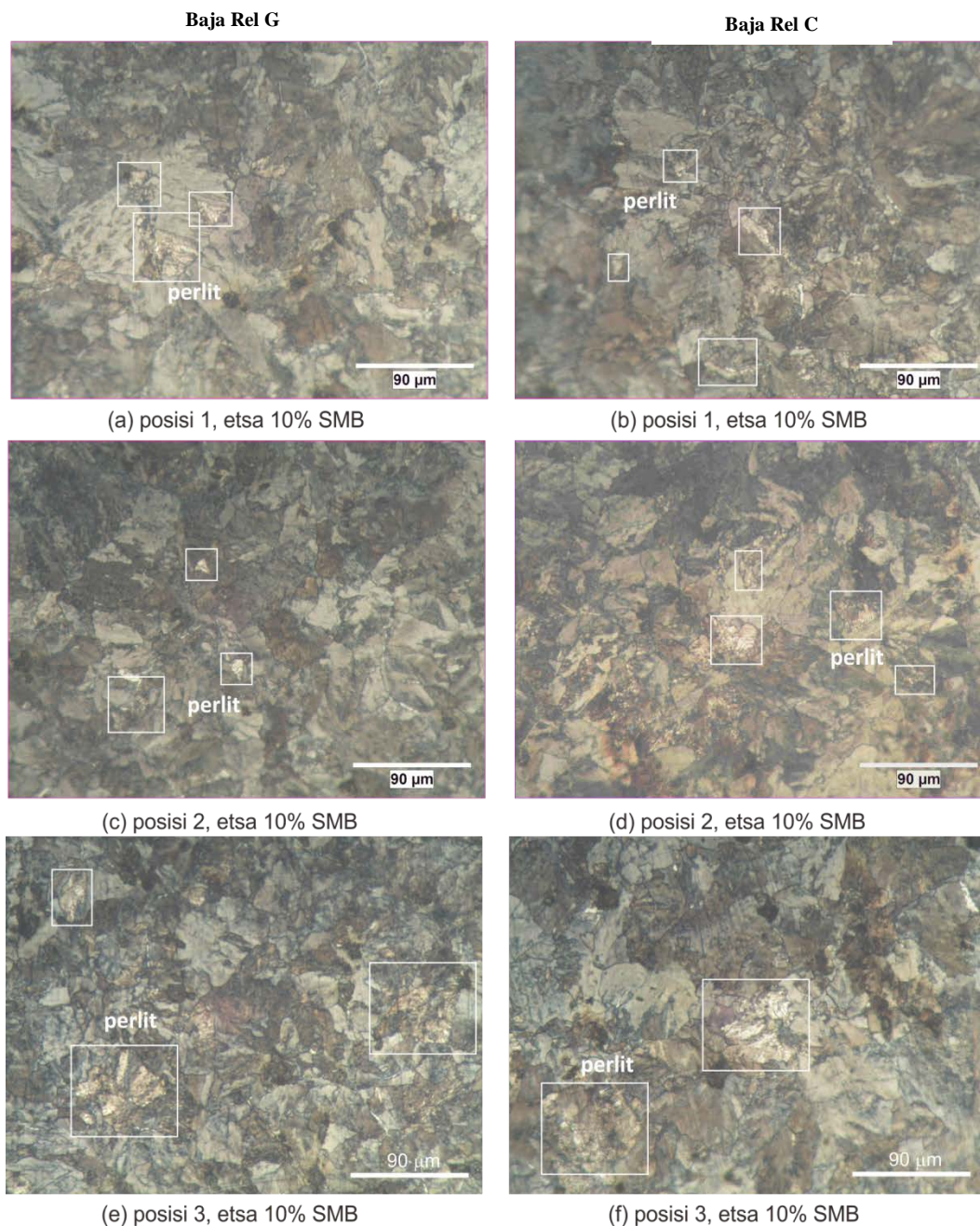


(g) posisi 3, etsa 4% picral + 2% nital



(h) posisi 3, etsa 4% picral + 2% nital

Gambar 2. Strukturmikro bagian badan untuk (a), (c), (e), (g) Baja Rel G dan (b), (d), (f), (h) Baja Rel C pada (a), (b), (c) (d) posisi 1 (e), (f) posisi 2 dan (g), (h) posisi 3 menunjukkan dominasi fasa perlit (hitam putih atau coklat putih) dan sedikit jaringan fasa ferit (putih)



Gambar 3. Strukturmikro bagian kepala untuk (a), (c), (e) Baja Rel G dan (b), (d), (f) Baja Rel C pada (a), (b) posisi 1 (c), (d) posisi 2 dan (e), (f) posisi 3

Jarak dari lebar lamela perlit ini memiliki pengaruh terhadap besaran nilai kekuatan luluh dan kekerasan material^[8-9]. Secara matematis, pengaruh lebar lamela perlit terhadap kedua besaran tersebut mengikuti tipe hubungan Hall-Petch^[10] dan dapat dituliskan sebagai berikut:

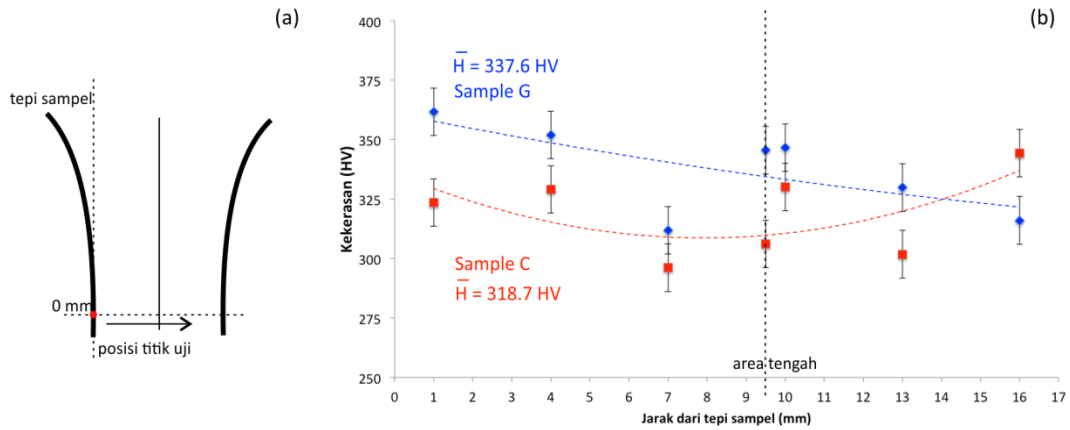
$$\sigma_y = \sigma_o + K_\sigma S^{-1/2} \quad (1)$$

$$H_v = H_o + K_H S^{-1/2} \quad (2)$$

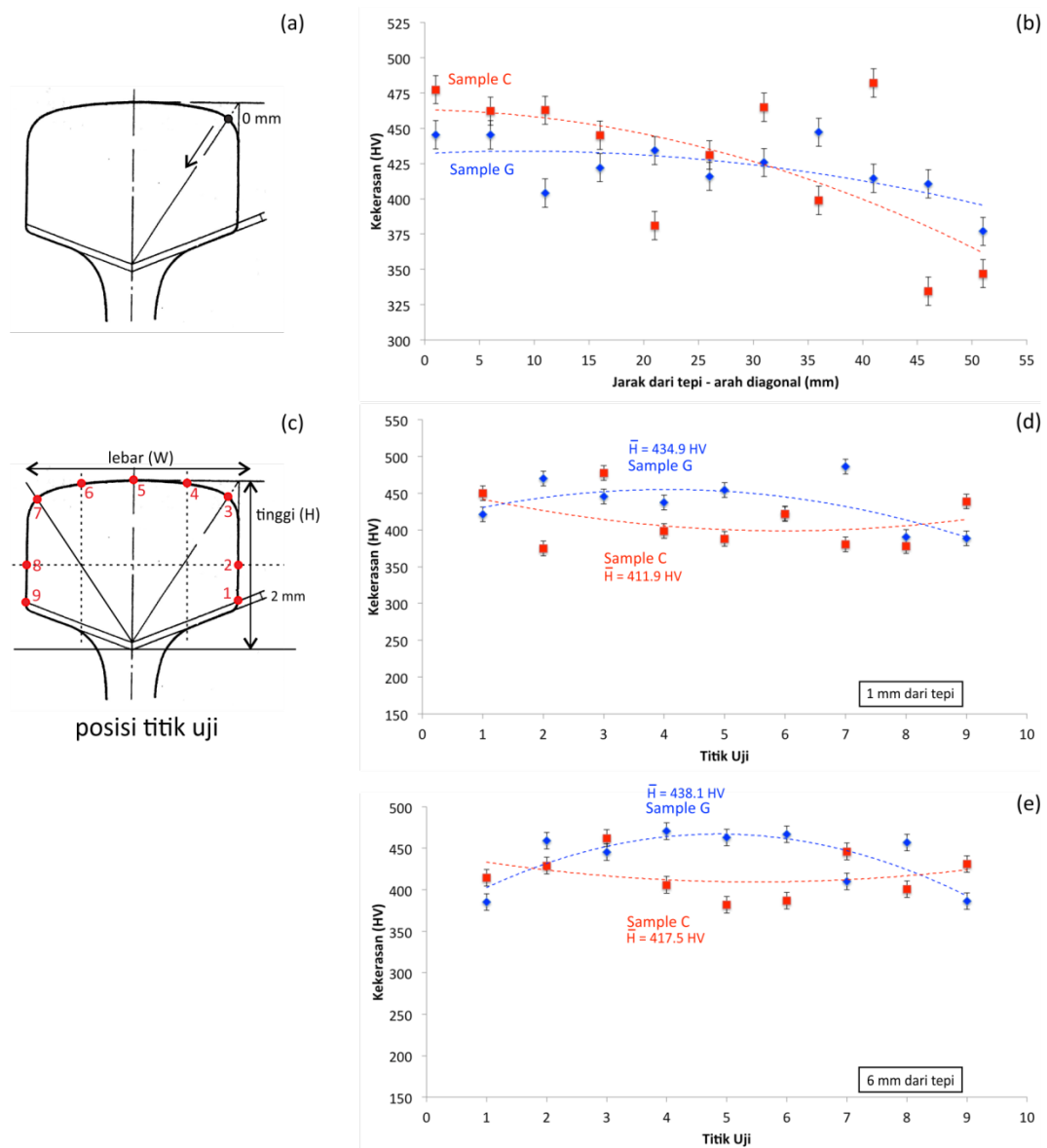
dimana σ_y adalah kekuatan luluh, H_v adalah kekerasan Vicker's, S adalah jarak antar lamela fasa perlit dan besaran σ_o , H_o , K_σ dan K_H merupakan besaran dan konstanta yang dapat

diperoleh melalui pengaluran nilai σ_y ataupun H_v terhadap $S^{-1/2}$.

Dari kedua persamaan tersebut, terlihat bahwa lebar jarak lamela perlit berbanding terbalik dengan kekuatan luluhnya (persamaan (1)). Hal ini sesuai dengan hasil perhitungan jarak lamela dan pengujian tarik yang diperoleh untuk Baja Rel G dan Baja Rel C, dimana Baja Rel G memiliki rata-rata jarak lamela sebesar $\sim 2,3 \mu\text{m}$ dan nilai kekuatan luluh sebesar 683 MPa, sedangkan Baja Rel C memiliki rata-rata jarak lamela sebesar $\sim 3,6 \mu\text{m}$ dan nilai kekuatan luluh sebesar 676 MPa.



Gambar 4. (a) Gambar skematik pengambilan lokasi uji keras pada bagian badan Baja Rel G dan Baja Rel C (b) pengaluran nilai kekerasan terhadap jarak pada penampang melintang badan rel Baja Rel G dan Baja Rel C



Gambar 5. Gambar skematik pengambilan titik pengujian kekerasan pada bagian kepala Baja Rel G dan Baja Rel C secara (a) diagonal dari tepi lengkungan dan (c) pada beberapa titik di seputar bagian tepi kepala sesuai dengan standar JIS E1120 (b), (d) dan (e) menyajikan hasil pengaluran antara nilai kekerasan terhadap jarak atau titik uji

Selain dari kekuatan luluh, berdasarkan hubungan matematis pada persamaan (2), lebar perlit juga berbanding terbalik dengan kekerasannya. Beberapa hasil pengujian kekerasan untuk Baja Rel G dan Baja Rel C dapat dilihat pada Gambar 4 untuk pengujian pada bagian badan dan Gambar 5 untuk pengujian pada bagian kepala.

Pengujian pada bagian badan, dilakukan beberapa kali di area tepi dan di beberapa titik di sepanjang arah horizontal penampang melintang kedua baja rel (Gambar 4(a)). Nilai kekerasan rata-rata untuk bagian tepi pada Baja Rel G sebesar 342 HV, sedangkan untuk Baja Rel C sebesar 334 HV. Nilai rata-rata kekerasan ini memiliki perbedaan terhadap nilai kekerasan sepanjang area penampang melintang dari kedua baja rel (Gambar 4(b)).

Dari grafik pengaluran antara nilai kekerasan dan jarak pengambilan titik uji keras (Gambar 4(b)), terlihat bahwa area tepi memang memiliki kekerasan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan area tengah baja rel, dengan kekerasan rata-rata sepanjang penampang melintang bagian badan baja rel adalah 337,6 HV untuk Baja Rel G dan 318,7 HV untuk Baja Rel C.

Pada bagian kepala, posisi pengambilan titik uji kekerasan beserta pengaluran hasil pengujian kekerasannya untuk Baja Rel G dan Baja Rel C ditunjukkan pada Gambar 5. Dari Gambar 5(a) dan (b), hasil pengujian kekerasan yang dilakukan dari tepi hingga bagian tengah kepala rel secara diagonal memperlihatkan bahwa bagian tepi pada Baja Rel G memiliki selisih nilai kekerasan sebesar 68,4 HV dengan bagian tengah baja rel, sedangkan pada Baja Rel C selisih ini hampir mencapai dua kali lipat dari selisih pada Baja Rel G, yaitu sebesar 130 HV. Khusus untuk pengujian di sekeliling bagian tepi, titik-titik uji yang diambil, ditunjukkan secara skematis pada Gambar 5(c)) sedangkan hasil pengalurannya disajikan dalam bentuk grafik H vs titik uji pada Gambar 5(d) yaitu untuk posisi uji yang diambil pada jarak 1 mm dari tepi dan pada Gambar 5(e) untuk posisi uji yang diambil pada jarak 6 mm dari tepi baja rel. Dari 9 titik yang diuji, titik uji 4, 5, dan 6 merupakan area permukaan yang bersentuhan langsung dengan roda kereta. Pengaluran yang dihasilkan dari Baja Rel G dan Baja Rel C untuk jarak 1 mm dan 6 mm cenderung memiliki tren yang sama, yaitu untuk Baja Rel G area permukaan memiliki kekerasan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan nilai kekerasan kedua area sisi, sebaliknya untuk Baja Rel C area

permukaannya memiliki nilai kekerasan yang cenderung lebih rendah dibandingkan dengan nilai kekerasan area kedua sisinya (Gambar 5(d) dan (e)).

Dari hasil pengamatan strukturmikro, area pengujian pada titik 4, 5 dan 6, diamati melalui strukur mikro posisi 2, dimana jarak lamela perlit rata-rata untuk Baja Rel G adalah sebesar $\sim 0,7 \mu\text{m}$, sedangkan untuk Baja Rel C sebesar $\sim 1,2 \mu\text{m}$. Perbedaan ini dapat menjadi salah satu penyebab perbedaan nilai kekerasan pada area yang bersentuhan dengan roda (titik 4, 5 dan 6) diantara kedua baja rel. Nilai kekerasan rata-rata untuk pengujian di sekeliling area tepi kepala untuk Baja Rel G adalah 434,9 HV untuk tepi 1 mm dan 438,1 HV untuk tepi 6 mm, nilai ini relatif lebih tinggi dibandingkan dengan nilai rata-rata Baja Rel C yang berada pada besaran 411,9 HV untuk tepi 1 mm dan 417,5 HV untuk tepi 6 mm. Secara keseluruhan, nilai kekerasan rata-rata kedua baja rel telah memenuhi standar yang dibutuhkan untuk aplikasi batangan rel kereta bertipe R54^[11].

Perbedaan nilai rata-rata kekerasan yang cukup signifikan, terlihat pada nilai kekerasan rata-rata antara bagian badan dan bagian tepi kepala baik pada Baja Rel G maupun Baja Rel C, yaitu 337,6 HV (Baja Rel G) dan 318,7 HV (Baja Rel C) untuk bagian badan dan 434,9 HV - 438,1 HV (Baja Rel G) dan 411,9 HV - 417,5 HV (Baja Rel C) untuk bagian tepi kepala. Salah satu faktor yang mempengaruhi perbedaan nilai rata-rata kekerasan ini adalah dari strukturmikro kedua bagian yang berbeda yaitu terutama pada perbedaan jarak lamela dari fasa perlit. Jika digabungkan antara kedua baja rel, bagian badan memiliki jarak lamela rata-rata $\sim 3 \mu\text{m}$ sedangkan bagian kepala memiliki jarak lamela rata-rata sebesar $\sim 1,8 \mu\text{m}$.

Dari keseluruhan hasil pengujian yang telah dilakukan, terlihat bahwa pada baja yang strukturmikronya mengandung fasa ferit dan perlit, perbedaan jarak lamela dari fasa perlit dapat memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap sifat mekanis dari material. Selain dari faktor strukturmikro, perbedaan nilai kekerasan rata-rata dari Baja Rel G dan Baja Rel C baik pada bagian badan maupun kepala, dapat juga dipengaruhi oleh unsur pemadu mikro yang ditambahkan melalui pembentukan presipitat.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan terhadap batangan rel kereta api Jerman dan Cina dapat disimpulkan bahwa struktur mikro batangan rel bertipe R54 dari kedua negara tersebut adalah ferit dan perlit. Keduanya termasuk ke dalam kelompok baja dengan kandungan C tinggi, yaitu sebesar 0,7% berat dan memiliki kandungan unsur padu utama yang sama, yaitu Mn, sebesar 1% berat. Perbedaan terlihat pada unsur padu mikro, dimana Baja Rel G memiliki kandungan Zr yang lebih tinggi dibandingkan Baja Rel C. Tidak ditemukan adanya perbedaan kekuatan tarik, kekuatan luluh dan elongasi yang signifikan diantara keduanya. Namun, dari hasil uji keras, secara keseluruhan Baja Rel G memiliki nilai rata-rata kekerasan lebih tinggi dibandingkan dengan Baja Rel C, yang dapat disebabkan oleh perbedaan kandungan unsur padu mikro dan jarak lamela dari fasa perlit dari masing-masing baja rel.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI yang telah memberikan pendanaan melalui kegiatan Kompetensi Inti Tahun 2016. Ucapan terimakasih juga kepada PT KAI Persero DAOP 1 atas sampel baja rel yang diberikan, dan Ir. Budi Priyono atas sesi diskusi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. H. T. Utomo, *Jalan Rel*, 2nd ed. Yogyakarta: Beta Offset, 2009.
- [2] Peraturan Dinas No. 10 Tahun 2009 tentang Perencanaan Konstruksi Jalan Rel, S. Negara 10, 2009.
- [3] J. Yates, "Innovation in rail steel," *Science in Parliament*, vol. 53, pp. 2-3, 1996.
- [4] G. E. Totten, *Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies*, 2nd ed. Portland: CRC Press, 2006.
- [5] B. Sladojevic, M. Jelic, and M. Puzic, "New Requirements for The Quality of Steel Rails," *Metalurgija-MJoM*, vol. 17, pp. 213-219, 2011.
- [6] F. M. Al-Abbasi, "Micromechanical modeling of ferrite-pearlite steels," *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, pp. 6904-6916, 2010.
- [7] D. Zeng, L. Lu, N. Zhang, Y. Gong, and J. Zhang, "Effect of different strengthening methods on rolling/sliding wear of ferrite-pearlite steel," *Wear*, vol. 358, pp. 62-71, 2016.
- [8] O. P. Modi, N. Deshmukh, D. P. Mondal, A. K. Jha, A. H. Yegneswaran, and H. K. Khaira, "Effect of interlamellar spacing on the mechanical properties of 0.65% C steel," *Materials Characterization*, vol. 46, pp. 347-352, 2001.
- [9] L. Wang, D. Tang, and Y. Song, "Prediction of mechanical behavior of ferrite-pearlite steel," *Journal of Iron and Steel Resesarch, International*, vol. 27, pp. 321-327, 2017.
- [10] A. R. Marder and B. L. Bramfitt, "The Effect of Morphology on the Strength of Pearlite," *Metallurgical Transactions A*, vol. 7A, pp. 365-372, 1976.
- [11] D. K. Arnold, *Railroad Track Mechanics and Technology*. New Jersey: Pergamon Press, 1975.