

PERUBAHAN STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK PADA PENGELASAN DRUM BAJA KARBON WADAH LIMBAH RADIOAKTIF

Aisyah*)

ABSTRAK

PERUBAHAN STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK PADA PENGELASAN DRUM BAJA KARBON WADAH LIMBAH RADIOAKTIF. Drum volume 200 liter digunakan sebagai wadah limbah radioaktif hasil kompaksi. Drum wadah limbah terbuat dari pelat baja karbon rendah yang dalam fabrikasinya memerlukan pengelasan. Adanya siklus termal dalam pengelasan dapat mengakibatkan terjadinya perubahan struktur mikro dan sifat mekanik dari bahan drum. Dalam pemakaiannya drum wadah limbah mengalami beban tarik pada saat pengangkutan dan beban tumpuk pada saat penyimpanan, sehingga perubahan sifat mekanik yang terjadi harus mampu menahan beban tersebut. Dari perhitungan harga karbon ekuivalen (C_{eq}) sebesar 0,194 % bermakna bahwa baja karbon yang digunakan sebagai wadah limbah memiliki sifat mampu las yang baik. Pengelasan dilakukan dengan las busur listrik sedangkan pengamatan perubahan struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik dan mikroskop elektron. Perubahan sifat mekanik diamati dengan melakukan pengujian tarik dan kekerasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan struktur mikro terutama terjadi pada Heat Affected Zone (HAZ) dan daerah las. Pada HAZ terbentuk struktur bainite yang merupakan agregat ferrite dan cementite yang keras karena mengandung karbon. Namun demikian, saat pengelasan HAZ mengalami pemanasan dan pendinginan yang lambat sehingga terjadi pertumbuhan butir. Terbentuknya butir yang besar pada HAZ menjadikan daerah ini memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan daerah las. Struktur mikro daerah las terdiri dari struktur widmanstatten yang kasar dan daerah las merupakan daerah yang paling keras dan getas. Namun demikian perubahan struktur mikro dan sifat mekanik pada HAZ dan daerah las yang terjadi masih dalam batas wajar dan selamat bagi wadah limbah radioaktif.

Kata kunci: Limbah radioaktif, baja karbon, pengelasan, struktur mikro, sifat mekanik

ABSTRACT

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES CHANGE ON CARBON STEEL DRUM WELDING OF RADIOACTIVE WASTE CONTAINER. Drum of 200 litre is used for container of compacted radioactive waste. The drum is made of low carbon steel sheet of which its fabrication involves welding process. Thermal cycle in the welding process may result in microstructure and mechanical properties change on drum material. At their application, the waste container drum wrecked the tensile load at handling and stack load at storage, so the mechanical properties change had to able to restrain their load. The based on the calculated equivalent carbon (C_{eq}) value of 0.194 %, that means the carbon steel used as material for radioactive waste drum has a good weld ability. The welding was conducted by electric arc welding and observation of microstructure change was carried out by means of optical and electron microscopes. The observation of mechanical properties change was carried out by tensile strength and hardness test. The result of the research shows that the microstructure change has taken place on Heat Affected Zone (HAZ) and weld regions. On the HAZ region a hard bainite structure was produced, composed of ferrite and cementite agregat, the hard structure is caused by the carbon exist. During welding, the HAZ was exposed to a slow heating and cooling process resulting in the occurrence of particle growing in the region. The occurrence of large particles in the HAZ results in softer material was compared to that in the welding zone. Microstructure of the welding zone is composed of coarse widmanstatten structure, therefore the welding zone is the toughest zone but brittle. Nevertheless, the change of microstructure and mechanical properties of the welding zone was normal and safe for radioactive waste drum.

Keywords: radioactive waste, carbon steel, welding, microstructure, mechanical properties.

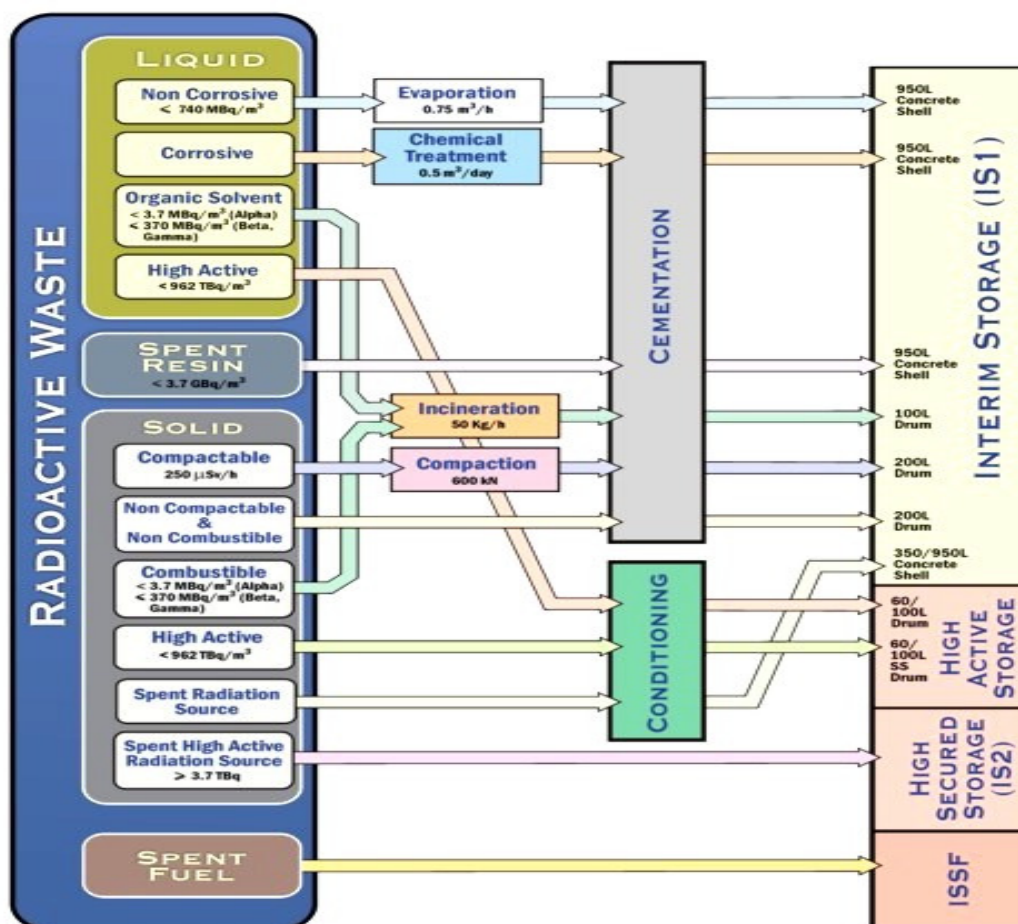
PENDAHULUAN

Menurut Undang-Undang No.10 Tahun 1997 tentang ketenaganukliran dimana pada pasal 23 ayat (1) menyebutkan bahwa pengelolaan limbah radioaktif dilaksanakan oleh Badan Pelaksana, dalam hal ini Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR). Untuk mengemban tugas tersebut, maka PTLR memiliki Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) yang berfungsi untuk mengolah limbah radioaktif cair, semi cair, padat dan sumber bekas dari seluruh wilayah Indonesia dengan skema pengelolaan limbahnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada Gambar 1 dijelaskan bahwa limbah radioaktif cair diolah dengan cara evaporasi dan konsentrat hasil evaporasi diimobilisasi dalam *shell* beton 950 liter dengan campuran semen. Bila limbah cair bersifat korosif maka limbah diolah secara kimia (*chemical treatment*) sebelum diimobilisasi. Limbah cair organik dan limbah padat terbakar direduksi volumenya

dengan cara insenerasi. Limbah padat termampatkan proses reduksi volumenya dilakukan dengan cara kompaksi dan hasil kompaksi selanjutnya diimobilisasi dalam drum 200L. Limbah padat tak terbakar dan tak termampatkan pengolahannya dimasukkan secara langsung dengan cara imobilisasi dalam *shell* beton 350liter/950liter

Dalam penelitian ini akan dipelajari salah satu wadah limbah radioaktif yang berupa drum volume 200 liter yang merupakan wadah limbah radioaktif aktivitas rendah dan sedang yang telah dikompaksi. Pada umumnya limbah radioaktif padat aktivitas rendah dan sedang berasal dari kegiatan yang menggunakan bahan radioaktif ataupun alat-alat kerja yang terkontaminasi, seperti pakaian, kertas, filter, sepatu, sarung tangan dan sebagainya. Limbah ini ditempatkan dalam drum 100 liter. Reduksi volume dilakukan dengan mengompaksi limbah dalam drum 200 liter.



Gambar 1. Pengelolaan limbah radioaktif di PTLR [1,2]

Dalam satu drum 200 liter memuat antara 4-7 buah drum limbah 100 liter yang telah terkompaksi yang tergantung dari jenis dan berat limbah. Drum volume 200 liter wadah limbah yang telah berisi limbah terkompaksi kemudian diimobilisasi dengan semen sehingga menjadi padatan yang kompak. Gambar 2 menunjukkan drum 200 liter wadah limbah radioaktif.

Drum 200 liter wadah limbah hasil imobilisasi terbuat dari pelat baja karbon rendah yang terdapat di pasaran, yang kemudian dalam fabrikasinya dilakukan pengelasan. Akibat adanya pengelasan, maka bahan akan mengalami siklus termal yaitu pemanasan dan pendinginan yang bervariasi sehingga akan mengakibatkan terjadinya penurunan kekuatan mekanik karena adanya perubahan struktur mikro bahan. Hasil pengelasan akan mempunyai kualitas yang baik apabila daerah lasan yang dihasilkan dapat memberikan kontinuitas yang sempurna antara bagian yang disambung dengan setiap bagian sambungan, sehingga sambungan dan logam induknya tidak menunjukkan perbedaan yang jelas. Oleh karena itu ada kondisi-kondisi yang harus dipenuhi dalam proses pengelasan antara lain adanya pemilihan bahan, suplai energi, cara pengelasan, bebas dari kontaminasi seperti oksida dan kotoran, proteksi terhadap atmosfer yang baik dan metalurgi las yang terkontrol.

Perubahan metalurgi yang paling penting dalam pengelasan adalah perubahan struktur mikro pada *Heat Affected Zone* (HAZ) maupun daerah las. Perubahan struktur mikro yang terjadi akan menentukan sifat mekanik pada sambungan las, seperti

kuat tarik dan kekerasannya. Hal ini terkait dengan pemakaian drum wadah limbah yang harus mampu menahan beban tarik yaitu pada saat pengangkutan ataupun beban tumpuk pada saat penyimpanan, sehingga sambungan las pada drum wadah limbah harus mempunyai karakteristik yang tidak jauh berbeda dengan bahan induknya. Diharapkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik yang terjadi masih dalam batas aman dan menghasilkan sambungan las yang kuat, sehingga pada waktu pengujian tarik bahan tidak putus pada sambungan lasnya namun pada logam induk atau HAZ. *Heat Affected Zone* yang biasa disebut daerah terpengaruh panas adalah daerah dengan jarak tertentu dari sambungan las yang mengalami pemanasan akibat adanya panas dari pengelasan dan mengalami pendinginan yang lebih lambat.

Dalam penelitian ini dilakukan pengelasan pada pelat baja karbon rendah yang ada di pasaran yaitu produksi dari PT. Krakatau Steel sebagai bahan drum 200 liter wadah limbah radioaktif. Pengelasan dilakukan dengan mesin las busur listrik. Perubahan struktur mikro yang terjadi diamati dengan mikroskop optik kemudian diperkaya dengan hasil pengamatan mikroskop elektron yang dilakukan oleh peneliti lain, sedangkan perubahan sifat mekanik diamati dengan cara melakukan pengujian tarik dan pengujian kekerasan. Penyiapan sampel uji tarik menggunakan standar JIS Z 2201 dan uji tarik dilakukan dengan mesin uji tarik, sedangkan pengujian kekerasan dilakukan dengan mesin uji kekerasan
Vickers.



Gambar 2. Drum 200 liter wadah limbah radioaktif [2]

TATA KERJA

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bidang Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif Dekontaminasi dan Dekomisioning di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Kawasan Puspitpek Serpong pada Tahun 2008

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelat baja karbon rendah tebal 3 mm yang ada di pasaran yang diproduksi oleh PT. Krakatau Steel dengan komposisi kimia seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1[3], elektrode jenis E 6013 dengan diameter 2,6 mm, amplas, pasta alumina dan larutan etsa dengan komposisi 3% asam nital.

Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah las busur listrik type BX 6-160-2, mesin uji tarik *Servopulser Shimadzu*, mesin uji keras (*Vickers Hardness Testing Machine*), mesin *grinding*, *polishing*, mikroskop optik

Metode

Dalam penelitian ini dilakukan pengelasan terhadap bahan drum yang berupa pelat baja karbon rendah. Dipelajari perubahan struktur mikro dan sifat mekanik yang terjadi akibat adanya pengelasan. Perubahan struktur mikro diamati dengan pengujian metalografi, sedangkan perubahan sifat mekanik diamati dengan melakukan pengujian tarik dan pengujian kekerasan.

Pengelasan

Pengelasan pelat bahan baja karbon rendah dilakukan dengan mesin las Busur Listrik type BX 6-160-2 dengan arus

las 60 – 110 ampere, tegangan busur 24 volt, jenis elektrode E6013, panjang elektrode 350 mm, diameter kawat 2,6 mm, polaritas AC/DC dan laju las 20 mm/detik [4-6].

Pengujian Metalografi

Pengamatan perubahan struktur mikro akibat pengelasan diamati dengan pengujian metalografi yang dilakukan pada daerah logam induk, batas antara logam induk dan HAZ, HAZ, daerah batas antara HAZ dan daerah las serta daerah las. Pengujian dilakukan dengan cara memotong sampel sesuai ukuran kemudian dibingkai dengan resin dan selanjutnya dilakukan pemolesan. Penggerindaan dilakukan dengan kertas amplas yang bertingkat kekasarannya sedangkan pemolesan dilakukan dengan pasta alumina. Sampel yang telah mengkilap dietsa dengan larutan etsa asam nital 3% untuk selanjutnya diamati struktur mikronya dengan mikroskop optik [7-10]. Untuk lebih memperdalam gambaran perubahan struktur mikro maka dilakukan pengkayaan data struktur mikro yang dilakukan oleh peneliti lain.

Pengujian Tarik

Sifat mekanik yang dipelajari adalah kekuatan tarik dan kekerasan bahan akibat adanya pengelasan. Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui tegangan tarik, tegangan luluh dan regangan pada bahan induk dan bahan yang telah mengalami pengelasan. Pengujian dilakukan sesuai dengan standar JIS Z 2201 dengan ukuran sampel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Kekuatan tarik merupakan kemampuan dari sambungan las untuk menerima beban tarik. Pengujian dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik *Servopulser Shimadzu* dengan cara menjepit sampel dengan kuat dan beban diberikan

Tabel 1. Komposisi kimia baja karbon rendah [3]

Unsur	Prosentase (%)	Unsur	Prosentase (%)
C	0,112	Ni	0,0143
Si	< 0,117	Mo	0,0065
Mn	0,443	Cu	0,0176
P	< 0,0008	Al	0,0381
S	< 0,0002	Fe	99,350
		Cr	0,0085

secara kontinyu sampai sampel tersebut putus. Sifat-sifat mekanis yang diharapkan untuk diketahui adalah kekuatan (tegangan) tarik, kekuatan luluh dan regangan dengan perhitungan menggunakan rumus [11-13]:

1. **Tegangan tarik**, yaitu tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh sampel

$$\sigma_t = F_{\text{mak}}/A_0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

σ_t : Kuat tarik sampel (kg/mm^2)
 F_{mak} : Gaya maksimum yang dapat ditahan oleh sampel (kg)
 A_0 : Luas penampang awal sampel (mm^2)

2. **Tegangan luluh**, yaitu tegangan yang terjadi pada saat terjadi regangan tetap atau plastis

$$\sigma_y = F_{\text{mak}}/A_0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

σ_y : Tegangan luluh (kg/mm^2)
 F_{mak} : Gaya pada saat sampel mengalami luluh (kg)
 A_0 : Luas penampang awal sampel (mm^2)

3. **Regangan**, yaitu perpanjangan benda pada saat keadaan tegang. Regangan yang dimaksud adalah regangan linier rata-rata

$$\varepsilon = L-L_0/L_0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ε : Regangan
 L : Panjang benda pada saat putus (mm)
 L_0 : Panjang awal sampel (mm)

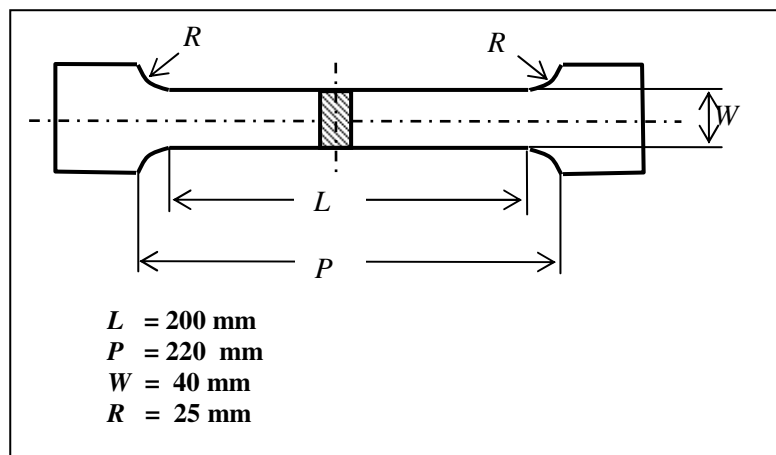
Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dimaksudkan untuk mendapatkan data perubahan kekerasan dari bahan akibat adanya pengelasan. Pengujian dilakukan dengan mesin uji keras (*Vickers Hardness Testing Machine*) dengan cara melakukan penekanan pada sampel menggunakan penekan berbentuk piramida intan yang dasarnya bujur sangkar. Besarnya sudut puncak identor piramida intan 136° . Besarnya angka kekerasan dihitung berdasarkan persamaan [11,15]:

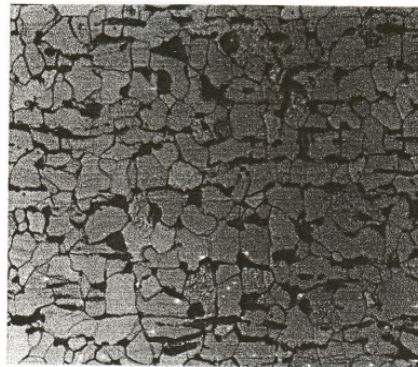
$$\text{HVN} = 1,8544 \times P/d^2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

HVN : Angka kekerasan Vickers (*Hardness Vickers Number*)
 P : Beban yang digunakan (kg)
 d : Diagonal identasi (mm)

Pengujian kekerasan dilakukan pada sampel pada daerah logam induk, batas antara logam induk dan HAZ, HAZ, daerah batas antara HAZ dan daerah las serta daerah las.



Gambar 3. Bentuk sampel pada uji tarik (standar JIS Z 2201) [11,14]



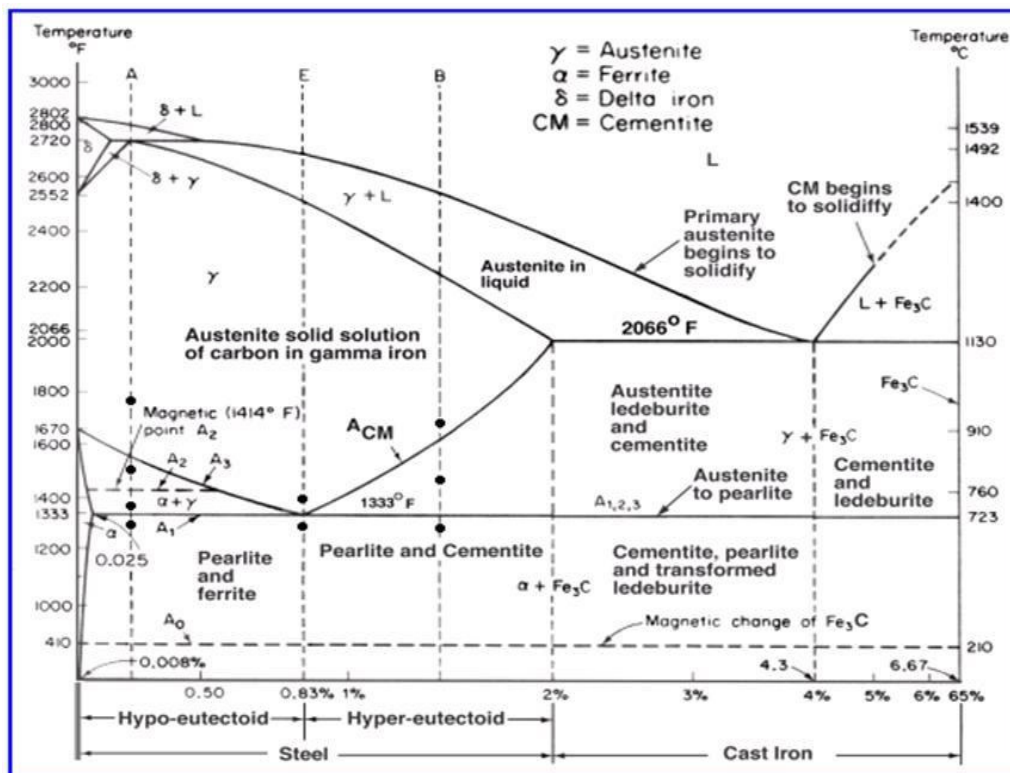
Gambar 4. Struktur mikro logam induk, hasil pengamatan dengan mikroskop optik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian tentang perubahan struktur mikro dan sifat mekanik akibat pengelasan ditunjukkan pada gambar-gambar berikut. Struktur mikro logam induk hasil pengamatan dengan mikroskop optik pada perbesaran 500 kali ditunjukkan pada Gambar 4. Pada Gambar 4 tampak butir-butir ferrite (berwarna terang), dan fase pearlite (berwarna gelap). Butir ferrite cenderung lebih halus dan lunak sedangkan

butir pearlite lebih kasar dan keras karena mengandung karbon.

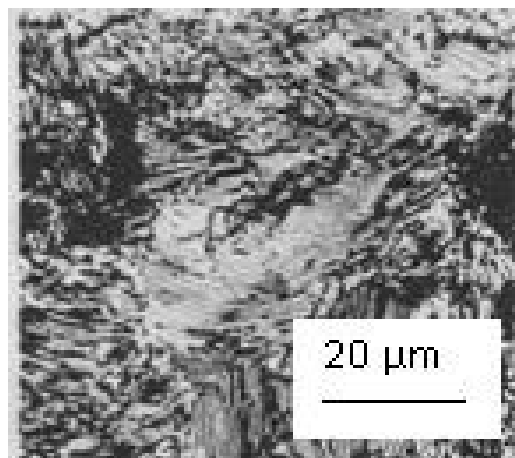
Logam induk mengandung karbon 0,112 % seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 sehingga dikatakan bahwa baja karbon ini termasuk baja karbon rendah. Selain itu dengan memperhatikan diagram fase Fe-C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 maka baja karbon rendah ini termasuk jenis baja *hypoeutektoid* karena prosentase unsur pemapu karbonnya tidak melebihi 0,8%.



Gambar 5. Diagram Fase Fe – C [16]

Pada Gambar 5 tampak bahwa pada suhu kamar baja *hypoeutectoid* memiliki struktur mikro yang terdiri dari butiran kristal *ferrite* dan *pearlite*. Hal ini sesuai dengan Gambar 4 bahwa struktur mikro logam induk terdiri dari ferrite dan perlit. *Ferrite* adalah suatu komposisi logam (fase) yang mempunyai batas maksimum kelarutan karbon 0,025 % pada suhu 723 °C, struktur kristalnya *Body Center Cubic* (BCC) dan pada suhu kamar mempunyai batas kelarutan karbon 0,008 %. Sedangkan *pearlite* ialah campuran *eutectoid* antara *ferrite* dengan *cementite* yang terbentuk

pada suhu 723 °C dengan kandungan karbon 0,83 %. *Cementite* ialah suatu senyawa yang terdiri dari unsur Fe dan C dengan perbandingan tertentu (Fe_3C) dengan struktur kristalnya *Orthohombik* [16]. Pengamatan dengan mikroskop elektron menunjukkan bahwa struktur *pearlite* terdiri dari lamelar *ferrite* dan *cementite* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 [17]. Perubahan struktur mikro yang terjadi pada HAZ ditunjukkan pada Gambar 7.



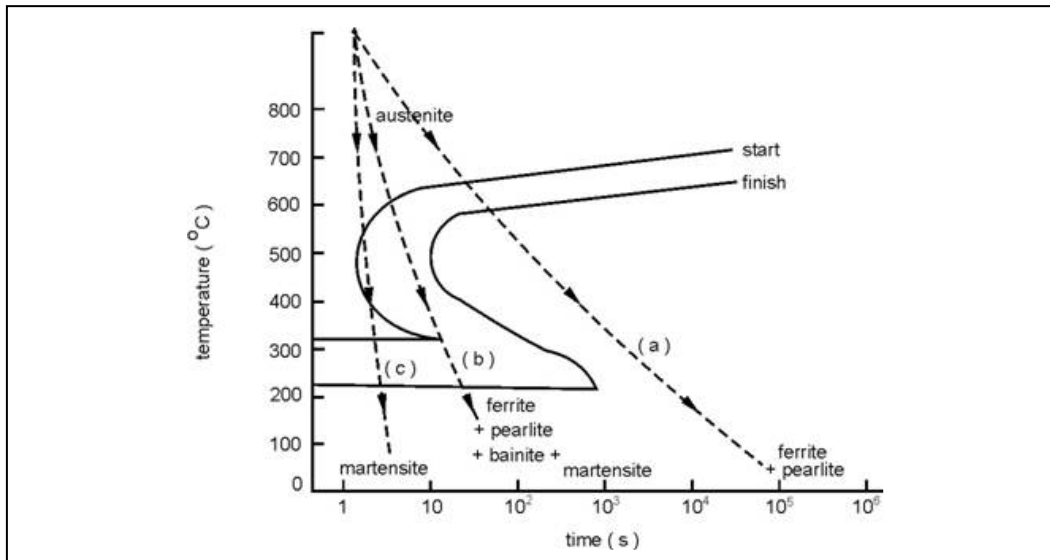
Gambar 6. Struktur pearlite, hasil pengamatan dengan mikroskop elektron [17]



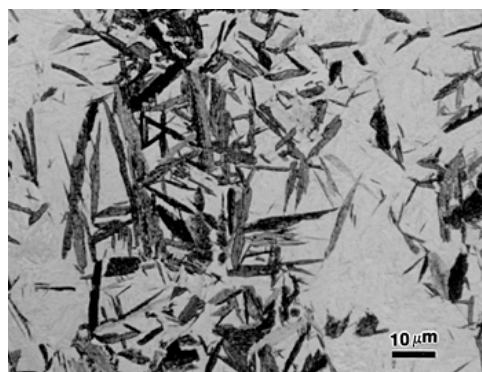
Gambar 7. Struktur mikro daerah HAZ, hasil pengamatan dengan mikroskop optik

Dari Gambar 7 tampak bahwa struktur mikro pada HAZ yang diamati dengan mikroskop optik pada perbesaran 500 kali terdiri dari *ferrite* halus, *ferrite* kasar dan *bainite*. *Heat Affected Zone* adalah daerah pada logam induk yang berdekatan dengan logam las. Selama proses pengelasan daerah ini mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan agak cepat (sedang), sehingga daerah ini merupakan daerah yang paling kritis pada sambungan las. Sesuai dengan diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. tampak bahwa pada proses pendinginan sedang (garis b), akan terbentuk struktur mikro *bainite* disamping *pearlite*. Namun pada proses pendinginan secara perlahan (garis a) akan

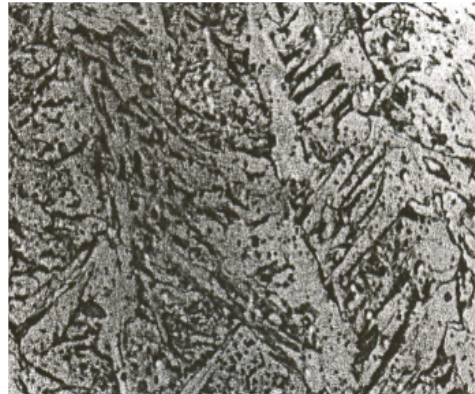
terbentuk struktur *pearlite* dan *ferrite*, sedangkan pada proses pendinginan cepat (garis c) akan terbentuk struktur *martensite* [18]. *Bainite* yang merupakan agregat dari *ferrite* dan *cementite* (Fe_3C) terbentuk pada kecepatan pendinginan sedang dimana pada kondisi ini karbon sulit berdifusi kedalam fase *austenite*. Pengamatan struktur *bainite* menggunakan mikroskop elektron ditunjukkan pada Gambar 9 dimana struktur *bainite* berupa *ferrite* yang tumbuh dari batas butir *austenite* yang berbentuk pelat dengan Fe_3C berada di antara plat-plat tersebut [19]. Perubahan struktur mikro yang terjadi pada daerah las seperti ditunjukkan pada Gambar 10.



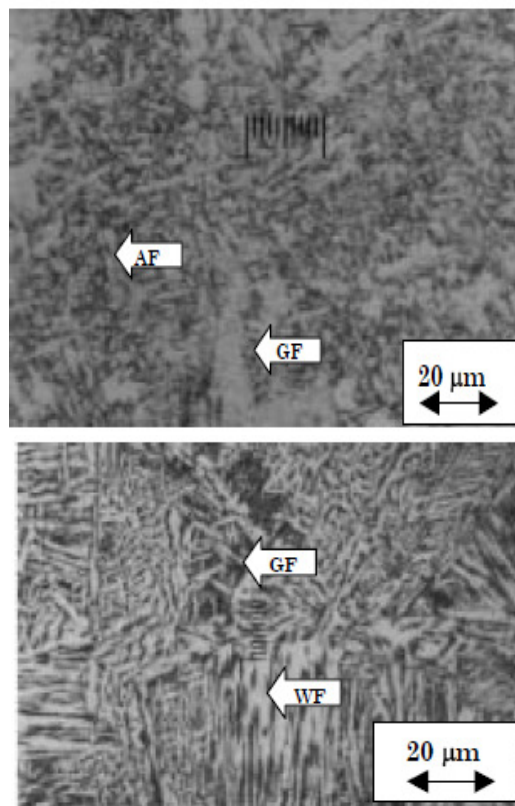
Gambar 8. Diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT) pada baja karbon [18]



Gambar 9. Struktur mikro bainite, pengamatan dengan mikroskop elektron [19]



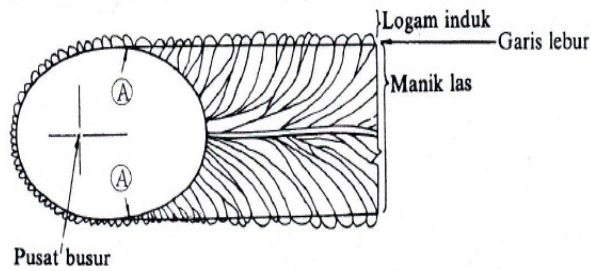
Gambar 10 . Struktur mikro daerah las, pengamatan dengan mikroskop optik



Gambar 11. Struktur mikro daerah las, pengamatan dengan mikroskop elektron [20]
(AF : *Acicular Ferrite*, GF : *Grain boundary Ferrite* dan WF : *Widmanstatten Ferrit*)

Pada Gambar 10 tampak struktur mikro daerah las yang diamati dengan mikroskop optik pada perbesaran 500 kali, terdiri dari *ferrite Widmanstatten*, *ferrite acicular*, dan *ferrite* batas butir(*grain boundary ferrite*). Struktur mikro ini terbentuk karena daerah las mengalami pendinginan yang cepat. Pengamatan dengan mikroskop elektron memberikan gambaran struktur mikro daerah las yang lebih jelas seperti yang ditunjukkan pada Gambar11[20].

Gambar 11 menunjukkan bentuk struktur AF, GF dan WF yang terbentuk selama pengelasan, dimana struktur AF tampak saling berkaitan membentuk *interlocking structure*. Struktur WF terbentuk karena adanya pendinginan cepat pada daerah las. Struktur WF ini memiliki struktur berbutir panjang (*columnar grains*). Pertumbuhan struktur WF ini berawal dari logam induk yang tumbuh ke arah tengah daerah logam las seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Arah pembekuan logam Las [4]

Gambar 12. menjelaskan bahwa titik mula dari struktur pilar (titik A) terletak pada logam induk. Titik ini tumbuh menjadi garis lebur dengan arah sama dengan sumber panas. Pada garis lebur ini sebagian dari logam induk ikut mencair dan selama proses pembekuan, logam las tumbuh pada butir-butir logam induk.

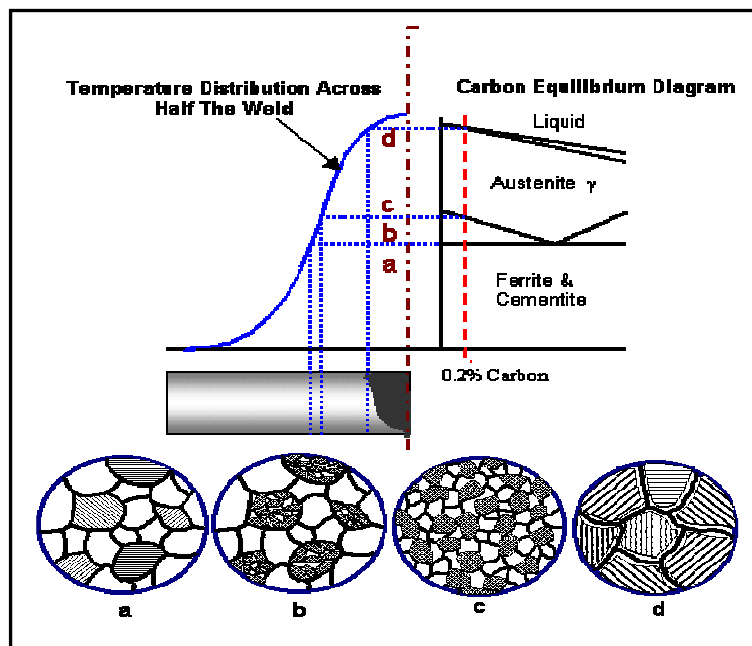
Pada umumnya struktur mikro logam las merupakan kombinasi dari beberapa struktur mikro berikut [15,21,22]:

- *Ferrite* batas butir, terbentuk pertama kali pada transformasi *austenite-ferrite* dan biasanya terbentuk di sepanjang batas *austenite* pada suhu $1000 - 650^{\circ}\text{C}$.
- *Ferrite widmanstatten*, terbentuk pada suhu $750 - 650^{\circ}\text{C}$ di sepanjang batas butir *austenite*
- *Ferrite acicular*, berbentuk intragranular dengan ukuran yang

kecil dan mempunyai orientasi arah yang acak. Biasanya ferrite acicular ini terbentuk sekitar suhu 650°C

- *Bainite*, merupakan *ferrite* yang tumbuh dari batas butir *austenite* dan terbentuk pada suhu $400 - 500^{\circ}\text{C}$.
- *Martensite*, terbentuk pada proses pendinginan yang sangat cepat.

Selama proses pengelasan, pada daerah logam las dan HAZ akan mengalami serangkaian siklus termal, yaitu pemanasan sampai mencapai suhu tertentu yang kemudian diikuti dengan pendinginan. Siklus termal tersebut mempengaruhi struktur mikro dan sifat mekanik logam las dan HAZ, di mana logam las akan mengalami transformasi fase. Hal ini dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 13[23]



Gambar 13. Perubahan struktur mikro pada logam yang mengalami pengelasan [23]

Gambar 13 menyajikan ilustrasi dari hubungan antara struktur mikro dengan distribusi suhu dalam proses pengelasan. Terlihat adanya perubahan struktur mikro (notasi a,b,c dan d) terkait dengan distribusi suhu akibat adanya pengelasan. Gambar ilustrasi ini berkaitan dengan diagram fase Fe-C yang ditunjukkan pada Gambar 5 yaitu bahwa:

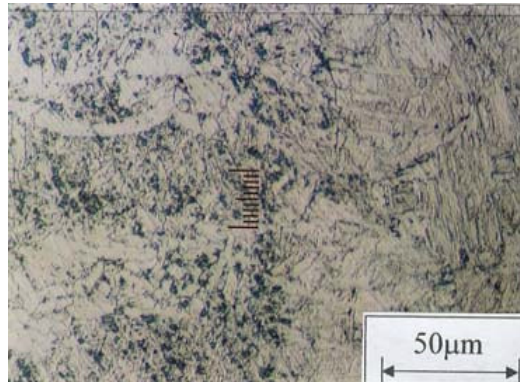
- Pada daerah (a) yaitu daerah logam induk, pada suhu dibawah garis A_1 (pada Gambar 5: 1333°F) struktur mikro merupakan campuran butir *ferrite* dan *pearlite*
- Pada daerah (b) *pearlite* bertransformasi menjadi *austenite*, namun karena suhunya tidak dapat melebihi garis A_3 (pada Gambar 5: 1670°F) maka tidak semua butir *ferrite* bertransformasi menjadi *austenite*, posisi ini biasanya merupakan posisi perbatasan antara daerah logam induk dan HAZ
- Pada daerah (c) adalah daerah yang mengalami siklus termal tepat pada garis A_3 (pada Gambar 5: 1670°F) maka

austenite secara sempurna bertransformasi.

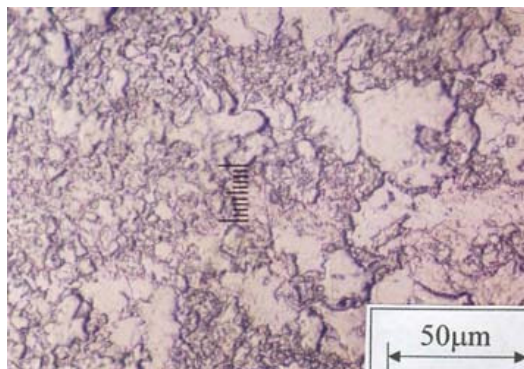
- Pada daerah (d) yaitu daerah yang mengalami siklus termal di atas garis A_3 (pada Gambar 5: $>1670^{\circ}\text{F}$) terjadi pertumbuhan butir. *Heat Affected Zone* biasanya merupakan daerah yang mengalami pertumbuhan butir. Butir tumbuh membesar sehingga kekuatan mekanik menurun

Perubahan struktur mikro pada daerah perbatasan antara HAZ dan daerah las ditunjukkan pada Gambar 14.

Pada Gambar 14 tampak bahwa struktur mikro daerah ini mirip dengan struktur mikro pada daerah las yaitu terdiri dari *ferrite acicular*, *ferrite* batas butir dan *ferrite Widmanstatten*. Daerah ini mengalami pendinginan yang lebih lambat dari daerah las sehingga struktur *ferrite* batas butir, *ferrite acicular* berupa bilah-bilah yang menyilang namun berbutir kasar. Struktur mikro daerah perbatasan antara logam induk dan HAZ ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 14 . Strutur mikro daerah perbatasan antara HAZ dan daerah las, pengamatan dengan mikroskop optik [24]



Gambar 15. Strutur mikro daerah perbatasan antara HAZ dan logam induk, pengamatan dengan mikroskop optik [24]

Daerah ini memiliki struktur mikro yang mirip dengan struktur mikro logam induk, hal ini karena daerah ini menerima panas yang tidak terlalu tinggi dan pendinginan yang lambat. Struktur mikro yang terbentuk terdiri dari *ferrite*, *ferrite* halus dan *pearlite*. Struktur mikro *ferrite* pada daerah ini tersusun paling renggang dibandingkan dengan struktur mikro pada HAZ. Pada Gambar 15 terlihat *ferrite* (berwarna terang) dan *ferrite* halus yang mengisi sela sela struktur *ferrite*

Hasil pengujian perubahan sifat mekanik yaitu pengujian tarik, luluh, regangan dan kekerasan ditunjukkan pada Gambar 16,17 dan 18. Gambar 16 menunjukkan perubahan kekuatan tarik bahan akibat pengelasan yaitu kekuatan tarik, kekuatan luluh pada logam induk dan las, sedangkan Gambar 17 menunjukkan perubahan regangan pada bahan akibat adanya pengelasan dan Gambar 18 menunjukkan distribusi kekerasan pada daerah logam induk, HAZ, daerah las, batas antara logam induk dan HAZ serta daerah batas HAZ dan daerah las.

Pada Gambar 16 terlihat bahwa logam induk memiliki kekuatan tarik yang tinggi dibandingkan dengan logam las. Seperti diketahui bahwa logam induk mengandung unsur Mn 0,443 % dan kandungan unsur silikon (Si) sebesar 0,117 %. Fungsi dari unsur Mn adalah dapat mengikat karbon (C) membentuk karbida mangan (Mn_3C) yang dapat menaikkan kekuatan, ketangguhan baja dan meningkatkan kekerasan. Fungsi dari kandungan unsur silikon adalah pembentuk *ferrite* yang sangat kuat dan juga untuk menguatkan baja. Nilai regangan untuk logam induk juga lebih tinggi dibandingkan dengan setelah mengalami pengelasan.

Pada Gambar 18 tampak bahwa logam las memiliki kekerasan yang paling tinggi dibandingkan dengan yang lainnya. Pada daerah las terjadi pendinginan yang cepat sehingga dalam bahan terkandung tegangan sisa yang cukup besar. Selain itu struktur mikro pada daerah las ini terdiri dari AF yang saling berkaitan satu sama lain membentuk *interlocking structure* dimana struktur seperti ini merupakan struktur yang

paling efektif dalam menahan beban sehingga daerah ini menjadi lebih keras. Namun demikian daerah ini getas terlihat dari nilai tegangan luluh dan regangannya yang lebih rendah dibandingkan dengan logam induk.

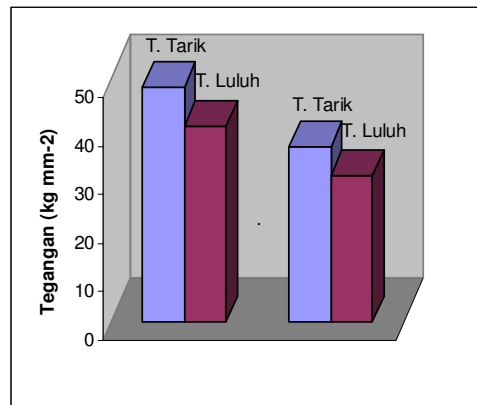
Pada HAZ terlihat kekerasan yang menurun dibandingkan dengan logam induk maupun daerah las. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13. tentang hubungan antara distribusi suhu dan struktur mikro terlihat bahwa pada daerah (d) tampak terjadi pertumbuhan butir. Butir menjadi lebih besar yang mengakibatkan bahan menjadi lunak dan lemah. Hal ini sesuai dengan Persamaan Hall-Petch yang menggambarkan hubungan antara kekuatan baja dengan ukuran butirnya dengan rumus sebagai berikut [21,25]:

$$\sigma_y = \sigma_f + K.D^{-1/2} \dots\dots\dots(5)$$

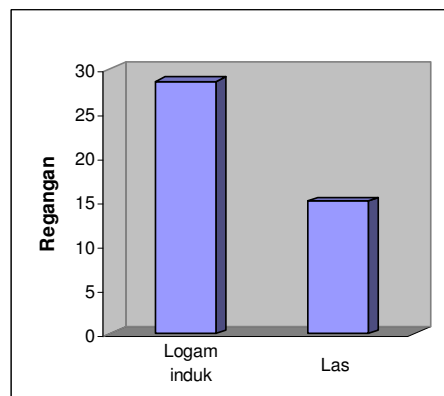
dimana σ_y : batas luluh, σ_f : tegangan friksi, K: konstanta dan D adalah diameter butir. Dari rumus tersebut tampak bahwa semakin halus ukuran butir suatu bahan, maka bahan akan memiliki kekuatan yang besar. Sedangkan pada HAZ terjadi pendinginan yang lambat sehingga butir akan membesar. Butir yang besar memiliki kekerasan yang lebih kecil.

Hasil pengujian kekerasan pada daerah batas antara las dan HAZ terlihat bahwa pada daerah ini struktur mikronya mirip dengan struktur mikro daerah las, namun *ferrite* yang terbentuk lebih kasar dibandingkan dengan *ferrite* pada daerah HAZ. Semakin kasar struktur *ferrite* maka semakin tinggi nilai kekerasannya namun bahan semakin getas.

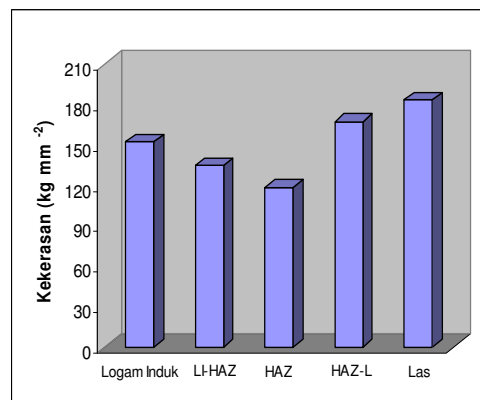
Hasil pengujian kekerasan pada daerah batas logam induk dan HAZ menunjukkan kekerasan yang lebih rendah dari logam induk tapi lebih tinggi dari HAZ. Daerah ini menerima panas yang tidak terlalu tinggi dibandingkan dengan HAZ karena memang letaknya lebih jauh dari daerah las. Oleh karena itu daerah ini hanya sedikit mengalami perbesaran butir sehingga hanya sedikit mengalami penurunan kekerasan dibandingkan dengan daerah logam induk.



Gambar 16. Hasil pengujian kekuatan tarik dan kekuatan luluh pada logam induk dan bahan yang mengalami pengelasan.



Gambar 17. Hasil pengujian regangan pada logam induk dan bahan yang mengalami pengelasan.



Gambar 18. Hasil pengujian kekerasan pada daerah logam induk, batas antara logam induk dan HAZ, HAZ, batas antara HAZ dan las serta daerah las.

Secara keseluruhan memang terjadi perubahan struktur mikro dan sifat mekanik akibat adanya siklus termal pada pengelasan. Namun dari hasil pengujian kekuatan mekanik (pengujian tarik dan pengujian kekerasan) menunjukkan nilai yang masih dalam batas wajar dan selamat bagi drum wadah limbah yang mengalami beban tarik pada saat pengangkutan dan beban tumpuk dalam penyimpanan. Hal ini sejalan dengan sifat mampu las (*weldability*) dari bahan drum wadah limbah yang dapat diketahui dengan menghitung nilai karbon ekivalen (C_{eq}) dengan rumus [4,26]:

$$C_{eq} = (C + 1/6 Mn + 1/24 Si + 1/40 Ni + 1/5 Cr + 1/4 Mo + 1/14 V) \% \dots\dots(6)$$

Mampu las (*weldability*) merupakan ukuran kemampuan suatu bahan untuk dapat dilas dengan hasil memuaskan baik dari segi mekanis, fisis maupun kimiawi. Faktor utama *weldability* suatu bahan logam adalah komposisi bahan dasar, masukan panas dan laju pendinginan. Masukan panas dan laju pendinginan merupakan karakteristik dari proses pengelasan dan teknik yang dipakai.

Apabila C_{eq} sama atau lebih kecil dari 0,45% maka baja tersebut cukup *weldable* dan pengelasan tidak memerlukan cara-cara khusus, bila C_{eq} sama atau lebih besar 0,45% maka baja memerlukan perlakuan khusus dalam pengelasan. Dari komposisi jenis baja karbon yang dipakai dalam penelitian ini, maka didapat harga C_{eq} sebesar 0,194%. Harga C_{eq} ini masih berada dalam batas aman, sehingga dikatakan bahwa baja karbon yang dipakai sebagai bahan drum wadah limbah radioaktif memiliki kemampuan las yang baik.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa adanya pengelasan pada bahan drum baja karbon mengakibatkan terjadinya perubahan struktur mikro dan sifat mekanik. Perubahan struktur mikro terjadi karena adanya siklus termal yaitu pemanasan yang diikuti dengan pendinginan akibat pengelasan. Pada daerah las terbentuk struktur AF yang membentuk *interlocking structure* sehingga daerah las ini menjadi keras. Namun demikian daerah ini lebih getas dibandingkan dengan logam induknya, karena adanya pendinginan yang

cepat mengakibatkan tersimpan energi tegangan sisa yang lebih banyak. Pada daerah yang paling kritis yaitu HAZ terbentuk struktur mikro *bainite* yang merupakan agregat dari *ferrite* dan *cementite*. Struktur *bainite* ini sebenarnya agak keras karena mengandung karbon. Namun pada daerah ini yang dominan adalah adanya pendinginan lambat yang mengakibatkan perbesaran butir sehingga menurunkan kekuatan dan kekerasannya. Namun demikian perubahan struktur mikro dan sifat mekanik yang terjadi masih dalam batas yang wajar dan selamat bagi drum wadah limbah. Hal ini sejalan dengan harga C_{eq} sebesar 0,194 % yang menunjukkan bahwa bahan ini memiliki kemampuan las yang baik, sehingga yang perlu diperhatikan adalah meminimalkan pengaruh pengelasan terhadap perubahan struktur mikro sehingga penurunan kekuatan mekanik masih dalam batas yang selamat.

DAFTAR PUSTAKA

1. PUSAT TEKNOLOGI LIMBAH RADIOAKTIF., Laporan Analisis Keselamatan rev. 5, PTLR, Serpong ,2006.
2. PUSAT TEKNOLOGI LIMBAH RADIOAKTIF, Pengelolaan Limbah, <http://www.batan.go.id/ptlr/08id>, diunduh pada tanggal 12 Mei 2008
3. WARDOYO, T. J., Metode Peningkatan Tegangan Tarik dan Kekerasan pada Baja Karbon Rendah Melalui Baja Fase Ganda, Teknoim, Vol 10, No. 3, 237-248,2005.
4. WIRYOSUMARTO, H. dan OKUMURA, T., Teknologi Pengelasan Logam, PT. Pradya Paramita, Jakarta, 2000.
5. MESSLER, R.W., Principles of Welding (Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy), John Wiley and Sons, United States,1999.
6. KELLY FERJUSZ, Handbook, Vol. 6 : Welding, Brazing and Soldering, 9th ed, ASM, USA, 1992.
7. GEORGE F. VANDER VOORT, ASM Handbook, Vol. 9 : *Metallography and Micro Structures*, 9th ed, ASM, USA, 1992
8. SINDO KOU, Welding Metallurgy, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc, 2003

9. AMELINCKX, S., et.all., Handbook of Microscopy: Applications in Materials Science, Solid-State Physics and Chemistry, 1st ed., Wiley-VCH, 1996.
10. YAJIANG, L.I., et.all., XRD and TEM Analysis of Microstructure in the Wwelding Zone of 9Cr-1Mo-V-Nb Heat Resisting Steel, Bulletin of Materials Science, Volume 25, No.3, 213-217, Springer India, 2002
11. KHUN, H., MESLIN, D., ASM Handbook, Vol. 8 : Mechanical Testing and Evaluation, 9th ed, ASM, USA, 1992
12. CRANCOVIC, M.G., SM Handbook, Vol. 10 : Materials Characterization, 9th ed, ASM, USA, 1992
13. ASTM Standards, *Metal Test Methods and Analytical Procedures* Volume 03.01 Edisi 3, West Conshohocken, 2001.
14. PIMENTA. G., and BASTIAN, F., Influence of Plate Thickness on the Mechanical Properties of Welded Joints Subjected to Long-Term Post Weld Heat, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 11, Number 2, 130-137, Springer New York, 2002.
15. TATA SURDIA, dkk., Pengetahuan Bahan Teknik, Edisi 4, PT. Pradya Paramita, Jakarta, 1999
16. ANONIM, Besi dan Baja, <http://www.sapuijux.multiply.com/journal/item/18/besi> dan baja, diunduh tanggal 5 Mei 2008
17. ANONIM, Transformasi Baja pada Kondisi Non Equilibrium, <http://its.ac.id/personal/material/750-fahmi>, diunduh pada tanggal 4 Mei 2008.
18. ANONIM, Perlakuan Panas (Heat Treatment) pada Baja, <http://gregorius.blogdetik.com>, diunduh pada tanggal 7 Mei 2008.
19. GEORGE F., VANDER VOORT, Microstructure of Ferrous Alloys, Research & Technology, Buhler Ltd, Lake Bluff, IL, 2001, http://www.industrialheating.com/articles/Cover_story/93096f835 cbb 70 10 Vgn VCM 100000f932a 8c0, diunduh pada tanggal 8 Mei 2008
20. SETIAWAN, A., WARDANA, Y.A.Y., Analisa Ketangguhan dan Struktur Mikro pada Daerah Las dan HAZ Hasil Pengelasan Sumerged ARC Welding pada Baja SM 490, Jurnal Teknik Mesin, Vol 8, No.2, 57-63, 2006.
21. KARL-ERIC, T., Steel and Its Heat Treatment, 2nd ed, Buffer Warth & Co, Boston, London, 1994.
22. PLLACK, W.H., POLLACK, H., Materials Science And Metallurgy, Reston Publishing Company, Virginia., 1997
23. ANONIM, The Metallurgy of Carbon Steel, <http://www.gowelding.com/met/Carbon.htm>, diunduh tanggal 5 mei 2008
24. SANTOSO, J., Pengaruh Arus Pengelasan Terhadap Kekuatan Tarik dan Ketangguhan Las SMAW dengan Elektroda E7018, Skripsi Strata 1, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Semarang, 2006
25. TRINDADE FILHO, V.B., et.all, Normalizing Heat Treatment Effect on Low Alloy Steel Weld Metals, J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng, Vol.26, No.1, Rio de Janeiro, . 2004
26. STEINER, R., ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM, USA, 1998.

TANYA JAWAB

1. Penanya : L.Kwin Pujiastuti
Instansi : PTLR-BATAN
Pertanyaan : Pengelasan merupakan proses fabrikasi drum wadah limbah yang tidak bisa dihindari. Bagaimana caranya agar tidak terjadi perubahan struktur mikro dan sifat mekanik akibat adanya pengelasan, sehingga kekuatan drum tidak menurun?
Jawab : Dalam proses pengelasan maka bahan akan mengalami siklus termal, yaitu adanya pemanasan yang diikuti dengan pendinginan yang variatif. Kondisi inilah yang menyebabkan terjadinya perubahan struktur mikro dan sifat mekanik pada bahan. Hal yang perlu diperhatikan adalah meminimalkan dampak dari adanya siklus termal tersebut dalam pengelasan, sehingga perubahan struktur mikro dan sifat mekanik yang terjadi tidak signifikan menurunkan kekuatan dari drum tersebut. Oleh karena itu ada kondisi-kondisi yang harus dipenuhi dalam proses pengelasan antara lain adanya pemilihan bahan, suplai energi, cara pengelasan, bebas dari kontaminasi seperti oksida dan kotoran, proteksi terhadap atmosfer yang baik dan metalurgi las yang terkontrol. Bahan drum wadah limbah radioaktif dipilih dari baja karbon rendah yang memiliki harga karbon ekivalen (C_{eq}) sebesar 0,194 % yang bermakna bahwa baja karbon yang digunakan sebagai wadah limbah memiliki sifat mampu las yang baik, artinya bahwa tidak akan terjadi degradasi sifat mekanik yang parah. Selain itu digunakan arus las yang sedang sehingga masukan panas cukup untuk pengelasan
2. Penanya : Ayi Muziawati
Instansi : PTLR-BATAN
Pertanyaan : Selama ini jenis limbah apa saja yang telah dikelola di PTLR?
Jawab : Selama ini PTLR telah mengelola limbah radioaktif dari berbagai rumah sakit, industri maupun dari instansi BATAN sendiri. Pada umumnya limbah radioaktif dari rumah sakit berupa limbah sumber bekas radioterapi, sedangkan dari industri pada umumnya limbah berupa sumber bekas (gauging, logging). Dari lingkungan BATAN limbah berupa air pendingin reaktor, resin bekas, limbah padat dari laboratorium penelitian dan bahan bakar bekas reaktor. Berbagai limbah ini telah dikelola di PTLR dengan standar keselamatan yang tinggi.
3. Penanya : Ruminta Ginting
Instansi : PTLR-BATAN
Pertanyaan : Jenis limbah apa yang ditempatkan dalam drum 200 liter yang digunakan dalam penelitian ini?
Jawab : Drum volume 200 liter yang digunakan dalam penelitian ini merupakan wadah limbah padat yang terkompaksi. Biasanya limbah padat tersebut berupa kertas, pakaian kerja, peralatan laboratorium yang terkontaminasi bahan radioaktif. Limbah –limbah tersebut ditempatkan dalam drum 100 liter kemudian dikompaksi. Dalam drum 200 liter memuat 4-7 drum terkompaksi tergantung dari karakteristik limbahnya. Drum 200 liter yang telah berisi limbah terkompaksi kemudian diimobilisasi dengan campuran pasir, koral dan semen dan disimpan dalam tempat penyimpanan sementara.