

Investigasi Penambahan Betaine pada Media Quenching Surface Treatment untuk Meningkatkan Nilai Kekerasan Rel Kereta Api UIC R54

Fadli Rozaq^{*1}, Hari Boedi Wahjono¹, Rafli Rianzah Putra¹, Willy Artha Wirawan², Marwan Effendy³

¹Teknologi Mekanika Perkeretaapian, Politeknik Perkeretaapian Indonesia
Tirta Raya Pojok, Nambangan Lor, Manguharjo, Madiun, 63161 Indonesia

²Department of Aircraft Maintenance Engineering, Politeknik Penerbangan Surabaya
Jemur Andayani I No 73 Wonocolo, Surabaya 60236, Indonesia

³Department of Mechanical Engineering Universitas Muhammadiyah Surakarta
Pabelan, Kartasura, Surakarta, 57102, Indonesia

*E-mail: fadli@pengajar.ppi.ac.id

Diajukan: 27-07-2023; Diterima: 14-04-2024; Diterbitkan: 29-04-2024

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi tingkat keefektifan penambahan *betaine* pada media *quenching* dalam proses *surface treatment* di rel kereta api tipe UIC R54. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu diawali dengan perlakuan *surface treatment* pada rel dibagian permukaannya. Media *quenching* yang dipakai adalah campuran air dengan *betaine* dengan perbandingan 65:35 wt%. Spesimen rel yang sudah mendapat perlakuan selanjutnya dilakukan pengukuran nilai kekerasan permukaan dan pengamatan struktur mikro. Nilai kekerasan *raw material* rel menunjukkan angka 283,52 BHN. Pada spesimen yang telah mendapat perlakuan, nilai kekerasannya menunjukkan angka 297,97 BHN. Fasa yang terbentuk pada spesimen *raw material* rel didominasi oleh *pearlite* dan *ferrite*. Untuk fasa yang terbentuk pada spesimen yang telah mendapat perlakuan adalah *martensite*. Kesimpulan dari penelitian ini adalah campuran *betaine* 35% dengan air 65% sebagai media *quenching* pada proses *surface treatment* memberikan hasil yang baik untuk menambah kekerasan permukaan rel.

Kata kunci: kekerasan; media pendingin; struktur mikro; *surface treatment*; rel UIC R-54

Abstract

This study aimed to investigate the effectiveness of adding *betaine* to quenching media in the surface treatment process on UIC R54 type railroads. The method used in this research is to first perform surface treatment on the surface of the rail specimen. The quenching medium used is a mixture of water and *betaine* with a ratio of 65:35%. Rail specimens that have received treatment are then carried out by measuring the surface hardness value and observing the microstructure. The hardness value of the rail raw material shows the number 283.52 BHN. In the treated specimens, the hardness value shows 297.97 BHN. The phase formed on the rail raw material specimen is dominated by *pearlite* and *ferrite*. The phase formed on the treated specimen is *martensite*. This study concludes that a mixture of 35% *betaine* and 65% water as a quenching medium in the surface treatment process gives effective results to increase the surface hardness of the rail.

Keywords: hardness; microstructure; quenching media; surface treatment; UIC R.54 railroad

1. Pendahuluan

Rel keriting, retak, terkelupas, dan keausan pada permukaan rel hanyalah beberapa masalah yang sering terjadi pada rel kereta api. Masalah ini muncul akibat adanya beban berlebih pada rel yang disebabkan oleh kereta api yang melintas. Selain itu, rel kereta api dapat mengalami kerusakan karena elemen geometri yang merugikan dan kualitas fabrikasi rel kereta api yang tidak standar[1].

Masalah lain yang sering muncul antara lain karat pada rel, yang membuatnya cepat aus jika terus bergesekan dengan roda kereta [2]. Agar tingkat keausan rel dapat dikurangi, kualitas mekanik rel harus ditingkatkan. Tingkat keausan ini dipengaruhi oleh nilai kekerasan rel terutama permukaan kepala rel yang bersentuhan dengan roda.

Demi meminimalisir serta mencegah terjadinya permasalahan di jalan rel, maka dibutuhkan inovasi peralatan perawatan jalan rel. Mahendra (2020) pada penelitiannya telah menghasilkan *Prototype Automatic Surface Treatment* yang berfungsi untuk mengeraskan permukaan rel dengan metode *flame hardening*. Menurut Wirawan et al, alat

automatic surface treatment ini mempunyai beberapa kelebihan, salah satunya alat ini dapat beroperasi secara otomatis sehingga dapat mengefisienkan jumlah pekerja dan juga mempermudah proses pekerjaan perawatan jalan rel [3]. Alat *automatic surface treatment* ini juga dapat mengurangi laju keausan pada jalan rel sebesar 66,76% [4]. Selain itu, alat ini juga mudah digunakan karena dari segi desain serta teknologi telah sesuai dengan kondisi saat ini [5]. Disamping itu alat ini juga masih perlu dilakukan pengembangan agar kinerjanya semakin optimal.

Dengan menerapkan perlakuan panas ke permukaan rel dengan api gas oxy-acetylene hingga diatas suhu kritis, *flame hardening* adalah teknik yang sangat membantu untuk mengeraskan permukaan rel dan untuk meningkatkan kualitas sifat mekaniknya. Permukaan rel kemudian didinginkan menggunakan media *quenching* tertentu. Media *quenching* yang digunakan akan berdampak pada tingkat kekerasan permukaan rel.

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk melakukan pengerasan pada permukaan rel adalah metode *flame hardening*. Metode ini dapat memperbaiki sifat mekanik dari permukaan rel dengan cara memberikan perlakuan panas dengan nyala api gas oksasi-asitilen hingga diatas temperature kritis. Permukaan rel yang telah mendapat *heat treatment* dilakukan pendinginan dengan cepat (*quenching*) dengan media *quenching* tertentu. Hasil pengerasan rel sangat dipengaruhi oleh faktor media *quenching* yang digunakan.

Media pendingin yang digunakan pada *prototype automatic surface treatment* ini adalah air. Air memiliki sejumlah manfaat saat digunakan dalam prosedur perawatan permukaan, termasuk tidak beracun, tidak mudah terbakar, dan laju pendinginan yang cepat. Air masih memiliki sisi negatif, termasuk fakta bahwa sering menyebabkan proses perawatan permukaan retak dan mempercepat laju korosi [6]. Meningkatnya laju korosi akan membuat peningkatan kekerasan sisa. Oleh karena itu dibutuhkan tambahan bahan lain yang dapat menghambat laju korosi yang ditimbulkan oleh media *quenching* air [7].

Salah satu inhibitor alami korosi adalah asam amino. Banyak senyawa kimia organik yang mengandung asam amino, salah satunya adalah *betaine*. *Betaine* ini sangat tepat untuk digunakan pada alat ini karena sifatnya yang stabil, ramah lingkungan, dan yang paling penting adalah tidak beracun [8]. Selain itu, *betaine* biasanya juga dijadikan campuran untuk *coolant* pada sistem pendingin *engine*. Berdasarkan hal tersebut, *betaine* dapat digunakan untuk menjadi campuran air untuk menjadi media *quenching* pada proses *surface treatment* rel.

Berdasarkan pembahasan diatas maka diperlukan penelitian agar pengaplikasian campuran air dan *betaine* dapat memberikan hasil yang optimal sebagai media *quenching* untuk meningkatkan nilai kekerasan permukaan rel kereta api. Maka dari itu penulis tertarik melaksanakan penelitian mengenai penambahan *Betaine* di media *quenching* dalam proses *surface treatment* untuk Rel UIC R54.

2. Material dan metodologi

2.1. Material

Rel yang digunakan pada penelitian ini adalah rel UIC R54. Berdasarkan literasi dari JFE Steel Corporation rel UIC R-54 mempunyai spesifikasi teknis yaitu, nilai kekerasan 320-388 BHN, *tensile strength* minimal 880-1030 N/mm², dan *elongation* minimal 8 %, *test piece* D = 10 mm[9]. Sedangkan *Betaine*, juga disebut sebagai trimethylglycine (TMG), adalah zat yang terbuat dari turunan asam amino alami yang sering ditemukan dalam makanan rata-rata orang. Ekstrak gula bit adalah tempat zat ini pertama kali diidentifikasi pada abad ke-19 dan karena karakteristik ion zwitternya, *betaine* mudah larut dalam air. Selain itu, menurut penemuan yang dilakukan oleh Jokinen et al. (2004) *Betaine* aman untuk lingkungan, efektif, stabil, dan mencegah karat. Berdasarkan *data sheet* yang diterbitkan oleh Acros Organics [10]. *Betaine* juga mempunyai beberapa karakteristik sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 1.

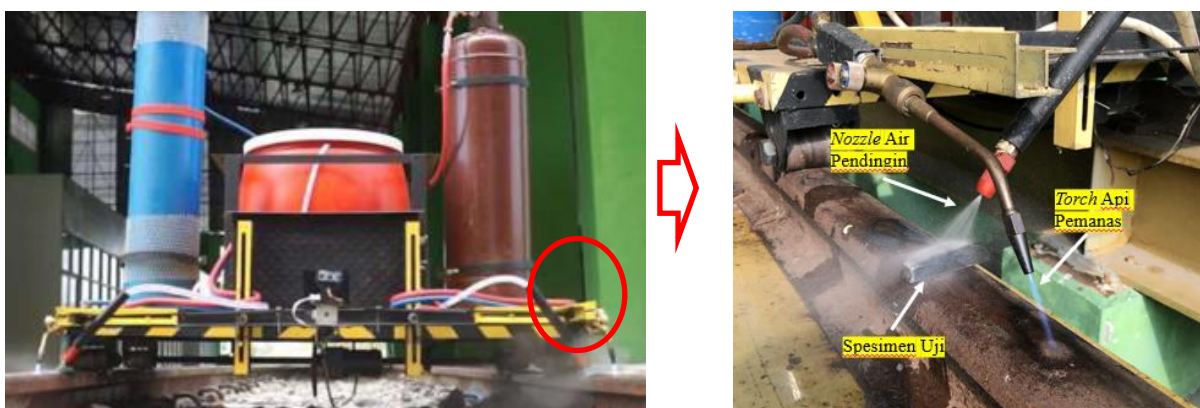
Tabel 1. Karakteristik *Betaine*

No.	Karakteristik	Keterangan
1.	Rumus Kimia	$C_5H_{11}NO_2$
2.	Sifat	Stabil
3.	Massa molar	117.15 g/mol
4.	Keadaan Fisik	Putih, <i>Solid</i>
5.	Bau	Sedikit bau khas
6.	pH	5 - 7 (5% aq. sol.)
7.	<i>Melting Point</i>	301 °C / 573.8 °F

2.2. Treatment

Perawatan diterapkan pada permukaan logam untuk menciptakan ketahanan gesekan dan kondisi yang baik. Pengerasan permukaan diperlukan untuk memberikan kualitas material yang tahan korosi dan tahan aus karena kontak yang tinggi antara kedua komponen, mencegah material dari kerusakan atau cacat. Umur komponen dapat meningkat sebagai akibat dari pengerasan permukaan. Nilai kekerasan permukaan dapat ditingkatkan dengan menggunakan berbagai teknik. *Flame hardening* adalah salah satu teknik yang cepat dan efektif [11]. Permukaan tipis baja dipanaskan sampai suhu kritisnya dan kemudian diberi perlakuan panas yang disebut *flame hardening*. Permukaan baja akan menjadi austenitik selama prosedur pemanasan ini. Setelah itu, baja dengan cepat di *quenching*, dan permukaannya berubah dari struktur austenit menjadi martensit tanpa mempengaruhi inti baja. (Budiman et al, 2016).

Persiapan betaine dan persiapan spesimen adalah tahap pertama dalam penelitian ini. 350 gram betaine digunakan dalam penelitian ini, dan dilarutkan dalam 650 ml air. Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah rel UIC R54 dengan ketebalan 15 mm dan lebar 15 mm. Spesimen ini akan dibersihkan dari karat atau kotoran di permukaan menggunakan amplas dan *thinner* sebelum menerima perawatan permukaan. *Prototype Automatic Surface Treatment* selanjutnya akan digunakan untuk melakukan proses *surface treatment* (Gambar 3). Ada berbagai langkah untuk prosedur *surface treatment*. Pertama melibatkan pemanasan permukaan spesimen dengan nyala api netral dari gas *oxy-acetylene* 1:1 dengan suhu nyala ± 1275 °C. Setelah proses pemanasan kemudian dilakukan proses *quenching* menggunakan media pendingin yang terbuat dari larutan 65% air dan 35% betaine.



Gambar 1. Proses *Surface Treatment*

Spesimen rel R54 tanpa perlakuan permukaan dan spesimen R54 dengan media quenching air dan *betaine* merupakan dua spesimen rel yang digunakan dalam penelitian ini. Untuk mempermudah pemrosesan selanjutnya, kedua spesimen diberi kode nama, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Kode Penamaan Spesimen

Kode	Arti
Spesimen A	Spesimen R54 tanpa perlakuan <i>surface treatment</i>
Spesimen B	Spesimen R54 dengan media <i>quenching</i> air dan <i>betaine</i>

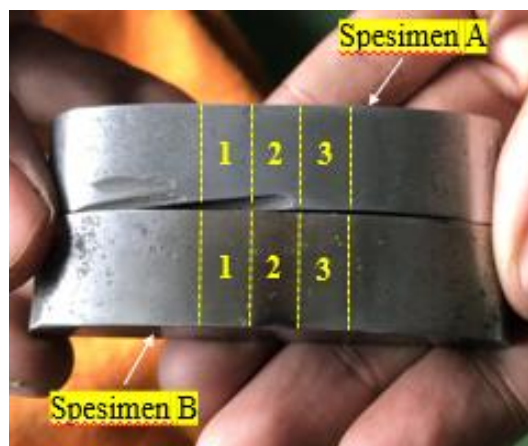
2.3. Pengujian Spesimen

Pengujian specimen difokuskan pada area HAZ (*Heat Affected Zone*) dipermukaan spesimen, maka terdapat tiga posisi pengujian yang digunakan baik untuk uji kekerasan maupun untuk mempelajari struktur mikro spesimen. Kode penamaan posisi pengujian pada permukaan spesimen dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 2. Kode Posisi Pengujian

Kode	Arti
A1	Posisi uji I spesimen A
A2	Posisi uji II spesimen A
A3	Posisi uji III spesimen A
B1	Posisi uji I spesimen B
B2	Posisi uji II spesimen B
B3	Posisi uji III spesimen B

Setelah itu, alat uji Brinell tipe GNEHM HORGEM OM 150 digunakan untuk melakukan uji kekerasan Brinell. Indentor 5 mm dan berat 250 kgf digunakan dalam pengujian ini. Untuk waktu penahanan tertentu antara 15 dan 20 detik. Prosisi pengujian ditunjukkan pada Gambar 4. Pembersihan permukaan benda uji dilakukan sebagai persiapan untuk pengujian struktur mikro. Amplas yang digunakan berkisar pada kekasaran dari yang paling kasar hingga yang paling halus. Dengan menggunakan Autosol, permukaan spesimen kemudian dipoles. Permukaan spesimen telah tergores untuk memungkinkan pengamatan mikroskopis dari batas butir dan fase. 1 ml etsa tipe nital digunakan dalam penelitian ini. Terakhir, investigasi struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran sekitar 1500x.



Gambar 2. Posisi Pengujian

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Hasil Pengujian Kekerasan

Ada 2 spesimen yang dilakukan pengujian kekerasan *brinell*, yaitu spesimen A dan spesimen B. Untuk spesimen A dilakukan pengujian pada 3 posisi A1, A2, dan A3. Pada posisi A1 memiliki nilai kekerasan sebesar 283,18 BHN, posisi A2 sebesar 284,45 BHN dan posisi A3 sebesar 282,92 BHN. Rata-rata nilai kekerasan spesimen A yang diuji memiliki nilai sebesar 283,52 BHN sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kekerasan Spesimen A

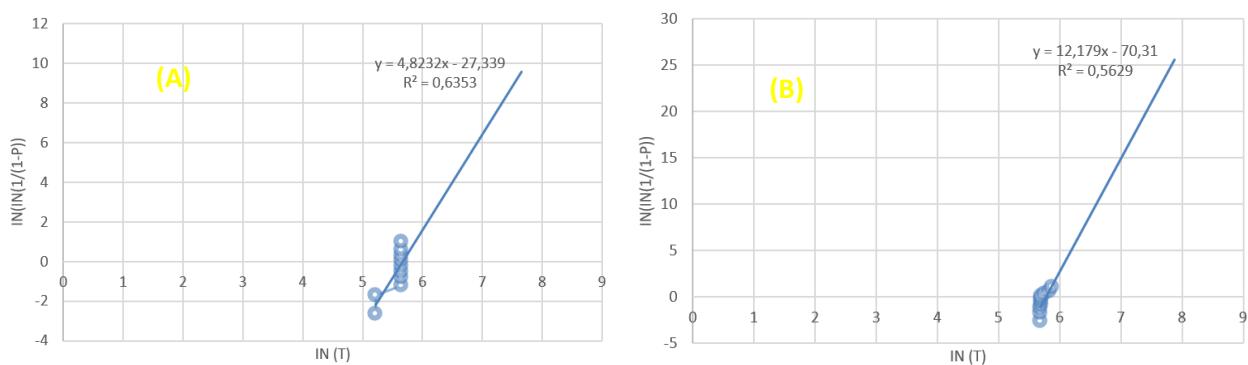
Spesimen	Nilai Kekerasan (BHN)
A1	283,18
A2	284,45
A3	282,92
Rata-rata	283,52 BHN

Sedangkan pada spesimen B, juga dilakukan pengujian kekerasan pada 3 posisi, yaitu pada posisi B1, B2, dan B3. Dimana pada posisi B1 memiliki nilai kekerasan sebesar 294,45 BHN, posisi B2 sebesar 302,93 BHN dan posisi B3 sebesar 296,53 BHN. Rata-rata nilai kekerasan spesimen B yang diuji memiliki nilai sebesar 297,97 BHN sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kekerasan Spesimen B

Spesimen	Nilai Kekerasan (BHN)
B1	294,58
B2	302,93
B3	296,53
Rata-rata	297,97 BHN

Pada Grafik Gambar 5 menunjukkan bahwa ada perbedaan antara spesimen A dan B, dan perbedaan ini menunjukkan bahwa nilai kekerasan logam dapat dinaikkan melalui *surface treatment*. Nilai rata-rata nilai kekerasan berdasarkan distribusi weibull yang dihasilkan pada spesimen A adalah 283,52 BHN. Sedangkan spesimen B menghasilkan nilai kekerasan rata-rata sebesar 297,97 BHN.



Gambar 5. Nilai Kekerasan Spesimen A dan B berdasarkan distribusi weibull

Nilai kekerasan benda uji, dalam contoh ini benda uji berbentuk logam, dapat ditingkatkan dengan pemanasan yang dilanjutkan dengan prosedur pendinginan cepat menggunakan media *quenching* tertentu[12]. Karena laju pendinginan yang lebih cepat akan memberikan nilai kekerasan yang lebih tinggi, media *quenching* disini sangat berpengaruh terhadap

nilai kekerasan yang dicapai [13]. Media quenching yang digunakan dalam penelitian ini adalah air dengan penambahan *betaine*, dan temuan pengujian spesimen menunjukkan peningkatan nilai kekerasan spesimen uji. Oleh karena itu, dapat dikatakan pemilihan media *quenching* air yang dikombinasikan dengan *betaine* berhasil karena dapat menaikkan nilai kekerasan suatu spesimen. Ini karena *betaine* bersifat stabil, sehingga sulit bereaksi membentuk molekul baru. Hasilnya, *betaine* ini tidak akan mengubah seberapa cepat air mendingin, yang menguntungkan untuk proses pendinginan.

3.2. Hasil Pengamatan Struktur Mikro

Setelah melakukan proses pengamatan dan pengambilan struktur mikro pada permukaan spesimen A dan spesimen B, diperoleh satu gambar pembentukan fasa di setiap posisi pengujian. Gambar 6(a) sampai dengan gambar 6(c) menunjukkan gambar struktur mikro spesimen *raw material* di masing-masing posisi pengujian pada spesimen A. Dapat diamati bahwa pembentukan fasa pada setiap posisi pengujian rata-rata sama yaitu didominasi oleh fasa *ferrite* dan *pearlite*. Fasa *ferrite* pada gambar diatas berwarna terang (putih), sedangkan fasa *pearlite* berwarna gelap (hitam). Fasa *ferrite* dan *pearlite* yang terbentuk masih kasar namun sudah merata.



Gambar 6. Struktur Mikro; (a) A1 (b) A2 (c) A3

Sedangkan, gambar 7(a) sampai dengan gambar 7(c) menunjukkan gambar struktur mikro pada spesimen yang telah mendapat *surface treatment* dengan menggunakan media *quenching* air dan *betaine* di masing-masing posisi pengujian. Dapat diamati bahwa terdapat pembentukan fasa *martensite* pada spesimen. Fasa *martensite* pada gambar diatas berwarna gelap dengan bentuk seperti jarum dan tidak beraturan. Fasa *martensite* ini terbentuk karena adanya karbon yang tidak dapat berdifusi keluar saat terjadinya proses pemanasan dan pendinginan secara cepat pada permukaan spesimen[14].

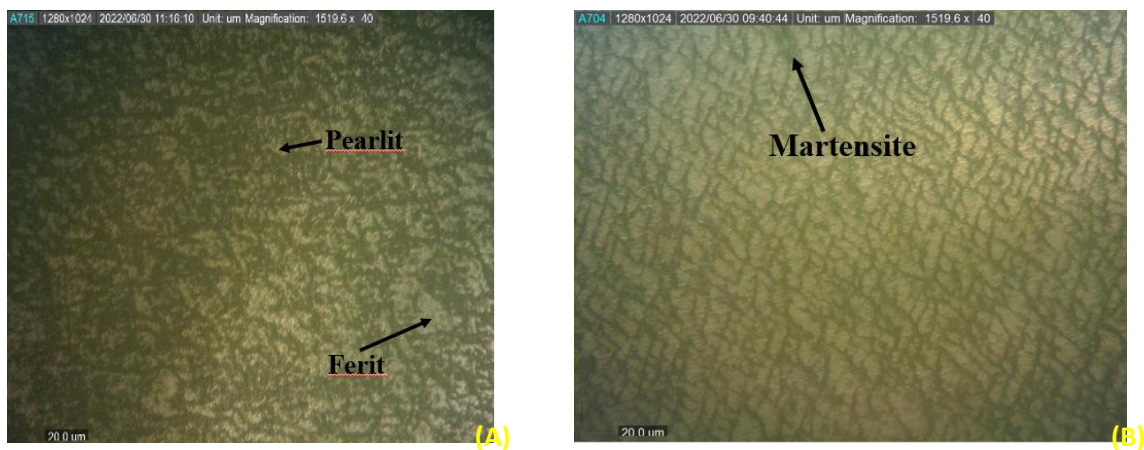


Gambar 7. Struktur Mikro; (a) B1 (b) B2 (c) B3

Beberapa temuan ditampilkan dalam bentuk foto untuk setiap spesimen setelah mengamati struktur mikro spesimen rel R54 baik tanpa maupun dengan *surface treatment*. Ada 3 gambar struktur mikro pada tiap-tiap spesimen. Namun, pada

sub bab ini diambil satu gambar untuk dilakukan pembahasan. Pemilihan gambar yang diambil berdasarkan nilai kekerasan tertinggi di posisi uji spesimen. Untuk spesimen A, dipilih gambar struktur mikro pada posisi pengujian A2 dikarenakan memiliki nilai kekerasan tertinggi yaitu 284,45 BHN. Sedangkan, untuk spesimen B, dipilih gambar struktur mikro pada posisi pengujian B2 yang memiliki nilai kekerasan sebesar 303,93 BHN.

Dapat diamati dari Gambar 8(a), Fase ferit dan perlit mendominasi Spesimen A, yang tidak menerima perlakuan permukaan apapun. Pada spesimen ini, ferit berwarna putih, sedangkan fase perlit berwarna gelap. Karakteristik spesimen A lebih lembut daripada spesimen B karena konfigurasi dua fasa ini. Sedangkan pada Gambar 8(b) yaitu struktur mikro spesimen B yang mendapat perlakuan *surface treatment* dengan media *quenching* air dan *betaine*, didapatkan pembentukan fasa *martensite* yang memiliki kekerasan tertinggi daripada fasa yang lain.



Gambar 8. Struktur Mikro Spesimen; (a) A dan (b) B

Panas yang diterima di daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) menyebabkan terbentuknya fasa martensit. Paparan pemanasan nyala api menghasilkan panas yang cukup untuk memanaskan permukaan material hingga permukaan rel mengalami austenisasi dan membentuk fasa austenit pada suhu 723⁰ C. Menurut Permana, spesimen di lokasi ini mengalami panas 759⁰ C[15]. Akibatnya, jika *quenching* terjadi dengan cepat, karbon dalam austenit tidak memiliki waktu untuk menyebar ke luar, menyebabkan pembentukan fasa martensit dengan struktur *Body Centered Tetragonal* (BCT). Jika dibandingkan dengan fase lainnya, fase martensit memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi.

4. Kesimpulan

Ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari hasil dan pembahasan yang telah dilakukan, antara lain nilai kekerasan rata-rata spesimen bahan mentah diukur, dan temuannya adalah 283,52 BHN. Nilai kekerasan rata-rata yang dicapai adalah 297,97 BHN setelah prosedur *surface treatment* selesai menggunakan media *quenching* air dan *betaine*. Spesimen yang terbuat dari bahan mentah adalah yang permukaannya belum dirawat. Oleh karena itu, kekerasannya lebih rendah daripada spesimen dengan permukaan yang dirawat. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *betaine* pada media *quenching* berhasil ditunjukkan dengan peningkatan nilai kekerasan spesimen. Setelah pengamatan struktur mikro pada permukaan spesimen, struktur fasa mengalami proses modifikasi akibat perlakuan permukaan. Ferit dan perlit mendominasi fase yang terbentuk pada spesimen bahan baku. Martensit, bagaimanapun, adalah fase yang dihasilkan dari prosedur perawatan permukaan menggunakan media pendinginan air dan *betaine*. Nilai kekerasan spesimen dinaikkan oleh fasa martensit yang memiliki nilai kekerasan maksimum.

Ucapan terima kasih

Teriring rasa syukur dan terimakasih Penulis sampaikan kepada Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun atas segala dukungan sehingga penelitian ini dapat tercapai sesuai target. Tidak lupa penulis juga mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] W. A. Wirawan, H. B. Wahjono, and F. Rozaq. Desain Prototype Teknologi Automatic Surface Treatment Untuk Meningkatkan Ketahanan Jalan Rel Kereta Api. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia. (Indonesian Railway Journal)*, vol. 4, no. 1, 2020, doi: 10.37367/jpi.v4i1.98.
- [2] A. Wanaradi, W. A. Wirawan, and T. S. S. I. Mahendra. Design dan Manufacture Prototype Surface Treatment untuk Meningkatkan Ketahanan Permukaan Jalan Rel. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia. (Indonesian Railway Journal)*, vol 4, no.96, 2020.
- [3] T. S. S. I. Mahendra. Pembuatan Prototype Surface Treatment Untuk Meningkatkan Ketahanan Permukaan Rel Kereta Api. Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun, 2020.
- [4] F. P. Pamungkas, W. A. Wirawan, and N. F. Rachman. Rancang Bangun Surface Treatment Rail Sebagai Upaya Mengurangi Keausan Pada Jalan Rel Kereta Api. *Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi ke-24*, no. November, pp. 4–6, 2021.
- [5] W. A. Wirawan, T. A. Cundoko, H. B. Wahjono, and F. Rozaq, “Rancang Bangun Prototipe Surface Treatment Untuk Meningkatkan Ketahanan Pada Permukaan Jalan Rel Kereta Api,” *Jurnal Perkeretaapian Indonesia.*, vol. V, pp. 1–9, 2021.
- [6] A. Ilves and M. Lindström. Method for Transferring Heat Utilizing Heat Transfer/Cooling Fluid Having Tri-Methyl Glycine,” 2000.
- [7] A. P. Yanuar, H. Pratikno, and H. S. Titah, “Pengaruh Penambahan Inhibitor Alami terhadap Laju Korosi pada Material Pipa dalam Larutan Air Laut Buatan,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, pp. 8–13, 2017, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.18938.
- [8] Jokinen, Janne, and FI, “Water-Based Coolant Fluid For Engine Applications,” 2004.
- [9] JFE Steel Corporation, “RAIL.” <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/shapes/catalog/d1e-001.pdf> (accessed Apr. 25, 2023).
- [10] Acros Organics, “Material Safety Data Sheet Betaine,” 2009.
- [11] J. Budiman and R. Safutra, “Pembuatan dan Pengujian Alat Bantu Flame Hardening Untuk Meningkatkan Kekerasan Permukaan Poros Dengan Media Quenching Air,” *STEMAN 2016*, pp. 1–7, 2016.
- [12] A. Mersilia, P. K. Karo, and I. Supriyatna, “Pengaruh Heat Treatment Dengan Variasi Media Quenching Air Garam dan Oli Terhadap Struktur Mikro dan Nilai Kekerasan Baja Pegas Daun AISI 6135,” *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika.*, vol. 4, no. 02, pp. 175–180, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.23960%2Fjtaf.v4i2>.
- [13] S. Luthfianto, Z. A. Suprayogi, and D. Samyono. Pengaruh Variasi Media Quenching Terhadap Sifat Mekanis Rantai Elevator Fruit Kelapa Sawit. *JST (Jurnal Sains dan Teknoloni)*, vol. 6, no. 1, pp. 0–9, 2017, doi: 10.23887/jst-undiksha.v6i1.9396.
- [14] F. R. Bethony, D. Program, S. Teknik, F. Teknik, and K. I. Toraja. Analisis Perlakuan Panas Bertahap terhadap Kekerasan dan Kekuatan Tarik Baja Karbon Rendah. *Dynamic Saint*, vol. 02, no. 1, 2016, doi: <https://doi.org/10.47178/dynamicsaint.v2i1.310>.
- [15] H. B. Wahjono. Pengujian Kekerasan dan Pengamatan Foto Makro Automatic Surface Treatment Rel dengan Variasi Jarak Torch Pemanas Dan Nozzle Pendingin. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia*, vol. 5, no. 2, pp. 46–54, 2021, doi: <https://doi.org/10.37367/jpi.v5i2.158>.