

# PENGEMBANGAN MATERIAL TAPAK RODA KERETA API IMPOR DENGAN PENAMBAHAN PADUAN DAN PERLAKUAN PANAS NORMALISASI PENDINGINAN KIPAS

## DEVELOPMENT OF IMPORTED TRAIN WHEEL TRACK USING ALLOYING AND NORMALIZING HEAT TREATMENT BY FAN COOLING

SRI BIMO PRATOMO<sup>1,3</sup>, HUSEN TAUFIQ<sup>2</sup>, EVA AFRILINDA<sup>3</sup>, MARTIN DOLOKSARIBU<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kepala Seksi Pengecoran Logam Dan Perlakuan Panas Balai Besar Logam Dan Mesin

<sup>2</sup>Staf Seksi Pengecoran Logam Dan Perlakuan Panas Balai Besar Logam Dan Mesin

<sup>3</sup>Peneliti Balai Besar Logam Dan Mesin

E-mail: bimo\_bblm@yahoo.com

### ABSTRAK

Roda kereta api adalah satu-satunya komponen kereta api yang masih diimpor seluruhnya. Kebutuhan komponen ini cukup besar yaitu sekitar 30.000 keping pertahunnya, dan diprediksi akan meningkat terus. Pembuatan roda kereta api menurut standar *Association of American Railroads* (AAR) dapat melalui proses tempa atau pengecoran. Di Indonesia pembuatan komponen ini yang paling memungkinkan adalah dengan proses pengecoran. Penelitian ini adalah penelitian terapan yang dimulai dengan analisa material roda kereta api impor dan dilanjutkan dengan pengembangan material dan proses untuk membuat prototipe roda kereta api. Dari hasil pengujian kekerasan sebesar 36 HRC dimana lebih tinggi dibandingkan kekerasan tapak roda kereta api impor yang hanya 26 HRC. Struktur mikro prototipe tapak roda kereta api hasil normalisasi dengan pendinginan kipas adalah *aggregate bainite* di bagian bawah permukaan hingga 1 mm, dan *pearlite* yang sangat halus di bagian dalam antara 1 mm hingga 10 mm dari permukaan. Unsur molibden dan nikel sebagai *bainite promotor* menyebabkan terbentuknya *aggregate bainite*, sedangkan unsur mangan, krom dan tembaga berperan sebagai *partition elements* diantara *ferrite* dan *cementite* yang menghambat pertumbuhan *pearlite*, sehingga dihasilkan *pearlite* yang halus. Selain itu laju pendinginan yang cepat dari pendinginan kipas memperlambat difusi karbon di dalam *austenite* sehingga cenderung menghasilkan *aggregate bainite* di bagian permukaan serta *pearlite* halus di bagian dalam tapak prototipe roda kereta api hasil normalisasi dengan pendinginan kipas.

**Kata kunci:** tapak roda kereta api, *aggregate bainite*, *pearlite*, *ferrite*, *cementite*

### ABSTRACT

Only train wheels as the train components are all still imported. The necessity these components are quite large at around 30,000 pieces per year, and predicted to increase steadily. According to the *Association of American Railroads* (AAR) standard, the manufacturing of train wheels can be processed by forging or casting. In Indonesia the most feasible of manufacturing these components are the casting process. This research is applied research that began with the material analysis of imported train wheel and continued with the development of materials and process to create a train wheel prototype. From the hardness results of train wheel track prototype that normalized by cooling fan, obtained 36 HRC of hardness which is higher than the imported train wheel that only 26 HRC of hardness. The Microstructure of train wheel track prototype that normalized by cooling fan are *aggregate bainite* at the bottom up to 1 mm from the surface, and a very fine *pearlite* on the inside between 1 mm to 10 mm from the surface. The molybdenum and nickel as *bainite promoter* causes the formation of *aggregate bainite*, while the manganese, chromium and copper acts as the *partition elements* between *ferrite* and *cementite*, that inhibit the growth of *pearlite* resulting in very fine *pearlite*. Additionally the rapid cooling rate of the cooling fan slow down the diffusion of carbon in *austenite*, so it tends to produce *aggregate bainite* in the surface, as well as the very fine *pearlite* in the inside of the tread of train wheel track prototype that normalized by cooling fan.

**Keywords:** train wheel track, *aggregate bainite*, *pearlite*, *ferrite*, *cementite*

### PENDAHULUAN

Roda kereta api adalah satu-satunya komponen kereta api yang saat ini seluruhnya masih diimpor. Negara

pengekspor roda kereta api untuk Indonesia adalah Cina, baik sebagai suku cadang PT. Kereta Api Indonesia (PT. KAI) untuk mengganti roda yang sudah aus, maupun

sebagai komponen untuk merakit gerbong dan lokomotif baru yang diproduksi oleh PT. Industri Kereta Api (PT. INKA).

Saat ini panjang jalan kereta api yang beroperasi di Indonesia sepanjang 4.684 Km. Karena moda transportasi kereta api merupakan transportasi massal yang memiliki banyak keunggulan, maka rencana pengembangan perkeretaapian nasional telah menargetkan peningkatan panjang jalan kereta api pada tahun 2030 menjadi sepanjang 12.276 Km, atau meningkat sebesar 260%. Saat itu persentase penumpang kereta api dan angkutan barang dari seluruh moda transportasi, diprediksi naik menjadi 13 % dan 17 %, dimana saat ini hanya 7,3 % dan 0,6%<sup>1</sup>. Hal tersebut tentunya akan berimplikasi kepada peningkatan jumlah kebutuhan roda kereta api. Saat ini kebutuhan roda kereta api nasional pertahunnya adalah sekitar 30.000, dengan berat satu roda sekitar 320 kg<sup>2</sup>. Gambar 1 berikut ini memperlihatkan roda-roda kereta api yang sudah terpasang pada as-nya dan siap dipasang pada gerbong penumpang.

Tapak roda kereta api adalah bagian yang terpenting dari roda kereta api. Hal tersebut disebabkan karena tapak roda langsung bergesekan dengan rel. Tapak roda kereta api yang sudah aus sedalam 10 mm sudah tidak dapat digunakan sehingga harus diganti dengan roda kereta api yang baru. Gambar 2 berikut ini memperlihatkan potongan melintang tapak roda kereta api jenis CC untuk gerbong kereta angkutan penumpang maupun barang.



Gambar 1. Roda kereta api yang terpasang pada as-nya



Gambar 2. Potongan tapak roda kereta api jenis CC

Salah satu proses pembuatan roda kereta api adalah dengan menggunakan proses pengecoran. Dari standar Association of American Railroads (AAR) tahun 2009 tercantum bahwa pembuatan roda kereta api dapat menggunakan 2 cara yaitu dengan proses tempa atau proses pengecoran<sup>3</sup>. Proses pembuatan roda kereta api yang paling tepat dilakukan di Indonesia adalah dengan menggunakan proses pengecoran, karena lebih murah dan di Indonesia sudah banyak beroperasi industri pengecoran baja dengan fasilitas yang memadai. Bila membandingkan dengan proses tempa, industri tempa baja belum berkembang di Indonesia, selain itu proses tempa roda kereta api membutuhkan industri penghasil bahan baku *bloom*, yang membutuhkan dana besar sehingga mengharuskan pertimbangan ekonomi khusus untuk menginstalasinya. Hal tersebut mengakibatkan proses tempa roda kereta api di Indonesia sulit dilaksanakan.

Dari uraian terdahulu terlihat bahwa kebutuhan roda kereta di Indonesia cukup besar, tetapi masih diimpor seta proses pembuatan roda kereta api yang cocok untuk diterapkan di Indonesia adalah proses pengecoran. Hal tersebut yang melatarbelakangi untuk melakukan penelitian dan pengembangan material tapak roda kereta api dengan menggunakan proses pengecoran. Penelitian ini diawali dengan melakukan kajian material tapak roda kereta api impor sebagai data awal untuk memprediksi material dan proses dalam pembuatan prototipe roda kereta api.

## METODE

Penelitian ini adalah penelitian terapan yang dimulai dengan analisis material tapak roda kereta api impor. Analisis material dilakukan dengan cara menganalisis komposisi kimia, struktur mikro, serta hasil uji kekerasan yang diperoleh. Karakteristik material roda kereta api impor akan menjadi acuan untuk melakukan penelitian dan pengembangan material dan proses.

Material yang digunakan untuk membuat prototipe roda kereta api merupakan pengembangan material roda kereta api impor. Dilakukan penambahan unsur-unsur mangan (Mn), krom (Cr), nikel (Ni) dan tembaga (Cu). Nilai kekerasan dan analisa struktur mikro tapak roda kereta api impor dari China dibandingkan dengan nilai kekerasan dan analisa struktur mikro dari prototipe tapak roda kereta api setelah cor (*as-cast*), prototipe tapak roda kereta api setelah normalisasi dengan pendinginan udara, dan prototipe tapak roda kereta api setelah normalisasi dengan pendinginan kipas. Proses normalisasi dimulai dengan memanaskan prototipe tapak roda kereta api hingga temperatur 920°C, ditahan selama 1 jam, lalu didinginkan dengan udara bebas atau kipas angin. Pengujian kekerasan menggunakan metoda Rockwell tipe C. Analisa struktur mikro menggunakan *optical microscope* dan *scanning electron microscope* (SEM). Sedangkan analisa komposisi kimia menggunakan *optical emission spectrometer*. Gambar 3 berikut ini memperlihatkan prototipe roda kereta api pada saat pembongkaran dari cetakan pasir setelah proses pengecoran.



Gambar 3. Pembongkaran prototipe roda kereta api dari cetakan pasir

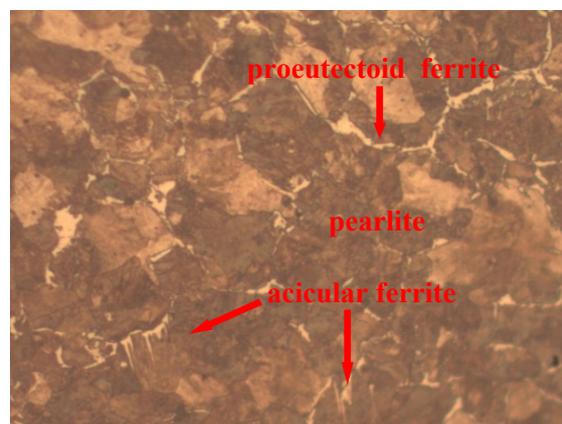
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi kimia roda kereta api impor dapat dilihat pada tabel 1 berikut ini. Dari komposisi kimia dapat disimpulkan bahwa material roda kereta api impor digolongkan sebagai baja karbon menengah dengan sedikit penambahan paduan unsur mangan dan krom. Diprediksi struktur mikro yang terbentuk adalah baja *pearlite* dengan adanya sedikit fasa *ferrite*. Mangan dan krom ditambahkan untuk mendorong terbentuknya fasa *pearlite* sekaligus menghasilkan karbida agar kekerasan dapat meningkat.

Tabel 1. Komposisi kimia roda kereta api impor

Fe	C	Si	Mn	P
sisia	0.52	0.32	0.76	0.012
S	Cr	Mo	Ni	Cu
0.008	0.17	<0.002	0.01	0.02

Dari hasil pengamatan struktur mikro tapak roda impor bagian permukaan, yaitu dari permukaan hingga kedalaman 1 mm, terlihat bahwa fasa *pearlite* sangat mendominasi. Ditemukan juga sedikit fasa *proeutectoid ferrite* pada batas butir fasa *pearlite*. Batas butir fasa *pearlite* merupakan batas butir fasa *austenite* sebelum fasa *pearlite* terbentuk. Beberapa bagian dari fasa *ferrite* adalah *acicular ferrite*. Gambar 4 berikut ini memperlihatkan struktur mikro tapak roda kereta api impor di bagian permukaan.

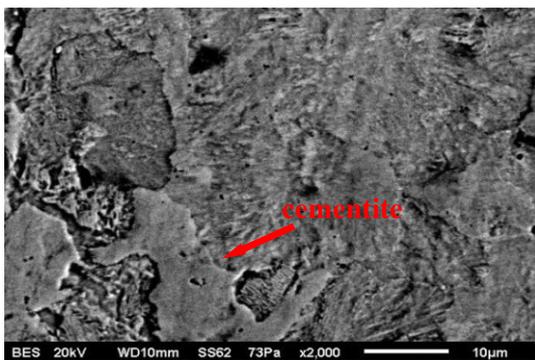


Gambar 4. Struktur mikro bagian permukaan tapak roda kereta api impor hasil pengamatan dengan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x

Struktur mikro tapak roda impor bagian dalam, yaitu kedalaman diatas 1 mm hingga 10 mm dibawah permukaan, tetap didominasi oleh fasa *pearlite*, sedikit fasa *ferrite* dan adanya karbida (*cementite*) pada batas butir *pearlite*. Gambar 5 berikut ini memperlihatkan struktur mikro yang menggunakan *optical microscope*. Sedangkan gambar 6 memperlihatkan struktur mikro yang menggunakan analisis *secondary electron image - scanning electron microscope*. Pada gambar 6 terlihat dengan jelas fasa *cementite* pada batas butir *pearlite*.



Gambar 5. Struktur mikro bagian dalam tapak roda kereta api impor hasil pengamatan dengan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x



Gambar 6. Struktur mikro bagian dalam tapak roda kereta api impor hasil pengamatan dengan *scanning electron microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 2000 x

Kekerasan dari tapak roda impor dapat dilihat pada tabel 2. Terlihat bahwa kekerasan pada bagian permukaan tapak roda lebih rendah dibandingkan dengan bagian dalamnya. Hal ini dapat dimengerti karena pada bagian dalam tapak roda terbentuk fasa *cementite* yang keras. Laju pendinginan yang lebih lambat pada bagian

dalam menyebabkan unsur mangan dan krom yang tidak larut di dalam larutan padat *austenite* akan tersegregasi pada batas butir *austenite*, lalu bersenyawa dengan besi dan karbon membentuk *cementite*,  $(Fe, Mn, Cr)_3C$ .

Tabel 2. Kekerasan tapak roda kereta api impor

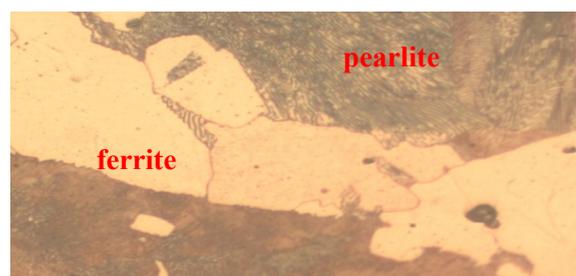
Kekerasan hingga 1mm dari permukaan (Bagian Permukaan)	Kekerasan 1 mm hingga 10 mm dari permukaan (Bagian Dalam)
23 HRC, setara 240 BHN	26 HRC, setara 258 BHN

Komposisi kimia prototipe roda kereta api dapat dilihat pada tabel 3 berikut ini. Perbedaan komposisi kimia dengan roda kereta api impor adalah kandungan unsur-unsur mangan (Mn), krom (Cr), molibden (Mo), nikel (Ni) dan tembaga (Cu) yang lebih besar. Mangan, krom dan tembaga dikenal sebagai *pearlite promotor*, sedangkan molibden dan nikel dikenal sebagai *bainite promotor*<sup>41</sup>. Diharapkan struktur yang terbentuk merupakan gabungan dari *bainite* dan *pearlite*.

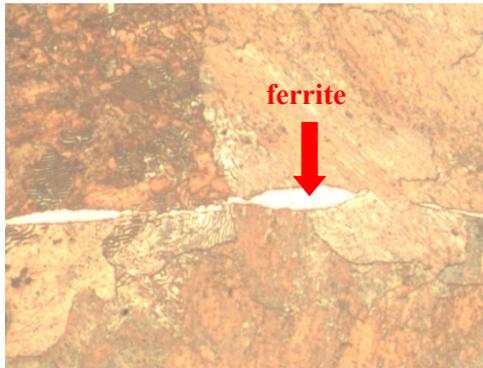
Tabel 3. Komposisi kimia prototipe roda kereta api

Fe	C	Si	Mn	P
sisia	0.64	0.38	0.94	0.02
S	Cr	Mo	Ni	Cu
0.01	0.24	0.1	0.19	0.3

Gambar 7 dan 8 berikut ini memperlihatkan struktur mikro hasil pengamatan menggunakan *optical microscope* dari prototipe tapak roda tanpa perlakuan panas (*as-cast*) untuk bagian permukaan dan pada bagian dalam.

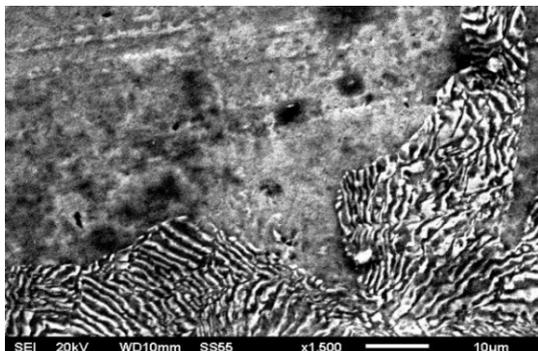


Gambar 7. Struktur mikro bagian permukaan prototipe tapak roda kereta api *as-cast* yang menggunakan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x



Gambar 8. Struktur mikro bagian dalam prototipe tapak roda kereta api *as-cast* yang menggunakan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x

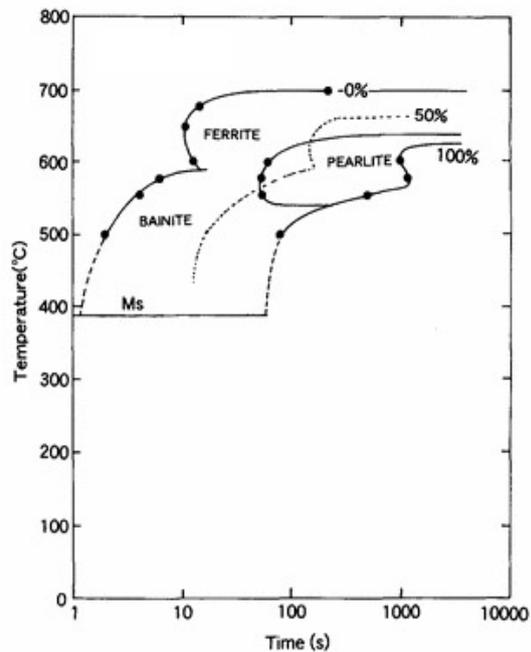
Dari gambar 7 terlihat bahwa prototipe tapak roda *as-cast* pada bagian permukaan terdiri dari fasa *pearlite* dan fasa *ferrite* dengan jumlah yang hampir sama. Sedangkan dari gambar 8 terlihat bahwa bagian dalam memiliki jumlah fasa *ferrite* yang semakin berkurang. Gambar 9 adalah hasil struktur mikro yang menggunakan *secondary electron image*, yang memperlihatkan fasa *pearlite* yang terdiri dari lamel-lamel *cementite* yang kasar.



Gambar 9. Struktur mikro bagian dalam tapak roda kereta api prototipe *as-cast* hasil analisa scanning electron microscope, menggunakan etsa nital 5%, perbesaran 1500 x

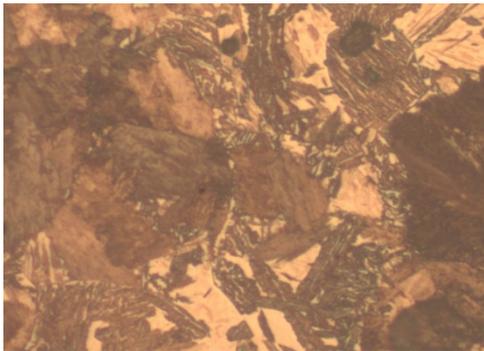
Gambar 10 memperlihatkan kurva *continuous cooling transformation* (CCT) untuk baja karbon paduan rendah<sup>51</sup>. Bila merujuk kepada kurva CCT tersebut, dengan adanya peningkatan laju pendinginan maka fasa *ferrite* yang terbentuk akan lebih banyak dibandingkan fasa *pearlite*. Hal tersebut sesuai dengan pengamatan struktur mikro dari prototipe tapak roda *as-cast*, yang memperlihatkan bahwa fasa *ferrite* pada bagian permukaan

(laju pendinginan lebih cepat) jumlahnya lebih banyak dibandingkan pada bagian dalam (laju pendinginan lebih lambat). Proses pembentukan fasa *pearlite* dikontrol oleh laju difusi karbon. Laju pendinginan yang cepat tidak memberikan kesempatan pada karbon untuk berdifusi, sehingga *austenite* cenderung bertransformasi menjadi *ferrite* dibandingkan menjadi *pearlite*.

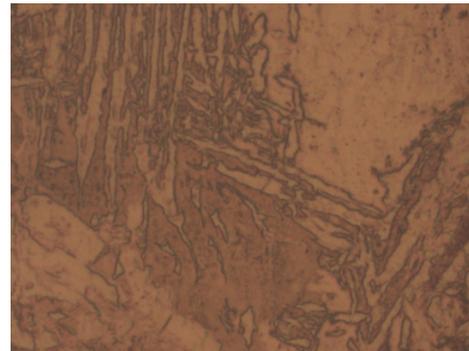


Gambar 10. Kurva CCT untuk baja karbon paduan rendah<sup>51</sup>

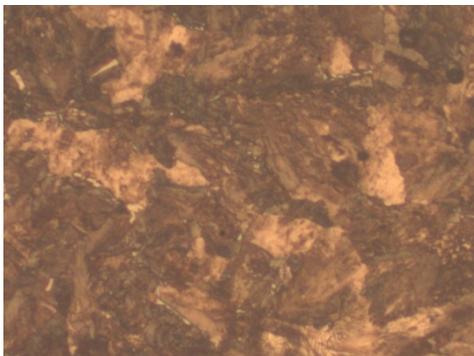
Gambar 11 dan gambar 12 memperlihatkan struktur mikro yang menggunakan *optical microscope* dari prototipe tapak roda dengan perlakuan panas normalisasi pendinginan udara bebas, masing-masing untuk bagian permukaan dan bagian dalam. Terlihat bahwa mikrostruktur pada bagian permukaan terdiri dari fasa *pearlite* dan fasa *ferrite*, dengan jumlah *pearlite* yang lebih banyak. Sedangkan bagian dalam seluruhnya terdiri dari fasa *pearlite*, dengan kekasaran yang tidak sama. Laju pendinginan udara, yang memiliki laju pendinginan yang lebih cepat dibandingkan *as-cast*, serta ditunjang adanya unsur mangan, krom serta tembaga akan mendorong pembentukan fasa *pearlite*. Semakin ke dalam, laju pendinginan semakin berkurang, sehingga jumlah fasa *ferrite* juga semakin berkurang.



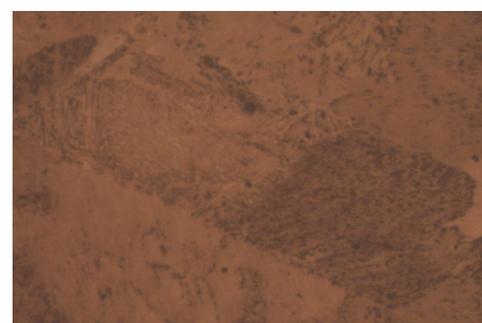
Gambar 11. Struktur mikro bagian permukaan prototipe tapak roda kereta api normalisasi pendinginan udara yang menggunakan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x



Gambar 13. Struktur mikro bagian permukaan prototipe tapak roda kereta api normalisasi pendinginan kipas yang menggunakan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x



Gambar 12. Struktur mikro bagian permukaan prototipe tapak roda kereta api normalisasi pendinginan kipas yang menggunakan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x

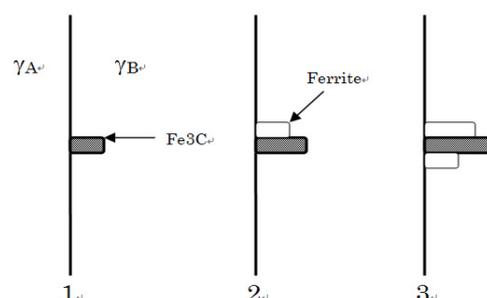


Gambar 14. Struktur mikro bagian dalam prototipe tapak roda kereta api normalisasi pendinginan kipas yang menggunakan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x

Gambar 13 dan 14 berikut memperlihatkan struktur mikro prototipe tapak roda kereta dengan perlakuan panas normalisasi pendinginan kipas, masing-masing untuk bagian permukaan dan bagian dalam. Pada bagian permukaan struktur mikro yang terbentuk adalah *bainite* dengan morfologi seperti *upper bainite*. Beberapa peneliti memberi nama *aggregate bainite* atau *ferrite/carbide aggregate bainite* (FCA), yang terdiri dari sebaran partikel *cementite* halus di dalam matriks *ferrite*<sup>6,7</sup>. Bila merujuk pada kurva CCT di gambar 10, terlihat bahwa dengan pendinginan yang lebih cepat dan komposisi yang sesuai, maka ada kemungkinan untuk dapat terbentuk fasa *bainite*. Unsur molibden dan nikel sebagai *bainite promotor* berperan dalam mendorong pembentukan *bainite*.

Pada bagian dalam terlihat bahwa fasa yang terbentuk seluruhnya adalah *pearlite* yang sangat halus. Batas butir *austenite* adalah tempat nukleasi dari *pearlite*<sup>8,9</sup>.

Gambar 15 berikut ini memperlihatkan ilustrasi pembentukan *pearlite* pada batas butir *austenite*, yang diawali dengan nukleasi *cementite* pada batas butir. Kadar karbon pada *austenite* di sekitar lamel *cementite* yang bernukleasi akan berkurang karena adanya difusi karbon menuju lamel *cementite* yang tumbuh. Hal tersebut menyebabkan *ferrite* akan terbentuk disekeliling *cementite* tersebut. Hal ini berlangsung secara terus menerus sehingga terbentuk koloni *pearlite*.

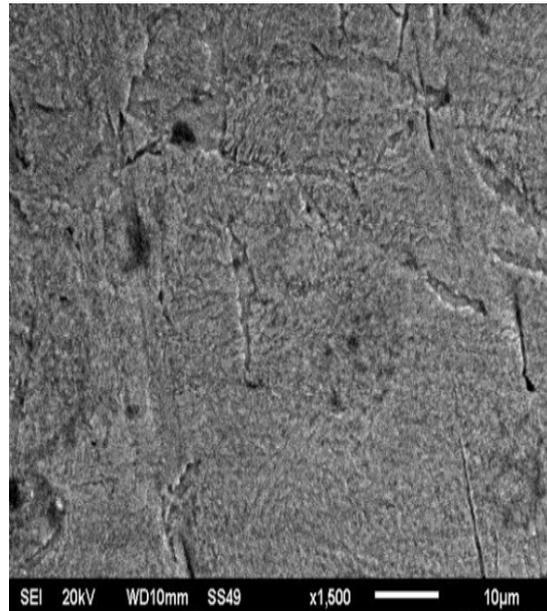


Gambar 15. Skematik pertumbuhan *pearlite* pada batas butir *austenite*

*Pearlite* yang terbentuk pada bagian dalam protipe tapak roda normalisasi pendinginan kipas adalah sangat halus. Hal ini disebabkan karena adanya penambahan unsur-unsur mangan, krom dan tembaga. Unsur-unsur tersebut akan tersegregasi pada batas butir *austenite* dan mengontrol pertumbuhan *pearlite* sebagai elemen partisi diantara *ferrite* dan *cementite*, sehingga menghambat pertumbuhan lamel-lamel *pearlite* dan menghasilkan *pearlite* yang halus<sup>10,11</sup>. Selain itu pendinginan kipas, yang memiliki laju pendinginan lebih cepat, menyebabkan waktu yang dimiliki oleh karbon untuk berdifusi menjadi sangat singkat sehingga jarak difusi menjadi sangat pendek dan menyebabkan lamel-lamel *pearlite* menjadi sangat halus. Gambar 16 dan 17 berikut memperlihatkan struktur mikro hasil dari *scanning electron microscope* bagian dalam dari tapak roda impor dan prototipe tapak roda hasil normalisasi pendinginan dengan kipas. Dari gambar 16 dan 17 tersebut dapat dibandingkan bahwa lamel-lamel *pearlite* pada protipe tapak roda hasil normalisasi pendinginan dengan kipas terlihat lebih halus bila dibandingkan dengan tapak roda impor.

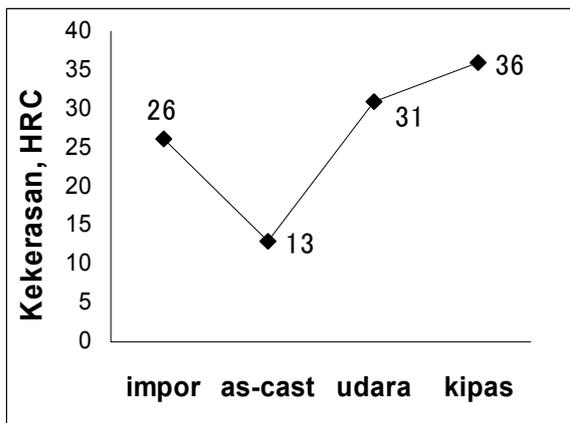


Gambar 16. Struktur mikro bagian dalam tapak roda impor hasil analisa *scanning electron microscope*, menggunakan etsa nital 5%, perbesaran 1500 x



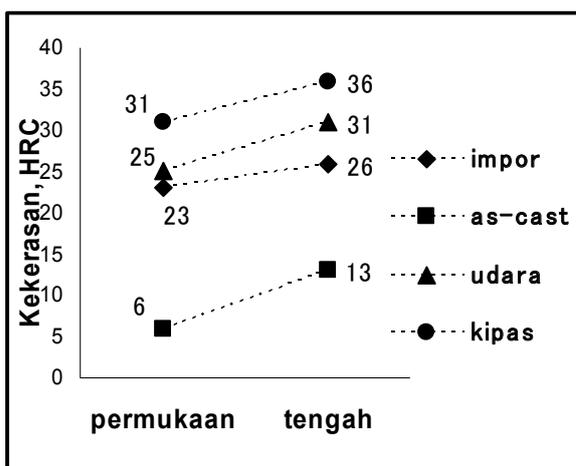
Gambar 17. Struktur mikro bagian dalam tapak roda kereta api prototipe dengan normalisasi pendinginan kipas hasil analisa *scanning electron microscope*, menggunakan etsa nital 5%, perbesaran 1500 x

Gambar 18 berikut ini memperlihatkan perbandingan nilai kekerasan skala HRC untuk semua sampel tapak roda kereta api pada bagian dalam, yaitu tapak roda impor, *as-cast*, normalisasi udara dan normalisasi kipas. Dari kurva perbandingan kekerasan tersebut terlihat bahwa nilai kekerasan prototipe tapak roda hasil normalisasi pendinginan dengan udara dan kipas adalah lebih besar dibandingkan nilai kekerasan tapak roda impor. Nilai kekerasan tertinggi dicapai oleh prototipe tapak roda hasil normalisasi pendinginan dengan kipas, dengan struktur mikro *pearlite* yang sangat halus, yaitu sebesar 36 HRC. Nilai kekerasan tapak roda impor dan prototipe tapak roda hasil normalisasi pendinginan udara masing-masing adalah 26 dan 31 HRC. Sedangkan nilai kekerasan prototipe tapak roda *as-cast* hanya 13 HRC. *Pearlite* terdiri dari lamel-lamel *cementite* yang sangat keras dan lamel-lamel *ferrite* yang sangat lunak. Bila lamel-lamel *cementite* menjadi sangat halus, maka secara keseluruhan nilai kekerasan dari *pearlite* yang halus menjadi tinggi.



Gambar 18. Kurva perbandingan nilai kekerasan tapak roda kereta api bagian dalam untuk semua sampel

Nilai kekerasan tapak roda bagian permukaan dan bagian dalam adalah berbeda disebabkan laju pendinginan yang berbeda pula. Gambar 19 berikut ini memperlihatkan kurva perbedaan kekerasan seluruh sampel tapak roda baik pada bagian permukaan maupun pada bagian dalam. Terlihat bahwa untuk seluruh jenis sampel, nilai kekerasan di bagian permukaan lebih rendah dibandingkan dengan kekerasan di bagian dalam. Hal ini disebabkan adanya perbedaan laju pendinginan diantara bagian permukaan dan bagian dalam.



Gambar 19. Kurva perbandingan nilai kekerasan tapak roda kereta api bagian permukaan dan bagian dalam untuk semua sampel

## KESIMPULAN DAN SARAN

Dengan penambahan unsur (Mn), krom (Cr), molibden (Mo), nikel (Ni) dan tembaga (Cu) pada prototipe tapak roda kereta api dengan perlakuan panas normalisasi dengan pendinginan udara maupun pendinginan kipas, diperoleh nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan nilai kekerasan tapak roda impor. Nilai kekerasan bagian permukaan dan bagian dalam prototipe tapak roda normalisasi dengan pendinginan kipas, masing-masing adalah 31 dan 36 HRC, sedangkan untuk tapak roda impor hanya 23 dan 26 HRC. Nilai kekerasan yang tinggi dari prototipe tapak roda hasil normalisasi pendinginan dengan kipas disebabkan karena terbentuknya fasa *aggregate bainite (ferrite/carbide aggregate bainite)* di bagian permukaan dan fasa *pearlite* yang sangat halus di bagian dalam.

Unsur molibden dan nikel sebagai *bainite* promotor menyebabkan daerah pembentukan *bainite* pada kurva CCT menjadi lebih luas, sehingga cenderung terbentuknya fasa *aggregate bainite* di bagian permukaan. Sedangkan unsur mangan, krom dan tembaga menyebabkan adanya fenomena partisi diantara *ferrite* dan *cementite* yang menyebabkan pertumbuhan lamel-lamel *cementite* dan *ferrite* lebih lambat sehingga menghasilkan *pearlite* yang sangat halus di bagian dalam. Laju pendinginan kipas yang cepat juga menghambat difusi karbon, sehingga mengakibatkan terbentuknya *bainite* pada bagian permukaan atau terbentuknya lamel-lamel *pearlite* yang lebih pendek (halus) pada bagian dalam.

Untuk dapat menguji performen prototipe roda kereta api diperlukan uji pakai dengan memasang prototipe di gerbong kereta api untuk dapat digunakan bersama roda kereta api impor. Diperlukan komunikasi ide ini dengan PT. Kereta Api Indonesia agar dapat segera direalisasikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- B. Hertasning, "Pembangunan Perkeretaapian Berdasarkan Rencana Induk Perkeretaapian Nasional Dan Rencana Strategis Kementerian Perhubungan Bidang Perkeretaapian", disajikan dalam Seminar Nasional Litbang Roda Kereta Api, Bandung, Indonesia, 2011
- H. Atmosukardjo, "Pengalaman Menggunakan Roda Kereta Api dan Harapan Penggunaan Produk Lokal", disajikan dalam Seminar Nasional Litbang Roda Kereta Api, Bandung, Indonesia, 2011
- Association of American Railroads Manual of Standards and Recommended Practices, "Wheel, Carbon Steel M-107/M-208", 1999
- S. Bimo. P " Research on Nodular Cast Iron Containing of Small Amount Boron", Doctor Dissertation, Iwate University Japan, 2010
- Y. Ohmori, H. Ohtsubo, Y. C. Jung, S. Okaguchi, H. Ohtani "Morphology of Bainite and Widmanstätten Ferrite", Metallurgical and Materials Transactions A, volume 25A, pages 1982, 1994
- S. Bimo. P, Hafid, E. Afrilinda "Pengembangan Material Bainitic Cast Steel Untuk Komponen Tapak Rantai Kendaraan Tempur Tank Substitusi Impor", Jurnal Riset Industri, volume 7, No. 3, pages 173-182, 2013
- S.F. Di Martino, G. Thewlis "Transformation Characteristics of Ferrite/carbide Aggregate in Continuously Cooled, Low Carbon-Manganese Steels", Metallurgical and Materials Transactions A, volume 45A, pages 579-580, 2014
- V.G. Vaks, A. Yu. Stroev, V.N. Urtsev, A.V. Shmakov "Experimental and Theoretical Study of the Formation and Growth of Peralite Colonies in Eutectoid Steels", Journal of Experimental and Theoretical Physics, volume 23A, No. 6, pages 961-962, 2011
- N. Ridley "A review of the Data on the Interlamellar Spacing of Pearlite", Metallurgical Transactions A, volume 15A, pages 1019, 1984
- S. K. Tewari, Romesh C. Sharma "The Effect of Alloying Elements on Pearlite Growth", Metallurgical Transactions A, volume 16A, pages 597-598, 1985
- S. A. Al-Salman, G. W. Lorimer, N. Ridley "Pearlite Growth Kinetics and Partitioning in Cr-Mn Eutectoid Steel", Metallurgical Transactions A, volume 10A, page 1703, 1979