

Analisis Kimia dan Mikrostruktur Rem Blok pada Roda Kereta Rel Listrik dengan Keausan Beralur

Triyono¹, Email: triyono@trisakti.ac.id

Soeharsono², Email: soeharsono@trisakti.ac.id

Faizal Riko Priwardana³, Email: faizal161012010001@std.trisakti.ac.id

^{1),2),3)} Universitas Trisakti

ABSTRAK

Keausan yang terjadi pada roda kereta Moda Raya Terpadu (MRT) Jakarta adalah keausan tidak normal tingkat kedalaman yang lebih tinggi hanya pada satu titik, sehingga menyebabkan alur baru. Kereta MRT Jakarta tetap beroperasi dengan kondisi roda yang mengalami keausan beralur, karena belum adanya perbaikan. Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penyebab dan dampak dari keausan beralur pada roda tersebut. Untuk itu guna mengungkap penyebab keausan dilakukan analisis morfologi permukaan, komposisi kimia, sifat fisik, sifat mekanik (kekerasan) dan struktur mikro terhadap 3 sampel rem blok yang mengalami keausan dan satu sample rem blok yang belum digunakan sebagai pembandingan. Dari penelitian ini terungkap bahwa bahan komposit dan besi tuang dalam konstruksi sepatu rem sesuai dengan spesifikasi pabrikan, namun, kuat tekan komposit material (29 MPa) lebih rendah dari persyaratan MRTJ (35 MPa). Keausan beralur pada roda kereta diduga disebabkan oleh morfologi rem blok yang terdapat besi cor dipermukaan yang tidak menutupi seluruh permukaan rem blok. Area permukaan rem blok yang tidak terdapat besi cor berada di lokasi yang sama dengan keausan beralur pada tapak roda kereta. Selama pengereman suhu tinggi, tapak roda dan permukaan besi cor akan melunak, menyebabkan peningkatan tingkat keausan kedua komponen. Selama pengoperasian, peningkatan kekuatan tekan sepatu rem dapat mempercepat pembentukan keausan beralur pada tapak. Setelah diketahui penyebabnya agar roda tidak mengalami keausan beralur perlu ada modifikasi rem blok baik dari segi penyusun kimia dan morfologi permukaan rem blok.

Kata Kunci: Keausan, Roda, Kereta Api

ABSTRACT

The wear that occurs on the wheels of the Mass Rapid Transit Jakarta (MRTJ) train is abnormal wear at a higher depth level only at one point, causing new grooves. The MRT Jakarta train continues to operate with wheels that are experiencing grooved wear, because there has been no repair. This study aims to determine the causes and effects of grooved wear on the wheels. For this reason, in order to reveal the cause of wear, an analysis of surface morphology, chemical composition, physical properties, mechanical properties (hardness) and microstructure was carried out on 3 samples of brake blocks that experienced wear and one sample of brake blocks that had not been used as a comparison. From this study it was revealed that the composite material and cast iron in the rem blok construction complied with the manufacturer's specifications, however, the compressive strength of the composite material (29 MPa) was lower than the MRTJ requirement (35 MPa). The failure of the grooves on the train wheels is thought to be caused by the morphology of the brake block which contains cast iron on the surface which does not cover the entire surface of the brake block. The surface area of the brake block that does not contain cast iron is in the same location as the grooved wear on the tread of the carriage. During high-temperature braking, the tread and the surface of the cast iron will soften, causing an increase in the wear rate of both components. During operation, increasing the compressive strength of the rem blocks can accelerate the formation of grooved wear on the tread. After knowing the cause so that the wheels do not experience grooved wear, it is necessary to modify the brake block both in terms of chemical composition and the morphology of the brake block surface.

Keywords: Wear, Wheel, Train

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Interaksi kontak antara dua permukaan benda padat dapat menghasilkan kegagalan mekanis berupa keausan. Pada sarana kereta api keausan tidak dapat terhindar dari kegagalan mekanis ini. Gesekan roda dengan rel dan rem blok adalah penyebab terjadinya keausan pada roda kereta api. Keausan yang terjadi pada roda kereta Moda Raya Terpadu (MRT) Jakarta adalah keausan tidak normal yaitu mengalami tingkat kedalaman yang lebih tinggi hanya pada satu titik, sehingga menyebabkan alur baru pada roda kereta MRT Jakarta dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Keausan Profil Roda Kereta MRT Jakarta

Roda kereta memiliki bentuk geometri khusus dan jika terdapat ketidaksesuaian antara geometri bentuk roda dengan rel maka akan berdampak negatif seperti keausan roda dan rel yang ekstrem, sehingga mengakibatkan ketidak stabilan pergerakan dimanis kereta api (Hesan Soleimani, 2017). Tingkatan kerusakan selanjutnya adalah kerusakan tapak roda dan rel, namun akan berkembang mengakibatkan gesekan, kebisingan, panas yang tidak diinginkan dan perubahan dimensi di berbagai komponen dan menyebabkan kegagalan yang lebih besar (Bosso & Zampieri, 2014)(Ma et al., 2021). *Rolling contact fatigue* antara roda dengan rel menjadi masalah serius bagi dunia perkeretaapian, karena akan meningkatkan biaya operasional dan keselamatan kereta api (Jiang et al., 2017)(Hu et al., 2020)(Liu et al., 2020).

Sungguhpun belum adanya tindakan perbaikan dari permasalahan diatas, akan tetapi kereta MRT Jakarta tetap beroperasi dengan kondisi roda yang mengalami keausan beralur. Tindakan yang dilakukan hanya dilakukan reprofil roda dengan proses pembubutan yang memiliki dampak berkurangnya umur pakai roda kereta (Muhamedsalih et al., 2019). Berdasarkan

penelitian sebelumnya, belum ada yang mengkaji dampak yang akan terjadi dari permasalahan ini di dunia perkeretaapian, terutama untuk kereta MRT Jakarta yang merupakan kereta semi otomatis pertama di Indonesia.

2. KAJIAN TEORI

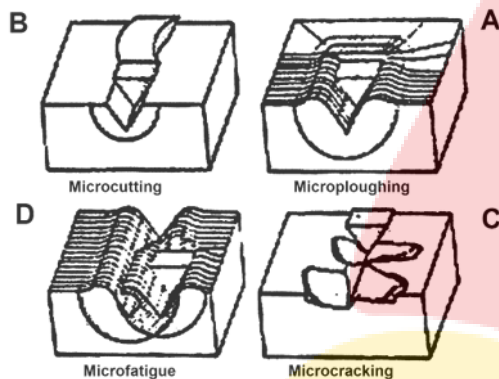
2.1 Tribologi

Tribologi adalah ilmu yang membahas tentang gesekan, keausan, dan pelumasan pada permukaan dalam gerak relatif benda Tribologi secara saintifik adalah ilmu tentang interaksi permukaan benda padat yang bergerak dan implikasi yang muncul dari interaksi tersebut (Chevalier et al., 2006). Permukaan benda yang bergerak tersebut biasanya memiliki tekstur yang sengaja maupun tidak sengaja dibuat setelah proses manufaktur. Karakteristik geometri dari tekstur permukaan dapat berupa gelombang (*waviness*), *lay* atau sebuah bentuk permukaan seperti *crack* yang akan mengelupas dan *roughness* atau kekasaran(Hesan Soleimani, 2017).

Dalam karakteristik geometrik permukaan yang sangat berpengaruh terhadap besarnya keausan salah satunya adalah *roughness*. *Roughness* adalah suatu karakteristik geometrik dari permukaan yang memiliki perbedaan ketinggian antara permukaan yang puncak dengan permukaan lembahnya. Untuk menghitung kekasaran dapat menggunakan alat ukur *scanning electron micrograph of tie dies* (Hesan Soleimani, 2017). Selain itu, keausan pada permukaan kontak disebabkan oleh reaksi dengan lingkungan. Lingkungan sekitar dapat berada dalam keadaan gas dan cair. Lapisan keausan diproduksi dari proses pemisahan yang berkelanjutan, dan hasil dari reaksi antar lapisan permukaan.

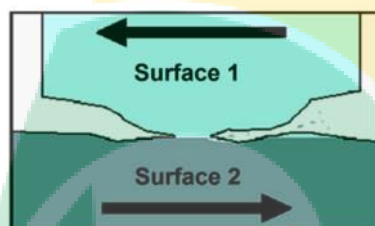
Hal ini membuktikan bahwa produk proses abrasi lapisan permukaan diawali dari reaksi kimia dan berlanjut dengan pemisahannya. Keausan tribokimia sangat dipengaruhi oleh lapisan permukaan dan sifat-sifatnya menentukan ketahanan terhadap pemisahannya. Sifat-sifat ini meliputi fleksibilitas, kekuatan dan daya rekat pada substrat. Berdasarkan sudut pandang tribologi, kerusakan pada permukaan padat yang melibatkan hilangnya material ketika dua permukaan berinteraksi melalui gerakan relative disebut keausan. Kerusakan akibat interaksi antara roda kereta dan rem blok yang paling penting tercantum dibawah ini (Nia, 2014):

- a. Keausan abrasive yang dapat dilihat pada Gambar 2 adalah keausan yang disebabkan oleh permukaan yang kasar dan keras saling bergesekan.



Gambar 2. Mekanisme Keausan Abrasive
(Hesan Soleimani, 2017)

- b. Keausan adhesive seperti yang ditunjukkan Gambar 3 merupakan keausan yang disebabkan oleh pemotongan sambungan yang terbentuk antara dua permukaan yang bersentuhan.



Gambar 3. Mekanisme Keausan Adhesive
(Hesan Soleimani, 2017)

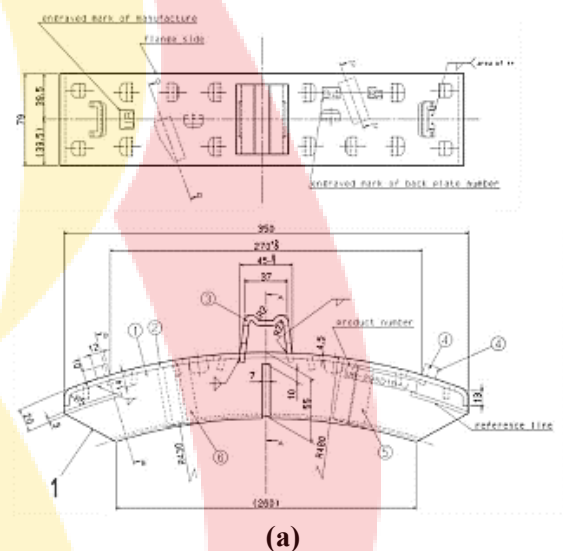
- c. Keausan kimiawi : keausan yang disebabkan oleh pembentukan oksida.
d. *Rolling Contact Fatigue* : disebabkan oleh variasi tegangan siklik yang menyebabkan kelelahan bahan. Umumnya menghasilkan pembentukan retakan bawah permukaan dan permukaan dalam.
e.

3. METODE PENELITIAN

Sampel uji didapatkan di kawasan Depo Lebak Bulus MRT Jakarta. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Metalurgi dan Material, Institut Teknologi Bandung bertujuan untuk mengetahui akar masalah penyebab terjadinya keausan beralur dan mempelajari mekanisme keausan dari material rem blok. Penyebab dan tindakan korektif akan dilakukan pendataan, penentuan mekanisme keausan akan ditentukan berdasarkan:

- Surface morphology using macro or stereo photography*
- Material composition analysis using Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and X-ray Diffraction (XRD)*
- Measurement of specific weight*
- Mechanical testing including Rockwell-R hardness and compressive strength*
- Microstructural analysis using Light Optical Microscope (LOM) and Scanning Electron Microscope (SEM)*

Dalam pengujian menggunakan 4 sampel rem blok yaitu satu rem blok baru dan 3 rem blok bekas yang telah digunakan dengan ketebalan yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.. Pada pengukuran rem blok dalam satu sampel terdapat perbedaan dalam satu rem blok yang sama, hal ini disebabkan dari gesekan antara rem blok dan roda.



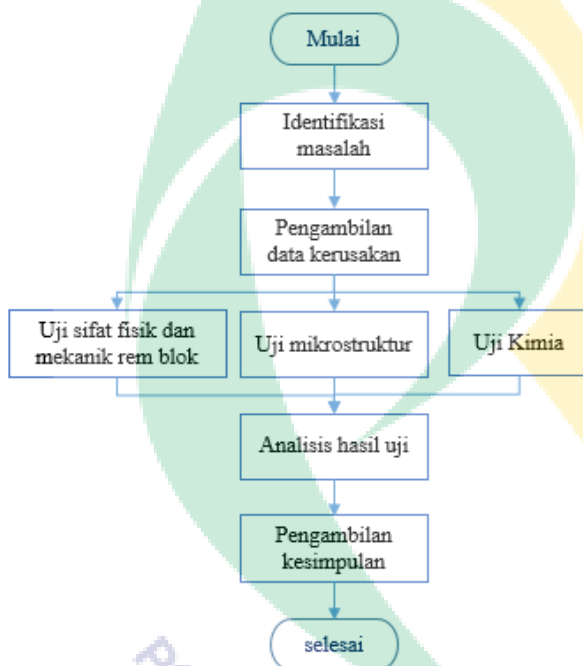
Gambar 4. (a) Gambar Teknis Rem Blok (b) Sampel Uji Rem blok

Ketebalan rem blok sampel hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Ketebalan Sampel Uji Rem Blok

No	Sampel	Ketebalan Max (mm)	Ketebalan Min (mm)
1	New Rem blok	54,89	51,65
2	Used Rem blok 1	34,49	32,56
3	Used Rem blok 2	23,35	21,07
4	Used Rem blok 3	21,45	19,46

Identifikasi masalah dilakukan di Depo Lebak Bulus MRT Jakarta dengan melakukan investigasi pengamatan langsung di lapangan mengenai kejadian dan gangguan yang telah terjadi selama operasi kereta MRT Jakarta yaitu terdapat keausan beralur di roda kereta selama 2 tahun beroperasi. Pengambilan data di lapangan meliputi tingkat kedalaman keausan roda kereta, spesifikasi kereta, profil roda dan jaringan jalan rel MRT Jakarta. Diagram alir keseluruhan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Alir

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Sifat Mekanis dan Fisik

Kereta rel listrik milik MRTJ mengalami keausan yang tidak normal pada rem blok dan terdeteksi keausan beralur pada Juni 2019 dengan kedalaman

dan keausan yang bervariasi. Investigasi sudah pernah dilakukan oleh manufaktur kereta yaitu Sumitomo dengan dugaan dikarenakan frekuensi penerapan rem pneumatik selama kereta dalam mode otomatis adalah penyebab dari keausan beralur ini. Guna memahami kasus ini maka dilakukan penelitian untuk mengetahui mekanisme keausan beralur tersebut

Keausan ini terjadi di semua rangkaian kereta. Pada Tabel 2 terlihat hasil pengukuran dari sifat mekanik dan fisik dari rem blok. Hasil pengukuran meliputi berat jenis, kekerasan komposit dan kekerasan besi cor yang berada dalam rem blok.

Tabel 2. Hasil Uji Sifat Fisik dan Mekanik

Sifat	Unit	Sample Baru	Sample Lama	Investigasi Sumitomo
Berat Jenis	g/mm^3	2	2	2
Charpy Impact Strength	kJ/m^2	NA	NA	3,3
Compressive Strength	N/mm^2	27,1	29,8	29,8
Kekerasan Komposit	HRR	74,8	73,2	74,9-75,8
Kekerasan Besi cor	HB	219	229	194-223

Nilai sesungguhnya untuk berat jenis rem blok sampel baru adalah $1,97 \text{ g/mm}^3$ dan rem blok bekas sebesar $1,99 \text{ g/mm}^3$, namun dilakukan pembulatan nilai. Nilai pada kolom investigasi Sumitomo merupakan nilai yang tertera pada laporan hasil penyelidikan sebelumnya yang dikeluarkan oleh manufaktur (Corporation, 2021). Sedangkan standar sifat fisik dan mekanis yang digunakan oleh rem blok dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kriteria Rem Blok (Corporation, 2021)

Sifat	Unit	PT. MRTJ	Manufaktur	JIS E 4309
Berat Jenis	g/mm^3	-	$2,0 \pm 0,2$	-
Charpy Impact Strength	kJ/m^2	3,2	$3,0 \pm 1,5$	1 min
Compressive Strength	N/mm^2	35	25 min	25 min
Kekerasan Komposit	HRR	-	75 ± 10	74,9-75,8
Kekerasan Besi cor	HB	-	190-238	-

Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran sifat fisik dan mekanik dari rem blok. Berat jenis, kekerasan komposit, dan kekerasan besi tuang berada dalam

kisaran kriteria penerimaan dan sebanding dengan hasil investigasi sebelumnya oleh Sumitomo (Corporation, 2021). Kekuatan bahan (*compressive strength*) sampel baru dan bekas berada di bawah spesifikasi MRTJ (35 N/mm^2). Sedangkan kekuatan bahan yang lebih rendah dapat mempengaruhi tingkat keausan sepatu rem. Selanjutnya, diamati bahwa ada sedikit peningkatan nilai masa jenis dan tekan kekuatan sepatu rem bekas dibandingkan dengan yang baru. Berat jenis rem blok baru sebesar $1,97 \text{ g/mm}^3$ dan rem blok yang telah digunakan sebesar $1,99 \text{ g/mm}^3$

4.2 Mikrostruktur dan Komposisi Material

Sinar-X digunakan untuk mengidentifikasi unsur atau karakteristik kimia dari suatu material, hal ini dapat terjadi karena sesuai dengan prinsip bahwa setiap elemen memiliki struktur atom yang unik dan memiliki ciri khas yang berbeda disetiap unsur atom. Teknik analisis yang digunakan adalah *Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)*. Hasil komposisi material dari uji sample rem blok dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Komposisi Material Uji

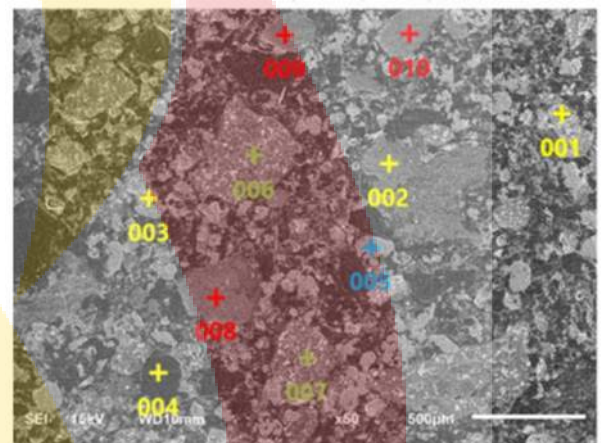
Kategori Material	%	Raw Material
Serbuk Metal	39	Iron Powder
		Alumunium Powder
Graphite Powder	4	Artifical Graphite
		Carbon Black
		Calcium Carbonate
Inorganic Materials	22	Amorphous Slica
		Sepiolite
		NBR Rubber Powder
Organic Materials	17	Cashew Dust
		Aramid Fiber
		Phenolic Resin
Binding Materials	18	Cast Iron Block
		Wheel

Setelah diketahui komposisi dalam unsur yang terkandung pada rem blok, selanjutnya dapat diketahui kekerasan setiap unsur yang terkandung dalam rem blok, kekerasan unsur penyusun dapat dilihat pada Tabel 6. Data tabel 6 menunjukkan bahwa terdapat unsur material *Amorphous Slica* yang berjenis *inorganic material* dengan komposisi 22% bersama *Calcium Carbonate*. Unsur *Amorphous Slica* memiliki kekerasan (HB) 750-1200, nilai ini lebih besar dari kekerasan roda yang sebesar 284-287. Jika melihat morfologi permukaan rem blok terdapat *cast iron block* dalam konstruksi yang hampir menutup keseluruhan permukaan rem blok, *cast iron block* memiliki kekerasan (HB) sebesar 194-223 yang

lebih rendah dari kekerasan roda. Hasil pengujian komposisi kimia *Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)* dapat dilihat pada gambar 6.

Tabel 6. Kekerasan Unsur Material

Raw Material	Kekerasan (HB)	Kekerasan (Mohs)
Iron Powder	70-200	4
Alumunium Powder	25-45	3
Artifical Graphite	5	1
Carbon Black	5	1
Calcium Carbonate	80-150	3
Amorphous Slica	750-1200	7
Sepiolite	5-80	2
NBR Rubber Powder	5	1
Cashew Dust	5	1
Aramid Fiber	5	1
Phenolic Resin	5	1
Cast Iron Block	194-223	4
Wheel	284-287	4



Gambar 6. Analisa Titik Kimia

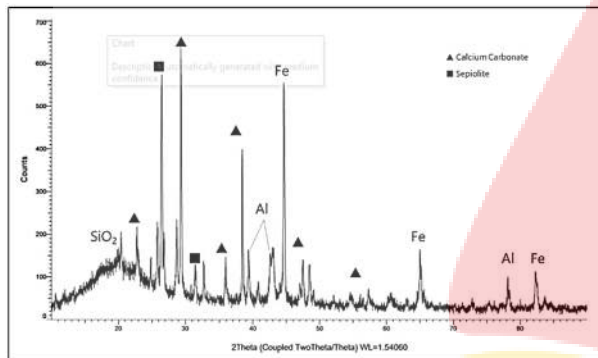
Dari Gambar 6 dapat diketahui komposisi kimia dari rem blok, keterangan titik-titik unsur kimia dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Keterangan Komposisi Kimia

Titik	Unsur Kimia
001, 002, 003, 004	Organic Material aterial (Graphite, cashew dust, NBR rubber, Aramid Fiber), Alumunium Powder
005	Iron Powder
006, 007	Calcium Carbonate
008, 009, 010	Amorphous Slica

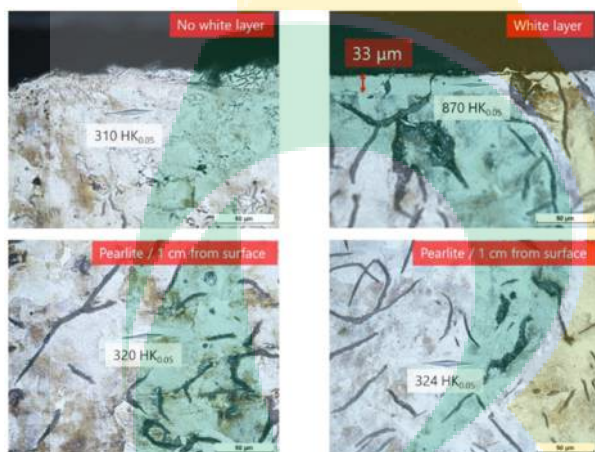
Karakterisasi material dapat diketahui dengan metode *X-ray Diffraction (XRD)*. Metode ini menggunakan interaksi antara sinar-X dengan

atom-atom yang menyusun dalam suatu sistem Kristal. Hasil pengujian *X-ray Diffraction (XRD)* rem blok sampel dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Spektrum XRD pada Material Komposit

Dari hasil analisis gambar 7 terbentuk unsur *calcium carbonate*, *sepiolite*, *aluminium*, *iron*, dan *amorphous silica*. Puncak tertinggi *calcium carbonate* didapat pada sudut 39° dengan intensitas 660. Unsur-unsur yang terbentuk sama dengan spesifikasi teknis yang tersedia.

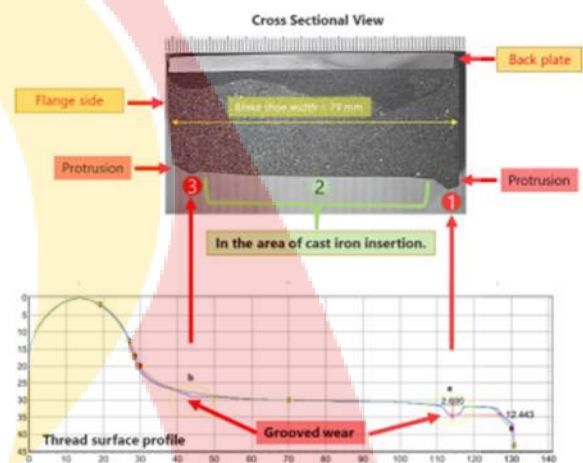


Gambar 8. Mikrostruktur Besi Cor Rem Blok

Gambar 8 menunjukkan bahwa material besi cor yang disisipkan didalam rem blok dengan struktur mikro grafit dan perlit. Ditemukan fase lapisan putih (dengan ketebal $33\mu\text{m}$) terlihat pada rem blok yang sudah digunakan dipermukaanya namun tidak ditemukan pada rem blok baru. Kekerasan lapisan ini adalah $870\text{ HK}_{0.05}$, dan nilai ini sangat tinggi dibandingkan dengan kekerasan matriks perlit yaitu $324\text{ HK}_{0.05}$. Ditemukan fase keras mengindikasikan bahwa besi cor tambahan rem blok mengalami temperature tinggi saat gesekan permukaan selama pengereman. Kondisi ini menyebabkan perlit berubah menjadi fase keras (martensit dan/atau karbida).

4.3 Mekanisme Keausan Beralur

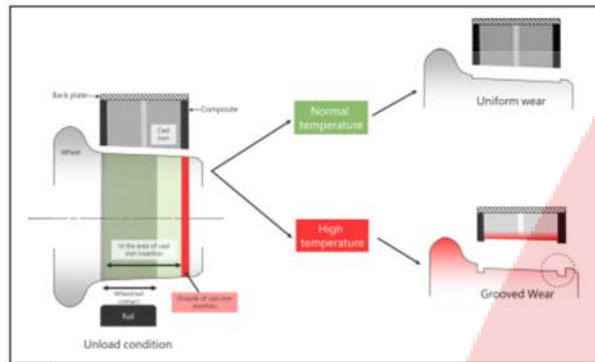
Besi cor yang terdapat pada rem blok menutupi seluruh permukaan rem blok, tapi 5-10 mm dari setiap tepi rem blok tidak tertutupi oleh besi cor ini (*blank spot*). Area *blank spot* yang tidak terdapat besi cor ditemukan tonjolan ditepi rem bloknya. Tonjolan ini memiliki tinggi yang berbeda dengan permukaan rem blok yang terdapat besi cor, tonjolan ini ditemukan disepanjang tepi permukaan rem blok. Tonjolan ini memiliki posisi yang sama dengan ditemukan keausan beralur di roda kereta pada permukaan tapak roda di titik a dan b dapat dilihat pada Gambar 9. Permukaan datar di rem blok berada di tingkat yang sama dengan permukaan besi cor arena ketahanan aus yang lebih tinggi.



Gambar 9. Posisi Keausan Beralur

Di bawah suhu normal, keausan seragam mungkin terjadi dengan profil keausan rata baik pada permukaan lurus tapak roda maupun sepatu rem. Selama pengereman suhu tinggi, tapak roda dan permukaan besi cor akan melunak, menyebabkan meningkatkan tingkat keausan kedua komponen. Abrasi sepatu rem di area luar penyisipan besi cor akan lebih rendah karena pelunakan tapak roda. Keadaan ini secara bersamaan menghasilkan pembentukan tonjolan pada sepatu rem dan keausan beralur pada tapak.

Gambar 9 mengilustrasikan area kontak rel-roda dan keausan tapak roda dibawah dua kondisi suhu pengereman, yaitu suhu normal dan suhu tinggi. Kondisi ini mungkin menunjukkan perilaku pemakaian yang berbeda.



Gambar 9. Ilustrasi Keausan Tapak Roda yang Dipengaruhi oleh Peningkatan Temperatur

5. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah

- Bahan komposit dan besi tuang dalam konstruksi sepatu rem sesuai dengan spesifikasi pabrikan. Namun, kuat tekan komposit material (29 MPa) lebih rendah dari persyaratan MRTJ (35 MPa).
- Area rem blok di luar penyisipan besi cor berada di lokasi yang tepat/sama dengan keausan beralur pada tapak roda kereta.
- Selama pengereman suhu tinggi, tapak roda dan permukaan besi cor akan melunak, menyebabkan peningkatan tingkat keausan kedua komponen.
- Selama pengoperasian, peningkatan kekuatan tekan sepatu rem dapat mempercepat pembentukan keausan beralur pada tapak.

REFRENSI

- Bosso, N., & Zampieri, N. (2014). Experimental and numerical simulation of wheel-rail adhesion and wear using a scaled roller rig and a real-time contact code. *Shock and Vibration*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/385018>
- Chevalier, L., Cloupet, S., & Quillien, M. (2006). Friction and wear during twin-disc experiments under ambient and cryogenic conditions. *Tribology International*, 39(11), 1376–1387. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.12.003>
- Corporation, S. (2021). *Submission of CP108 Rolling Stock Brake Shoe and Wheels Groove Wear Issues. SC-JMCMC-T(1)*, 1–7.
- Hesan Soleimani, M. M. (2017). Tribological Aspects of Wheel–Rail Contact: A Review of Wear Mechanisms and Effective Factors on Rolling Contact Fatigue. *Urban Rail Transit*, 3(4), 227. <https://doi.org/10.1007/s40864->

017-0072-2

- Hu, Y., Zhou, L., Ding, H. H., Tan, G. X., Lewis, R., Liu, Q. Y., Guo, J., & Wang, W. J. (2020). Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions. *Tribology International*, 143, 106091. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106091>
- Jiang, X., Li, X., Li, X., & Cao, S. (2017). Rail fatigue crack propagation in high-speed wheel/rail rolling contact. *Journal of Modern Transportation*, 25(3), 178–184. <https://doi.org/10.1007/s40534-017-0138-6>
- Liu, C. peng, Liu, P. tao, Pan, J. zhi, Chen, C. huan, & Ren, R. ming. (2020). Effect of pre-wear on the rolling contact fatigue property of D2 wheel steel. *Wear*, 442–443, 203154. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203154>
- Ma, C., Gao, L., Cui, R., & Xin, T. (2021). The initiation mechanism and distribution rule of wheel high-order polygonal wear on high-speed railway. *Engineering Failure Analysis*, 119(July 2019), 104937. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104937>
- Muhamedsalih, Y., Stow, J., & Bevan, A. (2019). Use of railway wheel wear and damage prediction tools to improve maintenance efficiency through the use of economic tyre turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 233(1), 103–117. <https://doi.org/10.1177/0954409718781127>
- Nia, S. H. (2014). *An investigation of the iron-ore wheel damages using vehicle dynamics simulation. Licentiate Thesis.*