

PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN MATERIAL JAW PLATE YANG TERBUAT DARI BAJA MANGAN UNTUK SUBSTITUSI IMPOR

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MATERIAL OF JAW PLATE COMPONENT THAT PRODUCED FROM MANGANESE STEEL FOR IMPORTED SUBSTITUTION

SRI BIMO PRATOMO^{1,3}, HUSEN TAUFIQ², MAHAPUTRA^{2,3}, WINDA SRI JAMAN⁴

¹Kepala Seksi Pengecoran Logam Dan Perlakuan Panas Balai Besar Logam Dan Mesin

²Staf Seksi Pengecoran Logam Dan Perlakuan Panas Balai Besar Logam Dan Mesin

³Peneliti Balai Besar Logam Dan Mesin

⁴Staf Seksi Pengujian Balai Besar Logam Dan Mesin

E-mail: bimo_bblm@yahoo.com

ABSTRAK

Jaw plate adalah komponen *consumable* dari mesin *jaw crusher* yang banyak digunakan di industri pertambangan di Indonesia. Saat ini sebagian besar komponen ini masih diimpor. Penelitian ini adalah penelitian terapan, yang berawal dari permintaan industri untuk dapat membuat komponen *jaw plate* yang tangguh tetapi tahan aus. Berawal dari hal tersebut BBLM melakukan litbang pembuatan komponen *jaw plate* dengan metoda pengecoran. Untuk meningkatkan sifat mekanis *jaw plate* dilakukan proses perlakuan panas yaitu austenitisasi yang dilanjutkan dengan pencelupan air. Dengan menggunakan 3 komposisi baja mangan yang berbeda dilakukan pengujian kekerasan, pengujian dampak metoda *charpy* serta analisis struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan *scanning electron microscope*. Baja mangan dengan kandungan karbon 1%, mangan 13,5%, dan tidak mengandung krom memiliki ketangguhan terbaik. Ketangguhan tersebut menjadi sangat meningkat setelah perlakuan panas, dengan energi yang diserap dari 15,88 joule menjadi 131,32 joule. Hal ini disebabkan karena terbentuknya fasa *full austenite* akibat larutnya karbida setelah perlakuan panas.

Kata kunci: *jaw plate*, baja mangan, ketangguhan, *full austenite*

ABSTRACT

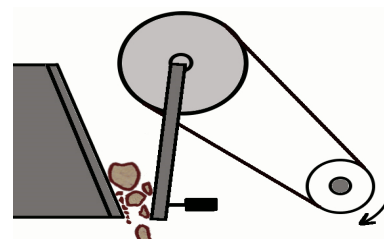
Jaw plate is the consumable component of the *jaw crusher* machine that widely used in the mining industry in Indonesia. Currently most of these components are still imported. This research is applied research, which originated from the industry request to make tough but wear resistant *jaw plate* component. Starting from it BBLM conducted research and development of making *jaw plate* components using casting method. To improve the mechanical properties of *jaw plate* conducted heat treatment process i.e. austenization followed by water quenching. Using 3 different compositions of manganese steel conducted hardness test, *charpy* impact test, and microstructure analysis by optical microscope and scanning electron microscope. Manganese steel that containing 1% carbon, 13.5% Mn, and not containing chromium had the best toughness. The toughness become greatly increased after the heat treatment, the absorbed energy of 15.88 joules become 131.32 joules. This was due to the formation of a *full austenite* phase as a result of the dissolution of carbides after heat treatment.

Keywords: *jaw plate*, manganese steel, toughness, *full austenite*

PENDAHULUAN

Mesin *jaw crusher* adalah mesin penghancur bongkahan material dan banyak digunakan di industri pertambangan di Indonesia untuk menghancurkan bongkahan mineral logam menjadi partikel-partikel yang lebih halus. Tekanan mekanik yang dihasilkan untuk menghancurkan bongkahan material adalah dengan menggunakan dua rahang, satu rahang yang tidak bergerak, dan satu rahang yang bergerak maju-mundur. Kedua rahang

tersebut dilapisi oleh komponen yang tahan aus, yang disebut *jaw plate*. Gambar skematis dari mesin *jaw crusher* dapat dilihat pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Skematis mesin *jaw crusher*

Jaw plate adalah komponen habis pakai (*consumable*). Hal tersebut disebabkan komponen ini bergesekan langsung dengan benda kerja yang keras. Komponen ini umumnya terbuat dari baja mangan. Gambar 2 berikut ini memperlihatkan prototipe komponen *jaw plate* yang dibuat di dalam penelitian ini.



Gambar 2. Prototipe komponen *jaw plate*

Komponen *jaw plate* yang digunakan untuk industri pertambangan di Indonesia umumnya diimpor dari China. Ada beberapa produsen lokal untuk membuat komponen ini, tetapi dikarenakan pengetahuan pembuatan baja mangan yang kurang memadai, menyebabkan komponen yang dihasilkan tidak memenuhi standar.

Baja mangan (*manganese steel*) banyak digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan sifat ketangguhan tinggi serta sifat pengerasan setelah pengerjaan (*work hardening*). Oleh karena itu baja mangan banyak dipakai untuk industri pertambangan, pengeboran minyak, pengeboran gas, dan sebagainya^{1,2}, dimana dibutuhkan sifat ketahanan aus pada permukaannya, tetapi tetap tangguh.

Komposisi kimia dan perlakuan panas pencelupan air (*water quenching*) adalah dua faktor penting untuk menghasilkan baja mangan dengan sifat mekanis yang sesuai. Kandungan krom sangat berpengaruh kepada sifat baja mangan, terutama untuk meningkatkan ketahanan korosi dan ketahanan aus. Tetapi karena krom termasuk unsur pembentuk karbida yang kuat maka

diperlukan temperatur tinggi saat proses austenitisasi, untuk melarutkan karbida yang terbentuk. Juga sifat mekanis baja mangan sangat tergantung kepada jumlah karbon dan mangan³. Perlakuan panas austenitisasi yang dilanjutkan dengan pencelupan air akan menjamin terbentuknya fasa *austenite* dengan karbon sebagai unsur intertisi (*interstitial element*) dan mangan sebagai unsur substitusi (*substitution element*) di dalam kisi larutan padat *face centered cubic*. Fasa *austenite* yang terbentuk memiliki 12 sistem slip kristal yang serupa, sehingga akan mudah membentuk tumpukan dan belitan dislokasi sehingga terjadi pengerasan akibat pengerjaan (*work hardening*) pada permukaannya⁴.

Dari pemaparan tersebut dapat disimpulkan bahwa produk *jaw plate* yang terbuat dari baja mangan masih diimpor. Kandungan krom, karbon dan mangan di dalam baja mangan sangat berpengaruh terhadap sifat baja mangan. Selain itu perlakuan panas pencelupan air diperlukan oleh baja mangan untuk menjamin terbentuknya *austenite* yang memiliki sifat pengerasan setelah pengerjaan. Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh krom, karbon dan mangan serta perlakuan panas pencelupan air terhadap sifat mekanis baja mangan. Komposisi kimia yang menghasilkan sifat mekanis yang paling sesuai akan digunakan untuk pembuatan prototipe *jaw plate*, sekaligus sebagai acuan industri untuk membuat komponen ini.

METODE

Penelitian ini adalah penelitian terapan. Penelitian ini dimulai dengan adanya permintaan industri pengguna *jaw plate* untuk membuat prototipe komponen ini di BBLM. Setelah pembuatan pola kayu dilanjutkan dengan membuat cetakan menggunakan pola tersebut. Pengikat yang digunakan untuk cetakan pasir adalah pengikat α *alkaline phenolic resin*. Peleburan material logam menggunakan tungku induksi kapasitas 200 kg. Untuk melihat komposisi kimia leburan digunakan *optical spectrometer*. Setelah komposisi leburan logam sudah sesuai, lalu logam cair dituang ke dalam cetakan pasir. Setelah

logam cair membeku, cetakan pasir dibongkar untuk mengeluarkan produk cor *jaw plate*. Gambar 3 memperlihatkan proses penuangan logam cair ke dalam cetakan pasir, sedangkan gambar 4 memperlihatkan proses pemotongan sistem saluran tuang dari produk cor *jaw plate*.



Gambar 3. Proses penuangan cairan logam ke dalam cetakan pasir *jaw plate*



Gambar 4. Proses pemotongan sistem saluran tuang produk cor *jaw plate*

Seluruh protipe produk cor yang dihasilkan dibagi menjadi 2 bagian. Bagian pertama adalah protipe tanpa perlakuan panas, sedangkan bagian kedua adalah protipe yang menggunakan perlakuan panas pencelupan air. Proses perlakuan panas ini dimulai dengan memanaskan produk cor pada temperatur 900°C, ditahan selama 1 jam di dalam tungku, lalu dicelup ke dalam air. Gambar 5 memperlihatkan proses pengeluaran produk cor *jaw plate* dari tungku, sedangkan gambar 6 memperlihatkan proses pencelupan produk cor *jaw plate* ke dalam bak yang berisi air.



Gambar 5. Proses pengeluaran produk cor *jaw plate* dari dalam tungku perlakuan panas



Gambar 6. Proses pencelupan produk cor *jaw plate* ke dalam bak yang berisi air

Komposisi kimia produk cor 1 dan 2 hampir serupa, hanya kandungan krom yang berbeda. Sedangkan komposisi kimia produk cor 3 menggunakan kadar mangan yang lebih tinggi dibandingkan produk cor 1 dan 2, tetapi kadar karbon yang terkandung yang lebih rendah serta tidak mengandung krom.

Ketiga jenis produk cor *jaw plate* dengan komposisi yang berbeda serta pengaplikasian / tanpa pengaplikasian perlakuan panas tersebut dipotong pada bagian ujungnya untuk diuji kekerasan dan diuji impak menggunakan metoda *charpy*. Juga dianalisis struktur mikro dari seluruh jenis produk cor tersebut dengan menggunakan mikroskop optik dan *scanning electron microscope* (SEM). Analisis x ray color mapping menggunakan SEM juga dilakukan untuk melihat unsur-unsur yang ada di dalam setiap fasa. Seluruh hasil pengujian dan analisis

digunakan sebagai data untuk membuat kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian komposisi kimia untuk produk cor *jaw plate* 1, 2 dan 3, masing-masing dapat dilihat pada tabel 1 berikut ini. Dari tabel 1 terlihat bahwa produk cor 1 dan 2 memiliki komposisi kimia yang hampir serupa, dengan perbedaannya hanya pada kandungan krom, yaitu 1,7% dan 3,5%. Sedangkan produk cor 3 memiliki jumlah karbon yang lebih sedikit dan mangan yang lebih besar dibandingkan produk cor 1 dan 2, yaitu 1,0% karbon dan 13,5% mangan, tetapi tidak memiliki kandungan krom.

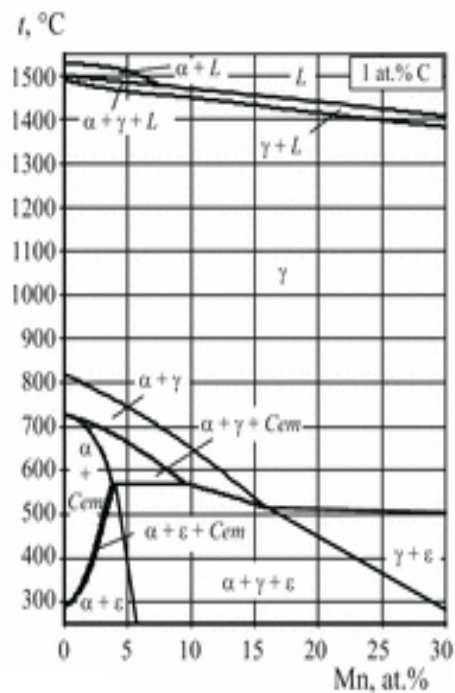
Tabel 1. Komposisi kimia produk cor *jaw plate* 1, 2 dan 3

| | Fe | C | Si | Mn | Cr |
|--------------|------|-----|-----|------|-----|
| Produk cor 1 | sisa | 1,7 | 0,8 | 10 | 1,7 |
| Produk cor 2 | sisa | 1,7 | 0,8 | 10 | 3,5 |
| Produk cor 3 | sisa | 1,0 | 0,8 | 13,5 | - |

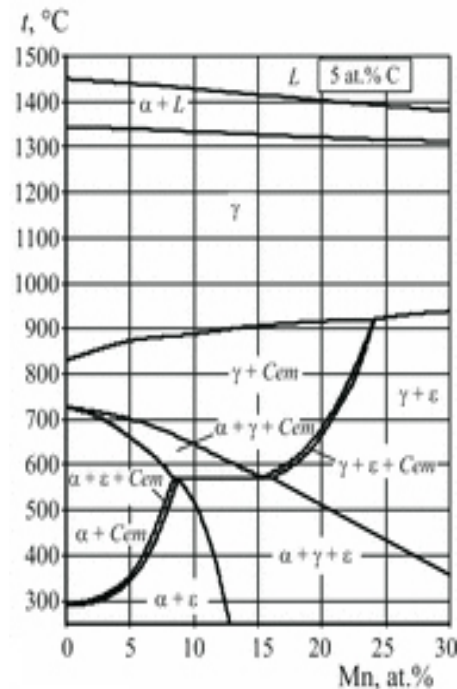
Proses perlakuan panas menggunakan proses austenitisasi pada temperatur 900°C dan ditahan selama 1 jam. Pemilihan temperatur 900°C adalah karena temperatur tersebut merupakan temperatur austenitisasi dari ketiga produk cor. Setelah austenitisasi produk cor dicelup ke dalam air.

Gambar 7 dan 8 memperlihatkan diagram fasa sistem Fe-Mn untuk kadar karbon 1% dan 5%. Sedangkan gambar 9 memperlihatkan skematis garis batas; hasil interpretasi dari gambar 7 dan 8, yang memperlihatkan garis batas daerah γ dengan daerah $\alpha+\gamma$ dan $\gamma+\epsilon$ pada diagram fasa Fe-Mn dengan kadar karbon 1,7%.

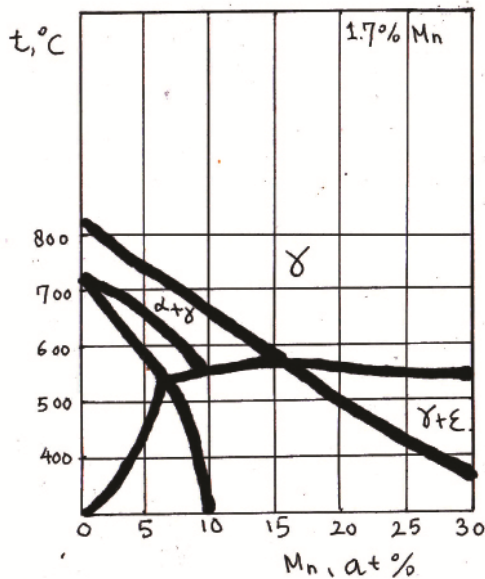
Dari gambar 9 terlihat bahwa temperatur 900°C merupakan daerah austenitisasi dari baja mangan untuk komposisi produk cor 1 dan 2. Sedangkan dari gambar 7 memperlihatkan temperatur 900°C termasuk daerah austenitisasi untuk baja mangan untuk komposisi produk cor 3.



Gambar 7. Diagram fasa Fe-Mn dengan kadar karbon 1%⁵⁾



Gambar 8. Diagram fasa Fe-Mn dengan kadar karbon 5%⁵⁾



Gambar 9. Skematik hasil interpretasi garis batas daerah γ dengan daerah $\alpha+\gamma$ dan $\gamma+\epsilon$ pada diagram fasa Fe-Mn dengan kadar karbon 1,7%

Tabel 2 dan 3 berikut ini memperlihatkan hasil pengujian kekerasan untuk produk cor 1, 2 dan 3, masing masing sebelum proses perlakuan panas dan setelah perlakuan panas. Dari tabel 2 dan 3 terlihat bahwa kekerasan pada produk cor 2 memiliki nilai tertinggi, sedangkan pada produk cor 3 memiliki nilai kekerasan terendah.

Tabel 2. Nilai kekerasan tanpa perlakuan panas untuk produk cor 1, 2 dan 3

| Produk cor 1 HRC | Produk cor 2 HRC | Produk cor 3 HRC |
|------------------|------------------|------------------|
| 38 | 46 | 16 |

Tabel 3. Nilai kekerasan setelah perlakuan panas untuk produk cor 1, 2 dan 3

| Produk cor 1 HRC | Produk cor 2 HRC | Produk cor 3 HRC |
|------------------|------------------|------------------|
| 30 | 38 | 14 |

Tabel 4 dan 5 berikut ini memperlihatkan nilai energi yang diserap pada pengujian dampak metoda *charpy*, masing masing sebelum proses perlakuan panas dan setelah perlakuan panas. Terlihat bahwa nilai energi yang diserap oleh sampel uji dampak untuk produk cor 3

adalah tertinggi, dan untuk produk cor 2 adalah terendah, baik untuk produk cor sebelum maupun setelah perlakuan panas.

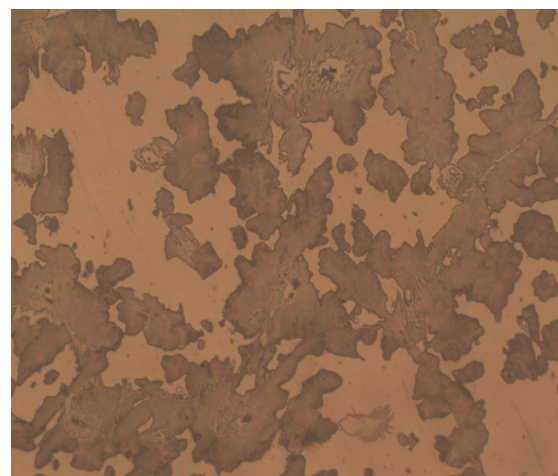
Tabel 4. Energi yang diserap pada pengujian dampak metoda *charpy* tanpa perlakuan panas untuk produk cor 1, 2 dan 3

| Produk cor 1 (Joule) | Produk cor 2 (Joule) | Produk cor 3 (Joule) |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| 2,94 | 2,45 | 15,88 |

Tabel 5. Energi yang diserap pada pengujian dampak metoda *charpy* setelah perlakuan panas untuk produk cor 1, 2 dan 3

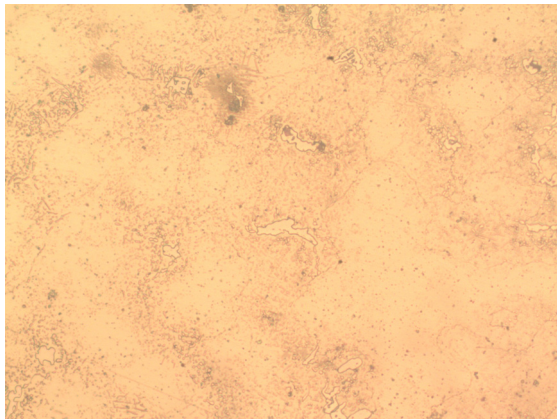
| Produk cor 1 (Joule) | Produk cor 2 (Joule) | Produk cor 3 (Joule) |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| 11,76 | 3,72 | 131,32 |

Dari pengamatan struktur mikro untuk produk cor 1 sebelum perlakuan panas yang menggunakan mikroskop optik memperlihatkan struktur mikro yang terdiri dari butir-butir *austenite* (warna terang), dengan *intergranular carbide* pada batas butir (warna gelap). Setelah perlakuan panas terlihat bahwa jumlah karbida menjadi sangat berkurang. Gambar 10 dan 11 memperlihatkan struktur mikro produk cor 1, masing-masing untuk produk cor sebelum dan setelah perlakuan panas.



0.01 mm

Gambar 10. Struktur mikro produk cor 1 sebelum perlakuan panas hasil pengamatan dengan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x

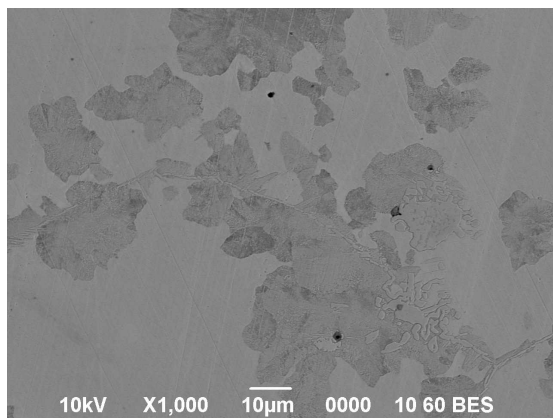


0.01 mm

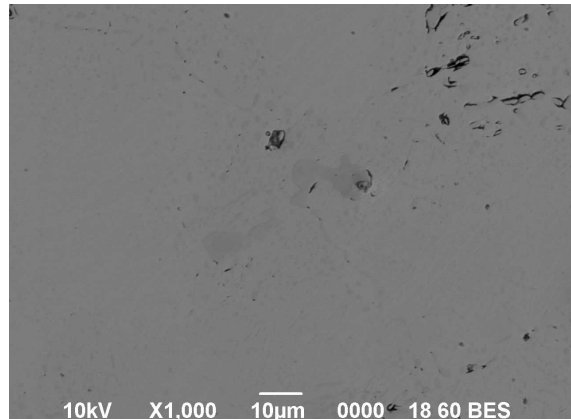
Gambar 11. Struktur mikro produk cor 1 setelah perlakuan panas hasil pengamatan dengan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x

Untuk lebih jelasnya digunakan SEM untuk melihat tampilan *back scattered* dari struktur mikro produk cor 1 sebelum maupun setelah perlakuan panas. Terlihat dengan jelas bahwa *intergranular carbide* menjadi sangat berkurang pada produk cor 1 setelah mengalami perlakuan panas. Perlakuan panas pada baja mangan diperlukan untuk melarutkan seluruh karbida yang ada, sehingga diharapkan akan terbentuk fasa *austenite* tanpa karbida^{1,6]}. Gambar 12 dan 13 memperlihatkan tampilan *back scattered electron*, masing-masing untuk produk cor 1 sebelum dan setelah perlakuan panas.

Terlihat dengan jelas bahwa *intergranular carbide* berkurang setelah perlakuan panas.

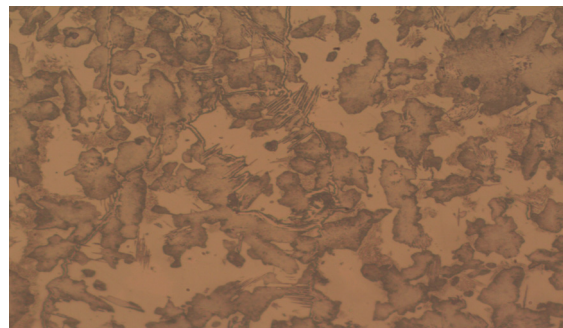


Gambar 12. Tampilan *back scattered electron* dari SEM untuk produk cor 1 tanpa perlakuan panas, etsa nital 5%



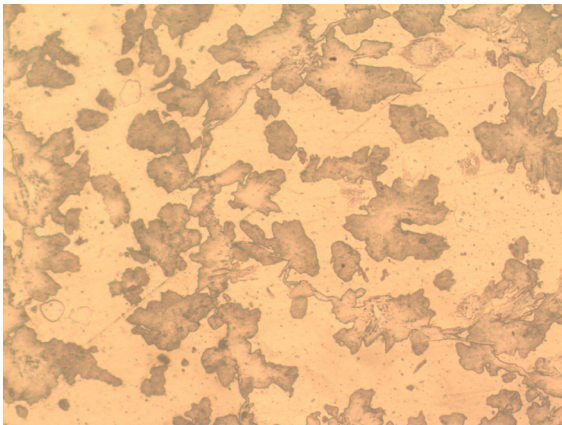
Gambar 13. Tampilan *back scatter electron* dari SEM untuk produk cor 1 setelah perlakuan panas, etsa nital 5%

Gambar 14 dan 15 memperlihatkan struktur mikro produk cor 2, masing-masing untuk produk cor sebelum dan setelah perlakuan panas. Produk cor 2 sebelum perlakuan panas memiliki struktur mikro yang hampir mirip dengan produk cor 1, hanya jumlah *intergranular* karbidanya lebih banyak dengan bentuk yang lebih kecil. Selain itu juga terlihat banyak *interdendritic (acicular) carbide*. Setelah perlakuan panas *interdendritic (acicular) carbide* menjadi tidak tampak, dan yang tertinggal adalah *intergranular carbide*. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 14 dan 15 yang memperlihatkan tampilan *back scattered electron*, masing-masing untuk produk cor 2 sebelum dan setelah perlakuan panas. Tampak pada gambar 14 adanya *interdendritic carbide* pada produk cor 2 sebelum perlakuan panas.



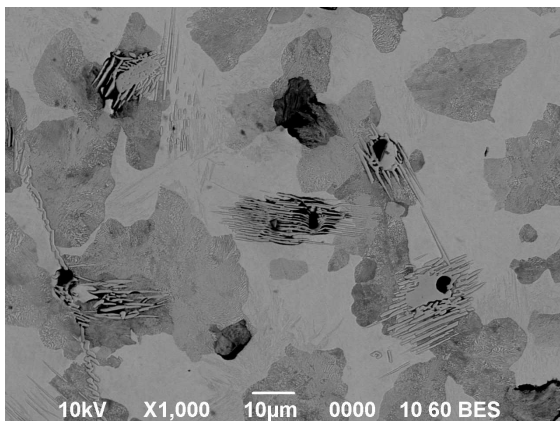
0.01 mm

Gambar 14. Struktur mikro produk cor 2 sebelum perlakuan panas hasil pengamatan dengan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x

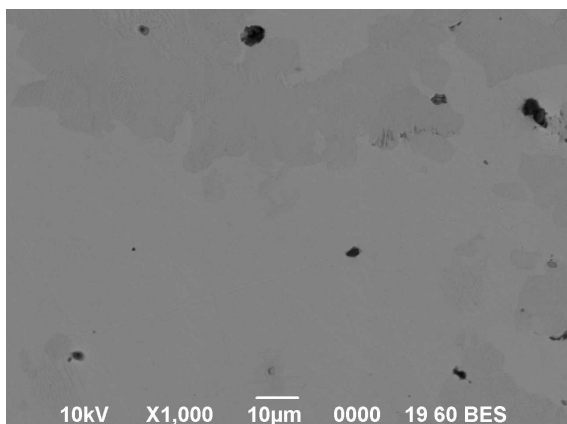


0.01 mm

Gambar 14. Struktur mikro produk cor 2 setelah perlakuan panas hasil pengamatan dengan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x



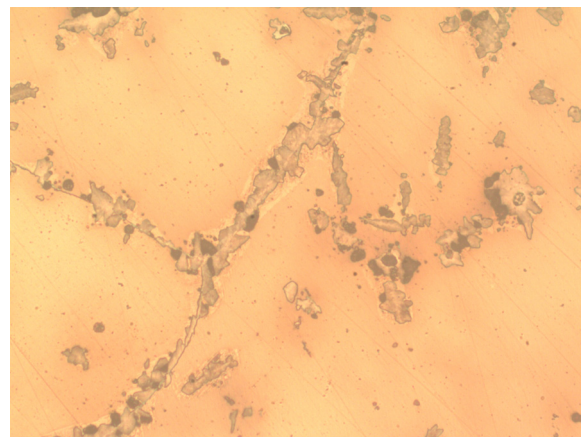
Gambar 15. Tampilan *back scatter electron* dari SEM untuk produk cor 2 tanpa perlakuan panas, etsa nital 5%



Gambar 15. Tampilan *back scatter electron* dari SEM untuk produk cor 2 setelah perlakuan panas, etsa nital 5%

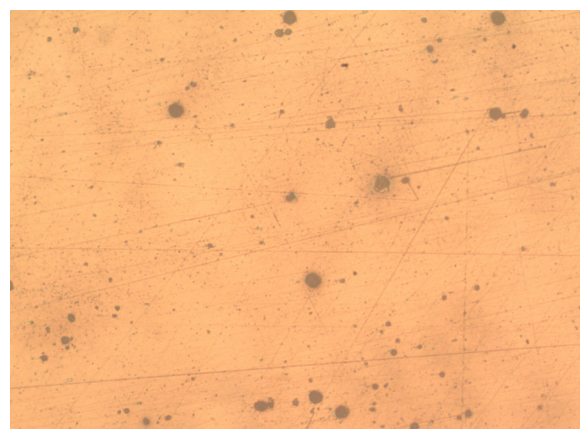
Gambar 16 dan gambar 17 memperlihatkan struktur mikro untuk produk cor 3, masing-masing sebelum dan setelah perlakuan panas. Pada produk cor sebelum perlakuan panas memperlihatkan adanya sedikit *intergranular carbide*. Sedangkan pada produk cor setelah perlakuan panas terlihat bahwa struktur mikro menjadi fasa tunggal *austenite*.

Gambar 18 dan 19 memperlihatkan *back scattered electron*, masing-masing untuk produk cor 3 sebelum dan setelah perlakuan panas.



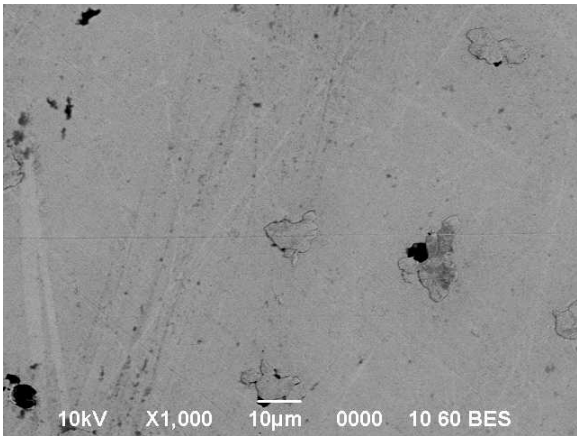
0.01 mm

Gambar 16. Struktur mikro produk cor 3 sebelum perlakuan panas hasil pengamatan dengan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x

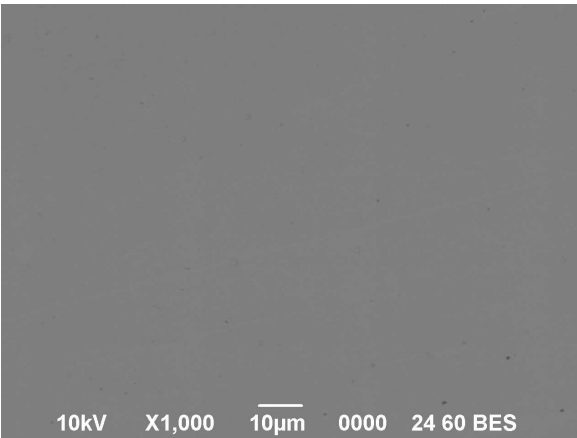


0.01 mm

Gambar 17. Struktur mikro produk cor 3 setelah perlakuan panas hasil pengamatan dengan *optical microscope*, etsa nital 5%, perbesaran 200 x

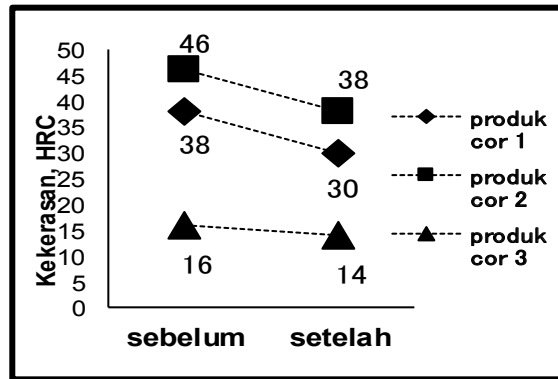


Gambar 18. Tampilan *back scatter electron* dari SEM untuk produk cor 3 tanpa perlakuan panas, etsa nital 5%



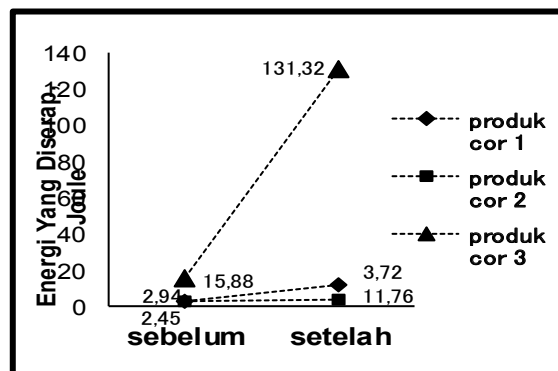
Gambar 19. Tampilan *back scatter electron* dari SEM untuk produk cor 3 setelah perlakuan panas, etsa nital 5%

Nilai kekerasan sebelum dan setelah perlakuan panas untuk produk cor 1, 2 dan 3 dapat dilihat pada gambar 20 berikut ini. Dari gambar tersebut terlihat bahwa nilai kekerasan untuk seluruh produk cor menurun setelah proses perlakuan panas. Bila melihat perubahan struktur mikro yang terjadi setelah perlakuan panas, terlihat bahwa karbida yang terbentuk setelah proses pengecoran sebagian atau seluruhnya larut. Untuk produk cor 1 sebagian besar karbida terlarut, yang tertinggal hanya sebagian kecil *intergranular carbide*. Produk cor 2 menyisakan *intergranular carbide* tanpa *acicular carbide* yang ada pada produk cor sebelum perlakuan panas. Sedangkan pada produk cor 3 menghilangkan seluruh karbida dan menghasilkan *full austenite*. Dengan hilangnya sebagian atau seluruh karbida menyebabkan nilai kekerasan setelah perlakuan panas menjadi turun.



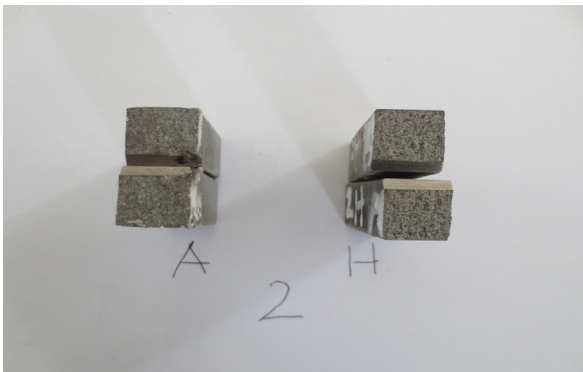
Gambar 20. Nilai kekerasan untuk produk cor 1, 2 dan 3 sebelum dan setelah perlakuan panas

Gambar 21 berikut memperlihatkan jumlah energi yang diserap oleh sampel impak produk cor 1, 2 dan 3 sebelum patah yang menggunakan pengujian impak metoda *charpy*. Terlihat bahwa kekuatan impak meningkat untuk seluruh produk cor setelah perlakuan panas. Penurunan jumlah atau hilangnya karbida akibat perlakuan panas menyebabkan kekuatan impak meningkat. Untuk produk cor 1 peningkatan kekuatan impak tidak terlalu signifikan. Produk cor 2 memperlihatkan sedikit peningkatan kekuatan impak, dari 2,94 joule energi yang diserap menjadi 11,76 joule. Sedangkan untuk produk cor 3 memperlihatkan bahwa kekuatan impak meningkat sangat drastis, yaitu dari 15,88 joule energi yang diserap menjadi 131,32 joule. Bila menganalisis struktur mikro yang dihasilkan oleh produk cor 3, struktur mikro *full austenite* hasil perlakuan panas menghasilkan kekuatan impak yang sangat tinggi.



Gambar 21. Energi yang diserap dari pengujian impak metoda *charpy* untuk produk cor 1, 2 dan 3 sebelum dan setelah perlakuan panas

Gambar 22 dan 23 memperlihatkan permukaan sampel impact setelah patah, masing-masing untuk produk cor 2 dan produk cor 3. Terlihat dengan jelas bahwa permukaan impact produk cor 2 berbentuk patahan halus, sedangkan pada produk cor 3 patahan berbentuk serabut. Hal ini menandakan bahwa produk cor 3 memiliki sifat yang tangguh dibandingkan dengan produk cor 2.



Gambar 22. Patahan halus pada produk cor 2,
A: sebelum perlakuan panas, H: setelah perlakuan panas



Gambar 23. Patahan serabut pada produk cor 3,
A: sebelum perlakuan panas, H: setelah perlakuan panas

KESIMPULAN DAN SARAN

Kekerasan baja mangan pada produk cor 3 setelah perlakuan panas, dengan kandungan karbon 1%, mangan 13,5% dan tanpa krom, memiliki kekerasan terendah tetapi memiliki kekuatan impact yang sangat tinggi bila dibandingkan dengan baja mangan pada produk cor 1 dan 2. Nilai kekerasan dan energi yang diserap untuk produk cor 3 masing-masing adalah

14 HRC dan 131,32 joule, sedangkan untuk produk cor 1 dan 2, masing masing adalah 30 HRC, 38 HRC serta 11,76 joule, 3,72 joule. Ketangguhan yang tinggi dari produk cor 3 disebabkan terbentuknya fasa *full austenite* akibat terlarutnya seluruh karbida setelah proses perlakuan panas. Dengan perlakuan panas, seluruh fasa *interdendritic carbide* di dalam struktur mikro produk cor 2 dapat terlarut, sedangkan sebagian besar *intergranular carbide* pada produk cor 1 dapat terlarut.

Penelitian lanjutan diperlukan untuk melihat seberapa besar *work hardening* yang terjadi setelah produk *jaw plate* digunakan di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- S.W. Bhero, B. Nyembe, K. Lentsoana "Common Causes of Premature Failure of Hadfield Steel Crushers and Hammers Used in the Mining Industry", International Conference on Mining, Mineral Processing and Metallurgical Engineering, pages 174-175, 2013
- Basudev Bhattacharya, Ranjit Kumar Ray, Torben Leffers "Microstructural and Texture Development in Two Austenitic Steels with High Manganese Content", Metallurgical and Materials Transactions A, volume 46A, page 5296, 2015
- D.K. Subramanyam " Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys" ASM Handbook, volume 1, page 1278, 2005
- Malcolm Blair, Thomas L. Stevens "Wear Resistant Steel", Steel Casting handbook, sixth edition, page 19-3, 1995
- G.I. Silman "Structure Formation in Iron Alloys Equilibrium Structures", Metal Science and Heat Treatment, volume 47, page 398, 2005
- George F. Vander Voort " Metallography and Microstructures" ASM Handbook, volume 9, page 1673, 2004