Teknika 20 (2): 457-468

JURNAL TEKNIKA
ISSN: 0854-3143
e-ISSN: 2622-3481
Journal homepage: http://jurnal.polsri.ac.id/index.php/teknika
Journal Email: teknika@polsri.ac.id

Kajian Eksperimental Keausan *Knuckle Coupler* Pada Sambungan Lokomotif Kereta Api

Zenika Rizki Putra [1], Taufikurahman*[2], Yuli Asmara Triputra[3], Toni Okviyanto[4]

[1,2,3,4.] Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia
*Email Penulis Korespondensi: taufikurrahman@polsri.ac.id

Abstrak

Keandalan knuckle coupler sebagai komponen kritis pada sistem perkeretaapian sangat dipengaruhi oleh ketahanan aus, ketangguhan impak, dan karakteristik mikrostrukturnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja material knuckle coupler berbasis baja AAR M-201 Grade E melalui pendekatan eksperimental yang terintegrasi. Metode yang digunakan meliputi uji impak Charpy (ASTM E23), uji keausan pin-on-disk (ASTM G99), serta pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik (ASTM E3). Hasil pengujian menunjukkan nilai energi impak sebesar 93,63 J dan harga impak 0,786 J/mm², yang jauh melebihi standar minimum industri (20–27 J), meskipun mekanisme patah yang diamati bersifat getas. Uji keausan menghasilkan nilai keausan spesifik sebesar 0,000088207 mm³/kg·m, yang menunjukkan ketahanan aus sangat baik dengan mekanisme dominan berupa abrasi. Analisis mikrostruktur mengidentifikasi keberadaan fasa ferit dan pearlit dengan distribusi yang tidak sepenuhnya homogen serta adanya presipit karbida pada batas butir. Kondisi ini memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekerasan dan ketahanan aus, namun juga berpotensi meningkatkan konsentrasi tegangan yang memicu patah getas. Secara keseluruhan, material masih memenuhi standar industri dan layak digunakan, namun diperlukan optimasi perlakuan panas untuk meningkatkan homogenitas mikrostruktur dan keandalan jangka panjang.

Kata kunci*—Knuckle coupler, AAR M-201 Grade E, keausan, impak, mikrostruktur*

Abstract

The reliability of a knuckle coupler as a critical component in railway systems is strongly influenced by its wear resistance, impact toughness, and microstructural characteristics. This study aims to evaluate the performance of knuckle coupler material based on AAR M-201 Grade E steel through an integrated experimental approach. The methods employed include Charpy impact testing (ASTM E23), pin-on-disk wear testing (ASTM G99), and microstructural observation using optical microscopy (ASTM E3). The results show that the material exhibits an impact energy of 93.63 J and an impact value of 0.786 J/mm², which are significantly higher than the minimum industry standard (20–27 J), although the observed fracture mechanism is predominantly brittle. The wear test yields a specific wear rate of 0.000088207 mm³/kg·m, indicating excellent wear resistance with abrasion as the dominant mechanism. Microstructural analysis reveals the presence of ferrite and pearlite phases with a non-uniform distribution and carbide precipitation along grain boundaries. This condition contributes to improved hardness

Received: November 21, 2025; Online Available: May 1, 2026;

and wear resistance but may also increase stress concentration, leading to brittle fracture behavior. Overall, the material meets industrial standards and is suitable for railway applications; however, optimization of heat treatment is required to enhance microstructural homogeneity and long-term reliability.

Keywords—*Knuckle coupler, AAR M-201 Grade E, wear, impact, microstructure*

1. PENDAHULUAN

Keandalan sistem perkeretaapian modern sangat ditentukan oleh integritas komponen mekanis yang bekerja dalam kondisi pembebanan dinamis tinggi dan siklus operasi berulang, di mana kegagalan satu komponen kritis dapat berdampak langsung terhadap keselamatan dan kontinuitas operasional [1–3]. Salah satu komponen yang memiliki peran vital dalam sistem tersebut adalah knuckle coupler, yang berfungsi sebagai penghubung antar gerbong sekaligus sebagai media transmisi gaya tarik dan tekan selama operasi berlangsung [4, 5]. Komponen ini bekerja secara kontinu dalam kondisi pembebanan kompleks sehingga sangat rentan terhadap degradasi material. Kegagalan pada *knuckle coupler* tidak hanya menyebabkan kerusakan mekanis, tetapi juga dapat menimbulkan risiko keselamatan yang signifikan, seperti terlepasnya rangkaian kereta yang berpotensi menyebabkan kecelakaan. Oleh karena itu, kajian terhadap perilaku material dan mekanisme kerusakan pada *knuckle coupler* menjadi aspek fundamental dalam mendukung keandalan dan keselamatan sistem perkeretaapian [6, 7].

Dalam kondisi operasional aktual, *knuckle coupler* mengalami kombinasi pembebanan yang kompleks berupa beban impak akibat tumbukan saat proses *coupling*, gesekan kontinu pada area kontak, serta fluktuasi tegangan akibat dinamika gerak kereta [8]. Kondisi ini menyebabkan terjadinya fenomena degradasi material seperti keausan (*wear*), deformasi plastis, serta inisiasi dan propagasi retak mikro yang berpotensi berkembang menjadi kegagalan *structural* [9–11]. Secara tribologis, keausan merupakan salah satu mekanisme dominan yang menyebabkan penurunan performa komponen mekanis, terutama pada sistem dengan tekanan kontak tinggi dan pelumasan terbatas [12]. Selain itu, faktor lingkungan seperti kontaminasi partikel abrasif dan kondisi pelumasan yang tidak optimal turut mempercepat laju keausan material, sehingga memperpendek umur pakai komponen [13]. Dengan demikian, pemahaman terhadap mekanisme keausan dan faktor-faktor yang mempengaruhinya menjadi kunci dalam mengoptimalkan performa *knuckle coupler* [14].

Material yang umum digunakan dalam pembuatan *knuckle coupler* adalah baja cor standar AAR M-201 Grade E yang dirancang untuk memiliki kombinasi sifat mekanik berupa kekuatan tinggi, ketangguhan yang baik, serta ketahanan terhadap beban impak [15]. Baja ini memiliki kandungan karbon sekitar 0,3% dan umumnya diproses melalui perlakuan panas seperti *quenching* dan *tempering* untuk menghasilkan struktur mikro yang optimal [16, 17]. Struktur mikro yang terbentuk biasanya berupa kombinasi ferit dan perlit, yang memberikan keseimbangan antara kekerasan dan keuletan material [18, 19]. Namun demikian, ketidakhomogenan distribusi fasa, khususnya presipitasi karbida pada batas butir, dapat menurunkan ketangguhan material dan meningkatkan kerentanan terhadap retak antar butir (*intergranular fracture*), terutama pada kondisi pembebanan dinamis dan siklik [20, 21]. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik mikrostruktur memiliki peran penting dalam menentukan performa material terhadap beban mekanis dan keausan [8].

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa sifat mekanik baja AAR M-201 Grade E sangat dipengaruhi oleh parameter perlakuan panas seperti suhu austenisasi, waktu penahanan, dan laju pendinginan [22]. Variasi parameter tersebut dapat mengubah distribusi mikrostruktur dan nilai kekerasan material secara signifikan. Selain itu, studi mengenai mekanisme patah pada *knuckle coupler* menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan pada area tertentu dapat memicu inisiasi retak yang berkembang secara cepat di bawah beban dinamis [23]. Di sisi lain, kajian

tribologi klasik menyatakan bahwa mekanisme keausan pada logam melibatkan interaksi kompleks antara deformasi plastis, adhesi, dan abrasi. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih bersifat parsial dan belum mengintegrasikan analisis keausan dengan karakterisasi mikrostruktur serta sifat impak secara simultan dalam satu kajian yang komprehensif [24].

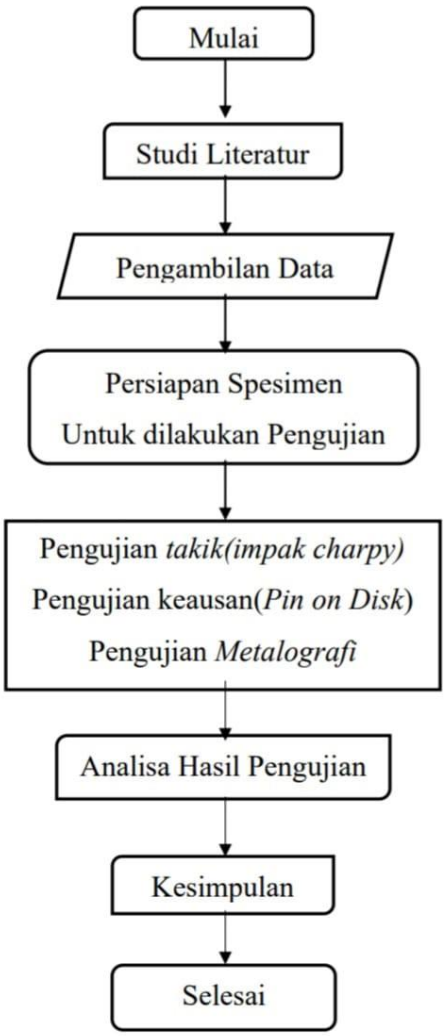
Penelitian pada sistem lain, seperti *journal bearing*, menunjukkan bahwa laju keausan sangat dipengaruhi oleh beban kontak dan panjang lintasan gesek, di mana peningkatan kedua parameter tersebut menyebabkan peningkatan volume material yang hilang secara signifikan [25]. Meskipun temuan ini relevan, perbedaan kondisi kerja dan geometri kontak antara sistem tersebut dan knuckle coupler menuntut adanya penelitian khusus yang lebih representatif terhadap kondisi operasional perkeretaapian [26, 27]. Selain itu, analisis dinamik pada sistem *coupler* menunjukkan bahwa distribusi gaya selama proses *coupling* dan *decoupling* dapat menghasilkan fluktuasi tegangan yang tinggi pada area kontak, yang berpotensi mempercepat terjadinya keausan dan inisiasi retak mikro [28]. Hal ini menegaskan bahwa degradasi material pada *knuckle coupler* merupakan hasil interaksi kompleks antara sifat material, kondisi pembebanan, dan lingkungan operasi [29].

Beberapa studi hanya berfokus pada satu aspek pengujian, seperti uji impak atau analisis mikrostruktur, tanpa mengintegrasikan dengan pengujian keausan secara komprehensif. Selain itu, data eksperimental yang menghubungkan secara langsung antara karakteristik mikrostruktur, sifat impak, dan ketahanan keausan masih terbatas. Di sisi lain, analisis kuantitatif yang membandingkan hasil pengujian dengan standar industri maupun literatur internasional juga belum dilakukan secara mendalam. Oleh karena itu, diperlukan suatu kajian eksperimental yang mampu mengintegrasikan ketiga aspek tersebut dalam satu kerangka analisis yang sistematis dan berbasis data.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja material *knuckle coupler* berbasis baja AAR M-201 Grade E terhadap ketahanan keausan dan ketangguhan impak dalam kondisi pembebanan dinamis melalui pendekatan eksperimental yang terintegrasi. Metode yang digunakan meliputi uji impak *Charpy*, uji keausan metode *pin-on-disk*, serta analisis mikrostruktur menggunakan mikroskop optik untuk memperoleh pemahaman komprehensif mengenai hubungan antara sifat mekanik dan struktur mikro material. Secara khusus, penelitian ini difokuskan pada penentuan nilai laju keausan spesifik, pengukuran energi serap impak, serta identifikasi karakteristik mikrostruktur yang mempengaruhi kedua sifat tersebut. Selain itu, dilakukan analisis kuantitatif untuk mengkorelasikan hasil uji keausan, impak, dan mikrostruktur, serta membandingkannya dengan standar industri dan hasil penelitian terdahulu guna menilai tingkat kelayakan material dalam aplikasi operasional perkeretaapian. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah yang lebih terarah dalam memahami mekanisme degradasi material, serta menjadi dasar dalam optimasi perlakuan panas, peningkatan umur pakai komponen, dan pengembangan strategi pemeliharaan berbasis kondisi guna meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem perkeretaapian.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif untuk mengevaluasi karakteristik keausan, ketangguhan impak, dan struktur mikro material knuckle coupler berbasis baja AAR M-201 Grade E. Pendekatan ini dipilih karena mampu menghasilkan data numerik yang terukur dan memungkinkan analisis hubungan antara parameter pengujian dengan performa material secara objektif. Tahapan penelitian meliputi persiapan spesimen, pelaksanaan pengujian, pengumpulan data, analisis data, serta penarikan kesimpulan. Alur penelitian divisualisasikan dalam bentuk diagram alir untuk mempermudah pemahaman proses secara sistematis yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

1. Studi Literatur

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk mengidentifikasi permasalahan keausan pada *knuckle coupler* kereta api, memahami karakteristik material AAR M-201 Grade E, serta menentukan metode pengujian yang relevan berdasarkan standar ASTM dan penelitian terdahulu. Tahap ini menjadi dasar dalam penyusunan tujuan penelitian, penentuan variabel uji, serta pemilihan metode eksperimen yang digunakan.

2. Pengambilan Data Awal

Tahap berikutnya adalah pengambilan data, yang mencakup pengumpulan informasi awal mengenai kondisi material, data spesimen, serta kebutuhan pengujian yang akan dilakukan. Data yang diperoleh pada tahap ini digunakan untuk mendukung penyiapan spesimen dan memastikan bahwa pengujian dilakukan sesuai dengan kebutuhan penelitian.

3. Persiapan Spesimen

Spesimen diambil dari komponen *knuckle coupler* yang telah digunakan dalam kondisi operasional aktual. Material kemudian dipotong dan dibentuk sesuai standar masing-masing pengujian. Jumlah spesimen yang digunakan pada setiap pengujian ditetapkan sebanyak tiga (n = 3) untuk setiap kondisi uji guna memastikan reprodusibilitas dan mengurangi deviasi hasil.

Permukaan spesimen untuk uji keausan dipoles hingga mencapai kekasaran permukaan yang seragam untuk meminimalkan pengaruh variabel luar.

4. Uji Impak Charpy

Pengujian impak dilakukan mengacu pada standar ASTM E23 untuk menentukan energi serap material terhadap beban kejut. Spesimen dibuat dengan dimensi standar dan takik berbentuk V. Pengujian dilakukan pada suhu ruang dengan menggunakan mesin uji impak tipe bandul.
Parameter pengujian meliputi:

a) Massa bandul: 16,7 kg
b) Panjang lengan: 0,83 m
c) Sudut awal: 156°
d) Sudut akhir: diukur setelah tumbukan
e) Jumlah spesimen: 3 buah

Pemilihan parameter ini didasarkan pada standar ASTM E23 serta kondisi pengujian umum untuk material baja struktural. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali untuk memperoleh nilai rata-rata energi impak dan mengurangi kesalahan eksperimental. Nilai energi serap dihitung berdasarkan selisih energi potensial sebelum dan sesudah tumbukan.

5. Uji Keausan (Pin-on-Disk)

Pengujian keausan dilakukan menggunakan metode *pin-on-disk* sesuai standar ASTM G99 untuk menentukan laju keausan spesifik material. Spesimen berbentuk pin ditekan terhadap permukaan disk yang berputar dengan kondisi pengujian terkontrol.
Parameter pengujian yang digunakan adalah:

a) Beban normal: 6,36 kg
b) Kecepatan gesek: 300 rpm
c) Jari-jari lintasan gesek: 13 mm
d) Waktu uji: 10 menit
e) Panjang lintasan gesek: 30 m
f) Jumlah spesimen: 3 buah

Pemilihan variasi beban dan waktu uji didasarkan pada simulasi kondisi operasional knuckle coupler yang mengalami kontak gesek berulang dengan tekanan relatif tinggi. Kecepatan gesek dipilih untuk merepresentasikan kondisi dinamis sistem perkeretaapian tanpa menyebabkan overheating pada spesimen. Pengujian dilakukan pada kondisi kering (*dry sliding*) untuk merepresentasikan kondisi lapangan dengan pelumasan minimal.

Pengukuran keausan dilakukan dengan mengamati lebar jejak keausan menggunakan mikroskop optik pada lima titik berbeda, kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Nilai keausan spesifik dihitung menggunakan persamaan standar berdasarkan volume material yang hilang, beban, dan jarak gesek.

6. Uji Metalografi

Pengamatan mikrostruktur dilakukan mengacu pada standar ASTM E3 untuk mengidentifikasi struktur fasa material. Spesimen dipersiapkan melalui tahapan pemotongan, *mounting*, pengamplasan bertahap, pemolesan, dan etsa kimia menggunakan larutan etsa yang sesuai.

Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran hingga 1000x. Jumlah spesimen yang diamati sebanyak 3 sampel untuk memastikan konsistensi hasil. Analisis difokuskan pada identifikasi fasa ferit, perlit, serta distribusi karbida yang berpotensi mempengaruhi sifat mekanik dan ketahanan keausan material.

7. Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif dengan menghitung nilai rata-rata dan membandingkannya dengan standar industri serta hasil penelitian terdahulu. Hubungan antara hasil uji keausan, impak, dan mikrostruktur dianalisis untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai perilaku material. Pendekatan ini digunakan untuk meningkatkan validitas hasil penelitian serta memastikan bahwa kesimpulan yang dihasilkan didasarkan pada data yang representatif.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Uji Impak Charpy

Pengujian impak dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan material *knuckle coupler* dalam menyerap energi akibat beban kejut secara tiba-tiba. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material memiliki nilai energi impak sebesar **93,63 J** dan harga impak sebesar **0,786 J/mm²**, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1. Nilai ini menunjukkan bahwa material memiliki ketangguhan yang tinggi terhadap beban dinamis.

Tabel 1 Parameter dan Hasil Uji Impak

Parameter	Nilai	Satuan
Massa bandul (m)	16,7	kg
Gravitasi (g)	9,81	m/s²
Panjang lengan (R)	0,83	m
Sudut awal (α)	156	°
Sudut akhir (β)	103	°
Energi impak (E)	93,63	Joule
Harga impak	0,786	J/mm²

Secara kuantitatif, nilai energi impak tersebut kemudian dibandingkan dengan standar industri ASTM E23 untuk material baja cor sejenis. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Perbandingan Hasil Uji dengan Standar Industri

Parameter	Hasil Penelitian	Standar ASTM E23	Rasio Peningkatan	Keterangan
Energi Impak (J)	93,63	20 – 27	3,5 – 4,5 kali	Sangat Tinggi
Harga Impak (J/mm²)	0,786	-	-	Tinggi

Berdasarkan Tabel 2, nilai energi impak material berada sekitar 3,5 hingga 4,5 kali lebih tinggi dibandingkan batas minimum standar. Hal ini menunjukkan bahwa material memiliki kapasitas penyerapan energi yang sangat baik dan masih berada dalam kondisi layak operasional. Secara analitis, tingginya nilai ini mengindikasikan bahwa material belum mengalami degradasi signifikan akibat kelelahan (*fatigue*) atau retak mikro. Hasil uji impak uji impak di tunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Patahan Uji *Impak*.

Gambar 2 menunjukkan hasil observasi visual pada permukaan patahan menunjukkan karakteristik patah getas (*brittle fracture*), yang ditandai dengan permukaan granular, tidak adanya deformasi plastis, serta pola patahan yang terjadi secara cepat. Untuk memperjelas hubungan antara hasil pengujian dan karakteristik patahan, disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Karakteristik Patahan dan Interpretasi

Karakteristik	Hasil Observasi	Interpretasi
Permukaan patahan	Kasar dan granular	Patah getas
Deformasi plastis	Tidak terlihat	Energi tidak digunakan untuk deformasi
Warna patahan	Abu-abu keperakan	Fraktur cepat
Mekanisme patah	Dominan getas	Propagasi retak cepat

Tabel 3 menunjukkan hubungan langsung antara hasil observasi makroskopik permukaan patahan dengan mekanisme kegagalan material selama pengujian impak, di mana permukaan patahan yang kasar dan bertekstur granular mengindikasikan bahwa proses fraktur terjadi secara tiba-tiba tanpa deformasi plastis yang signifikan sehingga dikategorikan sebagai patah getas (*brittle fracture*); hal ini diperkuat oleh tidak ditemukannya indikasi deformasi plastis seperti lelehan atau penarikan serat yang umumnya menjadi ciri patah ulet (*ductile fracture*), yang berarti energi yang diserap material tidak digunakan untuk deformasi plastis makroskopik melainkan langsung dilepaskan melalui pembentukan dan propagasi retak. Selain itu, warna patahan yang abu-abu keperakan dengan tampilan mengkilap menunjukkan bahwa proses fraktur berlangsung sangat cepat tanpa deformasi bertahap, yang merupakan karakteristik umum material dengan kekerasan tinggi dan keuletan terbatas, sehingga dominasi mekanisme patah getas pada tabel tersebut mengindikasikan bahwa kegagalan material dikendalikan oleh propagasi retak cepat setelah inisiasi, terutama pada area dengan konsentrasi tegangan tinggi seperti batas butir yang mengandung presipit karbida. Secara keseluruhan, interpretasi ini menegaskan bahwa meskipun material memiliki nilai energi impak yang tinggi, mekanisme kegagalannya tetap bersifat getas, yang menunjukkan adanya ketidakseimbangan antara ketangguhan global dan keuletan lokal akibat distribusi mikrostruktur yang tidak homogen, sehingga analisis ini penting sebagai dasar dalam memahami potensi kegagalan material pada kondisi pembebanan ekstrem serta sebagai acuan dalam optimasi perlakuan panas untuk meningkatkan performa material secara menyeluruh.

Jika dibandingkan dengan literatur internasional, kondisi ini sejalan dengan hasil penelitian [3] yang menyatakan bahwa baja AAR M-201 Grade E dapat menunjukkan kombinasi antara ketangguhan tinggi dan kecenderungan patah getas akibat adanya konsentrasi tegangan serta distribusi karbida pada batas butir. Selain itu, variasi perlakuan panas dapat mempengaruhi nilai impak dan homogenitas mikrostruktur. Dalam penelitian ini, nilai impak yang tinggi mengindikasikan bahwa kondisi material masih optimal, namun adanya patah getas menunjukkan bahwa distribusi mikrostruktur belum sepenuhnya homogen.

3.2 Analisis Hasil Uji Keausan

Uji keausan dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan permukaan material *knuckle coupler* terhadap gesekan pada kondisi pembebanan tertentu. Metode pengujian yang digunakan mengacu pada standar ASTM G99 dengan metode *pin-on-disk*, menggunakan spesimen baja AAR M-201 Grade E. Selama pengujian, spesimen diberikan beban konstan dan mengalami kontak gesek dengan permukaan *disk* yang berputar, sehingga menghasilkan jejak keausan yang kemudian dianalisis.

Pengukuran dilakukan terhadap lebar jejak keausan pada lima titik berbeda menggunakan mikroskop optik. Nilai yang diperoleh berturut-turut adalah 788 µm, 2629 µm, 1146 µm, 768 µm, dan 847 µm. Berdasarkan data tersebut, diperoleh nilai rata-rata lebar jejak keausan (*bo*) yang digunakan sebagai parameter utama dalam perhitungan keausan spesifik.
Rata-rata lebar jejak keausan (*bo*) dihitung menggunakan Formula (1).

$$bo = \frac{0{,}788+2{,}629+1{,}146+0{,}768+0{,}847}{5} \quad (1)$$
$$bo = \frac{6{,}178}{5} = 1{,}2356 \text{ mm}$$

Nilai *bo* ini merepresentasikan tingkat deformasi plastis permukaan akibat kontak gesek dan digunakan sebagai parameter utama dalam perhitungan keausan spesifik. Lebar jejak keausan (*bo*) merepresentasikan tingkat deformasi plastis pada permukaan material akibat kontak langsung dengan pin penguji. Semakin besar nilai *bo*, maka semakin tinggi tingkat keausan yang terjadi. Nilai ini selanjutnya digunakan untuk menghitung keausan spesifik, yang merupakan indikator utama dalam menilai ketahanan aus suatu material.

Tabel 3 Data Pengujian Keausan

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Lebar jejak (bo)	1,2356	mm	Rata-rata hasil pengukuran
B	3	mm	Lebar jalur gesek
R	13	mm	Jari-jari gesekan
Po	6,36	kg	Beban pengujian
Lo	30	m	Panjang lintasan gesek
Volume keausan	0,0168	mm^3	Hasil perhitungan
Keausan Spesifik	0.000088207	mm^3/kg-m	Volume Keausan persatuan gaya dan jarak (semakin kecil tahan aus)

Berdasarkan Tabel 3, nilai keausan spesifik yang diperoleh sebesar **0,000088207 mm^3/kg·m**, yang menunjukkan bahwa material memiliki ketahanan aus yang sangat baik. Secara umum, semakin kecil nilai keausan spesifik, maka semakin tinggi ketahanan material terhadap keausan. Nilai ini berada pada kategori sangat rendah, sehingga mengindikasikan bahwa material tidak mudah mengalami kehilangan massa meskipun mengalami gesekan dan pembebanan berulang.

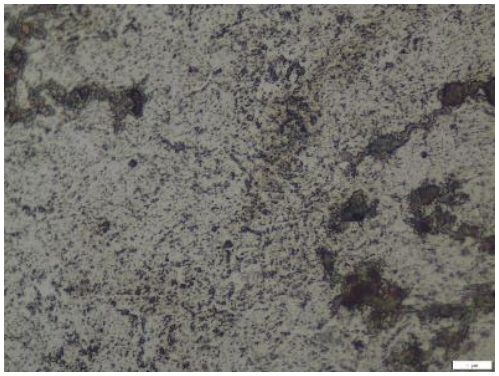
Hasil pengamatan permukaan keausan menunjukkan adanya pola goresan sejajar yang mengindikasikan bahwa mekanisme keausan yang dominan adalah keausan abrasif (*abrasive wear*). Pola ini terbentuk akibat interaksi mekanik antara permukaan spesimen dan partikel keras selama proses gesekan. Selain itu, tidak ditemukan adanya retak mikroskopik, delaminasi, maupun kerusakan signifikan lainnya, yang menunjukkan bahwa mekanisme keausan adhesif atau kelelahan (*fatigue wear*) tidak dominan dalam kondisi pengujian ini.

Permukaan material tetap terlihat relatif stabil dan terdefinisi dengan baik meskipun terdapat goresan akibat gesekan, yang menunjukkan bahwa material memiliki daya tahan gesek yang tinggi. Hal ini berkaitan erat dengan karakteristik mikrostruktur material, khususnya keberadaan fasa pearlit yang meningkatkan kekerasan dan ketahanan terhadap penetrasi partikel abrasif.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa *knuckle coupler* berbasis baja AAR M-201 Grade E memiliki ketahanan aus yang sangat baik dan masih berada dalam batas aman untuk penggunaan operasional. Material ini mampu mempertahankan integritas permukaan meskipun mengalami beban dinamis dan gesekan berulang, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi jangka panjang pada sistem sambungan kereta api.

3.2 Analisis Hasil Metalografi

Pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 1000× untuk mengidentifikasi fasa penyusun serta karakteristik struktur mikro material knuckle coupler berbasis baja AAR M-201 Grade E. Sebelum pengamatan, spesimen dipersiapkan melalui tahapan pemotongan, *mounting*, pengamplasan bertingkat, pemolesan, serta etsa kimia guna memperjelas batas butir dan distribusi fasa. Hasil pengamatan mikrostruktur ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Hasil pengamatan mikrografi 1000x

Berdasarkan hasil pengamatan dari diatas, mikrostruktur yang diamati menunjukkan dua komponen utama:

1. Fasa terang (berwarna putih keabu-abuan) yang tersebar merata di seluruh area, hal ini dapat diidentifikasi sebagai fasa *ferit* (α-Fe), yaitu larutan padat interstisial dari karbon dalam besi dengan struktur kristal BCC (*Body Centered Cubic).*
2. Fasa gelap (berwarna hitam atau gelap) yang membentuk pola tidak beraturan, tersebar acak maupun mengikuti batas butir, yang kemungkinan besar merupakan pearlit, atau *presipit karbida*, seperti *sementit* (Fe_3C), serta kemungkinan inklusi lain (misalnya MnS, SiO_2, atau Al_2O_3) jika baja tersebut diproses secara *casting* atau *alloying*.

Beberapa fasa gelap juga tampak membentuk pola *sferoidisasi* lokal ini dapat menandakan adanya proses *tempering* atau *overheating* ringan selama pembuatan, yang menyebabkan pecahnya *lamela pearlit* menjadi partikel *karbida* bulat atau *elips*. Kemungkinan besar, mikrostruktur ini terbentuk dari perlakuan panas atau pendinginan lambat dari fase *austenit* (γ-Fe):

1. Saat baja didinginkan secara perlahan, karbon dalam *austenit berdifusi* keluar dan membentuk *ferit* dan *pearlit*.
2. Dalam proses *normalizing* (pendinginan di udara dari suhu *austenit*), fasa *pearlit* akan terbentuk dalam bentuk *lamelar*.
3. Jika terjadi pendinginan yang lebih lambat (seperti dalam proses *annealing*), maka struktur *pearlit* akan lebih kasar dan kemungkinan *karbida* dapat bermigrasi ke batas butir, seperti yang terlihat dalam Gambar 4.
4. Adanya *presipit* karbida di batas butir mengindikasikan kondisi yang rawan terhadap *intergranular embrittlement* (getas antar butir), terutama jika digunakan dalam lingkungan *korosif* atau beban *siklik* tinggi.

Mikrostruktur material memiliki peran fundamental dalam menentukan sifat mekanik dan kinerja *knuckle coupler* selama operasi. Kombinasi fasa ferit dan pearlit yang teridentifikasi menunjukkan adanya keseimbangan antara keuletan dan kekuatan, di mana ferit berkontribusi terhadap kemampuan deformasi plastis, sedangkan pearlit meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus. Namun, distribusi pearlit yang tidak homogen serta keberadaan presipit karbida pada batas butir menyebabkan konsentrasi tegangan lokal yang dapat memicu inisiasi retak dan meningkatkan kecenderungan patah getas. Kondisi ini sejalan dengan hasil uji impak yang menunjukkan energi serap tinggi namun dengan mekanisme patah getas, serta hasil uji keausan yang menunjukkan ketahanan aus yang baik akibat dominasi fasa keras. Secara keseluruhan, mikrostruktur yang terbentuk memberikan performa yang cukup baik dalam menahan beban dinamis dan gesekan, namun ketidakhomogenan struktur berpotensi menurunkan ketahanan terhadap kegagalan jangka panjang. Oleh karena itu, pengendalian proses perlakuan panas

menjadi faktor kunci dalam meningkatkan homogenitas mikrostruktur dan memastikan kinerja material yang lebih andal dalam aplikasi perkeretaapian.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian *eksperimental* terhadap komponen *knuckle coupler* yang dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik *Mikrostruktur* dari *knuckle coupler* menunjukkan dominasi fasa *ferit* dan *pearlit*, dengan *presipit karbida* yang tersebar di batas butir. Struktur ini menunjukkan bahwa material memiliki kombinasi antara keuletan dan kekerasan, namun berpotensi mengalami getas antar butir jika digunakan dalam kondisi ekstrem.
2. Uji impak *Charpy* menunjukkan nilai ketangguhan yang menurun pada area tertentu akibat adanya konsentrasi fasa keras di batas butir. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur mikro yang tidak homogen dapat mempengaruhi daya tahan material terhadap beban kejut.
3. Pengujian keausan menggunakan metode *pin-on-disk* menghasilkan nilai laju keausan yang meningkat seiring waktu dan pembebanan. Permukaan yang mengalami keausan menunjukkan pola goresan *abrasif* dan *delaminasi* ringan akibat adanya partikel keras seperti *karbida* pada *matriks* baja.
4. Kondisi aktual *knuckle coupler* yang diuji mengindikasikan bahwa komponen tersebut telah mengalami *degradasi* material akibat beban dinamis, gesekan *kontinu*, serta siklus pembebanan tinggi dalam operasional kereta api.
5. Secara keseluruhan, kualitas material *knuckle coupler* masih sesuai untuk penggunaan operasional, namun perlu perhatian khusus terhadap laju keausan dan potensi retak mikro akibat struktur *karbida* yang tidak merata.

5. SARAN

Untuk meningkatkan performa dan umur pakai *knuckle coupler*, disarankan untuk memfokuskan upaya pada dua aspek utama, yaitu optimasi mikrostruktur material dan penerapan pemeliharaan prediktif. Optimasi mikrostruktur dapat dilakukan melalui pengendalian proses perlakuan panas yang lebih tepat, khususnya pada parameter austenisasi, pendinginan, dan *tempering*, sehingga dihasilkan struktur *pearlit–ferit* yang lebih halus dan homogen serta meminimalkan presipitasi karbida di batas butir yang berpotensi memicu patah getas. Selain itu, penerapan sistem pemeliharaan prediktif berbasis metode non-destruktif, seperti uji ultrasonik atau penetran, sangat direkomendasikan untuk mendeteksi dini inisiasi retak akibat keausan dan beban impak sebelum berkembang menjadi kegagalan struktural. Sebagai pengembangan penelitian lanjutan, disarankan dilakukan analisis numerik menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) untuk mensimulasikan distribusi tegangan aktual pada *knuckle coupler*, sehingga dapat diperoleh pemahaman yang lebih akurat dalam mendukung optimasi desain dan pemilihan material yang lebih andal.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Miranda RS, Rezende AB, Fonseca ST, Fernandes FM, Sinatora A, Mei PR. Fatigue and wear behavior of pearlitic and bainitic microstructures with the same chemical composition and hardness using twin-disc tests. Wear. 2022.

[2] Popović MV, Tanasković J, Međedović N. Review of of failure failure analysis analysis of of coupling coupling systems systems on on trains trains. Procedia Struct Integr . 2023;48:252–9. Available from: https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.135

[3] Huang J, Xia L, Zhang Y, Li S. Investigation on brittle fracture mechanism of a grade E cast steel knuckle. Biochem Pharmacol [Internet]. 2014;2(1):15–24. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.csefa.2013.12.007

[4] C Li SGS. Crack growth life estimation for No . 17 coupler knuckle in China Datong-Qinhuangdao railway freight trains Crack growth life estimation for No . 17 coupler knuckle in China Datong-Qinhuangdao railway freight trains. Mater Sci Eng. 2019;(17).
[5] Om Prakash Yadav NSV. The influence of AAR coupler features on estimation of in-train forces.pdf. Railw Eng Sci. 2023;31(3).
[6] Zani N, Mazz A, Solazzi L, Petrogalli C. Examining Wear Mechanisms in Railway Wheel Steels : Experimental Insights and Predictive Mapping. lubricants. 2024;
[7] Zhai W, Stichel S, Ling L. Train – track coupled dynamics problems in heavy- haul rail transportation. Veh Syst Dyn. 2025;3114. Available from: https://doi.org/10.1080/00423114.2025.2494834
[8] Hu X, Yang Y, Wei M, Chen Q, Zhou Z, Wang K. Research on abnormal wear mechanism of the coupler system in heavy-haul trains. Veh Syst Dyn. 2024;63:1568–96.
[9] Wu Q, Bernal E, Spiryagin M, Krishna V, Ding H, Stichel S, et al. Heavy haul rail / wheel wear and RCF assessments using 3D train models and a new wear map. Wear. 2024.
[10] Track R. Effective method of evaluating the level of material damage under different loading conditions. Transp Syst Technol. 2023;(Cdm):91–106.
[11] Radulescu AV, Radulescu I, Petrescu F. Influence of Lubricants Degradation Level over Tribological Properties. INCAS Bull. 2022;14(1):125–36.
[12] Mao J, Chen G, Zhao J, He Y, Luo J. An investigation on the tribological behaviors of steel / copper and steel / steel friction pairs via lubrication with a graphene additive. Friction. 2021;9(2):228–38.
[13] Messaadi M, Oomen M, Kumar A. Friction modifiers effects on tribological behaviour of bainitic rail steels. Tribol Int. 2019;140:105857.
[14] Kınacı BF, Botsalı H, Özarpa C, Esen İ, Ahlatçı H. Investigation of fatigue life of draw hook equipment used in freight wagon: Miscellaneous result. Eng Fail Anal. 2024;155:107757. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630723007112
[15] Morsy M, Khafagy S, Mosa E. Failure Analysis of the Semi-permanent Coupler Used in Metro Rail. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019.
[16] Li C, Sun SG. Failure Analysis of the Semi-permanent Coupler Used in Metro Rail Failure Analysis of the Semi-permanent Coupler Used in Metro Rail. Mater Sci Eng. 2019;
[17] Zhou X, Zhao W, Dong L, Song N. Effect of Quenching and Tempering Temperatures on Microstructure and Properties of Ultrahigh Strength Cast Steel. steel Res Int. 2022;93(11):2200328. Available from: https://doi.org/10.1002/srin.202200328
[18] Li Q, Zhang Y, Luo H. Impact abrasive wear behaviour of the multiphase microstructure in a medium carbon quenched and partitioned bainitic steel. Wear. 2023;518–519:204644. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164823000273
[19] Zhang F, Zhang T, Gou H, Chen S, Wu D, Wei H, et al. Improving the impact wear properties of medium carbon steel by adjusting microstructure under alternating quenching in water and air. Wear. 2023.
[20] Lee JJ, Koo JS, Cho BJ, Na HS, Mun HS. Analysis and Evaluation of Reduction of Impact Force in a Coupler when a Long Freight Car Brakes. J Korean Soc Manuf Process Eng. 2018;17(1).
[21] Chunduru S, Kim M, Mirman C. Failure analysis of railroad couplers of AAR type E. Eng Fail Anal. 2010.
[22] Yu X, Wu C, Shi RX, Yuan Y. Microstructural evolution and mechanical properties of 55NiCrMoV7 hot-work die steel during quenching and tempering treatments. Adv Manuf.

2021;9:520–37.
[23] Zhu X, Lin J, Jiang S, Cao A, Yao Y, Sun Y, et al. Study of the Effects on the Strengthening Mechanism and Wear Behavior of Wear-Resistant Steel of Temperature Controlling in Heat Treatment. Nanomaterials. 2024;
[24] Zuo Y, An T, Ma C, Kang J. Embrittlement mechanism of 460 MPa-Grade nuclear power steel deposited after heat treatment. Int J Press Vessel Pip.2023;202:104920.
[25] Blanco-rodríguez J, Cortada-garcia M, Profito FJ. A Novel Multiscale Contact Mechanics Approach for Wear Prediction in Journal Bearings via a Mixed Elastohydrodynamic Simulation. lubricants. 2025;1–31.
[26] Li G, Hou X, Wang M. Finite Element Algorithm for Fatigue Crack Initiation Life Modeling of Railway Coupler Knuckle Under Hybrid Load Spectra. In: 2025 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Digital Technology (ICAIDT). 2025.
[27] Bile G, Rukhande S, Rathod W. Investigation of Friction and Sliding Wear for Journal Bearing Using Taguchi Optimization. In: 2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). 2021. p. 1–7.
[28] Zhang M, Gao J, Han R, Fu Y, Zhang Q, Zhao J, et al. Tribological Properties of AISI 52100 Bearing Steel under Different Sliding Distance and Normal Force Conditions. J Mater Eng Perform. 2024;34:5081–93.
[29] Yadav O. Effects of dimensional variability on failure of AAR coupler knuckle. Railw Sci. 2026.