

Analisis Kegagalan Pelat *Roller Coal Crusher* Pada *Circulating Fluidized Bed Boiler* di PLTU Batu Bara

F. F. Utomo* dan M. N. Ilman

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.

Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia

*E-mail: faris.f.u@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Salah satu alat yang digunakan untuk mengolah batu bara sebelum dimasukkan dan dibakar di dalam ruang bakar boiler pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batu bara dengan *circulating fluidized bed* (CFB) boiler adalah *coal crusher*. Salah satu masalah yang timbul pada alat tersebut adalah keausan pada gigi-gigi pelat yang bisa berdampak pada penurunan efisiensi pembakaran di boiler. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan *repair weld* untuk meningkatkan kekerasan permukaan (*hardfacing*) dengan menggunakan *shielded metal arc welding* (SMAW). Penelitian ini bertujuan mempelajari karakteristik material *Hadfield steel* yang digunakan sebagai pelat *roller coal crusher* di suatu PLTU batu bara CFB boiler pada kondisi sebelum perlakuan (*as received*) dan sesudah mengalami *hardfacing* (*repair weld*) menggunakan proses SMAW. Pada penelitian ini, perlakuan *hardfacing* dilakukan dengan menggunakan 3 jenis elektroda las SMAW, yaitu: AWS A5.4 E309-16, AWS A5.13 EFeMn-A, dan CHR 212, masing-masing untuk lapisan dasar, lapisan tengah dan permukaan atas dari gigi pelat. Selanjutnya dilakukan pengujian yang meliputi: uji komposisi kimia material, pengamatan struktur mikro, uji kekerasan mikro Vickers, uji tarik, uji impact, uji keausan, dan fraktografi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelat *as received* dengan struktur mikro berupa *austenite* cenderung rentan terhadap keausan (*impact wear*) pada gigi pelat saat dioperasikan karena kekerasan relatif rendah, yaitu sekitar 216 HV. Untuk pelat *repair weld*, struktur mikro berupa *austenite* pada lapisan AWS A5.4 E309-16 dan AWS A5.13 EFeMn-A dengan bentuk *columnar dendritic* sedangkan pada bagian permukaan gigi pelat yang dibuat dari elektroda CHR 212 berupa *martensite* dan *austenite*. Adanya struktur mikro berupa *martensite* pada permukaan gigi hasil dari *repair welding* ini menyebabkan peningkatan nilai kekerasan (700 HV) dan nilai ketahanan aus namun diikuti dengan penurunan ketangguhan impact dan kekuatan tarik akibat terjadinya retak las yang berupa retak pembekuan (*weld solidification cracking*) dan *hydrogen-induced crack*.

Kata kunci : *Coal crusher*, *Aus*, *Hadfield steel*, *Hardfacing*, *SMAW*, *Retak pembekuan*.

Abstract

One of the equipments used in circulating fluidized bed boiler (CFB) of coal-power plant to process coal before being burned on the boiler furnace is coal crusher. One of the problems that arises in this equipment is wear on the teeth which can decrease combustion efficiency in a boiler. Therefore, a repair weld method by means of hardfacing using shielded metal arc welding (SMAW) can be used to fabricate new teeth. This investigation aims to study the characteristics of Hadfield steel material, which is used as a roller coal crusher plate in a CFB coal-power plant, before (as received plate) and after (repaired weld plate) hardfacing. In this work, the hardfacing was performed using SMAW process with 3 types of welding electrodes, namely: AWS A5.4 E309-16, AWS A5.13 EFeMn-A, and CHR 212, were deposited to form base, middle and top parts of teeth respectively. Subsequently, several experiments were conducted including chemical composition analysis of material, microstructure observation, Vickers microhardness test, tensile test, impact test, wear test, and fractography. Results showed that as received plate having austenite microstructure was suffered from impact wear on the teeth. In repaired weld plate, the base and middle parts of teeth produced using AWS A5.4 E309-16 and AWS A5.13 EFeMn-A were composed of austenite respectively in the form of columnar dendritic microstructure whereas at the top part of the teeth produced using CHR 212 was composed of martensite and austenite. The presence of hard and brittle martensite increased hardness and wear resistance but accompanied by a decrease in impact toughness and strength due to weld solidification and hydrogen-induced cracking.

Keywords : *Coal Crusher*, *Wear*, *Hadfield Steel*, *Hardfacing*, *SMAW*, *Weld Solidification Crack*.

1. PENDAHULUAN

Batu bara, mulai dari penambangan hingga pengiriman ke unit, tidak bisa dihindarkan dari bercampurnya besi dan unsur pengotor lainnya. Selain itu, *coal crusher* dan peralatan lainnya juga mudah terkena aus maupun retak, bahkan dapat menimbulkan insiden serius (Lihua dan Yin, 2011). Oleh karena itu, metode *repair welding* menjadi salah satu alternatif untuk memperbaiki ketahanan keausan pada *coal crusher*. Metode ini berupa pengerasan permukaan (*hardfacing*) dengan menggunakan proses pengelasan. Salah satu teknik pengelasan yang biasanya digunakan adalah dengan las SMAW. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa metode dan proses tersebut terbukti mampu untuk memberikan nilai kekerasan yang lebih baik pada benda kerja dibanding kondisi aslinya (*as received*) (Sopiyan dkk., 2019; Sandra dkk., 2017). Nilai kekerasan, dalam hal ini, merupakan faktor yang harus diperhatikan untuk menilai ketahanan aus suatu material dikarenakan nilai kekerasan berbanding lurus dengan ketahanan aus. Dimana, semakin tinggi nilai kekerasan, semakin tinggi ketahanan aus suatu material (Pintaude dkk. 2009).

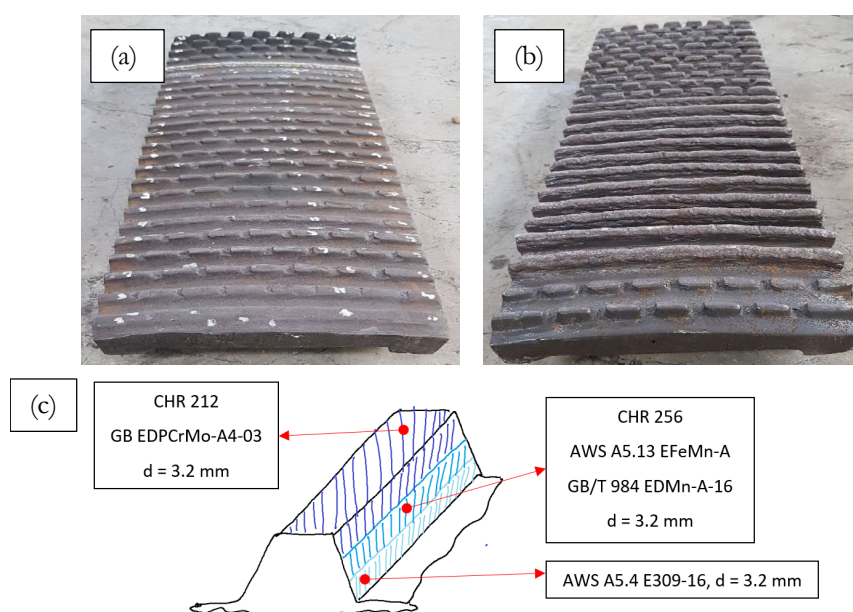
Meskipun demikian, proses pengelasan SMAW dapat menimbulkan cacat dan penurunan kekuatan mekanik pada benda kerja (Imam dan Sarjito, 2008). Kualitas las SMAW dipengaruhi banyak faktor seperti pemilihan jenis elektroda las, arus (I), tegangan (E) dan masukan panas (*heat input*). Untuk itu, diperlukan penelitian yang lebih lanjut mengenai karakteristik material yang telah mengalami proses pengelasan SMAW.

Penelitian ini akan mengamati karakteristik material *Hadfield steel*, yang digunakan sebagai pelat *roller coal crusher* di suatu PLTU batu bara CFB *boiler*, sebelum (pelat *as received*) dan sesudah mengalami *hardfacing (repair weld)* menggunakan proses pengelasan SMAW. Pada penelitian ini digunakan 3 jenis elektroda las untuk *repair weld*, yaitu: AWS A5.4 E309-16, AWS A5.13 EFeMn-A, dan CHR 212. Selanjutnya dilakukan karakterisasi material yang meliputi: uji komposisi kimia, pengamatan struktur mikro, uji kekerasan mikro Vickers, uji tarik, uji impak, uji keausan, dan fraktografi.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Roller Coal Crusher

Gambar 1 memperlihatkan *roller coal crusher* pada kondisi: (a) *as received*, (b) *repair welding* dan (c) detil dari gigi material *repair weld*. *Repair weld* dilakukan dengan 3 lapisan las SMAW yaitu: AWS A5.4 E309-16, AWS A5.13 EFeMn-A, dan CHR 212 masing-masing untuk bagian dasar (*base*), tengah (*middle*) dan atas (*top*) dari gigi.



Gambar 1. *Roller coal crusher* pada kondisi: (a) *as received*, (b) *repair weld*, beserta (c) tiga lapis las SMAW pada gigi pelat *repair weld*

2.2. Uji Komposisi Kimia

Uji komposisi kimia dilakukan menggunakan spektrometer dengan metode FELAST. Spesimen berjumlah 6 buah, yaitu: 1 buah spesimen material gigi pelat *as received*, 1 buah spesimen material logam induk pelat *as received*, 1 buah spesimen material gigi pelat *repair weld* daerah AWS A5.4 E309-16, 1 buah spesimen material gigi pelat *repair*

weld daerah AWS A5.13 EFeMn-A, 1 buah spesimen material gigi pelat *repair weld* daerah CHR 212, dan 1 buah spesimen material logam induk pelat *repair weld*.

2.3. Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik pada material logam induk dan gigi *roller coal crusher*. Spesimen berjumlah 2 buah, yaitu: 1 buah spesimen material gigi dan logam induk pelat *as received*, dan 1 buah spesimen material gigi dan logam induk pelat *repair weld*, yang dietsa menggunakan HNO₃ 2% + 98 % propanol selama 10 – 20 detik.

2.4. Uji Kekerasan Mikro Vickers

Uji kekerasan mikro Vickers dilakukan menggunakan alat uji kekerasan mikro Vickers dengan parameter pengujian sebagai berikut: beban sebesar 0,2 kg, lama waktu pembebanan 10 detik, dan jarak antar titik uji sebesar 0,5 mm. Spesimen berjumlah 2 buah, yaitu: 1 buah spesimen gigi pelat *as received*, dan 1 buah spesimen gigi pelat *repair weld*.

Persamaan 1 berikut ini digunakan untuk menghitung nilai kekerasan material (Callister and Rethwisch, 2010):

$$HV = \frac{1,854 P}{d_1^2} \quad (1)$$

dimana:

HV = nilai kekerasan Vickers (kg/mm²)

P = beban (kg)

d_1 = panjang diagonal rata-rata (mm)

2.5. Uji Tarik

Uji tarik dilakukan menggunakan mesin uji tarik Servopulser dengan kapasitas beban maksimal sebesar 20 Ton. Spesimen berjumlah 4 buah, yaitu: 3 buah spesimen gigi pelat *as received*, 1 buah spesimen gigi pelat *repair weld* dengan bentuk mengikuti ASTM E8/8M.

Persamaan 2 dan 3 berikut ini digunakan untuk menghitung nilai kekuatan luluh dan kekuatan tarik material (Callister and Rethwisch, 2010):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

dimana:

σ = tegangan tarik (N/m² atau Pa)

F = beban / gaya (N)

A_0 = luas penampang sebelum pembebanan (m²)

sedangkan nilai regang dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad (3)$$

dimana:

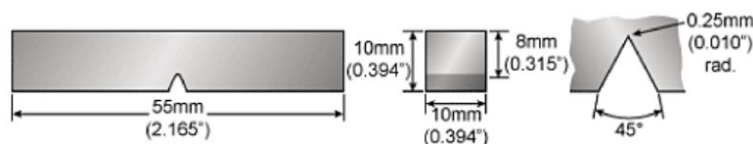
ε = regangan

l_i = panjang spesimen setelah pembebanan (m)

l_0 = panjang spesimen sebelum pembebanan (m)

2.6. Uji Ketangguhan Impak

Uji ketangguhan impact dilakukan menggunakan alat uji impact Charpy dengan energi impact sebesar 150 J dan sudut awal sebesar 156°. Spesimen berjumlah 6 buah, yaitu: 3 buah spesimen gigi pelat *as received*, 3 buah spesimen gigi pelat *repair weld*. Bentuk spesimen uji tarik ditunjukkan pada Gambar 2 berikut:



Gambar 2. Bentuk spesimen uji impact.

Nilai energi impact spesimen didapatkan melalui penunjukkan *pointer* pada skala yang ada di alat uji impact Charpy. Selanjutnya, nilai ketangguhan impact spesimen dihitung dengan menggunakan Persamaan 4 berikut:

$$\text{Ketangguhan Impact} = \frac{KV}{A} \quad (4)$$

Dimana:

Ketangguhan Impact = nilai ketangguhan impact spesimen (J/mm²)
KV = nilai energi impact spesimen (J)
A = luas permukaan patah spesimen (mm²)

2.7. Uji Keausan

Uji keausan dilakukan menggunakan alat uji keausan dengan parameter pengujian sebagai berikut: lebar piringan pengaus sebesar 3 mm, jari-jari piringan pengaus sebesar 13,3 mm, beban tekan saat pengausan sebesar 2,12 kg, jarak tempuh dari proses pengausan sebesar 66000 mm, dan kecepatan piringan pengaus sebesar 878400 mm/jam. Spesimen berjumlah 5 buah, yaitu: 1 buah spesimen gigi pelat *as received*, 1 buah spesimen logam induk gigi pelat *as received*, 1 buah spesimen material gigi pelat *repair weld* daerah AWS A5.4 E309-16, 1 buah spesimen material gigi pelat *repair weld* daerah AWS A5.13 EFeMn-A, 1 buah spesimen material gigi pelat *repair weld* daerah CHR 212.

Persamaan 5 berikut ini digunakan untuk menghitung keausan spesifik material (Stachowiak, 2005):

$$W_s = \frac{Bb^3}{8rPl_0'} \quad (5)$$

dimana:

W_s = keausan spesifik (mm² / kg)
B = lebar piringan pengaus (mm)
b = lebar keausan pada benda uji (mm)
r = jari-jari piringan pengaus (mm)
P = beban tekan saat pengausan (kg)
l₀' = jarak tempuh dari proses pengausan (mm)

Selanjutnya, Persamaan 6 berikut digunakan untuk menghitung kedalaman laju keausan (Stachowiak, 2005):

$$Wt = Ws \rho v \quad (6)$$

dimana:

Wt = kedalaman laju keausan (mm / jam)
 W_s = keausan spesifik (mm² / kg)
 ρ = tekanan normal (kg / mm²)
v = kecepatan piringan pengaus (mm / jam)

Selanjutnya, perkiraan umur pakai dapat dihitung dengan membandingkan kedalaman laju keausan dengan tebal gigi pelat, dalam hal ini tebal gigi pelat yang digunakan sebesar 10 mm.

2.8. Fraktografi

Fraktografi dilakukan menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM) pada 1 buah spesimen gigi pelat *as received*. Selain itu, fraktografi juga dilakukan menggunakan mikroskop optik pada permukaan patah spesimen uji tarik dan uji impact.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Uji Komposisi Kimia

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa logam induk pelat *repair weld* identik dengan logam induk pelat *as received*. Sehingga, jenis material logam induk pelat *repair weld* adalah ASTM A128 Grade A atau Grade B-2 sedangkan, pada gigi pelat *repair weld* memiliki tiga jenis daerah logam las akibat penggunaan tiga buah jenis elektroda las.

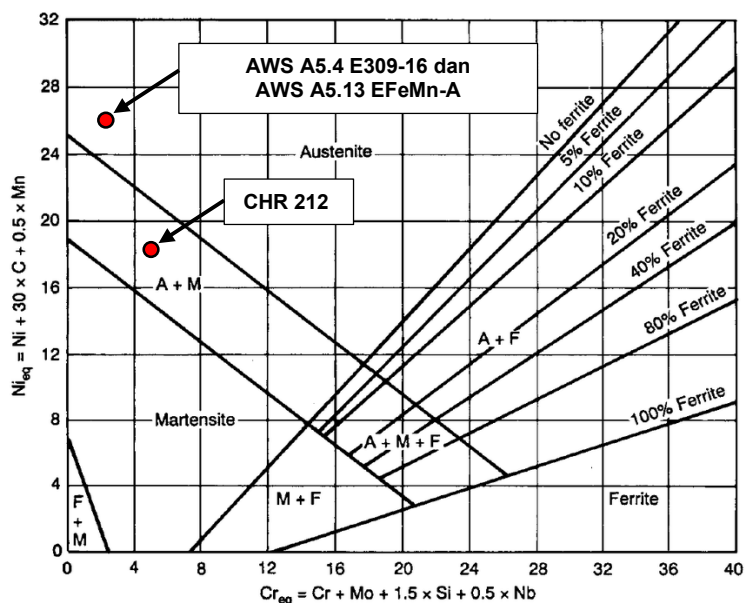
Komposisi kimia *Hadfield steel* merupakan campuran karbon (C) dan mangan (Mn) dan kadang-kadang ditambahkan unsur-unsur paduan lainnya seperti: krom (Cr), nikel (Ni), molibdenum (Mo), vanadium (V), titanium (Ti), dan bismut (Bi). Unsur karbon dan mangan merupakan unsur pembentuk *austenite* (γ) dimana, unsur mangan berperan memberikan kestabilan fasa *austenite* dengan cara menunda perubahan fasa *austenite* pada suhu

transformasinya. Sedangkan unsur krom merupakan unsur pembentuk ferit (α) dan memberikan sifat ketahanan terhadap korosi dan abrasi.

Tabel 1. Hasil uji komposisi kimia.

Unsur (%)	Pelat <i>As Received</i>		Pelat <i>Repair Weld</i>			
	Logam Induk	Gigi	Logam Induk	AWS A5.4 E309-16	AWS A5.13 EFeMn-A	CHR 212
C	1,09	1,07	1,09	0,65	0,65	0,54
Si	0,82	1,08	0,82	0,75	0,75	0,80
Mn	10,14	11,51	10,14	11,21	11,12	3,81
P	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02
S	0	0	0	0	0	0
Cr	0,19	0,28	0,19	2,14	2,28	3,35
Al	0,11	0,25	0,11	0,01	0,01	0,03
Sn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,07	0,1	0,07	0,05	0,05	0,07
Ni	0,03	0,08	0,03	0,42	0,48	0,22
Mo	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,33
W	0	0	0	0,47	0,47	0,21
Ti	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
Nb	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
V	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,04
Co	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Pb	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,01
Ca	0	0	0	0	0	0
Zn	0,01	0,04	0,01	0,03	0,03	0,02
Fe	87,36	85,39	87,36	84,08	83,97	90,45

Dengan menggunakan diagram Schaeffler pada Gambar 3, struktur mikro material pada Tabel 1 di atas bisa ditentukan dengan cara menghitung nilai *Nickel Equivalent* (Ni_{eq}) dan *Chromium Equivalent* (Cr_{eq}). Dari hasil perhitungan ini dapat disimpulkan bahwa struktur mikro untuk semua daerah material yang diuji berupa *austenite*, kecuali pada CHR 212 yang berupa *martensite* dan sedikit *austenite*.



Gambar 3. Diagram Schaeffler untuk baja tahan karat

3.2. Pengamatan Struktur Mikro

Berdasarkan Gambar 4 (a) dan 4 (b), dapat diketahui bahwa material logam induk dan gigi pelat *as received* memiliki struktur mikro *austenite*. Struktur *austenite* bisa terjadi jika kandungan mangan pada baja cukup tinggi. Hal ini disebabkan karena mangan memberikan kestabilan fasa *austenite* dengan cara menunda perubahan fasa *austenite* hingga suhu transformasinya mencapai suhu kamar. Disamping kesamaan fasa, dari Gambar 4 (a) dan (b) terlihat adanya perbedaan ukuran butiran (*grain size*) pada gigi dan logam induk yaitu ukuran butiran pada gigi lebih halus dibanding logam induk. Hal ini akan menyebabkan perbedaan nilai kekerasan dimana daerah dengan ukuran butiran halus akan memiliki nilai kekerasan lebih tinggi daripada daerah dengan ukuran butiran kasar (Schino dkk., 2002).

Gambar 4 (c) dan 4 (d) memperlihatkan struktur mikro pada gigi dari pelat *repair weld*. Berdasarkan Gambar 4 (c), bagian atas gigi pelat *repair weld* memiliki struktur mikro *martenite* dan berbentuk *columnar dendritic* dengan jarak yang berdekatan satu sama lainnya. Struktur mikro *columnar dendritic* dapat terjadi jika laju solidifikasinya (R) cukup tinggi dan disertai dengan gradien suhu (G) yang cukup rendah. Adapun jarak antar *dendrite* akan semakin dekat satu sama lainnya jika laju pendinginan (dT/dt), yaitu gradien suhu dikalikan dengan laju solidifikasi (GR), semakin tinggi. Struktur mikro pada daerah batas (*fusion line*) antara logam induk dan bagian bawah gigi pelat *repair welding* terlihat pada Gambar 4 (d). Dari Gambar 4 (d) tersebut terlihat bahwa struktur mikro untuk logam induk berbentuk *polygonal* yang merupakan tempat proses pembekuan las untuk elektroda AWS A5.4 E309-16. Selain itu, terdapat juga struktur mikro *planar* pada gigi bagian bawah yang terjadi akibat gradien suhu yang tinggi dan atau laju solidifikasi yang sangat rendah (Lippold, 2015).

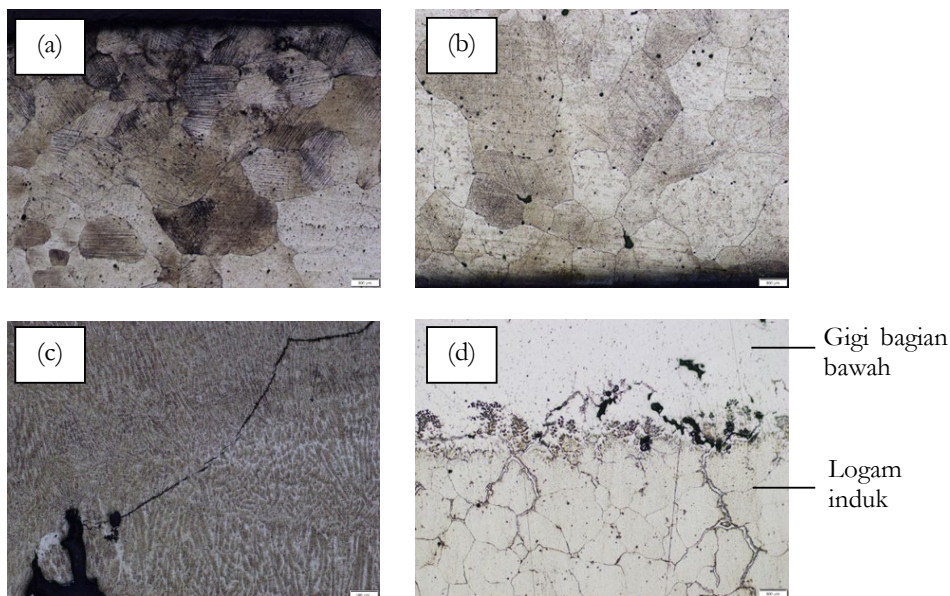
Selain melihat struktur mikro, dari Gambar 4 (c) dan 4 (d) dapat diketahui bahwa terdapat dua jenis retakan las. Retakan pertama menyerupai lubang besar dan bentuknya mengikuti bentuk butiran (*intergranular*). Hal tersebut merupakan ciri-ciri dari *weld solidification cracking*. Pada dasarnya, *weld solidification cracking* terjadi jika dua kondisi berikut terpenuhi, yaitu: (1) mengalami peregangan termal dan mekanis, dan (2) memiliki struktur mikro yang rentan terhadap retakan. Peregangan dapat terjadi baik secara intrinsik, ekstrinsik, maupun gabungan keduanya. Faktor yang bisa menjadi penyebab peregangan intrinsik diantaranya adalah: kekuatan material, ukuran dan ketebalan material kerja, desain sambungan, serta ukuran dan bentuk *weld bead* sedangkan faktor ekstrinsik utamanya terjadi akibat adanya *mechanical fixturing* pada material. Peregangan yang menyebabkan jenis retakan ini diakibatkan oleh penyusutan volume selama transformasi fasa dari cair menjadi padat. Selain itu, kontraksi termal yang terjadi akibat pendinginan HAZ juga dapat menambah peregangan yang terjadi. Kerentanan struktur mikro material terhadap retakan ini diakibatkan oleh adanya lapisan cair sepanjang batas solidifikasi pada logam las akibat pemisahan (*segregation*) (Lippold, 2015).

Retakan kedua memiliki bentuk menyerupai garis tipis yang membelah butiran atau dikenal dengan sebutan *transgranular crack*. Hal ini merupakan ciri dari *hydrogen-induced cracking* (HIC). HIC seringkali terjadi pada proses pengelasan dikarenakan adanya hidrogen yang masuk ke dalam *weld pool* selama proses pengelasan. Suhu tinggi dari busur listrik las dapat mengurai gas hidrogen, uap air, serta senyawa yang mengandung hidrogen, yang berakibat terbentuknya atom hidrogen yang kemudian masuk ke dalam *weld pool* lalu terdifusi ke matriks logam. Secara umum, HIC dapat terjadi jika memenuhi kondisi berikut: jumlah hidrogen yang tinggi, struktur mikro yang rentan terhadap retakan, adanya tegangan ulet, dan suhu material berada pada $-100 - 200$ °C (Lippold, 2015).

Sumber hidrogen yang menyebabkan hidrogen dapat masuk ke *weld pool* saat proses pengelasan bisa didapatkan dari: unsur hidrogen yang terdapat pada material kerja, kelembaban tinggi pada *coating* dan *flux* elektroda las, kontaminasi benda organik (gemuk atau oli), hidrogen pada gas pelindung, serta kelembaban udara lingkungan proses pengelasan. Selain itu, pemilihan proses pengelasan juga dapat berpengaruh pada jumlah hidrogen yang masuk ke *weld pool*. Proses SMAW, *flux-cored arc welding* (FCAW), dan *submerged arc welding* (SAW), merupakan proses yang paling mudah untuk hidrogen dapat masuk ke *weld pool* dikarenakan adanya kelembaban pada elektroda las yang digunakan (Lippold, 2015).

Secara umum, struktur mikro keras dan getas merupakan struktur mikro yang sangat rentan terhadap HIC. Struktur mikro ini biasanya terbentuk akibat pendinginan yang sangat cepat pada suhu di atas suhu kritis atas. Laju pendinginan yang cepat ini dapat diakibatkan oleh rendahnya *input* panas pengelasan, rendahnya suhu pemanasan awal, suhu *interpass*, dan material kerja yang tebal (Lippold, 2015).

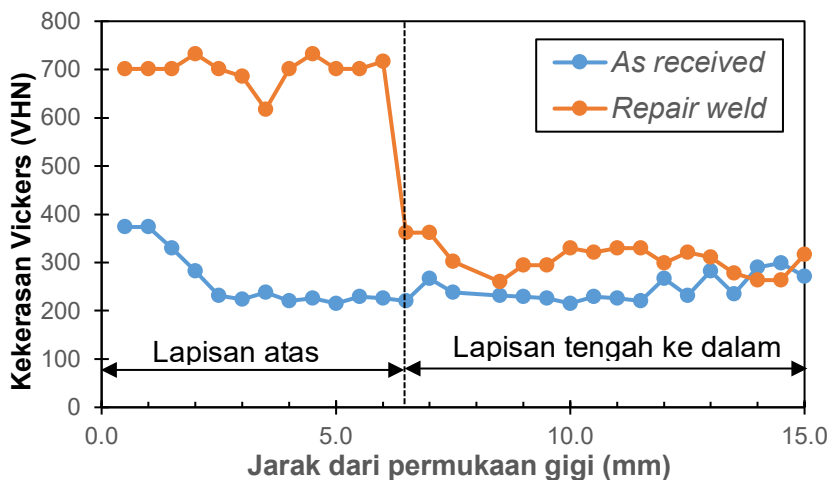
Tegangan sisa bisa terdapat pada daerah HAZ dengan nilai hingga mendekati nilai tegangan luluh material. Adanya cacat geometri, lalu, misalnya pada SMAW berupa adanya *slag intrusions* pada *toe of the weld*, merupakan tempat konsentrasi tegangan pada logam las. Lokasi ini biasanya sangat berdekatan dengan struktur mikro material yang rentan terhadap retakan dan juga hidrogen yang bisa menyebabkan HIC (Lippold, 2015).



Gambar 4. (a). Struktur mikro gigi pelat *as received* (*austenite*); (b). Struktur mikro logam induk pelat *as received* (*austenite*); (c). Struktur mikro gigi pelat *repair weld* bagian atas (*martensite* dan *austenite*); (d). Struktur mikro perbatasan gigi–logam induk pelat *repair weld* di bagian *fusion line*.

3.3. Uji Kekerasan Mikro Vickers

Gambar 5 memperlihatkan distribusi kekerasan untuk pelat *as received* dan *repair weld*. Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa untuk pelat *as received*, secara umum distribusi kekerasan hampir merata karena tersusun oleh material dan fasa yang sama yaitu *austenite* kecuali pada permukaan gigi yang terlihat lebih tinggi nilai kekerasannya. Hal ini mungkin terjadi akibat proses *hardening* pada permukaan gigi-gigi pelat *as received* yang dapat terlihat dari ukuran butir yang halus (Schino dkk., 2002). Nilai kekerasan gigi pelat *repair weld* pada bagian atas gigi sangat tinggi yaitu 600 – 750 HV jauh melebihi nilai kekerasan gigi pelat *as received* yang berkisar antara 200 – 400 HV. Hal ini disebabkan karena elektroda CHR 212 yang digunakan pada gigi bagian atas membentuk struktur mikro *martensite* dan *austenite*. Ini berarti bahwa proses *hardfacing* menggunakan tiga elektroda las tersebut di atas mampu menciptakan nilai kekerasan yang tinggi pada material. Untuk bagian dasar dan tengah dari gigi yang masing-masing dibuat dari AWS A5.4 E309-16 dan AWS A5.13 EFeMn-A mempunyai kekerasan yang relatif sama yaitu sekitar 300 HV, sedikit lebih tinggi dari nilai kekerasan gigi *as received*.

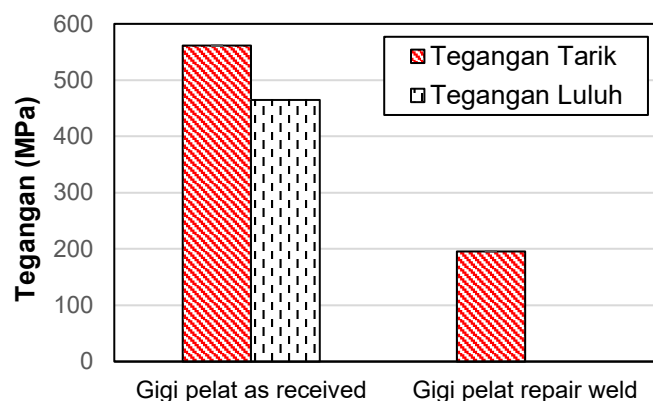


Gambar 5. Nilai kekerasan mikro Vickers.

3.4. Uji Tarik

Berdasarkan Gambar 6 dapat diketahui bahwa pelat *repair weld* tidak memperlihatkan adanya tegangan luluh karena deformasi yang terjadi sangat kecil. Fenomena ini menunjukkan bahwa material gigi *repair weld* kehilangan

sifat uletnya dan berubah menjadi getas (Callister and Rethwisch, 2010). Selain itu, nilai kekuatan tarik juga menurun jauh jika dibandingkan dengan nilai kekuatan tarik pelat *as received*.

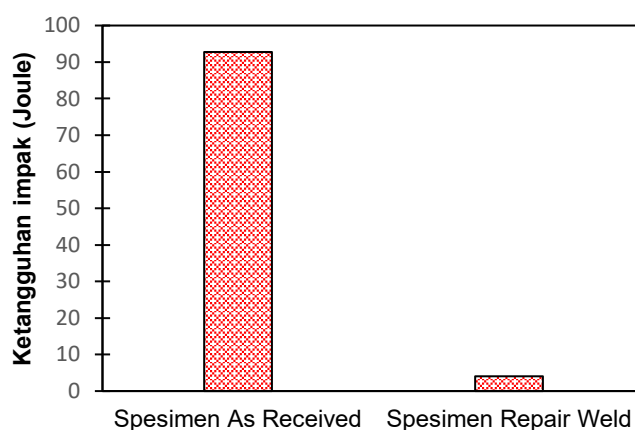


Gambar 6. Hasil uji tarik.

Pengelasan menggunakan elektroda-elektroda ini seharusnya dapat memberikan nilai kekuatan luluh dan nilai kekuatan tarik yang tinggi pada material pelat *repair weld*. Namun, hal tersebut tidak terjadi akibat adanya cacat berupa retak pembekuan pada las sehingga menyebabkan material pelat *repair weld* mengalami penurunan kekuatan tarik. Selain itu, ada kemungkinan material mengalami panas berlebih saat proses pengelasan sehingga menyebabkan pengetasan (*embrittlement*) material. Faktor lainnya adalah adanya HIC akibat difusi hidrogen saat proses pengelasan yang juga dapat menjadikan material menjadi getas (Lippold, 2015). Selanjutnya, retakan pada logam las membuat material kehilangan kekuatan tariknya (Cong-cong dkk., 2012).

3.5. Ketangguhan Impak

Berdasarkan Gambar 7 dapat diketahui bahwa pelat *repair weld* mengalami penurunan nilai energi impact yang signifikan jika dibandingkan dengan nilai energi impact pelat *as received*. Hal ini disebabkan oleh sifat material yang getas dan adanya retakan pada logam las. Material getas hanya mampu menyerap sedikit energi dari suatu beban impact saat material tersebut patah (Callister and Rethwisch, 2010). Untuk dapat menjaga ketangguhan material, panas berlebih saat proses pengelasan harus dihindari. Nilai energi impact yang kecil pada material pelat *repair weld* ini juga disebabkan karena penggunaan elektroda CHR 212 yang menghasilkan struktur *martensite* yang getas. Selain itu, adanya HIC akibat difusi hidrogen ke dalam logam las saat proses pengelasan dapat juga menyebabkan material menjadi getas (Lippold, 2015). Adanya retakan pada logam las ini dapat menyebabkan menurunnya nilai ketangguhan impact material (Jin dkk., 2014).

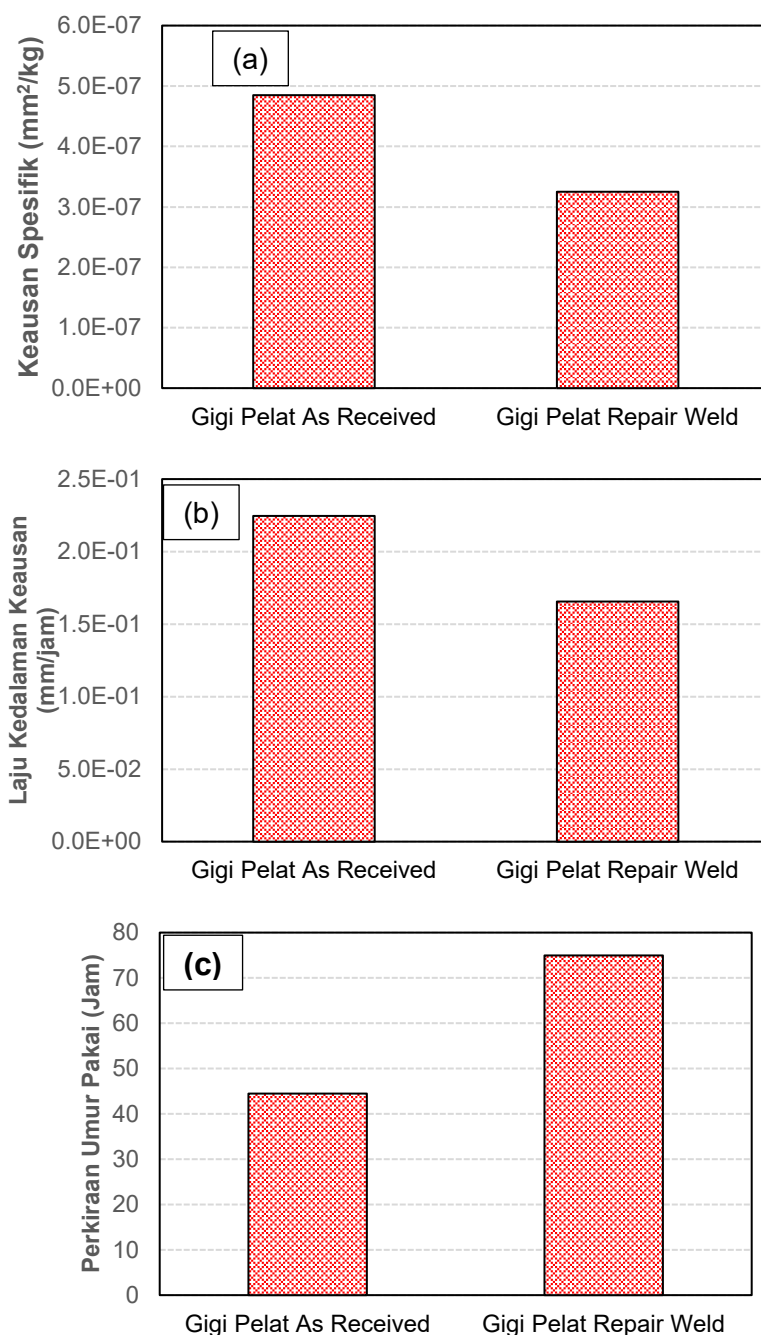


Gambar 7. Hasil uji impact.

3.6. Uji Keausan

Berdasarkan Gambar 8 (a) dan (b) dapat diketahui bahwa laju kedalaman keausan pada gigi pelat *repair weld* lebih rendah daripada daripada gigi pelat *as received*. Hal ini didukung dengan perkiraan umur pakai material *repair*

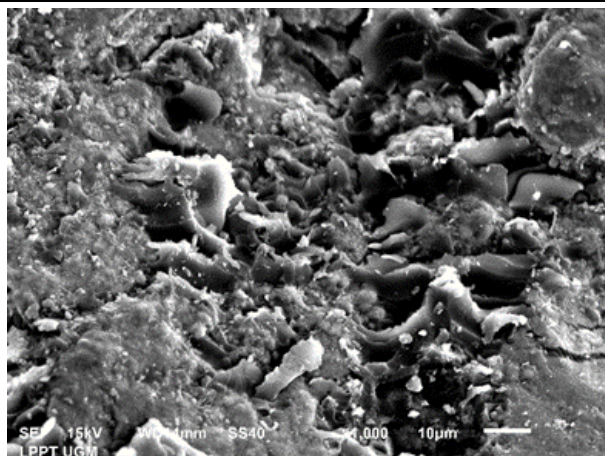
weld yang jauh lebih lama daripada material *as received* (Gambar 8 (c)). Hal tersebut dikarenakan tingginya nilai kekerasan material pelat *repair weld* yang kemudian berdampak pada ketahanan aus material menjadi lebih baik (Pintaude dkk., 2009) sehingga membuat material dapat bertahan untuk waktu yang lebih lama dari keausan.



Gambar 8. Hasil uji keausan: (a) keausan spesifik, (b) laju kedalaman keausan dan (c) perkiraan umur pakai.

3.7. Fraktografi

Berdasarkan Gambar 9 dapat terlihat bahwa permukaan gigi pelat *as received* berbentuk menyerupai kawah-kawah dan bertekstur kasar. Ditambah lagi, daerah yang berwarna gelap terlihat memiliki kedalaman yang lebih daripada daerah berwarna terang. Hal tersebut merupakan ciri-ciri dari *impact wear*, sehingga dapat dikatakan bahwa gigi pelat *as received* mengalami *impact wear* akibat dari beban impak yang diterima material saat proses menghancurkan batu bara.



Gambar 9. Foto mikro permukaan gigi pelat *as received*.

Penelitian ini sudah berupaya untuk mempelajari karakteristik gigi pada pelat *roller coal crusher* yang diproduksi melalui *repair welding*. Hasil-hasil ini memperlihatkan salah satu masalah pada pengelasan *repair welding* adalah terjadinya retak pembekuan (*solidification cracking*) dan *hydrogen-induced cracking*. Untuk penelitian selanjutnya akan dipelajari parameter las untuk mendapatkan kondisi yang optimal sehingga permasalahan ini bisa dihindari.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Gigi-gigi pada pelat *as received* yang terbuat dari ASTM A128 Grade A mempunyai struktur mikro *austenite* yang relatif lunak sehingga mudah mengalami *impact wear* saat proses menghancurkan batu bara.
2. Gigi pelat *as received* ini memiliki: nilai kekerasan antara 200 – 400 HV, nilai kekuatan luluh dan tarik sebesar 464,56 dan 561,30 N/mm², nilai energi impak dan ketangguhan impak sebesar 92,83 J dan 1,05 J/mm², nilai kedalaman laju keausan antara 1,08 – 2,25E-01 mm/jam dengan perkiraan umur pakai sekitar 44 jam, dan permukaan patah bertekstur kasar (patah getas).
3. Material logam induk pelat *repair weld* berjenis ASTM A128 Grade A atau B-2 dengan struktur mikro *austenite*. Sedangkan pada bagian giginya terdiri dari tiga jenis daerah logam las, yaitu: AWS A5.4 E309-16, AWS A5.13 EFeMn-A, dan CHR 212 dengan struktur mikro berupa *martenite* dan *austenite* yang berbentuk *columnar dendritic*. Gigi pelat *repair weld* pada bagian atas memiliki: nilai kekerasan antara 600 – 750 HV, nilai kekuatan luluh dan tarik sebesar 0 dan 266, 18 N/mm², nilai energi impak dan ketangguhan impak sebesar 4 J dan 0,069 J/mm², nilai kedalaman laju keausan antara 7,78E-02 – 2,29E-01 mm/jam dengan perkiraan umur pakai sekitar 70 jam, dan permukaan patah yang terdiri dari dua daerah, yaitu: daerah bertekstur kasar, dan daerah bertekstur halus.
4. Pada gigi pelat *repair weld* ditemukan dua jenis retakan, yaitu: *weld solidification cracking*, dan *hydrogen-induced cracking*. Selain itu, gigi pelat *repair weld* mengalami perubahan sifat dari ulet menjadi getas, yang disertai dengan penurunan kekuatan mekanik material, yang berpotensi menyebabkan patah pada material di masa mendatang.
5. Penggetasan dan penurunan kekuatan mekanik pada gigi material *repair weld* kemungkinan disebabkan oleh panas berlebih saat proses pengelasan. Hal tersebut menyebabkan terjadinya difusi hidrogen ke dalam logam las yang kemudian berdampak pada terbentuknya retak pembekuan dan *hydrogen-induced crack* di dalam logam las tersebut.

5. DAFTAR PUSTAKA

- ASM Handbook, *Friction, Lubriation, and Wear Technology*, Vol. 18, 1992.
- ASM Handbook, *Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys*, Vol. 1, 1993.
- American Welding Society, *Spesification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*, A5, pp. 4-92, 1992. ISBN 0-87171-385-3
- American Welding Society, *Spesification for Surfacing Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*, A5.13:2000, 2000. ISBN 0-87171-607-0
- ASTM, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, E8/8M-13a.
- A. Di Schino, I. Salvatori, and J.M. Kenny, 2002, Effects of martensite formation and austenite reversion on grain refining of AISI 304 stainless steel, *Journal of Materials Science*, Vol. 37, pp. 4561–4565.

- G. Pintaude, F.G. Bernardes, M.M. Santos, A. Sinatora, E. Albertin, 2009, Mild and severe wear of steels and cast irons in sliding abrasion, *Wear*, Vol. 267, pp. 19–25.
- G.M. Boyd, 1970, *Brittle Fracture in Steel Structures*, Butterworths, UK.
- G.W. Stachowiak, 2005, *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*, Wiley, USA.
- H. Cong-cong, H. Peng-fei, and Z. Bai-lin, 2012, Numerical Simulation of the Effect of Crack on the Tensile Mechanical Properties of Graphene, *2012 Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation*.
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-charpy-testing>, 2021. Accessed: December 2nd, 2021
- P.M. Imam, J.S. Sarjito, 2008, Analisis kekuatan sambungan las SMAW (shielded metal arc welding) pada marine plate ST 42 akibat faktor cacat porositas dan incomplete penetration, *Kapal*, Vol. 5, No.2, pp. 102-113.
- J.C. Lippold, 2015, *Welding Metallurgy and Weldability*, Wiley, USA.
- Z. Lihua, L. Yin, 2011, Operation and Maintenance of Coal Handling System in Thermal Power Plant, *Procedia Engineering*, Vol. 26, pp. 2032–2037.
- M.Z. Jin, T.F. Zhao, C.Q. Chen, 2014, The effects of micro-defects and crack on the mechanical properties of metal fiber sintered sheets, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, pp. 1946–1953.
- M.S. Sandra, D. Gunomo, M.A. Ary, H.W. Marsa, 2017, Proses Pengerasan Permukaan untuk Meningkatkan Nilai Kekerasan dan Ketahanan Aus pada Pisau Shaktiman Rotary Mulcher, *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*, Vol. 5, No. 2, pp. 108-116.
- S. Sopiyan, N. Yos, 2019, Evaluasi hasil hardfacing elektroda HV 350 pasca quenching media air, coolant dan oli, *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, Vol.4, No. 2, pp. 66-72.
- W.D. Callister, Jr., D.G. Rethwisch, 2010, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, Wiley, USA.