



ANALISIS STRUKTUR MIKRO DAN KEKUATAN AUS REL KERETA API TIPE R54 DIVRE IV TANJUNG KARANG

ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF RAILROAD RAIL TYPE R54 DIVRE IV TANJUNG KARANG

Eko Pujiyulianto^{1*}, Fajar Paundra^{1*}, Jukepri Brain Meliala¹, Hadi Teguh Yudistira¹, Amelia Oktavia², M. Fahan Sidik¹, M. Rafi Kurniawan¹, Fuad Mulkan Al Machzumy¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Sumatera (ITERA), Lampung Selatan, Lampung 35365, Indonesia.

²Program Studi Teknik Perkeretaapian, Institut Teknologi Sumatera (ITERA), Lampung Selatan, Lampung 35365, Indonesia.

E-mail : eko.pujiyulianto@ms.itera.ac.id; fajar.paundra@ms.itera.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa struktur mikro dan ketahanan aus material rel R54 yang telah digunakan di Divisi Regional (DivRe) IV Tanjung Karang. Beberapa pengujian yang dilakukan adalah pengujian komposisi kimia pada bagian kepala rel dan bagian badan rel dengan menggunakan spektrometer, pengujian struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik, dan pengujian keausan dengan metode *Ogoshi*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bagian kepala dan bagian badan memiliki komposisi kimia yang sama dimana unsur paduan utamanya adalah C, Si, Mn. Unsur Cr ditemukan pada material R54 yang dianalisis. Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa fasa yang terbentuk adalah perlit dimana pada bagian kepala berbentuk perlit halus dan pada bagian badan dan kaki berbentuk perlit kasar. Retakan ditemukan pada permukaan rel. Hasil pengujian aus menunjukkan bahwa nilai keausan spesifik material rel R54 adalah $1,606 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{kg}$.

Keywords : Struktur Mikro, Ketahanan Aus, Rel Kereta, Sifat Mekanik.

Abstract

The study aims to analyze the microstructure and wear resistance of the R54 rail material that has been used in Divre IV Tanjung Karang. Some of the tests were carried out such as chemical composition test on the head and on the web using spectrometry, microstructure test using an optical microscope, and wear test using the Ogoshi method. The results show that the head and web both have the same chemical composition where the main alloying elements are C, Si, Mn. Elemental Cr are found. The microstructure test shows that the phase is pearlite where on the head is fine pearlite and on the web and base is coarse pearlite. The cracks are found on the rail surface. The wear test shows that the specific wear value of R54 is $1.606 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{kg}$.

Keywords: Microstructure, Wear Resistance, Railroad rail, Mechanical Properties

PENDAHULUAN

Rel adalah dua batang baja yang tersusun untuk digunakan sebagai tumpuan dan jalur roda kereta api. Rel pertama kali digunakan sebagai jalur pada pengangkutan bahan tambang batu bara pada tahun 1630 oleh negara Inggris (Chandra dan Agarwal 2007). Seiring dengan perkembangan jaman, rel digunakan sebagai salah satu jalur pada moda transportasi untuk penumpang yaitu kereta api.

Rel memiliki beberapa klasifikasi, dan beberapa klasifikasi rel berdasarkan pada beberapa standar seperti AREMA (*American Railway Engineering and Maintenance Of Way Association*), JIS (*Japanese Industrial Standard*), EN (*European Standard*), UIC (*International Union Of Railway*), IRS (*Indian Railways Standard*), AS (*Australian Standard*) dan GOST yang merupakan standar negara Rusia (Rail 2020).

Rel berdasarkan fungsinya secara umum diklasifikasikan menjadi *standard rail*, *rail for heavy haul*, *head hardened rail*, dan *special rail*, dan berdasarkan kelasnya yaitu ada rel tipe R42, R50, R54, dan R60 (Rail 2020). Dua klasifikasi diatas mempengaruhi sifat material rel dan ukuran rel. Jenis rel yang paling banyak digunakan di Indonesia saat ini adalah jenis *standard rail* dan *head hardened rail* dengan tipe R54 (Dwiwandono, dkk. 2017).

Material rel pada umumnya adalah baja karbon tinggi dengan interval kandungan karbon sebesar 0.7-0.8 % C (ASM 2005, Torlakovic 2014, Toribio, dkk. 2014). Material tersebut juga disebut dengan baja eutektoid atau peralitik (Nejad, dkk. 2021, Schnalzger, Daves, dkk. 2022, Zhou, dkk. 2022, Atroshenko, Smirnov dan Maier 2022, Schnalzger, Maierhofer, dkk. 2022). Paduan utama pada material baja yang digunakan untuk rel adalah Karbon(C), Silikon (Si), Mangan (Mn), Fosfor (P), Sulfur (S) (Ueda dan Matsuda 2020, Kemenhub 2012). Beberapa paduan lain dengan jumlah kecil ditemukan pada rel seperti Krom (Cr). Unsur paduan akan berpengaruh terhadap sifat mekanik dan struktur mikro material baja. Selain unsur paduan, beberapa proses perlakuan panas seperti proses pengerasan permukaan yang biasa dilakukan pada rel jenis *head hardened rail* akan berpengaruh terhadap

sifat mekanik dan struktur mikro (Sudiyanto dan Pujiyulianto 2021). Sifat mekanik dan struktur mikro akan berpengaruh terhadap performa material (Amalia, dkk 2021, Pujiyulianto, dkk 2020, Pujiyulianto, dkk 2022, Pujiyulianto, dkk. 2018, Yushandiana, dkk 2020).

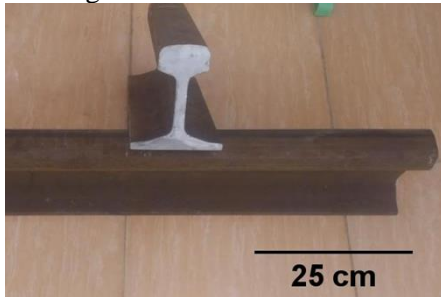
Salah satu sifat mekanik yang penting pada rel adalah ketahanan aus dimana salah satu permasalahan dan kerusakan yang sering ditemukan adalah keausan pada permukaan rel. Berdasarkan uraian diatas, dalam rangka tahap awal pengembangan rel di Indonesia, penelitian ini bertujuan untuk menganalisa struktur mikro dan ketahanan aus material rel R54 yang telah digunakan di divre IV tanjung karang

METODOLOGI

Rel kereta R54 divre IV tanjung karang digunakan sebagai material yang akan diteliti. Foto rel R54 divre IV tanjung karang ditunjukkan pada Gambar 1. Rel R54 dipotong dengan menggunakan gergaji mesin (*Knuth YS9044*, Jerman) dan di milling dengan menggunakan mesin milling (*Knuth MF5VP*, Jerman) untuk membentuk material rel R54 menjadi spesimen pengujian. Beberapa pengujian yang dilakukan adalah pengujian komposisi kimia dengan menggunakan spektrometri (*Poly Spek Neo Spectrometer*, Inggris), pengujian struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optic (*Zeiss*, Jerman), dan pengujian keausan dengan metode Ogoshi menggunakan mesin uji aus (*Ogoshi high speed universal wear testing machine OAT-U*). Paramater pengujian aus yaitu pembebanan yang digunakan adalah 2,21 kg, tebal piringan penggoresan adalah 3 mm, jari jari piringan penggoresan adalah 13,3 mm, material disc adalah *high quality alloy steel*, lama waktu pengujianya adalah 4,12 menit, dan kecepatannya adalah 0,244 m/detik.

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui unsur kimia yang terkandung pada material rel R54. Pengujian komposisi kimia dilakukan pada dua lokasi yaitu pada bagian kepala rel (*head*) dan badan rel (*web*). Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui fasa fasa yang terdapat pada material rel R54. Pengujian struktur mikro dilakukan pada tiga lokasi yaitu pada bagian kepala (*head*), badan (*web*), dan dasar (*base*). Proses persiapan permukaan

dilakukan dengan proses pengamplasan, proses poles dengan kain beludru, dan proses etsa. Proses etsa dilakukan dengan larutan larutan nital 3% (3ml HNO₃ + 97 ml Alkohol). Pengujian keausan dilakukan untuk mengetahui ketahanan aus material.



Gambar 1 Foto Rel R54

HASIL DAN PEMBAHASAN

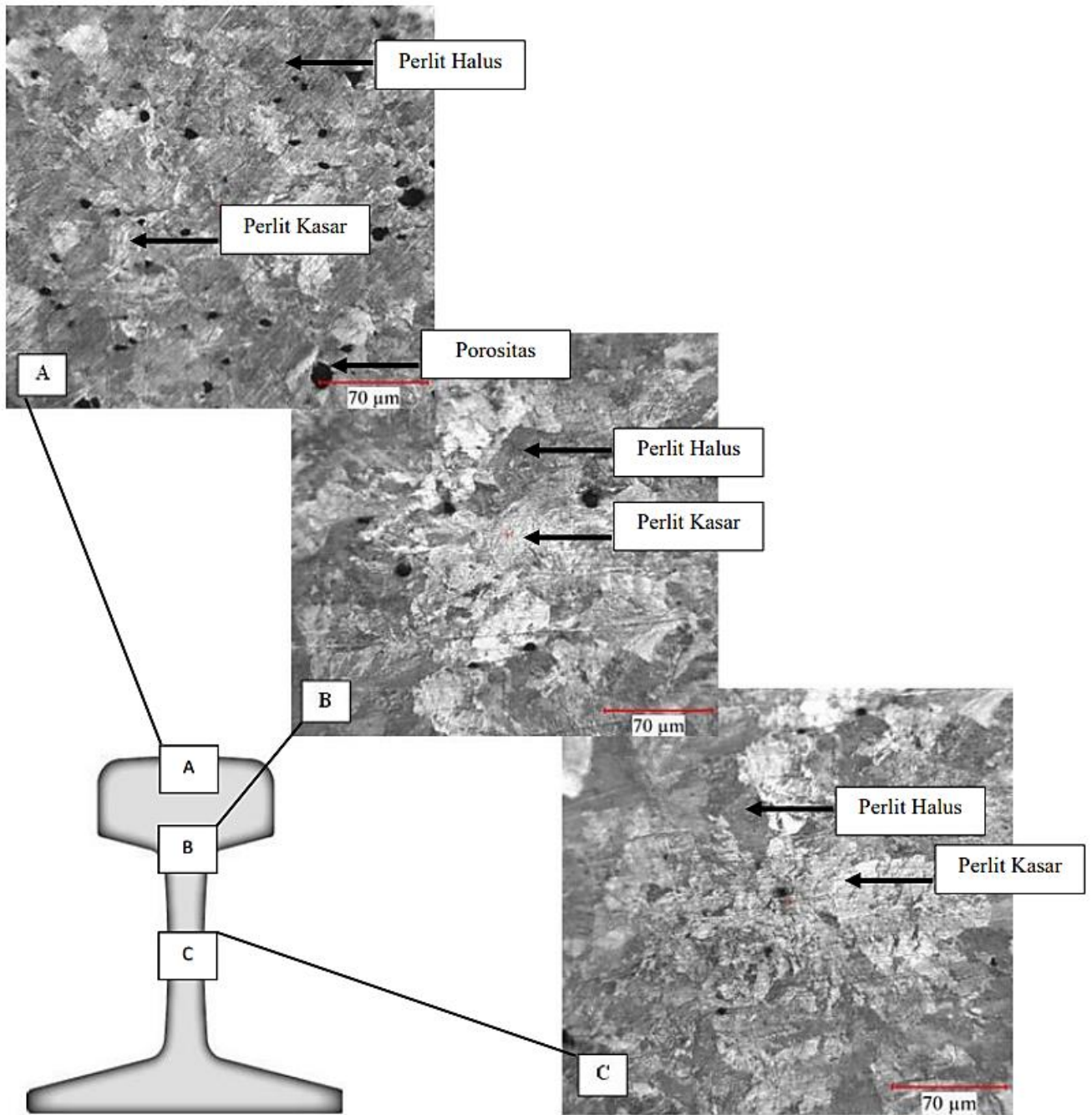
Tabel 3 menunjukkan komposisi kimia rel kereta api R54. Pengujian komposisi dilakukan pada dua titik yaitu pada area kepala rel (*head*) dan pada area badan rel (*web*). Hasil pengujian komposisi kimia pada tabel 3 menunjukkan bahwa komposisi kimia pada bagian kepala rel dan bagian badan rel tidak memiliki perbedaan komposisi yang signifikan, dengan kata lain, komposisi kimia pada area kepala rel dan badan rel masih memiliki komposisi yang sama. Hal ini dapat dilihat pada unsur paduan utama pada material tersebut yaitu pada unsur karbon (C), dan paduan lain dengan persentase yang cukup kecil yaitu Silikon (Si), Mangan (Mn), dan Krom (Cr).

Komposisi kimia pada bagian kepala rel dan badan rel yang sama menunjukkan bahwa rel tersebut tidak mendapatkan perlakuan permukaan atau pengerasan permukaan dengan cara *surface chemical treatment* seperti *carburizing*, *nitriding*, *carbonitriding*, dll.

Komposisi rel R54 pada bagian kepala dan pada bagian badan masih masuk kedalam beberapa standar komposisi kimia rel seperti standar JIS, AREMA, EN, dan IRS. Hal tersebut ditunjukkan pada tabel 3. Terdapat satu unsur yang ditemukan pada material rel R54 yang diuji dan tidak ditemukan pada standar komposisi kimia yaitu unsur Krom (Cr). Unsur krom (Cr) yang terdapat pada material rel memiliki kandungan sebesar 0,119% pada badan, dan 0,132 % pada kepala rel. Pengaruh unsur Cr pada material baja terhadap sifat mekanik adalah meningkatkan kekuatan tarik, kekerasan, kekuatan aus, dan ketahanan abrasi (ASM 2005). Beberapa pengaruh paduan lain pada material rel R54 terhadap sifat mekanik yaitu unsur Si berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan tarik, kekuatan luluh dan kekerasan, dan unsur Mn meningkatkan kekuatan tarik, kekuatan luluh, kekerasan, dan kekuatan aus (Amalia, dkk 2021).

Tabel 1. Komposisi Kimia Hasil Pengujian

Unsur (% wt.)	Material R54		Standar			
	Badan Rel	Kepala Rel	AREMA (Rail 2020)	EN 13674-1 (BS EN 2017)	IRS T12-2009 (Rail 2020)	JIS E1101-2001 (Rail 2020)
C	0,872	0,859	0,75-0,86	0,72-0,80	0,60-0,80	0,63-0,75
Si	0,424	0,589	0,1-0,6	0,10-0,50	0,10-0,50	0,15-0,30
Mn	1,070	1,213	0,75-1,25	0,70-1,20	0,80-1,30	0,70-1,10
P	0,057	0,093	Max. 0,02	Max. 0,020	Max. 0,03	Max. 0,03
S	0,005	0,014	Max. 0,02	Max. 0,025	Max. 0,03	Max. 0,025
Cr	0,119	0,132	-	-	-	-
Si	0,441	0,589	-	-	-	-
Fe	97,410	97,010	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa



Gambar 2 Struktur mikro rel R54 yang diuji pada tiga posisi yaitu pada bagian A , B, dan C

Pengujian struktur mikro yang ditunjukkan pada gambar 2 dilakukan pada tiga titik pengujian yaitu pada bagian kepala (A), bagian transisi kepala dan badan (B), dan bagian badan rel (C). Hasil pengujian struktur mikro secara umum menunjukkan bahwa jenis material rel kereta api merupakan jenis *fully pearlitic steel*. Arti dari *fully pearlitic steel* yaitu material tersebut memiliki fasa perlit secara keseluruhan. Hal ini terjadi pada material baja karbon tinggi, khususnya pada kandungan karbon (C) sekitar 0.8%. *Fully pearlitic steel* memiliki sifat mekanik yaitu kekuatan tinggi, ketahanan gesek yang baik, dan sangat kuat untuk menahan beban berat (beban tekan) dari lokomotif dan gerbong, tetapi material ini memiliki ketangguhan yang rendah.

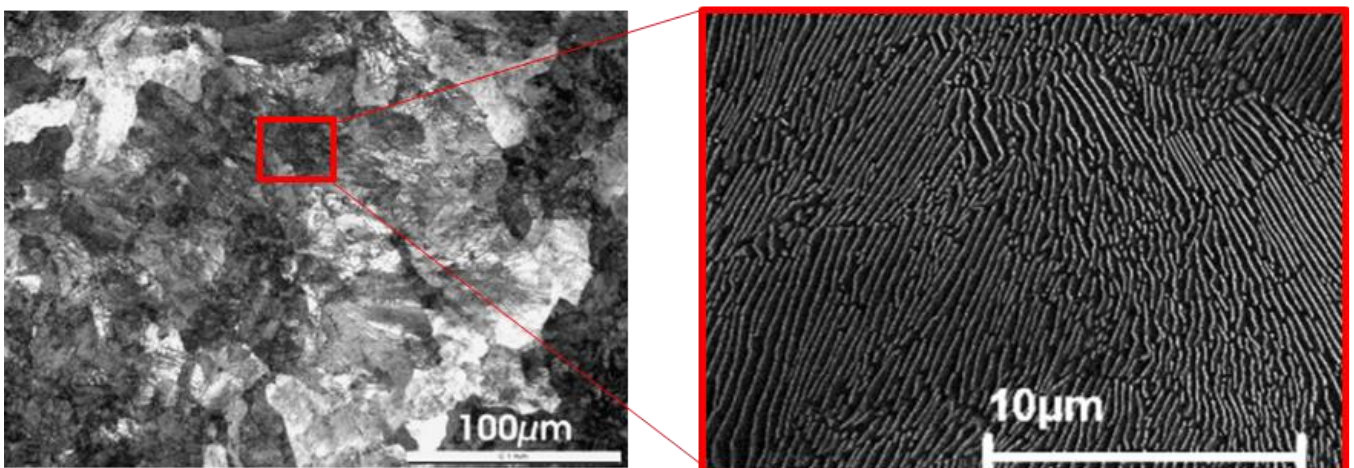
Fully pearlitic steel memiliki bentuk struktur mikro perlit yang tersusun dari lamel-lamel sementit dan ferit. *Pearlite* ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) merupakan fasa yang unik, karena memiliki struktur dengan lamel-lamel komposit yang terdiri dari 88% ferrite (α) yang bersifat lunak dan ulet dan 12 % *cementite* (Fe_3C) yang memiliki sifat keras dan getas. Pelat-pelat *cementite* yang keras (Fe_3C) didalam *ferrite* (α) yang lunak menyebabkan material *fully pearlitic steel* memiliki ketahanan aus yang tinggi.

Gambar 3a menunjukkan bentuk standar struktur mikro *fully pearlitic steel* dari beberapa referensi sebagai struktur mikro pembanding, dan gambar 3b

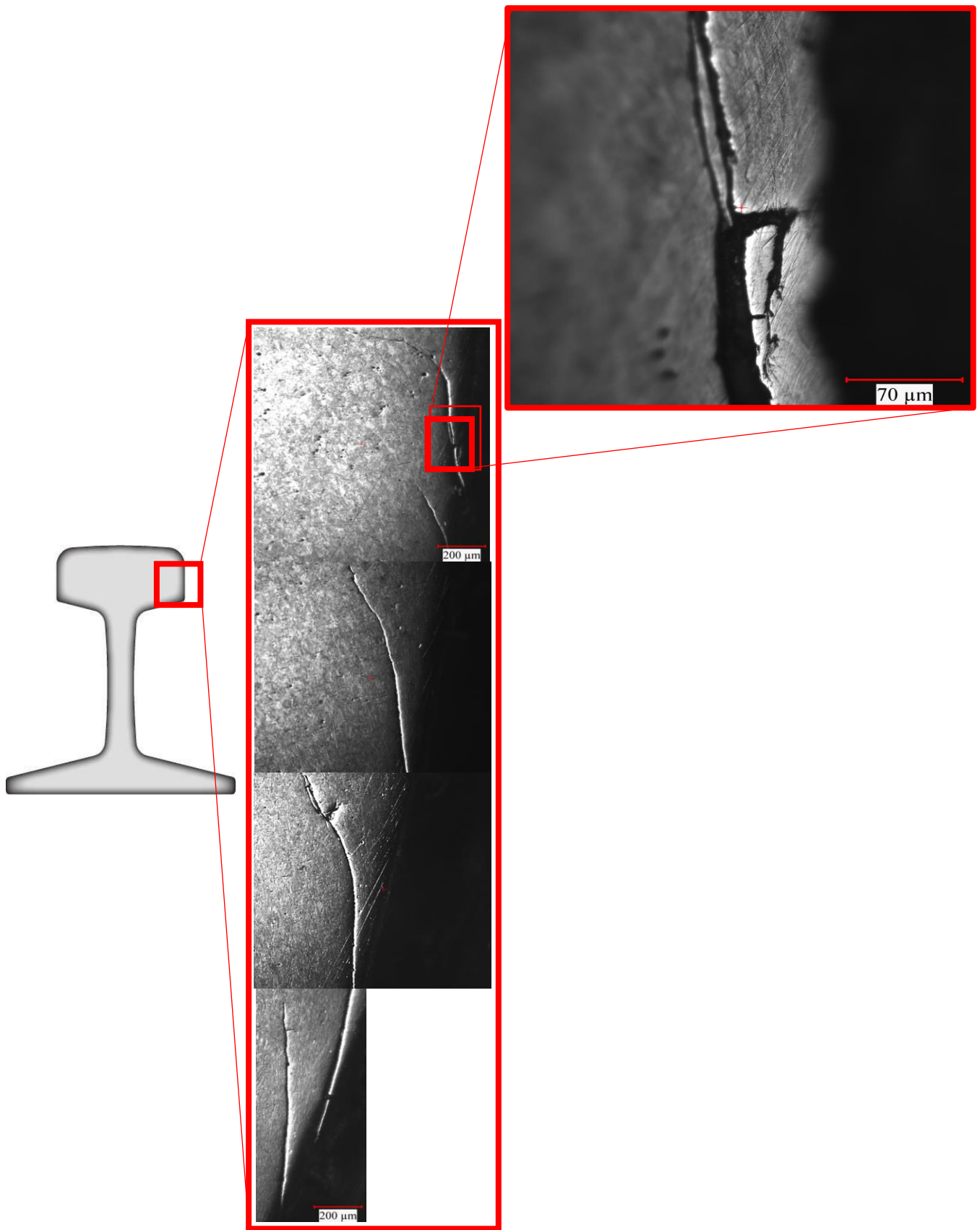
menunjukkan lamel lamel komposit *pearlite* yang terdiri dari *ferrite* dan *cementite* secara lebih detail.

Gambar 2 menunjukkan bahwa fasa perlit yang terdapat pada material rel R54 ada yang berwarna gelap, dan ada yang berwarna terang. Gelap dan terangnya fasa perlit pada material tersebut ditentukan oleh jarak antar lamel fasa sementit. Semakin dekat lamel lamel fasa sementit maka akan dihasilkan bentuk struktur mikro dengan warna yang lebih gelap, begitupun sebaliknya semakin jauh jarak lamel lamel fasa perlit maka akan dihasilkan warna yang lebih terang. Dua karakteristik fasa perlit tersebut masing masingnya disebut dengan perlit halus (*fine pearlite*) dan perlit kasar (*coarse pearlite*).

Gambar struktur mikro pada gambar 2 menunjukkan bahwa fasa *perlit kasar* (*coarse pearlite*) dapat dilihat jelas terdapat lebih banyak pada bagian B dan C dibandingkan dengan bagian A. Hal ini menunjukkan bahwa pada bagian A mengalami laju pendinginan yang lebih cepat dibandingkan dengan bagian B dan C. Beberapa literatur menyebutkan bahwa perlit halus (*fine pearlite*) memiliki sifat kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi karena lamel lamel perlit yang halus sehingga menghambat pergerakan dislokasi pada saat deformasi plastis (Pointner 2008)



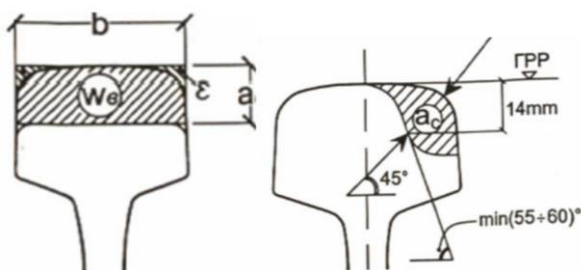
Gambar 3 Standar struktur mikro material *fully pearlitic steel* : a) Hasil dari foto mikroskop optic, dan b) hasil foto menggunakan SEM (Pointner 2008)



Gambar 4. Retak yang terbentuk pada permukaan rel

Gambar 4 menunjukkan retak (*crack*) pada permukaan rel R54. Retak pada permukaan rel merupakan permasalahan yang banyak didiskusikan karena berhubungan dengan umur dari rel dan cacat yang terbentuk pada permukaan rel. Retak pada permukaan rel terjadi karena beban siklik yang terdapat pada permukaan rel akibat adanya pembebanan dinamis dari roda (Ueda dan Matsuda 2020, ASM, 2005). Beban siklik yang ada di roda menyebabkan terjadinya deformasi plastis pada permukaan rel (Nejad, dkk. 2021).

Arah deformasi plastis pada permukaan rel bergantung terhadap arah pembebanan roda paling besar. Deformasi plastis menyebabkan terbentuknya retakan awal. Beban yang secara terus menerus diterima oleh rel akan menyebabkan perambatan retak terjadi dengan cepat. Perambatan retak terjadi secara mikroskopik. Perambatan retak yang terjadi secara mikroskopik mengakibatkan pengikisan pada permukaan rel. Pengikisan yang terjadi secara terus menerus akan menyebabkan cacat abrasif atau cacat aus pada permukaan rel. Hasil pengujian aus pada rel R54 menunjukkan bahwa ketahanan aus spesifik material rel -R54 adalah $1,606 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{kg}$. nilai tersebut menunjukkan keausan spesifik dari rel R54. Diharapkan nilai ini dapat menjadi referensi untuk penentuan nilai ketahanan aus material rel R54. Sejauh ini, belum ada literatur yang mencantumkan nilai ketahanan aus material rel R54 dalam bentuk nilai keausan spesifik. Sejauh ini, keausan rel hanya ditentukan berdasarkan perubahan kurva atau perubahan profil permukaan seperti yang diunjukkan pada gambar 5. Beberapa parameter pada gambar 5 yaitu b merupakan lebar dari rel bagian kepala, a adalah kedalam keausan pada arah vertikal, W_b adalah daerah rel bagian kepala yang mengalami keausan, ε adalah area bagian ujung dari kepala rel, a_c adalah keausan pada arah lateral yang dihitung sejauh 14 mm dari permukaan rel.



Gambar 5. Keausan vertikal dan lateral pada rel (Z. Dencheva, 2014)

Hal diatas menunjukkan bahwa perlu dilakukan upaya penilitan lebih lanjut untuk mengetahui nilai keausan spesifik rel kereta sehingga bisa menjadi standar referensi nilai ketahanan aus rel kereta api.

KESIMPULAN

Struktur mikro dan ketahanan aus material rel R54 yang telah digunakan di divre IV tanjung karang telah dianalisis. Kesimpulan dari hasil analisis yaitu bagian kepala rel dan badan rel memiliki komposisi kimia yang sama. Unsur paduan utamanya adalah C, Si, Mn. Unsur Cr ditemukan pada material R54 yang dianalisis. Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa fasa yang terbentuk adalah perlit dimana pada bagian kepala berbentuk perlit halus dan pada bagian badan dan kaki berbentuk perlit kasar. Retakan ditemukan pada permukaan rel. hasil pengujian aus menunjukkan bahwa nilai keausan spesifik material rel R54 adalah $1,606 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{kg}$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi yang telah mendukung kegiatan Pengabdian kepada Masyarakat dengan Nomor kontrak 114/E5/RA.00.PM/2022, dan juga terima kasih kepada PT KAI Divre IV Tanjung Karang yang telah memberikan material untuk pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, Y, A A Maulana, dan E Pujiyulianto. 2021. The Effect of Si Content on Microstructures and Mechanical Properties of Normalized Pressure Vessel Steel A517 Grade Q. *Advanced Materials Research* (1160) 15-23.
- ASM. 2005. *ASM International Volume 2 : Steel and Its Properties*. USA: ASM Insternational.
- ASM. 2005. High-Carbon Steel: Fully Pearlitic Microstructure and Applications. In *Steel: Processing, Structure, and Performance*, 281-295. Ohio: ASM International.
- Atroshenko, S A, V I Smirnov, dan S S Maier. 2022. Failure analysis of pearlitic rail steel with internal macrocrack after long-term operation. *Engineering Failure Analysis* 139 (106445).
- BS EN 14730-1:2017: *Railway applications — Track — Aluminothermic welding of*

- rails*. 2017. British Standards Institution
- Chandra, Satish, dan M M Agarwal. 2007. *Railway Engineering*. New Delhi: Oxford University Press.
- Dwiwandono, Robby, Leksono Firmansyah, Satrio Herbirowo, M Yunan Hasbi, and Fatayalkadri Citrawati. 2017. Analisa Strukturmikro dan Pengaruhnya terhadap Sifat Mekanik Batang Rel Tipe R54. *Metalurgi* (2) 67-76.
- Kemenhub. 2012. *Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api*. Nomor PM. 60 Tahun 2012, Jakarta: Kementerian Perhubungan, 1-42.
- Nejad, R M, Z Liu, W Ma, dan F Berto. 2021. Fatigue reliability assessment of a pearlitic Grade 900A rail steel subjected to multiple cracks. *Engineering Failure Analysis* 128 (105625) 1-15.
- Pointner, Peter. 2008. High strength rail steels—The importance of material properties in contact mechanics problems. *Wear* (265) 1373–1379.
- Pujiyulianto, Eko, Abdul Muhyi, Fajar Paundra, Fajar Perdana, Hadi Teguh Yudistira, and Muhammad Syaokani. 2022. Failure analysis of a wear ring impeller. *Engineering Failure Analysis* 138 (106415) 1-13.
- Pujiyulianto, Eko, Sri Bimo Pratomo, and Pawawoi. 2018. Pengaruh Carbon terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja Mangan Austenitik. *Jurnal Metal Indonesia* 40 (1) 17-25.
- Pujiyulianto, Eko, Y Amalia, T Wahyuningsih, Frideni YPG Field, Riria Z Mirahati, and Suyitno. 2020. The Effect of EDM Process on the Microstructure of CP-Titanium Grade 2 and AISI 316 L in Cardiovascular Stent Manufacturing. *Key Engineering Materials* (867) 1-7.
- JFE. 2020. *Rail*. Tokyo: JFE Steel Corporation.
- Schnalzger, G, J Maierhofer, W Daves, R Rippan, dan A Hohenwarter. 2022. Fatigue crack growth of deformed pearlitic rail steels under multiaxial loading. *Procedia Structural Integrity* (39) 313-326.
- Schnalzger, G, W Daves, R Pippan, J Maierhofer, dan A Hohenwarter. 2022. Crack path investigations in a pearlitic rail steel after pre-deformation under cyclic Mode-II loading. *Engineering Failure Analysis* 140 (106567).
- Sudiyanto, Anton, dan Eko Pujiyulianto. 2021. The Effect of Varying Quenching Media on Cooling Time and Microstructures of Leaf Spring Steel AISI 5160. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 1-10.
- Toribio, J, B González, J C Matos, dan F J Ayaso. 2014. Role of the microstructure on the mechanical properties of fully pearlitic eutectoid steels. *J. Toribio et alii, Frattura ed Integrità Strutturale* (30) 424-430.
- Torlakovic, M T. 2014. Guidelines for the Rail Grade Selection. *Metabk* 53 (4) 717-720.
- Ueda, M, dan K Matsuda. 2020. Effects of carbon content and hardness on rolling contact fatigue resistance in heavily loaded pearlitic rail steels. *Wear* 444-445.
- Yushandiana, F, H Setiana, dan E Pujiyulianto. 2020. Case Study: The Failure Analysis of Pipe ASTM A351 HK-40 in Reaction Plant Unit. *Journal of Failure Analysis and Prevention* (20) 663–670.
- Zhou, L, W Bai, Z Han, W Wang, Y Hu, H Ding, R Lewis, E Meli, Q Liu, dan J Guo. 2022. Comparison of the damage and microstructure evolution of eutectoid and hypereutectoid rail steels under a rolling-sliding contact. *Wear* (204233) 492-493.
- Z. Dencheva. 2014. Superstructure and maintenance of the railway., Bulgaria (Sofia).