

Analisa Pengaruh Variasi Media Pendingin Pada Proses Perlakuan Panas Terhadap Karakteristik Fasa Struktur Mikro Dan Nilai Kekerasan Baja Eutektoid Rel Kereta Api

Eko Pujiyulianto¹, Muhammad Lasin¹, Kardo Rajagukguk¹, Abdul Muhyi¹, Farid Nanda Syanur¹, Fajar Paundra^{1*}

Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera¹

Corresponding Author : fajar.paundra@ms.itera.ac.id

ABSTRAK

Rel kereta api mempunyai permukaan yang sangat keras. Salah satu cara meningkatkan kekerasan adalah dengan cara perlakuan panas. Perlakuan panas adalah proses pemberian panas pada material logam dan didinginkan dengan media pendingin tertentu dengan tujuan untuk memperoleh sifat-sifat mekanik sesuai dengan kebutuhan di lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari variasi media pendingin pada proses perlakuan panas terhadap karakteristik fasa struktur mikro dan nilai kekerasan pada material baja eutektoid. Proses penelitian dilakukan dengan pemotongan sampel baja eutektoid ($C=0,920$) menjadi 5 spesimen, kemudian dilakukan proses perlakuan panas dengan temperatur 900°C , lalu ditahan selama 30 menit selanjutnya didinginkan dengan media pendingin yang bervariasi yaitu: udara, di diamkan dalam oven, air, oli bekas. Salah satu spesimen tidak diberikan perlakuan panas akan digunakan sebagai pembanding. Hasil pengamatan struktur mikro baja eutektoid tanpa perlakuan mengandung struktur ferit 36% dan perlit 63%. Hasil struktur mikro yang memiliki sifat paling keras pada media pendingin oli yaitu dengan struktur mikro martensit secara keseluruhan. Hasil dari pengujian kekerasan dari material yang tidak diberikan perlakuan panas yaitu 333,09 HVN. Material hasil perlakuan panas yang memiliki sifat paling keras yaitu pada media pendingin air dengan nilai kekerasan vickers sebesar 881,09 HVN. Material uji ini dapat memenuhi standar kekerasan untuk aplikasi rel kereta api.

Kata Kunci: Rel kereta api, perlakuan panas, struktur mikro, kekerasan.

ABSTRACT

Railway tracks have a very hard surface. One way to increase hardness is by heat treatment. Heat treatment is the process of applying heat to a metal material and cooling it with a certain cooling medium with the aim of obtaining mechanical properties according to field needs. This research aims to determine the effect of variations in cooling media in the heat treatment process on the microstructural phase characteristics and hardness values of eutectoid steel materials. The research process was carried out by cutting a sample of eutectoid steel ($C=0.920$) into 5 specimens, then carrying out a heat treatment process at a temperature of 900°C , then holding it for 30 minutes, then cooling it with various cooling media, namely: air, leaving it in the oven, water, used oil. One of the specimens not subjected to heat treatment will be used as a comparison. The results of observations of the microstructure of eutectoid steel without treatment contain 36% ferrite and 63% pearlite. The resulting microstructure which has the hardest properties in the oil cooling media is the overall martensite microstructure. The results of hardness testing of material that was not heat treated was 333.09 HVN. The heat treated material that has the hardest properties is water cooling media with a Vickers hardness value of 881.09 HVN. This test material can meet hardness standards for railroad applications.

Keywords: Railway tracks, heat treatment, microstructure, hardness.

1 PENDAHULUAN

Kereta api adalah salah satu alat transportasi darat yang banyak diminati oleh masyarakat Indonesia. Salah satu alasan yang mendasari hal tersebut yaitu kereta api ini dapat membuat perjalanan lebih efektif dibandingkan dengan alat transportasi darat lainnya [1]. Bertambahnya jadwal perjalanan kereta dan beban yang diangkut serta bertambahnya kecepatan kereta menyebabkan kerja pada rel menjadi lebih berat [2]. Permasalahan kegagalan material rel ditunjukkan dengan telah terjadinya keausan pada rel dan juga patahan pada sambungan rel [3].

Rel pada umumnya terbuat dari baja eutektoid. Untuk mengurangi tingkat kegagalan pada baja eutektoid material rel kereta api tersebut banyak cara dapat dilakukan salah satunya dengan pemberian perlakuan panas. Penelitian tentang perlakuan panas pada rel sudah banyak dilakukan, salah satunya yang dilakukan oleh Willy Artha Wirawan, dkk (2020)[4] yang melakukan inovasi pembuatan desain *prototype* alat untuk meningkatkan ketahanan jalan rel kereta api secara otomatis menggunakan metode *surface treatment*. Hasil dari penelitian diketahui bahwa adanya peningkatan kekuatan terhadap nilai kekerasan dan perubahan pada struktur mikro. Sebelum diberikan perlakuan *surface treatment* rel kereta api pada daerah *web* mempunyai nilai kekerasan sebesar 215 HVN, daerah *head* 2 15 HVN dan daerah *Foot* sebesar 210 HVN. Setelah dilakukan *surface treatment* nilai kekerasan rel kereta api mengalami peningkatan yaitu pada daerah *web* sebesar 235 HVN, daerah *head* sebesar 228 HVN dan daerah *foot* sebesar 223 HVN dan pada struktur mikro sebelum *surface treatment* mempunyai struktur mikro yang terdiri dari struktur ferit (terang) dan pearlit yang terlihat gelap. Sedangkan struktur mikro yang sudah diberikan *surface treatment* menunjukkan struktur fase martensit dimana material memiliki kekerasan yang tinggi [5]. Referensi lain yang berkaitan dengan proses perlakuan panas pada rel kereta dapat dilihat pada referensi[6][7]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa perlakuan panas dapat meningkatkan sifat mekanik material rel kereta api. Peningkatan sifat mekanik tersebut disebabkan oleh fenomena transformasi fasa yang dihasilkan. Beberapa fasa yang berpengaruh didalam peningkatan sifat mekanik material rel kereta berdasarkan penelitian tersebut yaitu terbentuknya fasa martensit[6].

Penelitian tentang perlakuan panas pada material rel juga sudah pernah dilakukan oleh I Made Widiyarta, dkk(2014)[8]. Dalam penelitiannya yang berjudul perilaku kekerasan dan tingkat keausan material rel kereta api akibat beban gelinding-gesek pada tahun 2014. Hasil dari proses *quench-hardening* yang dilakukan pada temperatur sekitar 900°C dan ditahan

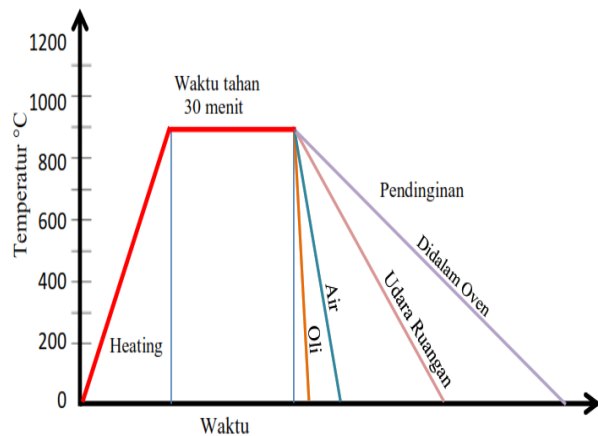
selama 10 menit didalam oven lalu dilakukan dengan pendinginan cepat dalam media air selama 5 detik pada baja karbon AISI 1065 mampu meningkatkan kekerasan permukaan material hingga kedalaman sekitar 200 μm dengan nilai kekerasan sekitar 420 HVN atau meningkat 160% dari nilai kekerasan mula. Meningkatnya kekerasan material dapat meningkatkan ketahanan aus material, rata-rata tingkat keausan baja karbon 1065 dengan perlakuan *quench-hardening* turun dari sekitar 0,0025 μm /putaran menjadi sekitar 0,0008 μm /putaran yang diuji dengan alat uji kontak dua-disk material. Pengujian keausan ini diatur dengan pemosisian material rel AISI 1065 (*disc* 1) diletakkan pada poros bagian atas dan diatur pada kecepatan konstan 383 RPM. Pada material roda AISI 1040 (*disc* 2) pada poros bagian bawah diatur pada kecepatan 386 RPM serta dengan pembebanan 1000 MPa sampai 2000 putaran [8].

Dari beberapa penelitian diatas kita dapat mengetahui untuk mengurangi tingkat kegagalan baja eutektoid pada aplikasinya adalah dengan perlakuan panas pada material baja tersebut. Melihat pentingnya perlakuan panas dalam menangani masalah kegagalan pada material baja eutektoid ini, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang menganalisa pengaruh dari beberapa media pendingin yang digunakan pada saat perlakuan panas terhadap karakteristik fasa struktur mikro dan nilai kekerasan pada material baja eutektoid. Dari tujuan tersebut diharapkan mendapatkan karakteristik struktur mikro dari baja eutektoid yang lebih baik untuk kebutuhan aplikasi material rel kereta api dan juga nilai kekerasan yang didapat semakin tinggi dengan begitu nilai ketahanan aus dari material akan semakin tinggi. Dengan demikian pemakaian baja eutektoid untuk material rel kereta api dapat menjadi lebih efektif serta tidak cepat mengalami kegagalan karena keausan yang disebabkan oleh gesekan yang terjadi secara terus menerus saat kereta beroperasi.

2 METODE

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rel kereta api R54 yang diperoleh dari Dipo Tanjung Karang, Bandar Lampung. Sebelum dilakukan penelitian, material dilakukan pengujian komposisi untuk mengetahui komposisinya. Pada bagian kepala rel, material dipotong dengan ukuran 1x1x1cm. Selanjutnya, proses *heat treatment* dilakukan pada temperatur 900°C dengan *holding time* 30 menit menggunakan *muffle furnace* (Carbolite, CWF 1300, UK) dengan laju pemanasan 5 °C/menit. Proses pendinginan dilakukan dengan berbagai variasi, seperti di dalam air (1 g/cm³), oli bekas (0,95 g/cm³), udara, dan didiamkan di dalam tungku. Proses pemanasan dilakukan secara bersamaan untuk ke-4 spesimen

dengan jarak antar spesimennya yaitu 3 cm, dan proses pendinginan dilakukan pada wadah berukuran 20 x 20 x 20 cm. Gambar 1 menunjukkan skema dari proses *heat treatment*.



Gambar 1. Proses *heat treatment*

Setelah dilakukan proses *heat treatment* dilakukan proses pengujian struktur mikro (*Zeiss, Optical Microscope*, Germany) dan kekerasan. Uji struktur mikro ini bertujuan untuk mengetahui batas butir dan fasa yang terbentuk setelah proses etsa. Proses etsa yang dilakukan dengan memberikan larutan asam pada permukaan logam yang sudah dipoles agar batas butir dan ukuran butir dapat dilihat. Ukuran dan Batas butir terjadi karena adanya pengendapan (*presipitation*) atau pemisahan (*segregation*) berdasarkan sifat fisika dan kimianya[9]. Ukuran dan bentuk struktur butir akan sangat berpengaruh terhadap sifat mekanis kekuatan, kekerasan[10]. Pengujian kekerasan menggunakan metode vicker dengan indenter berbentuk piramid dengan waktu indentasi selama 10 detik dan beban 10 kgf (*ZwickRoell, Universal Hardness*, Germany). Untuk memperoleh nilai kekerasan Vickers dapat menggunakan persamaan berikut.

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

Keterangan :

- HV = *Hardness Vickers Number*
- P = Beban Indentor
- d = Luas Penampang $d = \frac{D_1 + D_2}{2}$

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Uji Komposisi

Uji komposisi kimia adalah pengujian yang bertujuan untuk mengetahui jumlah persen unsur yang terkandung dalam suatu bahan[10][11]. Tabel 1 menunjukkan komposisi kimia Rel kereta api tipe R-54 bagian kepala.

Tabel 1. Hasil uji komposisi

Unsur Kimia	Kandungan (%C) material uji	Contoh (%C) baja karbon tinggi[12]
Fe	97,24	-
C	0,920	0,639
Si	0,489	0,380
Mn	1,053	0,941
P	0,033	0,019
S	0,020	0,013
Cr	0,125	-

Tabel 1 menunjukkan komposisi kimia dari material rel kereta api R-54. Unsur kimia tersebut umumnya terdiri dari beberapa unsur logam dan non-logam. Unsur logam yang terdapat pada Rel kereta api tipe R-54 dikelompokkan menjadi 2 jenis, logam berat yang terdiri dari Cr dan Mn. Untuk unsur penyusun non-logam rel kereta api tipe R-54 terdiri dari karbon (C), Silikon (Si), Fosfor (P), Sulfur (S). Unsur lain yang terkandung dalam baja ini disebut unsur paduan.

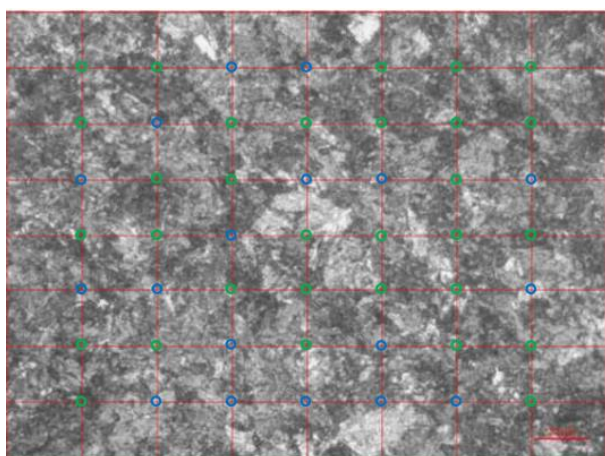
Unsur paduan yang terkandung dalam baja akan berpengaruh terhadap sifat mekanik dan struktur mikro material baja. Kandungan Cr pada material baja meningkatkan kekuatan tarik, kekerasan, kekuatan aus, ketahanan abrasi ketahanan korosi yang baik[13]. Baja dengan kandungan yang Mn tinggi memberikan sifat tahan aus yang baik. Sedangkan untuk kandungan Si dalam jumlah yang sedikit dapat meningkatkan kemampuan untuk dikeraskan (*hardenability*) dan jika dalam jumlah yang banyak akan menurunkan keuletan[14].

Tabel 1 dapat diketahui kandungan unsur besi (Fe) merupakan unsur utama dari material rel kereta api dengan presentase komposisi kimia paling besar, yaitu sebesar 97,24%, selanjutnya kadar mangan (Mn) sebesar 1,053% dan kadar karbon (C) sebesar 0,920%. Dari presentase tersebut dapat dilihat bahwa baja eutektoid material rel kereta api digolongkan dalam baja karbon tinggi. hal tersebut dibuktikan dengan adanya kadar mangan (Mn) dan karbon (C) yang melebihi dari 0,60%. Baja karbon tinggi (*high carbon steel*), merupakan baja karbon dengan kandungan unsur karbon yang terkandung dalam besi sebesar 0,6% – 1,4% unsur karbon[15]. Nilai komposisi pada tabel 1 memiliki kandungan karbon yang lebih besar yaitu 0,920% jika dibandingkan dengan kandungan karbon rel kereta yang ditunjukkan pada referensi[16] yang hanya memiliki kandungan karbon sebesar 0,872%. Secara umum, kandungan karbon pada material baja berpengaruh terhadap sifat mekanik. semakin tinggi kandungan karbon akan semakin meningkatkan nilai kekerasan material.

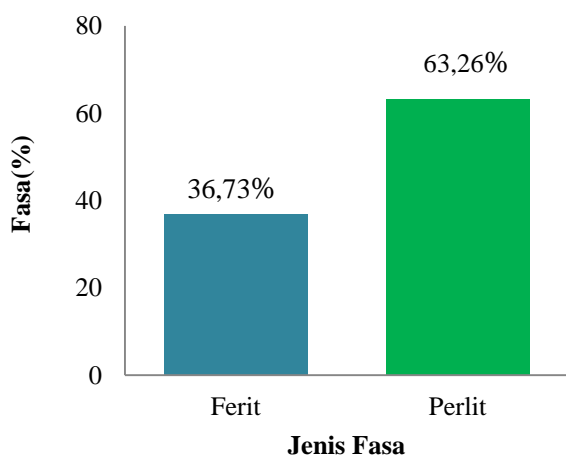
Baja karbon tinggi memiliki sifat yang sangat keras, paling kuat dan keuletan yang rendah diantara baja karbon lainnya. Secara khusus pada penggunaannya ditujukan untuk komponen atau alat yang memerlukan ketahanan gesek yang tinggi, pisau potong (*cutting tools*) atau juga untuk sebagai cetakan[17].

3.2 Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro yang dilakukan melalui mengamati pada mikroskop optik dengan perbesaran 500 kali. Gambar 2 menunjukkan struktur mikro baja eutektoid yang tanpa diberikan perlakuan panas.



Gambar 2. Tanpa perlakuan



Gambar 3. Grafik persentase fasa tanpa perlakuan

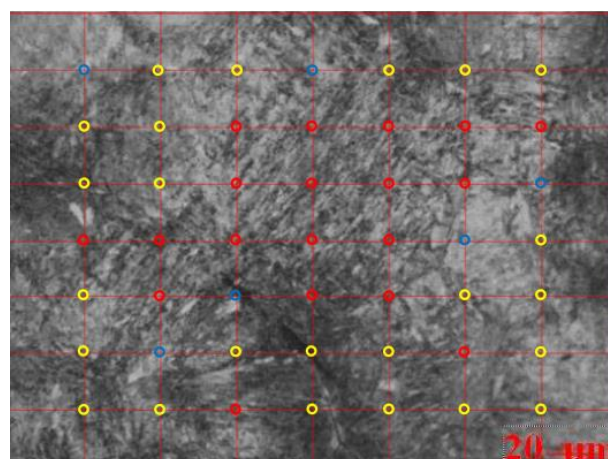
Gambar 2 merupakan gambar struktur mikro baja eutektoid material rel kereta api tanpa diberikan perlakuan perlakuan panas. Struktur mikro dari rel tanpa perlakuan ini dijadikan pembandingan untuk melihat perubahan struktur mikro dari spesimen lain yang sudah diberi perlakuan panas dengan media pendingin yang berbeda. Laju pendinginan sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik yang akan dihasilkan baja saat proses perlakuan panas[18]. Kemampuan jenis media pendingin bervariasi. Perbedaan sifat cairan pendingin disebabkan oleh suhu,

viskositas, kekuatan larutan dan bahan pendingin. Semakin cepat logam didinginkan, semakin keras logam tersebut[19].

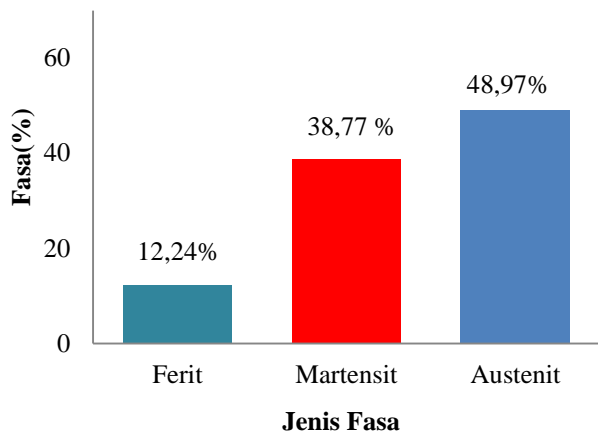
Gambar 3 menunjukkan grafik presentase fasa struktur spesimen baja eutektoid tanpa perlakuan yaitu perlit 63,26% dan ferit 36,73%. Kondisi ferit dan perlit terbentuk dari proses pendinginan lambat[20]. Struktur perlit (*pearlite*) adalah campuran ferit (Fe) 80% dan cementit (Fe_3C) 12% berlapis dalam suatu struktur batas butir[21]. Struktur perlit ini ditandai dengan warna hitam atau gelap dan struktur mikro ferit ditandai dengan warna putih atau terang[22].

Gambar 2 struktur mikro pada baja eutektoid spesimen material rel yang tanpa diberikan perlakuan panas menunjukkan bahwa jenis material rel kereta api yang diuji merupakan jenis material *fully pearlitic steel*. Material *fully pearlitic steel* terjadi pada material baja karbon tinggi, khususnya pada kandungan karbon (C) sekitar 0,8%. Pada material baja eutektoid yang dilakukan pengujian unsur kimia diketahui memiliki kandungan karbon yaitu 0,920% (C). Material *fully pearlitic steel* memiliki sifat mekanik yaitu kekuatan tinggi, ketahanan gesek yang baik, dan sangat kuat untuk menahan beban berat tetapi material ini memiliki ketangguhan yang rendah[23].

Gambar 4 merupakan gambar struktur mikro dari proses perlakuan panas dengan menggunakan media pendingin berupa air. Perlakuan panas dengan menggunakan media pendingin air ini menghasilkan struktur mikro yaitu fasa martensit 36,77%, ferit 12,24%. dan austenit 48,97% yang dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 4. Struktur mikro baja eutektoid media pendingin air



Gambar 5. Presentase fasa Struktur mikro baja eutektoid media pendingin air

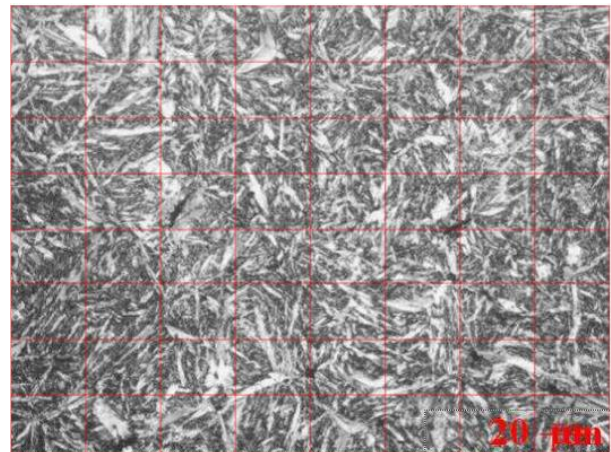
Material uji yang memiliki fasa ferit dan perlit (Gambar 2 struktur mikro rel tanpa perlakuan panas) bertransformasi menjadi austenit pada suhu 900°C lalu diberikan pendinginan cepat dengan menggunakan media air. Akibat pendinginan cepat tersebut austenit berubah menjadi martensit seperti pada gambar 5. Struktur mikro martensit ditunjukkan dengan bentuk jarum-jarum halus, bersifat kuat, keras dan getas (*brittle*) [24].

Apabila kadar karbon dalam kondisi austenit tinggi maka struktur jarum martensit yang terbentuk akan lebih memanjang, juga menjadi lebih terang [25]. Namun, struktur martensit yang terbentuk pada permukaan spesimen perlakuan panas dengan media pendingin air dapat dilihat pada gambar 4 ini tidak sepenuhnya martensit, tetapi ada juga terdapat austenit dan ferit sisa dalam struktur tersebut yang berwarna terang, sedangkan martensit berwarna gelap. Hal ini dikarenakan laju pendinginan yang berbeda saat kondisi proses pendinginan dengan menggunakan media air, dimana pada daerah permukaan laju pendinginannya lebih besar daripada daerah inti [26].

Fasa Austenit yang terlihat terang pada gambar 4 terjadi karena pada saat pendinginan austenit tidak sempat berubah menjadi martensit. Pada proses perlakuan panas yang dilakukan dengan pendinginan cepat menggunakan media pendingin air, austenit ini akan bertransformasi menjadi martensit. Semakin banyak martensit sisa yang terbentuk setelah proses perlakuan panas mengakibatkan peningkatan kekerasannya menjadi relative lebih kecil [27].

Gambar 6 merupakan gambar struktur mikro dari proses perlakuan panas dengan menggunakan media pendingin berupa oli bekas. Perlakuan panas dengan menggunakan media pendingin oli bekas ini menghasilkan struktur mikro yaitu fasa martensit (*martensite*) secara keseluruhan (*full martensite*).

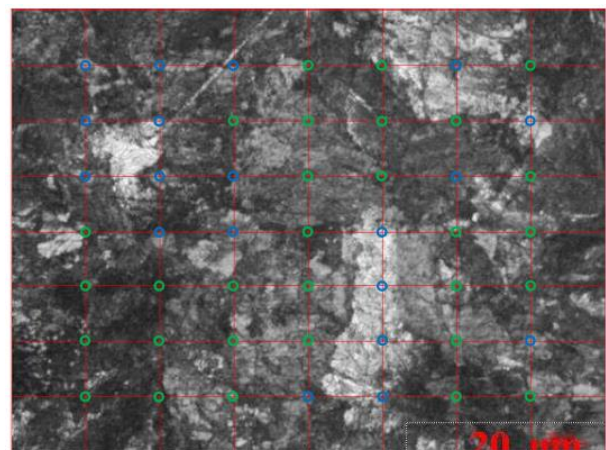
Struktur mikro martensit dapat ditunjukkan dengan bentuk jarum-jarum halus yang terlihat pada gambar 6.



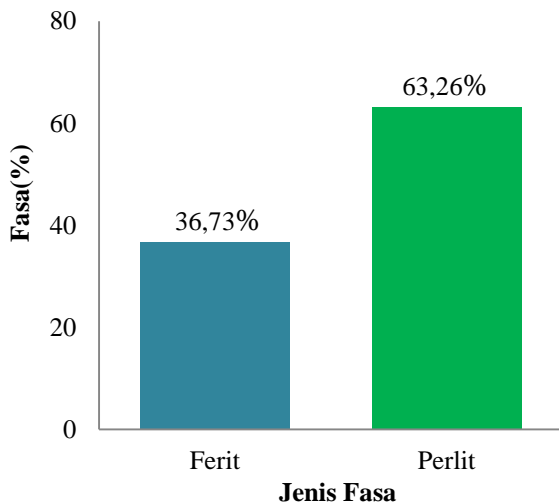
Gambar 6. Struktur mikro baja eutektoid media pendingin oli

Fasa martensit yang terbentuk ini akibat dari proses pendinginan cepat menggunakan media oli bekas. Transformasi fasa martensit terjadi tanpa adanya perubahan komposisi kimia pada fasa awalnya. Bentuk dari martensit yang dihasilkan ini dipengaruhi oleh kadar karbon [28]. Struktur fasa martensit hasil dari perlakuan panas dengan media pendingin berupa oli bekas ini mengakibatkan perubahan sifat mekanik yaitu mempunyai tingkat kekerasan yang paling tinggi namun getas (*brittle*) [29]. Kekerasan dari martensit ini dipengaruhi oleh kandungan karbon dalam baja [30].

Gambar 7 dan gambar 8 merupakan gambar struktur mikro dari proses perlakuan panas dengan menggunakan media pendingin berupa udara ruangan. Perlakuan panas dengan media pendingin udara ruangan menghasilkan struktur mikro yaitu fasa ferit 63,26% dan perlit 36,73%.

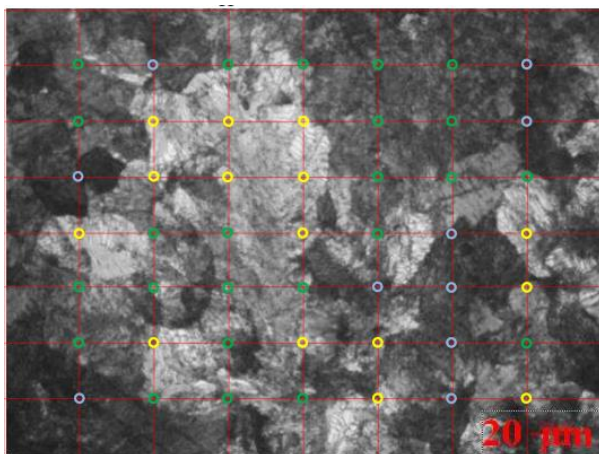


Gambar 7. Struktur mikro media pendingin udara ruangan.

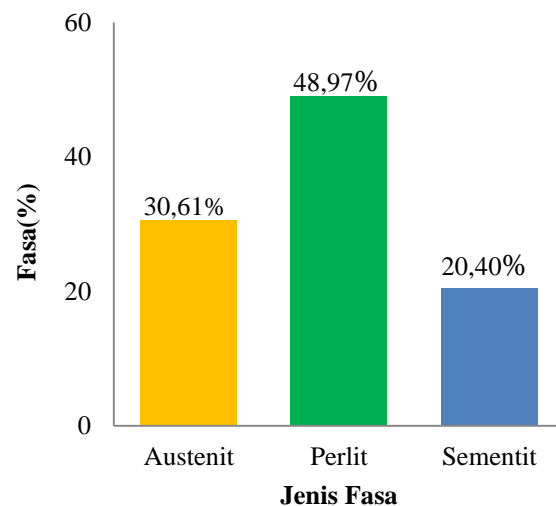


Gambar 8. Presentase fasa Struktur mikro baja eutektoid media pendingin udara ruangan.

Gambar 9 merupakan gambar struktur mikro dari proses perlakuan panas dengan menggunakan media pendingin dengan membiarkan spesimen yang telah diberikan perlakuan panas tetap didalam tungku hingga spesimen dingin sepenuhnya. Perlakuan panas dengan media pendingin udara ruangan dan dengan didiamkan didalam tungku ini menghasilkan struktur mikro yang hampir sama yaitu fasa sementit 20,40% perlit 48,97% dan austenit 30,61%. Hasil struktur mikro ini dikarenakan proses pendinginan yang terjadi lambat.



Gambar 9. Struktur mikro media pendingin didiamkan didalam tungku



Gambar 10. Presentase fasa Struktur mikro baja eutektoid media pendingin didiamkan di dalam tungku

Kondisi ferit dan perlit terbentuk dari proses pendinginan lambat dari austenite baja bersifat lunak, ulet, cukup keras dan konduktivitas thermalnya tinggi. Struktur perlit yang terbentuk terlihat tidak beraturan memiliki tingkat gelap terang yang berbeda. Gelap dan terangnya fasa perlit dari gambar 7 dan 9 tersebut diakibatkan oleh jarak antar lamel fasa sementit. Jarak lamel lamel yang berdekatan maka akan dihasilkan bentuk struktur mikro perlit dengan warna yang lebih gelap, begitu pula sebaliknya semakin jauh jarak lamel lamel tersebut maka akan menghasilkan warna yang lebih terang pada fasa perlit. fasa perlit tersebut masing masingnya disebut dengan perlit halus (*fine pearlite*) untuk perlit yang lebih gelap dan perlit kasar (*coarse pearlite*) untuk struktur perlit yang lebih terang[31][11]. Pendinginan yang lambat menghasilkan struktur mikro Pearlite kasar, sedangkan struktur mikro *Pearlite* halus terbentuk dari hasil pendinginan cepat. Baja yang memiliki struktur mikro perlit kasar kekuatannya lebih rendah dibandingkan baja yang memiliki struktur mikro perlit halus[32].

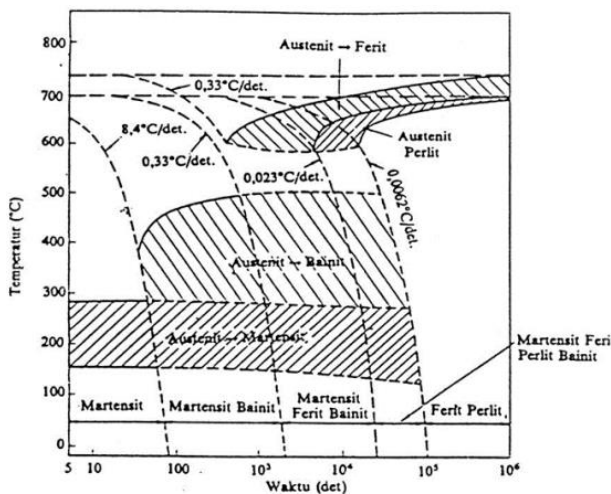
Material baja eutektoid rel kereta api yang tanpa di berikan perlakuan pada gambar 2 terlihat bahwa material memiliki fasa ferit dan perlit namun dominan fasa perlitnya (*fully pearlitic*). Setelah dilakukan proses perlakuan panas dengan media pendingin yang berbeda, yaitu media air, oli, udara dan didiamkan dalam tungku terjadi perubahan struktur mikro pada material rel kereta api ini. Perubahan struktur mikro ini mengakibatkan sifat mekanis pada baja tersebut akan berubah. Sifat mekanik dari suatu baja sangat bergantung pada struktur mikronya[16].

Struktur mikro yang muncul pada akhir proses perlakuan panas ini, selain ditentukan oleh komposisi kimia dari material tersebut juga ditentukan dari proses perlakuan panas yang dialami oleh material

tersebut[22]. Faktor yang mempengaruhi saat proses perlakuan panas antara lain yaitu kandungan karbon, temperatur pemanasan, waktu tahan (*Holding Time*), laju pemanasan, laju pendinginan dan media pendingin pada tahap pendinginan(*cooling*)[33].

Laju pendinginan sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik pada baja[24]. Kemampuan jenis media untuk mendinginkan sampel dapat bervariasi. Perbedaan sifat cairan pendingin disebabkan oleh suhu, viskositas, kekuatan larutan dan bahan pendingin dasar. Semakin cepat logam didinginkan, semakin keras pula logam tersebut[18]. Media pendingin yang sering digunakan pada proses perlakuan panas, yang memiliki viskositas lebih rendah akan memberikan laju pendinginan kritis sehingga akan mendapatkan kekerasan yang lebih tinggi[34].

Pengaruh laju pendinginan terhadap struktur mikro yang dihasilkan ini dijelaskan dengan diagram CCT (*Continuous Cooling Transformasi*) yang merupakan salah satu diagram dalam proses perlakuan panas yang menggambarkan hubungan antara laju pendinginan kontinu dengan fasa atau struktur yang akan terbentuk setelah terjadinya transformasi fasa. Untuk mempermudah dalam mengidentifikasi struktur yang terjadi setelah perlakuan panas maka dapat dilihat pada diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT) yang dapat digunakan untuk memprediksi struktur yang terbentuk[26].



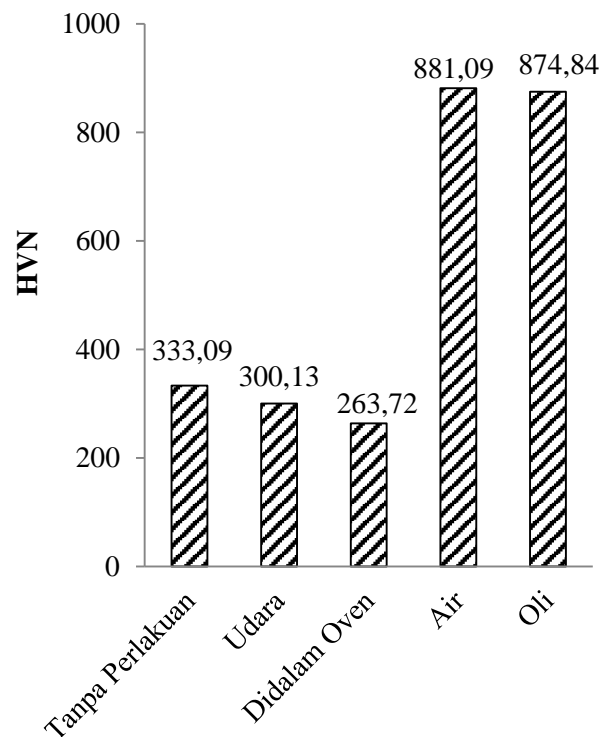
Gambar 11. Kurva diagram CCT[35].

Dengan mengetahui Kecepatan media pendingin saat mendinginkan media benda kerja lalu di hubungkan dengan diagram CCT (*Continuous Cooling Transformation*) kita dapat memprediksi hasil akhir dari proses perlakuan panas yang dilakukan. Spesimen yang diberikan perlakuan panas dengan media pendingin air dan oli terbentuk fasa ferit, martensit dan austenit. namun pada media pendingin oli bekas terbentuk fasa martensit secara keseluruhan. Perubahan

struktur ini diakibatkan karena laju pendinginan yang cepat. Munculnya struktur martensit menandakan terjadinya peningkatan tingkat kekerasan yang paling tinggi pada material tersebut. Namun pada spesimen dengan pendingin oli bekas memiliki sifat yang getas(*brittle*)[19]. Pada spesimen dengan pendingin udara ruangan dan didiamkan dalam tungku terjadi kemiripan fasa yang dihasilkan. Namun pada spesimen yang didiamkan dalam tungku terbentuk struktur sementit dan austenit.

3.3 Kekerasan Vickers

Pengujian vickers ini dilakukan dengan 5 titik pengujian pada permukaan spesimen uji. Nilai kekerasan yang dihasilkan dari satu spesimen uji titik 1 dengan yang lainnya berbeda. Faktor yang mempengaruhi perbedaan nilai kekerasan ini adalah dari kandungan fasa struktur mikro yang berbeda dari setiap titik[36]. Data nilai rata-rata pengujian kekerasan vickers baja eutektoid material rel kereta api dalam bentuk grafik dibawah ini:



Variasi Media Pendingin

Gambar 12. Grafik uji Kekerasan

Gambar 12 merupakan grafik hasil nilai rata-rata pengujian kekerasan vickers spesimen baja eutektoid material rel kereta api tanpa perlakuan, dan yang diberikan perlakuan panas dengan berbagai pendinginan yang berbeda. Spesimen tanpa perlakuan panas memiliki nilai rata-rata kekerasan vickers yaitu sebesar 333,09 HVN (Hardness Vickers Number).

Nilai kekerasan vickers sebesar 333,09 HVN ini setara dengan 322 HBN. Nilai kekerasan baja eutektoid ini sudah memenuhi standar kekerasan rel kereta api menurut PM 60 tahun 2012 yaitu sebesar 320 HBN atau berkisar 326 HVN[3].

Perbedaan nilai kekerasan pada gambar 12 disebabkan oleh perbedaan fasa pada material. Fasa yang dihasilkan pada material rel yang didinginkan dengan air dan oli memiliki struktur fasa martensit. Fasa martensit merupakan fasa dengan struktur (*Body Centered Tetragonal*) BCT yang terjadi akibat fenomena pergeseran atom karbon selama proses pendinginan cepat. pergeseran atom karbon akan berdampak terhadap deformasi struktur kisi sehingga kerapatan pada struktur kisi akan meningkat. Hal inilah yang menyebabkan fasa martensit memiliki kekerasan yang tinggi. Berbeda halnya dengan fasa yang dihasilkan pada pendinginan udara dan pendinginan didalam oven. Fasa yang dihasilkan pada kedua pendinginan tersebut pada umumnya adalah fasa ferit dan pearlite. Fasa ferit dan pearlit memiliki nilai kekerasan lebih rendah dibandingkan fasa martensit.

Grafik media pendingin udara pada gambar 12 menunjukkan nilai rata-rata kekerasan vickers yang dihasilkan dari proses perlakuan panas yaitu sebesar 300,13 HVN atau setara 308 HBN. Nilai kekerasan Vickers yang dihasilkan menurun dari material pembanding (material rel tanpa perlakuan panas) yang sebelumnya 392,64 HVN menjadi 300,13 HVN. Penurunan nilai kekerasan ini sebesar 92,51 HVN. Nilai kekerasan vickers yang menurun ini akibat. Penurunan ini nilai kekerasan ini disebabkan karena waktu pendinginan yang lambat, sehingga terjadinya fasa perlit dan ferit yang muncul terlihat besardan kasar. struktur mikro perlit dan ferit yang besar dan kasar hal itu menyebabkan tingkat kekerasan pada spesimen tersebut menjadi lunak[37].

Grafik media pendingin didalam oven pada gambar 12 menunjukkan nilai kekerasan vickers yang dihasilkan dari proses perlakuan panas yaitu sebesar 263,72 HVN atau berkisar 252 HBN. Nilai kekerasan vickers yang dihasilkan juga menurun dari material pembanding (material rel tanpa perlakuan panas) yang sebelumnya 333,09 HVN menjadi 263,72 HVN. Penurunan nilai kekerasan ini sebesar 69,33 HVN. Dengan nilai 263,72 HVN ini maka sampel uji ini tidak memenuhi standar minimum nilai kekerasan untuk material rel kereta api dengan nilai kekerasan minimum yaitu 320 HBN atau sekitar 326 HVN. Nilai kekerasan vickers yang menurun ini akibat dari proses pendinginan yang sangat lama.

Grafik media pendingin air pada gambar 12 menunjukkan nilai kekerasan vickers yang dihasilkan

dari proses perlakuan panas yaitu sebesar 881,09 HVN. Nilai kekerasan vickers yang dihasilkan naik dari material pembanding (material rel tanpa perlakuan panas) yang sebelumnya 333,09 HVN menjadi 881,09 HVN. Peningkatan kekerasan ini sebesar 548 HVN. Meningkatnya kekerasan ini disebabkan karena munculnya fasa austenit dan martensit. Fasa ini memiliki kekerasan yang sangat baik namun keuletan yang rendah(getas)[38].

Grafik media pendingin oli bekas pada gambar 12 menunjukkan nilai kekerasan vickers yang dihasilkan dari proses perlakuan panas yaitu sebesar 874,84 HVN. Nilai kekerasan vickers yang dihasilkan naik dari material pembanding (material rel tanpa perlakuan panas) yang sebelumnya 333,09 HVN menjadi 874,84 HVN. Peningkatan kekerasan ini sebesar 541,75 HVN. Meningkatnya kekerasan ini disebabkan karena munculnya fasa martensit secara keseluruhan pada sampel. Struktur fasa martensit hasil dari perlakuan panas dengan media pendingin berupa oli bekas ini mengakibatkan perubahan sifat mekanik yaitu mempunyai tingkat kekerasan yang paling tinggi namun getas(*brittle*)[39]. Kekerasan dari martensit ini dipengaruhi oleh besarnya kandungan karbon dalam baja[40].

Nilai rata-rata kekerasan vickers yang dihasilkan dari material yang mengalami perlakuan panas mengalami kenaikan, namun adapula yang mengalami penurunan nilai. Kekerasan yang menurun ini yaitu pada material media pendingin udara dan didiamkan didalam oven. Penurunan nilai kekerasan dengan media pendingin didiamkan didalam oven cukup besar yaitu sebesar 69,72 HVN dan menjadikan material ini tidak memenuhi standar dari kekerasan minimum material rel kereta api. Material uji yang memiliki kenaikan paling tinggi yaitu pada media pendingin air yaitu sebesar 548 HVN dan media oli bekas yaitu sebesar 541,75 HVN. Kedua material ini memiliki kekerasan vickers yang paling tinggi yaitu 881,09 HVN untuk sampel media pendingin air dan 874,84 HVN. Dengan meningkatnya kekerasan material, maka ketahanan aus material juga semakin meningkat[35].

4 KESIMPULAN

- a. Karakteristik fasa pada spesimen baja eutektoid material rel yang tidak diberikan perlakuan panas memiliki fasa ferit 36,73% dan perlit 63,26%. Pada media pendingin oli bekas muncul fasa martensit yang mendominasi dan dapat dikatakan menyeluruh pada sampel tersebut, dibanding dengan sampel media pendingin air yang struktur mikro martensit hanya 38,77% namun muncul fasa austenit 48,97%. Sedangkan, pada sampel dengan media

pendingin udara dan dalam oven fasa yang terbentuk ferlit, perlit, sementit dan austenit. Media pendingin air dan oli bekas merupakan sampel yang memiliki tingkat kekerasan paling tinggi, sesuai dengan sifat fasa martensit dan austenit yaitu sangat keras namun getas. Material ini baik untuk digunakan pada material yang membutuhkan tingkat ketahanan terhadap gesekan yang tinggi.

- b. Nilai kekerasan spesimen rel tanpa perlakuan adalah 333,09 HVN, nilai ini sudah memenuhi standar dari material rel. Nilai kekerasan yang paling tinggi diperoleh yaitu dari media pendingin air yaitu 881,09 HVN. Nilai kekerasan yang diperoleh dari media pendingin oli adalah 874,84 HVN. Nilai kekerasan yang sangat tinggi ini di hasilkan dari media air dan oli bekas akibat dari proses pendinginan yang cepat. Nilai kekerasan media pendingin udara adalah 300,12 HVN, nilai kekerasan media pendingin dalam oven adalah 263,72 HVN. Nilai kekerasan yang dihasilkan dari proses perlakuan panas dari media pendingin oli bekas dan air mengalami kenaikan namun, pada media pendingin udara dan didiamkan didalam oven mengalami penurunan menjadikan material ini tidak memenuhi standar dari kekerasan minimum material rel kereta api yang sebesar 320 HBN.

UCAPAN TERIMA KASIH

Authors would like to thank to Institut Teknologi Sumatera for providing the research grant No. 159bf/IT9.2.1/PT.01.03/2024 through "Hibah Penelitian Itera 2024".

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nafisah Nurul Hakim, "Implementasi Machine Learning pada Sistem Prediksi Kejadian dan Lokasi Patah Rel Kereta Api di Indonesia," *J. Sist. Cerdas*, vol. 3, no. 1, pp. 25–35, 2020, doi: 10.37396/jsc.v3i1.58.
- [2] D. Payana, I. M. Widiyarta, and M. Sucipta, "Kekerasan Baja Karbon Sedang dengan Variasi Suhu Permukaan Material," *J. METTEK*, vol. 4, no. 2, p. 43, 2018, doi: 10.24843/mettek.2018.v04.i02.p02.
- [3] A. Ihlas, "Analisis Kerusakan Rel Kereta Api Angkutan Batubara," *J. Teknol. Bahan dan Barang Tek.*, vol. 7, no. 1, p. 7, 2017, doi: 10.37209/jtbbt.v7i1.89.
- [4] A. Zulkarnain, W. A. Wirawan, L. Apricillya, and P. Permatasari, "Kekuatan Bending Pada Material Komposit Interior Kereta Api Dengan Metode Hand Lay-Up," *Pros. Semin. Nas. Teknol.* V, pp. 88–93, 2019.
- [5] W. A. Wirawan, T. A. Cundoko, H. B. Wahjono, F. Rozaq, and S., "Rancang Bangun Teknologi Automatic Surface Treatment Untuk Meningkatkan Ketahanan Jalan Rel Kereta Api," *J. Perkeretaapi. Indones. (Indonesian Railw. Journal)*, vol. 5, no. 1, pp. 1–9, 2021, doi: 10.37367/jpi.v5i1.129.
- [6] A. Aghastya, H. B. Wahjono, W. A. Wirawan, D. S. Atmaja, N. F. Rachman, and W. T. Adi, "The effect of heating surface treatment by oxy-acetylene gas on the microstructure and hardness of the UIC R42 rail," 2023, p. 030017, doi: 10.1063/5.0129746.
- [7] W. A. Wirawan, H. B. Wahjono, F. R. N. F. Rachman, and A. Rhamadhani, "Macrostructural and mechanical properties of rails clad by automatic flame treatment," 2023, p. 070022, doi: 10.1063/5.0114141.
- [8] I. M. Widiyarta, I. M. Parwata, I. M. G. Karohika, I. P. Lokantara, and I. Putu, "Mekanisme Aus Baja Karbon (C 0 . 65 %) Akibat Beban Kontak Gelinding-Luncur Dua Arah Berlawanan," no. Snttm Xiii, pp. 15–16, 2014.
- [9] M. A. Yusuf, R. Roestaman, and E. Walujodjati, "Evaluasi Struktur Atas Komponen Jalan Rel dalam Kegiatan Reaktivasi Jalur Cibatub Cikajang," *J. Konstr.*, vol. 20, no. 1, pp. 30–40, 2022, doi: 10.33364/konstruksi/v.20-1.926.
- [10] S. A. Yudistirani, E. Diniardi, H. Basri, and A. I. Ramadhan, "Analisa Keausan Dan Faktor Keamanan Keluar Rel Pada Kereta Api Lokomotif," *J. Teknol.*, vol. 13, no. 2, pp. 209–216, 2021, [Online]. Available: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/jurtek/article/view/9960>.
- [11] E. Pujiyulianto *et al.*, "Journal Homepage : R54 DIVRE IV TANJUNG KARANG ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF RAILROAD RAIL TYPE R54 DIVRE IV TANJUNG KARANG," vol. 44, no. 2, 2022.
- [12] M. Doloksaribu *et al.*, "PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU TAHAN

- PROSES PERLAKUAN PANAS TEMPER TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN PERMUKAAN RIM RODA KERETA API PROTOTIPE HASIL Pengerasan Induksi EFFECT OF TEMPERING TEMPERATURE AND HOLDING TIME ON MICROSTRUCTURE AND SURFACE HARDNES,” vol. 40, no. 1, 2018.
- [13] F. H. Jaya, “Evaluasi Struktur Atas Komponen Jalan Rel Berdasarkan Passing Tonnage (Studi Kasus : Jalan Rel Lintas Tanjung Karang – Bekri),” *Tapak Vol. 8 No. 1*, vol. 8, no. 1, pp. 33–45, 2018.
- [14] J. Anindito, F. Paundra, and N. Muhayat, “Pengaruh aliran dan kedalaman air terhadap hasil pengelasan dan kekerasan sambungan las bawah air baja SS400,” vol. 15, no. 2, pp. 1–13, 2020.
- [15] H. Rusjdi, A. W. Pramono, and W. B. Faathir, “Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Pada Baja Aisi 4340,” *J. Power Plant*, vol. 4, no. 2, pp. 95–106, 2016.
- [16] E. Pujiyulianto, F. Paundra, J. B. Meliala, and H. T. Yudistira, “Journal Homepage : R54 DIVRE IV TANJUNG KARANG ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF RAILROAD RAIL TYPE R54 DIVRE IV TANJUNG KARANG,” vol. 44, no. 2, 2022.
- [17] K. Ramadhani, “Analisa Uji Kekerasan Pada Material Baja ST37 Setelah Mengalami Perlakuan Panas Normalizing,” *Medan*, vol. 2, no. 1, 2019.
- [18] Y. Handoyo, “Pengaruh Quenching Dan Tempering Pada Baja Jis Grade S45C,” *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 3, no. 2, pp. 102–115, 2015.
- [19] I. Prabowo, M. Ichsanudin, A. H. Wibowo, F. Paundra, and E. Pujiyulianto, “Peningkatan Nilai Kekerasan Baja Karbon Rendah AISI 1018 melalui Proses Pack Karburizing dengan Media Batok Kelapa,” *J. Metall. Eng. Process. Technol.*, vol. 3, no. 2, p. 125, 2023, doi: 10.31315/jmept.v3i2.8701.
- [20] H. Isworo and N. Rahman, “Effect of Variations in Heating Temperature and Cooling Media on the Hardness and Microstructure of Steel St 41 Hardening Method,” *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 5, no. 1, pp. 37–50, 2020, doi: 10.20527/sjmekinematika.v5i1.136.
- [21] S. Sitorus, “Analisis sifat mekanik baja karbon menengah yang dipanaskan 850C dengan quenching pada larutan NaOH,” *J. Pembang. Wil. Kota*, vol. 1, no. 3, pp. 82–91, 2019.
- [22] A. Pramono, “Karakterisrik Mekanik Proses Hardening Baja Aisi 1045 Media Quenching Untuk Aplikasi Sprochet Rantai,” *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 1, pp. 32–38, 2011, [Online]. Available: www.uddeholm.com.
- [23] S. Sumiyanto and A. Abdunnaser, “Pengaruh Media Pendingin Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Plat Baja Karbon Astm a-36,” *Bina Tek.*, vol. 11, no. 2, p. 155, 2017, doi: 10.54378/bt.v11i2.108.
- [24] H. Marpaung, “PENGARUH HEAT TREATMENT TERHADAP KEKERASAN DAN MIKROSTRUKTUR SPROCKET DRIVE DAN SPROCKET DRIVEN,” vol. 24, no. 1, pp. 27–36, 2016.
- [25] S. Anggoro, “Pengaruh Perlakuan Panas Quenching dan Tempering terhadap Laju Korosi pada Baja AISI 420,” *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 1, no. 2, p. 19, 2017, doi: 10.30588/jeemm.v1i2.257.
- [26] S. Kirono, E. Diniardi, and I. Prasetyo, “Analisa Perubahan Dimensi Baja AISI 1045 Setelah Proses Perlakuan PANAS (Heat Treathment),” *SINTEK J. J. Ilm. Tek. Mesin*, no. 1, pp. 1–11, 2010.
- [27] A. I. S. Magdalena Feby Kumayasari, “Studi Uji Kekerasan Rockwell Superficial VS Micro Vickers Comparison Study Of Hardness Testing By Using Rockwell Superficial VS Microvickers,” *J. Teknol. Proses dan Inov. Ind.*, vol. 2, no. 2, pp. 85–88, 2017.
- [28] I. Hardiyanti, “Pengaruh Temperatur Austenisasi Dan Waktu Tahan Terhadap Sifat Mekanik, Tebal Scale Dan Struktur Mikro Pada Baja Paduan Ni-Cr-Mo,” *J. Furn.*, 2015, [Online]. Available: <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jf/article/view/1672>.
- [29] M. O. H. Amuda, T. F. Lawal, T. A. Olaniyan, and G. A. Oladapo, “a Quenching Media Effect on the Mechanical Properties of Medium Carbon Dual Phase Steel,” *J. Chem. Technol. Metall.*, vol. 55, no. 4, pp. 895–909, 2020.

- [30] P. Zhang, Y. Chen, W. Xiao, D. Ping, and X. Zhao, "Progress in Natural Science : Materials International Twin structure of the lath martensite in low carbon steel," *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, vol. 26, no. 2, pp. 169–172, 2016, doi: 10.1016/j.pnsc.2016.03.004.
- [31] M. Firman, F. Herlina, and M. Hatif Martadinata, "ANALISA KEKERASAN BAJA ST 42 DENGAN PERLAKUAN PANAS MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI," *J. Tek. Mesin UNISKA Univ. Islam Kalimantan Muhammad Arsyad Al Banjari Jln. Adhyaksa*, vol. 01, no. 022, pp. 1–9, 2016.
- [32] R. Dwiwandono, L. Firmansyah, S. Herbirowo, M. Y. Hasbi, and F. Citrawati, "ANALISA STRUKTURMIKRO DAN PENGARUHNYA TERHADAP SIFAT MEKANIS BATANGAN REL TIPE R54," vol. 2, pp. 67–76, 2017.
- [33] S. R. Sailon, "Analisis Perubahan Kekerasan Dan Struktur Mikro Hasil Perlakuan Panas Produk Pandai Besi Dengan Menggunakan Media Pendingin Batang Pisang," *Jurnal Austenit*, vol. 6, pp. 45–62, 2014.
- [34] D. Luhur and I. Saputra, "ANALISIS STRUKTUR MIKRO LOGAM STAINLESS STEEL TIPE SS 304 DI INSTALASI KHIPSB3," pp. 29–37, 2018.
- [35] A. Wijaya and A. H. A. Fakultas, "ANALISA KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS BAJA AISI 1045 AKIBAT HEAT TREATMENT DENGAN VARIASI TEMPERATUR DAN MEDIA QUENCHING AIR GARAM UNTUK APLIKASI SPROCKET GEAR."
- [36] D. Aditia, R. Usman, and Y. Yuniati, "Pengaruh Variasi Arus Dan Waktu Pada Anodisasi Type Hard Proses Terhadap Kekerasan Permukaan Aluminium," *J. Mesin Sains Terap.*, vol. 3, no. 2, pp. 47–52, 2019, [Online]. Available: <http://e-jurnal.pnl.ac.id/mesinsainsterapan/article/view/1220>.
- [37] Astrini, "Pengaruh Heat Treatment dengan Variasi Media Quenching Air dan Oli terhadap Struktur Mikro dan Nilai Kekerasan Baja Pegas Daun AISI 6135," *J. Teor. dan Apl. Fis.*, vol. 4, no. 02, pp. 195–200, 2016.
- [38] K. T. Kusuma Putra, A. Hermawan Riyanto, and T. Fajar Purbosari, "Jurnal Analisis Perawatan Jalan Rel Lintas Mandai - Palanro Komang Trisna Kusuma Putra_Mtp 3.4," pp. 1–11, 2022.
- [39] Herwandi, "Analisa Perubahan Struktur Akibat Heat Treatment," *J. Tek. Mesin*, vol. 7, pp. 57–62, 2005.
- [40] Sumiyanto, "PENGARUH MEDIA PENDINGIN TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PLAT BAJA KARBON ASTM A-36."