

MORFOLOGI STRUKTUR DAN KARAKTERISTIK SIFAT MEKANIK SERTA KEAUSAN BAJA BAINIT DENGAN VARIASI MANGAN HASIL NORMALISING UNTUK TAPAK KENDARAAN TEMPUR

Sri Bimo Pratomo*, Hafid, Husen Taufiq, Eva Afrilinda, Martin Doloksaribu

Balai Besar Logam Dan Mesin
Jalan Sangkuriang 12, Bandung, Indonesia, 40135
Email: *bimo_bblm@yahoo.com

Masuk Tanggal : 03-05-2015, revisi tanggal : 15-07-2015, diterima untuk diterbitkan tanggal 18-08-2015

Intisari

Tapak rantai impor yang digunakan untuk kendaraan tempur menggunakan baja bainite. Baja bainite digunakan secara luas karena memiliki sifat yang keras tetapi tangguh. Untuk memperbaiki sifat mekanis produk cor, umumnya dilakukan proses perlakuan panas normalisasi. Tahap akhir dari proses normalisasi adalah proses pendinginan yang sangat mempengaruhi morfologi struktur mikro. Pengaruh mangan terhadap pembentukan struktur *bainite* saat ini masih dalam perdebatan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengamati pengaruh kadar mangan dan perbedaan proses pendinginan terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan aus dari tapak rantai yang terbuat dari baja *bainite*. Disebabkan karena terbentuknya *massive bainitic ferrite* maka kekerasan dan ketahanan aus prototipe tapak rantai yang mengandung 2% mangan menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan yang hanya mengandung 1% mangan. Pada prototipe tapak rantai yang mengandung 1% mangan dan dinormalisasi dengan pendinginan kipas angin, akan menghasilkan struktur mikro *compact bainitic ferrite*, dengan nilai kekerasan dan ketahanan aus yang lebih baik bila dibandingkan dengan tapak rantai impor; yaitu 31 HRC, 0,28% dan 28 HRC, 0,52%, masing-masing untuk tapak rantai prototipe dan impor. Struktur mikro dari *compact bainitic ferrite* memperlihatkan morfologi yang lebih baik bila dibandingkan dengan struktur mikro *massive bainitic ferrite*.

Kata kunci: Tapak rantai, Baja bainit, Massive bainitic ferrite, Compact bainitic ferrite

Abstract

Imported track link for combat vehicle uses bainitic steel. Bainitic steels are widely used because they exhibit hard but tough. To improve the mechanical properties of casting product generally are performed normalizing heat treatment. The final stage of normalizing namely cooling process greatly affects the change of microstructure morphology. Effect of manganese in the formation of bainitic structure is still debated. The purpose of this study was observing effect the manganese content and effect the various cooling process of bainitic steel track link on microstructures, hardness and abrasive resistant. Due to the formation of massive bainitic ferrite, the hardness and abrasive resistance of track link prototype containing 2% manganese becomes higher compared with track link prototype contains only 1% manganese. The track link prototype containing 1% manganese and normalized by the cooling fan, produced the microstructure of compact bainitic ferrite that has hardness and abrasive resistance was better compared to imported track link; ie 31 HRC, 0.28% and 28 HRC, 0.52%, respectively for the track link prototype and imported track link. Compact bainitic ferrite microstructure showed better morphology compared to the massive bainitic ferrite microstructure.

Keywords: Track link, Bainitic steel, Massive bainitic ferrite, Compact bainitic ferrite

1. PENDAHULUAN

Komponen tapak rantai digunakan sebagai komponen penggerak dan penapak pada kendaraan tempur tank sehingga dibutuhkan sifat yang tahan aus tetapi ulet. Umumnya komponen ini dibuat dari baja bainite (*bainitic*

steel) atau baja mangan (*manganese steel*). Baja *bainite* digunakan secara luas karena memperlihatkan sifat yang menjanjikan, yaitu lebih tangguh dibandingkan baja *martensite* temper (*tempered martensitic steel*) untuk kekerasan yang sama. Baja *bainite* memiliki

kekuatan dan ketangguhan yang tinggi, sehingga saat ini menjadi topik penelitian yang menarik^[1,2,3].

Pengaruh mangan di dalam pembentukan struktur *bainite* saat ini masih diperdebatkan. Penambahan mangan merupakan paduan yang paling efektif untuk menghambat pembentukan *pearlite*. Mangan adalah paduan yang paling efektif untuk mempengaruhi diagram CCT *bainite* (*bainite continuous cooling transformation*)^[4]. Mangan ditambahkan untuk menstabilkan *untransformed austenite* di dalam struktur *bainite*^[5].

Tetapi beberapa peneliti menyampaikan pendapat yang berbeda. Konsentrasi mangan di dalam *austenite* dapat menghambat pembentukan *bainite*^[6,7]. Mangan menggeser seluruh daerah transformasi *bainite* ke arah sisi kanan dari CCT diagram, dan secara signifikan menurunkan temperatur *martensite start*^[2].

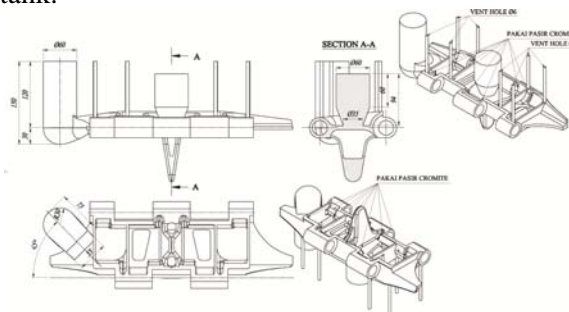
Produk cor baja umumnya mengalami proses perlakuan panas untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasannya. Perlakuan panas yang umum dilakukan adalah normalisasi (*normalizing*). Proses pendinginan sebagai tahap akhir dari proses normalisasi, sangat mempengaruhi morfologi dari struktur *bainite* yang akan terbentuk. Peningkatan laju pendinginan dapat menyebabkan peningkatan jumlah *bainite* dan penurunan jumlah *pearlite*. Peningkatan laju pendinginan juga akan merubah *bainite* dari *lower bainite* menjadi *acicular bainite*^[6].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh perbedaan jumlah mangan serta untuk melihat pengaruh perbedaan laju pendinginan dari proses normalisasi terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan aus dari prototipe tapak rantai yang terbuat dari baja *bainite*. Data yang diperoleh akan dibandingkan dengan struktur mikro, kekerasan dan ketahanan aus dari tapak rantai asli yang saat ini masih digunakan oleh kendaraan tempur tank yang merupakan produk impor.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Pembuatan prototipe dari tapak rantai ini menggunakan proses pengecoran logam yang umum digunakan oleh industri, yang dimulai dari pembuatan pola kayu, pembuatan cetakan pasir, proses peleburan dan penuangan logam cair ke dalam cetakan pasir dan diakhiri dengan proses perlakuan panas normalisasi. Paduan logam yang digunakan di dalam percobaan ini dilebur di dalam tungku induksi listrik kapasitas 200 kg. Produk-produk cor yang diperoleh lalu dinormalisasi dengan menggunakan pendinginan

yang berbeda, yaitu pendinginan udara bebas dan pendinginan menggunakan kipas angin. Gambar 1 memperlihatkan desain pengecoran, sedangkan Gambar 2 memperlihatkan prototipe produk cor dari tapak rantai kendaraan tempur tank.

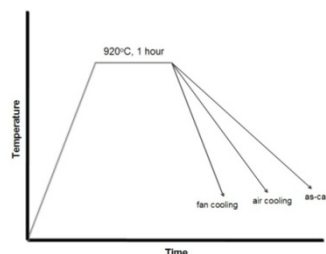


Gambar 1. Desain pengecoran prototipe tapak rantai



Gambar 2. Prototipe produk cor tapak rantai

Untuk meningkatkan kekerasan dan ketangguhan dari prototipe tapak rantai produk cor maka dilakukan proses perlakuan panas normalisasi. Pada penelitian ini dibandingkan 3 jenis proses, yaitu normalisasi dengan pendinginan udara, normalisasi dengan pendinginan kipas angin, dan tanpa normalisasi (produk cor). Selama proses penahanan temperatur, produk cor dipanaskan pada temperatur 920 °C selama 1 jam. Tujuan penahanan temperatur adalah untuk memastikan keseragaman temperatur pada produk cor. Gambar 3 memperlihatkan skema dari berbagai proses yang dibandingkan di dalam penelitian ini.



Gambar 3. Skema proses normalisasi yang digunakan

Paduan logam yang digunakan adalah 2 jenis paduan yang berbeda kandungan unsur mangannya. Tabel 1 memperlihatkan komposisi kimia dari paduan yang digunakan. Terlihat

bahwa kandungan mangan pada paduan kedua adalah dua kali lebih besar dibandingkan paduan pertama.

Tabel 1. Komposisi kimia paduan dengan Mn yang berbeda

	C	Si	P	S	Cr	Mo	Mn	Fe
Paduan 1	0,27	0,31	0,01	0,01	1,05	0,45	1,04	remain
Paduan 2	0,26	0,29	0,02	0,01	1,03	0,39	2,18	remain

Sifat mekanis sampel dianalisis menggunakan pengujian kekerasan dan pengujian ketahanan aus. Sampel uji keras dan uji aus diambil dari bagian sayap tapak rantai. Pengujian kekerasan menggunakan indenter Rocwell tipe C dengan beban 150 kg. Sedangkan sampel uji aus digesek permukaannya menggunakan piringan tahan aus dengan beban 10 kg selama 30 menit. Persentase kehilangan berat yang terjadi diindikasikan sebagai ketahanan aus material. Struktur mikro dianalisis menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) sedangkan komposisi kimia dianalisis menggunakan *optical emission spectrometer* dan *energy dispersive spectrometry* (EDS). Selanjutnya dibandingkan struktur mikro, kekerasan dan persentase kehilangan berat dari produk prototipe dan produk impor tapak rantai. Tabel 2 memperlihatkan komposisi kimia tapak rantai impor.

Tabel 2. Komposisi kimia tapak rantai impor

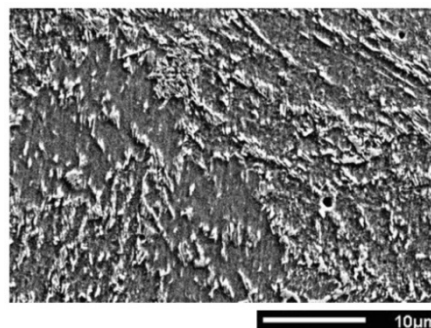
C	Si	P	S	Cr	Mo	Mn	Fe
0,34	0,49	0,01	0,02	0,97	0,32	0,79	remain

3. HASIL DAN DISKUSI

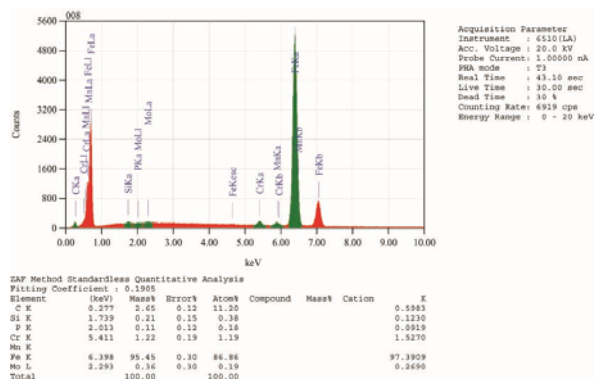
Gambar 4 memperlihatkan struktur mikro prototipe hasil cor dengan kandungan mangan 1%. Terlihat bahwa struktur mikro adalah *acicular bainite* yang terdiri dari *acicular bainitic ferrite* dan *austenite* sisa (*retained austenite*). Pembentukan *bainitic ferrite* dari paduan yang memiliki komposisi tertentu adalah hasil dari pendinginan kontinu (*continuous cooling*) yang melewati bagian atas kurva transformasi *bainite* (*bainite transformation curve*). *Bainitic ferrite* umumnya terdiri dari *aggregate bainitic ferrite* dan *austenite* sisa^[3,4].

Dengan menggunakan profil intensitas EDS terlihat bahwa kadar karbon di dalam fasa *acicular bainitic ferrite* (fasa terang) cukup tinggi yaitu 2,6 %berat. Jumlah tersebut tidak sesuai dengan kadar karbon yang umum di dalam *ferrite*. Kadar karbon maksimum di dalam *ferrite* adalah 0,021 %berat^[8]. Diperkirakan bahwa karbon tidak terlarut di dalam larutan

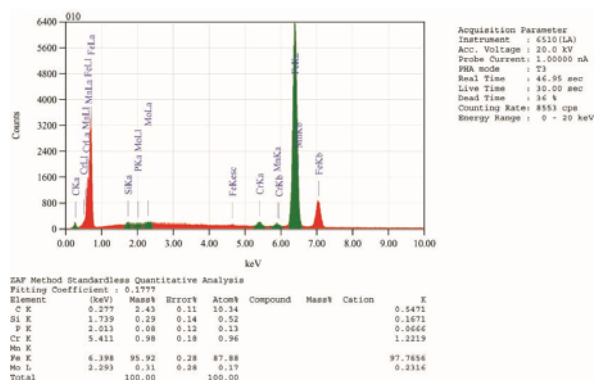
padat *ferrite*, tetapi mengendap sebagai karbida halus di dalam fasa *acicular bainitic ferrite*. Kadar karbon di dalam fasa *austenite* sisa (fasa gelap) adalah sekitar 2,4 %berat. Gambar 5 dan 6 memperlihatkan profil intensitas EDS, masing-masing untuk fasa *acicular bainitic ferrite* dan fasa *austenite* sisa.



Gambar 4. Struktur mikro prototipe hasil cor dengan kandungan mangan 1%, tampilan secondary electron-SEM. Etsa Nital 5%



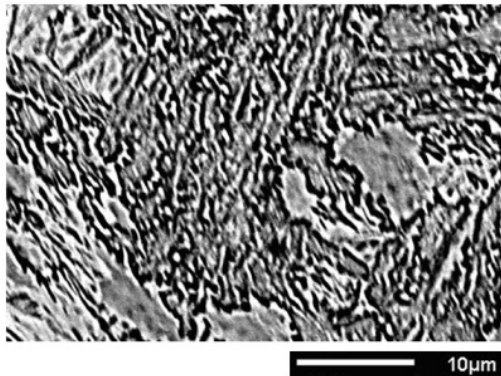
Gambar 5. Profil intensitas EDS untuk fasa *acicular bainitic ferrite*



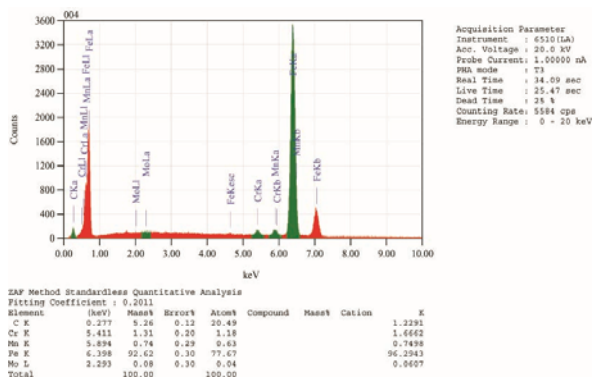
Gambar 6. Profil intensitas EDS untuk fasa *austenite* sisa

Gambar 7 memperlihatkan struktur mikro prototipe hasil cor dengan kandungan mangan 2%. Terlihat adanya fasa *massive bainitic ferrite* yang cukup banyak. Dari profil intensitas EDS terlihat bahwa mangan hanya terdapat di dalam fasa *massive bainitic ferrite*. Kandungan mangan di dalam fasa ini adalah sekitar 0,74

%berat, sedangkan kandungan karbon mencapai 5,3 %berat. Gambar 8 memperlihatkan profil intensitas EDS untuk fasa *massive bainitic ferrite*.



Gambar 7. Struktur mikro prototipe hasil cor dengan kandungan mangan 2%, tampilan secondary electron-SEM. Etsa Nital 5%

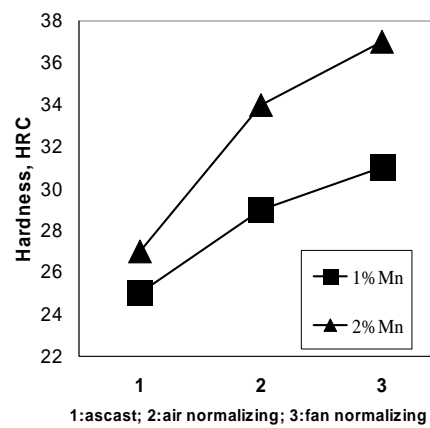


Gambar 8. Profil intensitas EDS untuk fasa *massive aggregate*

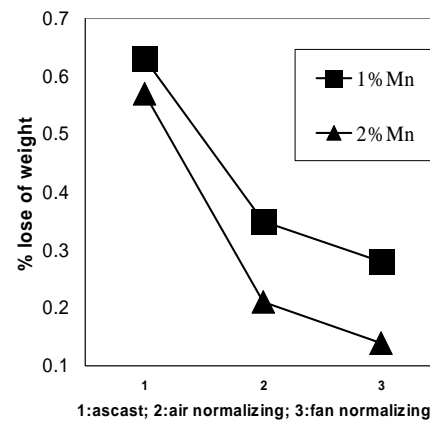
Fasa *massive bainitic ferrite* mengandung karbon dan mangan yang cukup tinggi. Diprediksi karbon dan mangan akan bersenyawa membentuk endapan halus karbida (Fe, Mn). Struktur mikro dari paduan ini adalah campuran dari fasa *massive bainitic ferrite* yang memiliki banyak endapan karbida (Fe, Mn) dan *austenite* sisa.

Nilai kekerasan dari prototipe hasil cor dengan kandungan mangan 2% lebih tinggi dibandingkan nilai kekerasan dari prototipe hasil cor dengan kandungan mangan 1%. Masing-masing nilai kekerasannya adalah 27 dan 25 HRC. Nilai kekerasan yang lebih tinggi tersebut disebabkan oleh adanya endapan karbida (Fe,Mn) pada prototipe hasil cor dengan kandungan mangan 2%. Dengan meningkatnya nilai kekerasan maka meningkat pula nilai ketahanan ausnya. Persentase kehilangan berat untuk produk cor dengan kandungan mangan 2% dan 1% masing-masing adalah 0,57% dan 0,63%.

Normalisasi dengan pendinginan kipas angin akan menghasilkan material dengan kekerasan dan ketahanan aus yang lebih tinggi. Gambar 9 memperlihatkan grafik hubungan antara pengaruh perbedaan jenis proses terhadap nilai kekerasan, sedangkan Gambar 10 memperlihatkan grafik hubungan antara pengaruh perbedaan jenis proses terhadap persentase kehilangan berat, untuk masing-masing material dengan kandungan mangan 1% dan 2%. Kekerasan dan ketahanan aus dari prototipe dengan kandungan mangan 2% adalah lebih tinggi dibandingkan dengan prototipe dengan kandungan mangan 1% untuk setiap proses yang sama.

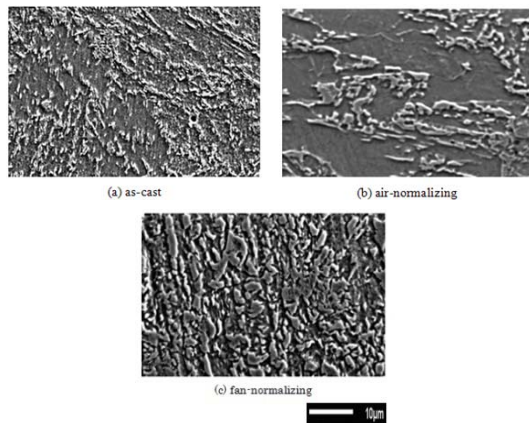


Gambar 9. Hubungan pengaruh perbedaan jenis proses terhadap nilai kekerasan untuk prototipe dengan kandungan Mn 1% dan 2%



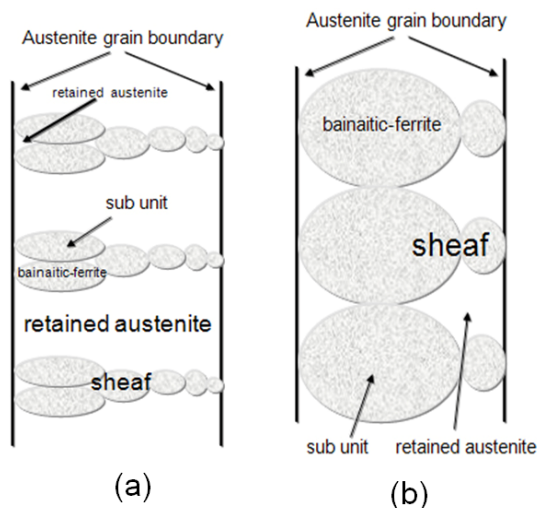
Gambar 10. Hubungan pengaruh perbedaan jenis proses terhadap persentase kehilangan berat untuk prototipe dengan kandungan mangan 1% dan 2%

Perubahan struktur mikro dari prototipe dengan kandungan mangan 1% sesuai dengan perubahan prosesnya, dapat dilihat pada Gambar 11. Terlihat dalam Gambar 11 bahwa struktur mikro berubah dari *acicular bainitic ferrite* menjadi *compact bainitic ferrite*.



Gambar 11. Perubahan mikro struktur dari prototipe dengan kandungan mangan 1% sesuai dengan perubahan proses, tampilan dari *secondary electron-SEM*. Etsa Nital 5%

Peningkatan laju pendinginan akan mempromosikan pembentukan *bainite*^[6]. Plat-plat *bainite* tumbuh dengan cepat pada batas butir, sedangkan plat-plat *bainite* yang bernukleasi pada plat *bainite* yang sudah ada, akan tumbuh lebih lambat^[1].

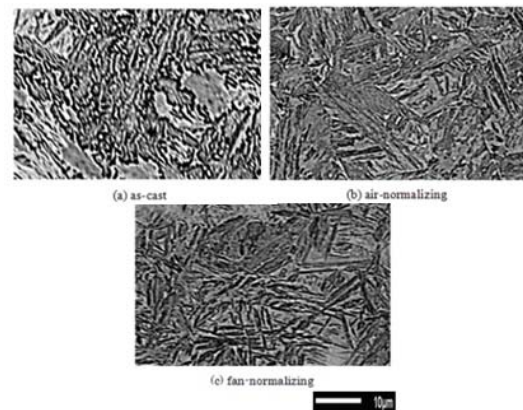


Gambar 12. Skema pembentukan bainite: (a) Laju pendinginan lambat, (b) Laju pendinginan cepat

Pembentukan *bainitic ferrite sub-unit* dimulai dari batas butir *austenite*. Laju pendinginan yang lambat akan menyebabkan pertumbuhan *sub-unit* pada batas butir akan lambat pula, sehingga memberikan kesempatan untuk terbentuknya *sub-unit* baru pada ujung *sub-unit* yang terbentuk pertama kali pada batas butir. Pertumbuhan *sub-unit* baru pada ujung *sub-unit* terdahulu lebih lambat. Hal ini akan menyebabkan terbentuknya *acicular bainitic ferrite* dengan jumlah *austenite* sisa yang banyak. Tetapi dengan laju pendinginan yang lebih cepat (pendinginan kipas angin) akan menyebabkan pertumbuhan *sub-unit* pada batas butir *austenite* menjadi cepat. *Sub-unit* akan

terbentuk lebih besar, dan menyebabkan terbentuknya *compact bainitic ferrite* dengan jumlah *austenite* sisa yang lebih sedikit. Gambar 12 memperlihatkan skema pertumbuhan *bainite* untuk laju pendinginan yang lambat dan laju pendinginan yang cepat.

Gambar 13 memperlihatkan perubahan struktur mikro dari paduan yang mengandung mangan 2%, sesuai dengan perubahan proses yang dilakukan. Terlihat adanya peningkatan jumlah *massive bainitic ferrite* yang mengandung mangan, sesuai dengan peningkatan laju pendinginan.

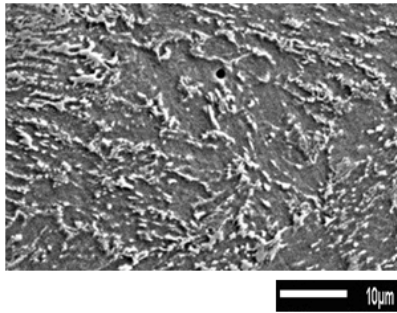


Gambar 13. Perubahan mikro struktur dari prototipe dengan kandungan mangan 2% sesuai dengan perubahan proses, tampilan dari *secondary electron-SEM*. Etsa Nital 5%

Kekerasan dan ketahanan aus dari prototipe akan meningkat dengan peningkatan laju pendinginan dalam proses normalisasi. Laju pendinginan yang menggunakan kipas angin akan menghasilkan nilai kekerasan dan ketahanan aus tertinggi. Hal tersebut disebabkan karena meningkatnya jumlah *aggregate bainitic ferrite (acicular bainitic ferrite, compact bainitic ferrite, massive bainitic ferrite)* yang mengandung endapan karbida halus. Endapan karbida yang keras akan menyebabkan fasa *aggregate bainitic ferrite* tersebut menjadi lebih keras dibandingkan fasa *austenite* sisa.

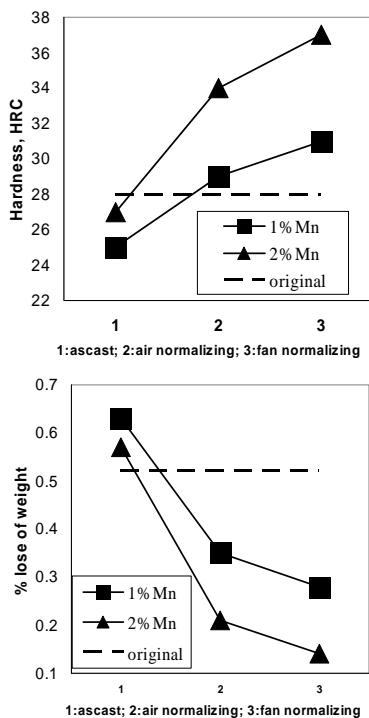
Selanjutnya struktur mikro, kekerasan dan ketahanan aus dari prototipe yang memiliki kandungan mangan 1% maupun 2% dibandingkan dengan struktur mikro, kekerasan dan ketahanan aus dari material tapak rantai impor yang dipakai pada kendaraan tempur tank.

Struktur mikro dari tapak rantai impor dapat dilihat pada Gambar 14. Terlihat bahwa struktur mikro hampir mirip dengan struktur mikro prototipe hasil cor dengan kandungan mangan 1%. Diasumsikan bahwa tapak rantai impor juga telah mengalami proses perlakuan panas.



Gambar 14. Struktur mikro dari tapak rantai impor, tampilan dari *secondary electron-SEM*. Etsa Nital 5%

Kekerasan dan ketahanan aus dari tapak rantai impor yang sudah dilakukan perlakuan panas ternyata lebih baik dibandingkan dengan tapak rantai prototipe sebelum normalisasi, baik yang memiliki kandungan mangan 1% atau 2%. Tetapi setelah dilakukan proses perlakuan panas normalisasi terhadap tapak rantai prototipe, nilai kekerasan maupun ketahanan ausnya dapat melebihi tapak rantai impor. Gambar 15 berikut memperlihatkan grafik perbandingan nilai kekerasan tapak rantai impor dengan tapak rantai prototipe untuk proses yang berbeda.



Gambar 15. Grafik hubungan nilai kekerasan dan kehilangan berat dari tapak rantai impor dengan tapak rantai prototipe untuk proses yang berbeda

4. KESIMPULAN

Struktur mikro dari tapak rantai prototipe dengan kandungan mangan 1% tanpa normalisasi adalah *acicular bainite* yang terdiri dari *acicular bainitic ferrite* dan *austenite* sisa.

Dengan normalisasi menggunakan pendinginan kipas angin dengan laju pendinginan yang cepat akan menyebabkan pertumbuhan *bainitic ferrite sub-unit* pada batas butir *austenite* menjadi cepat sehingga akan menghasilkan struktur mikro *compact bainitic ferrite* dengan sedikit *austenite* sisa. Struktur mikro tersebut akan menghasilkan kekerasan dan ketahanan aus yang lebih tinggi dibanding tapak rantai impor.

Dengan penambahan mangan menjadi 2% pada prototipe akan menghasilkan struktur mikro *massive bainitic ferrite* yang didalamnya terdapat endapan halus karbida (Fe, Mn). Peningkatan laju pendinginan akan menyebabkan peningkatan jumlah *massive bainitic ferrite* dan menurunkan jumlah *austenite* sisa, sehingga terjadi peningkatan nilai kekerasan dan ketahanan aus.

Morfologi dari struktur *compact bainitic ferrite* lebih baik dibandingkan struktur *massive bainitic ferrite*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia yang telah membiayai dana penelitian Insentif PKPP tahun 2012 dan Insentif Riset SINAS tahun 2013, serta semua pihak yang telah memberikan sumbangan pemikiran dan diskusi yang berguna.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhang-wei Hu, Guang Xu, Hai-jiang Hu, "In Situ Measured Growth Rates of Bainite Plates in an Fe-C-Mn-Si Superbainitic Steel", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, volume 21, page 371, 2014.
- [2] J. Wang, P.J. Van Der Wolk, S. Van Der Zwaag, "On the Influence of Alloying Elements on the Bainite Reaction in Low Alloy Steels During Continuous Cooling", *Journal of Materials Science*, volume 35, page 4393, 2000.
- [3] H.D.H. Bhadeshia, J. W. Christian, "Bainite in Steels", *Metallurgical Transactions A*, volume 21A, pages 767-768, 1990.
- [4] Roger K. Steele, "Steel Alloys with Lower Bainite Microstructure for Use in Railroad Cars and Track", *U.S. Department of Transportation*, USA, Laporan teknis, 2002.
- [5] K.D.H. Bhadeshia, D. V. Edmonds J, "Discussion of the Bainite Transformation in a Silicon Steel", *Metallurgical Transactions A*, volume 16, page 457, 1979.

- [6] Lei Shi, Zesheng Yan, Yongchang Liu
“Development of Ferrite / Bainite Bands and
Study of Bainite Transformation Retardation
in HSLA Steel During Continuous
Cooling”, *Metals and Material
International*, volume 20, pages 19-20,
2014.
- [7] C.P. Luo, G.J. Weatherly, Zheng-Yi Liu
“The Crystallography of Bainite in a
Medium-Carbon Steel Containing Si, Mn,
and Mo”, *Metallurgical Transactions A*,
volume 23A, pages 1403-1404, 1992.
- [8] H. Okamoto, “Carbon Binary Alloy Phase”,
Alloy Phase Diagram, U.S.A, *ASM
International Handbook Committee*, page
527, 1998.

