

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

www.itk.ac.id

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai dasar teori yang berkaitan dengan penelitian ini yang meliputi meliputi baja JIS G3101 SS400, pengertian pengelasan, *shield metal arc welding*, *flux-core arc welding*, parameter pengelasan, kampuh pengelasan, daerah hasil pengelasan, diagram fasa Fe-Fe₃C, diagram CCT, pengujian LPT, pengujian struktur mikro, metode planimetri, pengujian tarik, dan penelitian terdahulu.

2.1. Baja JIS G3101 SS400

Baja JIS G3101 SS400 merupakan jenis baja struktural yang mengacu pada standar industri Jepang. Baja ini memiliki komposisi yang hampir sama dengan baja ASTM A36 yang termasuk ke dalam bagian *mild steel*. *Mild steel* adalah salah satu baja canai panas struktural yang paling umum digunakan. Komposisi *mild steel* umumnya terdiri dari 0,20% karbon, 0,4-0,7% Mangan, 0,5% silikon, dan memiliki sedikit sulfur, fosfor dan unsur lainnya yang tersisa. *Mild steel* umumnya digunakan pada produk seperti *as-rolls*, *forged*, atau *annealed*. Dalam dunia industri baja JIS G3101-SS400 sering digunakan untuk menggantikan baja ASTM A36 karena mudah dicari (Saputra, 2019).

Adapun komposisi pada baja JIS G3101 SS400 dapat dilihat pada tabel sebagai berikut.

Tabel 2.1 Komposisi Baja JIS G3101-SS400^{*)}

Unsur	Kandungan (%)
Karbon (C)	0,2054
Silikon (Si)	0,142
Mangan (Mn)	0,311
Fosfor (P)	0,0121
Sulfur (S)	0,0070

^{*)}PT. Krakatau Posco, 2020

2.2. Pengelasan

Pengelasan adalah proses penyambungan material dimana dua atau lebih bagian digabungkan pada permukaan kontakannya dengan diberi panas dan/atau tekanan yang sesuai. Banyak proses pengelasan yang dilakukan dengan memberi panas saja, ada juga yang menerapkan kombinasi dari panas dan tekanan, dan beberapa yang lainnya dilakukan hanya dengan memberi tekanan, tanpa adanya panas eksternal. Pada beberapa proses pengelasan sebuah *filler* atau bahan pengisi ditambahkan dengan dileburkan untuk menyambungkan material. Gabungan dari bagian yang disambungkan dengan pengelasan disebut sebagai *weldment*.

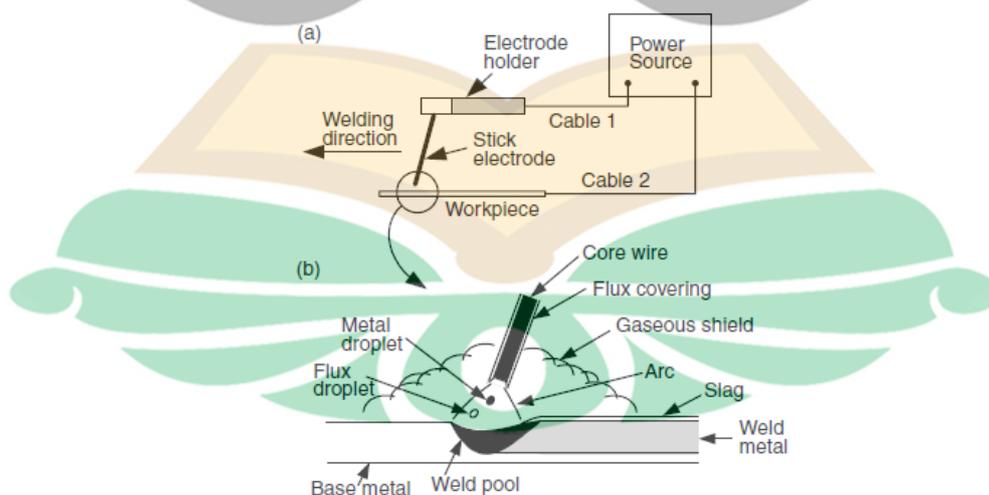
Terdapat sekitar 50 tipe operasi pengelasan yang terdapat di dalam *American Welding Society*. Berbagai tipe pengelasan tersebut dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu *fusion welding* dan *solid-state welding*. Proses *fusion welding* menggunakan panas untuk melelehkan *base metal*. Dalam banyak pengoperasian *fusion welding*, *filler metal* atau logam pengisi ditambahkan ke dalam kolam las. *Fusion welding* yang tidak menggunakan *filler metal* disebut sebagai *autogenous welding*. *Fusion welding* umumnya terbagi menjadi tiga kategori, yaitu *arc welding* (AW), *resistance welding* (RW) dan *oxyfuel gas welding* (OFW). *Arc welding* merupakan proses pengelasan yang memerlukan arus listrik untuk memanaskan logam. Berbeda halnya dengan *resistance welding* yang memerlukan hambatan listrik terhadap aliran arus yang mengalir di antara permukaan logam yang disatukan sehingga menghasilkan tekanan. Sedangkan *oxyfuel gas welding* memerlukan campuran antara oksigen dan asetilen untuk menghasilkan semburan api yang panas untuk melelehkan *base metal* dan *filler metal*. Selain ketiga kategori umum tersebut, terdapat jenis *fusion welding* yang lain seperti *electron beam welding* dan *laser beam welding*.

Solid-state welding merupakan proses pengelasan dimana logam dileburkan dengan hanya menggunakan tekanan atau kombinasi antara panas dan tekanan. Apabila panas digunakan, maka temperatur di dalam proses pengelasan di bawah titik lebur dari logam yang dilas. Pengelasan jenis ini tidak menggunakan *filler metal*. *Solid-state welding* umumnya dikelompokkan menjadi tiga kategori yaitu *diffusion welding* (DFW), *friction welding* (FRW) dan *ultrasonic welding* (USW). *Diffusion welding* adalah pengelasan yang dilakukan dengan menyatukan dua

permukaan logam di bawah tekanan pada temperatur tinggi sehingga bagian yang dikontakkan tersebut menyatu dengan *solid-state diffusion*. Pada *friction welding*, panas dihasilkan dari gesekan dua permukaan logam. Sedangkan pada *ultrasonic welding*, tekanan sedang diaplikasikan antara dua bagian logam dan gerak osilasi pada frekuensi ultrasonik digunakan pada arah paralel untuk mengontakkan permukaan. Kombinasi dari gaya normal dan getaran menghasilkan tegangan geser yang menghilangkan lapisan permukaan dan membuat atom-atom berikatan pada permukaan tersebut (Groover, 2010).

2.3. Shield Metal Arc Welding

Shield Metal Arc Welding (SMAW) adalah sebuah proses pelelehan dan penyambungan logam dengan cara dipanaskan dengan sebuah arus listrik yang terjadi antara elektroda berbentuk stik dan logam yang akan disambungkan. Pengelasan SMAW sering disebut *stick welding*. Dalam SMAW, tang elektroda dan benda kerja masing-masing disambungkan dengan menggunakan kabel ke terminal dari sumber tenaga (*power source*). Ketika pengelasan dioperasikan, panas busur menyebabkan kawat inti pada bagian ujung elektroda mencair sebagai tetesan. Lelehan logam elektroda berkumpul di area kolam las dan membeku menjadi logam las. Fluks juga ikut mencair dan mengapung di permukaan logam las. Kemudian fluks yang membeku akan membentuk terak di atas logam las.



Gambar 2.1 *Shield Metal Arc Welding*: (a) Proses Keseluruhan, (b) Area Pengelasan Diperbesar (Kou, 2003)

Pengelasan SMAW memiliki kelebihan meliputi perlengkapan pengelasan yang relatif simpel, mudah dibawa, dan lebih murah dibanding jenis pengelasan lain. Karena hal tersebut, SMAW sering digunakan untuk pemeliharaan, perbaikan, dan konstruksi lapangan. Di samping hal tersebut, SMAW memiliki kekurangan dimana gas pelindung tidak cukup melindungi untuk logam yang reaktif seperti aluminium dan titanium. Laju pengendapan dibatasi oleh elektroda berlapis fluks cenderung untuk terlalu panas dan jatuh di saat menggunakan arus pengelasan yang terlalu tinggi. Elektroda memiliki panjang maksimal sebesar 35 cm sehingga apabila telah habis, maka harus dilakukan pergantian elektroda. Hal ini tentu akan mengurangi tingkat produksi keseluruhan.

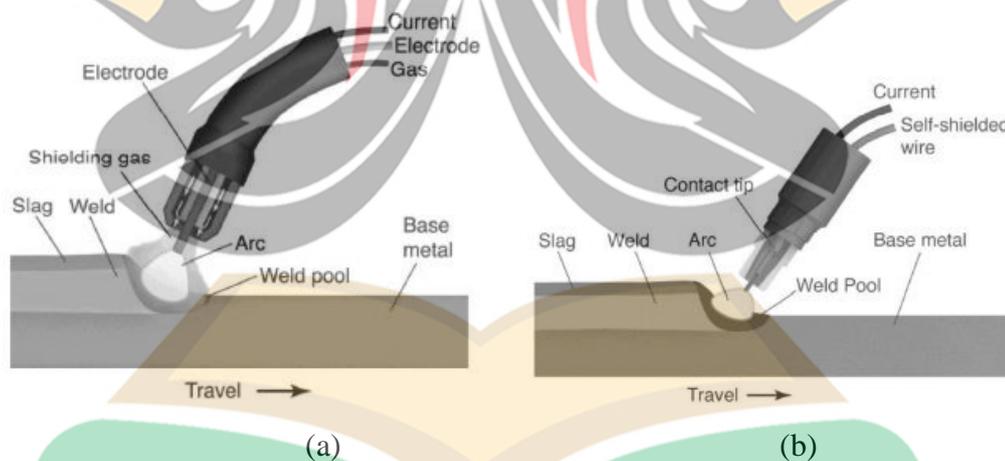
Pada pengelasan SMAW, elektroda berlapis fluks dapat berfungsi sebagai pelindung yang mana elektroda tersebut akan menghasilkan gas pelindung untuk menjaga lelehan logam dari udara. Elektroda berlapis fluks juga dapat berperan *Deoxidizers* dan *fluxing agents* yang akan mendeoksidasi dan membersihkan logam las. Terak padat yang terbentuk akan melindungi logam las yang telah padat tetapi masih panas sehingga rentan akan oksidasi. Elektroda berlapis fluks juga berfungsi sebagai penstabil arus listrik. Elektroda akan membantu mempertahankan kestabilan busur listrik. Busur listrik merupakan gas ionik yang menghantarkan arus listrik. Pada elektroda berlapis fluks, senyawa yang mudah terurai menjadi ion dalam busur listrik seperti potasium oksalat dan litium karbonat akan meningkatkan konduktivitas listrik dan busur mengalirkan arus listrik menjadi lebih lancar. Selain itu, elektroda berlapis busur juga berfungsi sebagai logam tambahan. Logam tambahan ini dapat membantu mengontrol komposisi logam las dan membantu meningkatkan laju pengendapan (Kou, 2003).

2.4. Flux-Core Arc Welding

Flux-Core Arc Welding (FCAW) merupakan pengelasan yang mirip dengan GMAW. Elektroda yang digunakan merupakan tabung logam dengan fluks yang dibungkus di dalamnya. Elektroda tersebut berfungsi mirip seperti elektroda pada pengelasan SMAW, termasuk melindungi lelehan logam dari udara. Penggunaan gas pelindung tambahan pada pengelasan ini bersifat opsional. (Kou, 2003)

Sebuah elektroda berinti fluks terdiri dari kawat tabung berinti yang mengandung kombinasi bahan yang meliputi fluks dan terkadang serbuk logam. Bahan fluks di dalam elektroda tersebut melakukan fungsi yang sama seperti halnya fluks di luar elektroda pada SMAW dan membentuk terak di atas manik las. FCAW terbagi menjadi dua yaitu FCAW berpelindung gas (FCAW-G) dan FCAW berpelindung diri (FCAW-S). Pada FCAW-S tidak memerlukan gas pelindung eksternal karena seluruh sistem perlindungan dihasilkan melalui bahan fluks yang terkandung dalam elektroda. Sedangkan pada FCAW-G menggunakan tambahan gas eksternal.

FCAW-G memiliki stabilitas busur yang lebih baik dan lebih mudah dalam mempertahankan bentuk yang seragam dibandingkan dengan FCAW-S. Selain itu, FCAW-G memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan FCAW-S yang hanya memiliki kekuatan maksimal sebesar 90 ksi. Pada aplikasi struktural, batasan utama FCAW-G terkait dengan kebutuhan gas pelindung. *Brigde Welding Code* membatasi kecepatan angin maksimum di sekitar busur sebesar 5 mph. Apabila pengelasan dilakukan pada kondisi berangin, porositas mungkin terjadi.



Gambar 2.2 (a) Proses FCAW-G, (b) Proses FCAW-S (FHWA, 2019)

FCAW-S sangat ideal apabila dilakukan pada kondisi lapangan dimana angin dapat mengganggu gas pelindung. Lasan dibuat dalam kondisi menyimulasikan kecepatan angin sebesar 10 mph tanpa efek bahaya (FEMA, 2007). Karena tidak membutuhkan gas pelindung eksternal, maka tidak diperlukan tabung gas, selang

dan *regulator* sehingga pengelasan dapat dilakukan lebih fleksibel dibandingkan dengan FCAW-G. Peralatan yang lebih sederhana dapat membuat FCAW-S dilakukan di ruang terbatas (FHWA, 2019).

Pada pengelasan FCAW, penambahan gas pelindung berfungsi untuk memberikan perlindungan ganda. Gas pelindung akan mempengaruhi busur, lebar manik las, penumpukan, penetrasi, percikan, dan sifat mekanik. Ada beberapa gas pelindung yang digunakan dalam pengelasan FCAW di antaranya ialah argon dan CO₂. Gas argon mudah terionisasi oleh busur. Hasil ionisasi sangat terkonsentrasi dalam jalur antara elektroda ke *molten pool*. Konsentrasi ini menghasilkan ukuran tetesan logam yang lebih kecil atau di dalam *metal transfer* dikenal sebagai *axial spray mode*. Hal ini menjadikan hasil busur yang halus dan stabil serta sedikit percikan. Gas CO₂ yang ditambahkan dalam argon akan meningkatkan penetrasi. Peningkatan penetrasi akan berlanjut hingga gas pelindung yang digunakan berupa CO₂ 100%. Namun seiring meningkatnya persentase CO₂, stabilitas busur akan semakin menurun. Busur yang kurang stabil akan menyebabkan peningkatan percikan. Gas CO₂ dengan mudah dipecah dalam busur. Kemudian membentuk karbon monoksida dan oksigen bebas. Kedua gas tersebut reaktif terhadap beberapa paduan di elektroda. Saat paduan ini bergerak dari elektroda ke *molten pool*, beberapa di antaranya membentuk oksida. Silikon dan mangan adalah paduan utama yang teroksidasi dan hilang dari logam las. Sebagian besar elektroda pengelasan FCAW secara khusus dirancang untuk digunakan dengan atau tanpa gas pelindung dan untuk campuran persentase atau gas pelindung tertentu. Misalnya, elektroda yang dirancang khusus untuk digunakan dengan 100% CO₂ akan memiliki tingkat silikon dan mangan yang lebih tinggi untuk mengkompensasi hilangnya oksidasi (Jeffus, 2016).



Gambar 2.3 Pengaruh Gas Pelindung Pada Bentuk Manik Las (Jeffus, 2016)

2.5. Parameter Pengelasan

Dalam pengelasan, terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan agar mendapatkan hasil las yang baik. Di antara beberapa parameter tersebut dijelaskan sebagai berikut.

2.5.1. Arus Pengelasan

Pada pengelasan SMAW, elektroda las harus digunakan dengan arus yang ditentukan agar dapat beroperasi dengan benar. Arus yang terlalu rendah akan menghasilkan sedikit atau tidak adanya penetrasi las ke *base* metal. Selain itu, busur yang dihasilkan sangat pendek dan memiliki stabilitas yang buruk. Lasan mungkin akan menghasilkan inklusi terak dan gas karena *molten pool* tidak cair cukup lama untuk fluks bereaksi. Apabila arus yang digunakan terlalu tinggi akan menyebabkan stabilitas busur yang buruk. Kondisi ini menyebabkan percikan, porositas, dan inklusi terak. Manik yang dihasilkan pun akan lebih lebar dan rata serta penetrasi yang lebih dalam (Jeffus, 2016).

Tabel 2.2 Hubungan Antara Diameter Elektroda E7016 dan Arus Pengelasan SMAW^{*)}

Diameter (mm)	Arus (Ampere)
2,4 dan 2,5	65 – 110
3,2	100 – 150
4,0	140 – 200
5,0	180 – 255
5,6	240 – 320
6,0	300 – 390
8,0	375 – 475

^{*)}AWS A5.1/A5.1M, 2004

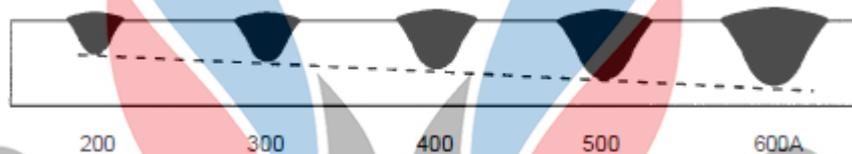
Berbeda halnya dengan pengelasan FCAW yang cenderung membutuhkan arus yang lebih besar. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kecepatan pemakanan. Jika kecepatan pemakanan diturunkan, otomatis akan menurunkan arus pengelasan yang dibutuhkan. Selain itu, semakin besar elektroda juga akan membutuhkan lebih banyak arus untuk melelehkan ujung kawat elektroda untuk menjaga tegangan agar tetap konstan.

Tabel 2.3 Hubungan Antara Diameter Elektroda E70T-1 dan Arus Pengelasan

Diameter (mm)	Arus (Ampere)
0,9	130 – 150
1,2	150 – 210
1,4	150 – 300
1,6	200 – 400

*)Jeffus, 2016

Adapun pengaruh arus pada tampilan pengelasan dapat dilihat pada gambar sebagai berikut.



Gambar 2.4 Pengaruh Arus Pada Tampilan Las (Weman, 2003)

2.5.2. Tegangan Pengelasan

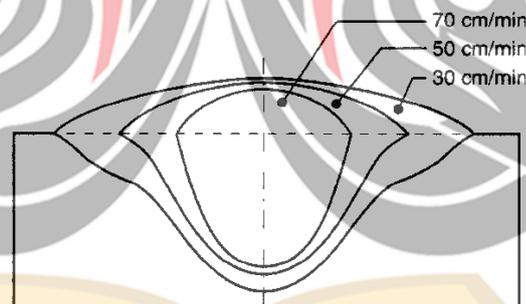
Tingginya tegangan busur tergantung pada panjang busur dan jenis elektroda yang digunakan. Tingginya tegangan busur yang diperlukan berbanding lurus dengan panjang busur. Busur listrik yang terlalu panjang tidak dikehendaki karena stabilitasnya mudah terganggu sehingga hasil pengelasannya tidak rata. Di samping itu, tingginya tegangan tidak banyak mempengaruhi kecepatan pencairan, sehingga tegangan yang terlalu tinggi hanya akan membuang-buang energi. Panjang busur yang dianggap baik kira-kira sama dengan diameter elektroda. Tegangan yang diperlukan untuk mengelas dengan elektroda dengan diameter ialah 3 sampai 6 mm, kira-kira antara 20 sampai 30 V untuk posisi datar. Sedangkan untuk posisi tegak atau atas kepala biasanya dikurangi lagi dengan 2 sampai 5 volt (Wiryosumarto, 2000).

2.5.3. Travel Speed

Kecepatan pengelasan tergantung pada jenis elektroda, diameter inti elektroda, bahan yang dilas, geometri sambungan, ketelitian dimensi dan lain-lain. Kecepatan pengelasan berbanding lurus dengan arus pengelasan. Dalam hal ini,

semakin cepat pengelasan maka diperlukan arus yang semakin besar pula. Bila tegangan dan arus dibuat tetap, tetapi kecepatan pengelasan dinaikkan maka jumlah deposit per satuan las menurun. Apabila kecepatan pengelasan terus ditingkatkan maka masukan panas per satuan panjang akan semakin kecil sehingga pendinginan terjadi terlalu cepat yang berkemungkinan dapat memperkeras daerah HAZ (Wiryo Sumarto, 2000).

American Welding Society (AWS) mendefinisikan *travel speed* sebagai laju linier di mana busur digerakkan di sepanjang sambungan pengelasan. Apabila *travel speed* terlalu cepat, *filler metal* tidak dapat mengisi jalur yang dilebur oleh busur secara memadai. Hal ini dapat menyebabkan cacat *undercut*. *Travel speed* yang terlalu lambat pada awalnya akan meningkatkan penetrasi dan meningkatkan deposit *filler metal*. Saat *filler metal* meningkat, manik las akan menumpuk di kolam las. Karena penetrasi yang dalam dari kawat berinti fluks, sudut elektroda sangat menentukan keberhasilan pengelasan. Cara lain untuk mengetahui *travel speed* yang benar adalah dengan melihat bagan rekomendasi pabrik untuk laju pembakaran untuk elektroda yang dipilih dalam pengelasan FCAW (Jeffus, 2016).



Gambar 2. 5 Pengaruh Travel Speed Pada Pengelasan (Weman, 2003)

2.5.4. Polaritas Listrik

Karakteristik mesin las FCAW berdasarkan arusnya dibedakan menjadi tiga macam, yaitu mesin las arus searah atau *Direct Current* (DC), mesin las arus bolak-balik atau *Alternating Current* (AC) dan mesin las arus ganda yang merupakan mesin las yang dapat digunakan untuk pengelasan dengan arus searah (DC) dan pengelasan dengan arus bolak-balik (AC). Mesin las arus DC dapat digunakan dengan dua cara yaitu polaritas lurus dan polaritas terbalik. Mesin las DC polaritas

lurus (DC-) digunakan bila titik cair bahan induk tinggi dan kapasitas besar, untuk pemegang elektrodanya dihubungkan dengan kutub negatif dan logam induk dihubungkan dengan kutub positif, sedangkan untuk mesin las DC polaritas terbalik (DC+) digunakan bila titik cair bahan induk rendah dan kapasitas kecil, untuk pemegang fillernya dihubungkan dengan kutub positif dan logam induk dihubungkan dengan kutub negatif. Pilihan ketika menggunakan DC polaritas negatif atau positif adalah terutama ditentukan elektroda yang digunakan. Beberapa filler FCAW didesain untuk digunakan hanya DC- atau DC+. Filler lain dapat menggunakan keduanya DC- dan DC+ (Jones, 2015).



Gambar 2.6 Pengaruh Polaritas Listrik Pada Pengelasan (Weman, 2003)

2.5.5. Elektroda

Pada pengelasan SMAW, elektroda yang digunakan pada penelitian ini yaitu dengan kode E7016. Berdasarkan AWS A5.15/5.15M (2004) elektroda tersebut memiliki arti sebagai berikut.

- E : Elektroda pada pengelasan busur listrik.
- 70 : Besar nilai tegangan tarik maksimum dari hasil pengelasan yaitu sebesar 70.000 psi atau 450 MPa.
- 1 : Posisi pengelasan, angka 1 menunjukkan proses dapat dilakukan dalam semua posisi pengelasan.
- 6 : Elektroda dengan berbahan dari selaput soda hidrogen rendah.

Tabel 2.4 Komposisi Elektroda E7016^{*)}

Unsur	Kandungan (%)
Karbon (C)	0,15
Silikon (Si)	0,75
Mangan (Mn)	1,6
Posfor (P)	0,75
Sulfur (S)	0,035

*)AWS A5.15/5.15M (2004)

Pada pengelasan FCAW, elektroda FCAW-G dapat digunakan untuk mengelas *carbon steel*, *low alloy steel* dan *stainless steel*. Pada AWS A5.20/5.20M (2005) dijelaskan klasifikasi elektroda E70T-1C seperti yang digunakan pada penelitian ini ialah sebagai berikut.

- E : Elektroda pada pengelasan busur listrik.
 7 : Pada AWS A5.20/A5.20M (2005), satu atau dua digit menunjukkan besar kekuatan tarik minimum dari logam las yaitu sebesar 70.000 psi atau 450 MPa.
 0 : Posisi pengelasan yang digunakan saat melakukan proses pengelasan. Angka 0 menunjukkan posisi flat dan horizontal.
 T : Mengidentifikasi sebagai fluks berinti atau logam berinti elektroda.
 1 : Menunjukkan polaritas DCEP.
 C : Menunjukkan proses FCAW-G dengan menggunakan gas pelindung CO₂.

Tabel 2.5 Komposisi Elektroda E70T-1C^{*)}

Unsur	Kandungan (%)
Karbon (C)	0,12
Silikon (Si)	0,9
Mangan (Mn)	1,75
Fosfor (P)	0,03
Sulfur (S)	0,03

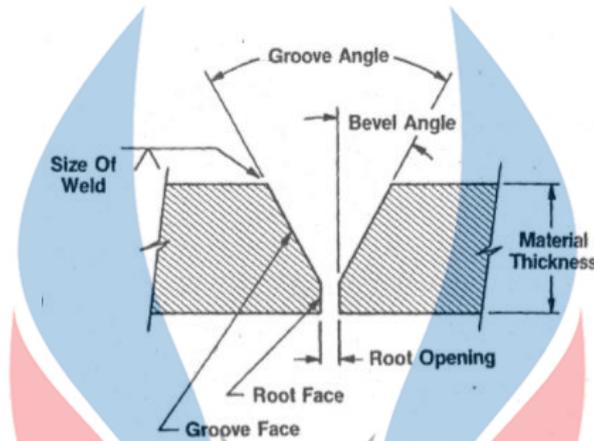
^{*)}AWS A5.20/5.20M (2005)

2.6. Kampuh Pengelasan

Pembuatan struktur las meliputi proses pemotongan material sesuai dengan ukuran yang telah ditentukan tiap-tiap daerah yang disambung disebut sebagai sambungan. Terdapat beberapa variasi sambungan dalam pengelasan sebagai pilihan berdasarkan ketebalan dan kualitas material, metode pengelasan, bentuk struktur dan lain sebagainya.

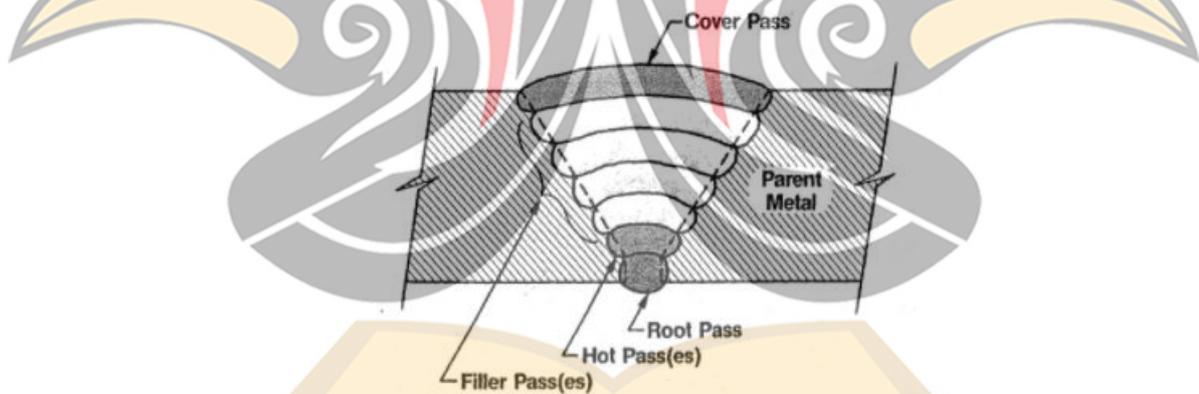
Gambar 2.7 menjelaskan tata nama komponen sambungan pengelasan pada bagian kampuh pengelasan. Adapun definisi dari istilah-istilah pada gambar 2.9 di antaranya, *groove angle* yaitu total sudut antara dua permukaan kampuh yang saling berhadapan. *Bevel angle* yaitu sudut antara permukaan kampuh dengan bidang tegak lurus. *Groove face* yaitu permukaan kampuh pengelasan. *Root face* yaitu permukaan akar pada kampuh pengelasan. *Root opening* yaitu pemisah antara *root*

face pada kedua permukaan *base metal*. *Material thickness* yaitu ketebalan material yang akan dilas. *Size of weld* yaitu simbol pengelasan yang menjelaskan tipe sambungan dan ukuran las.



Gambar 2.7 Tata Nama Bagian Kampuh Pengelasan (Rudarmel, 1996)

Gambar 2.8 menjelaskan perbedaan dari lapisan las pada sambungan *butt joint* penetrasi penuh.

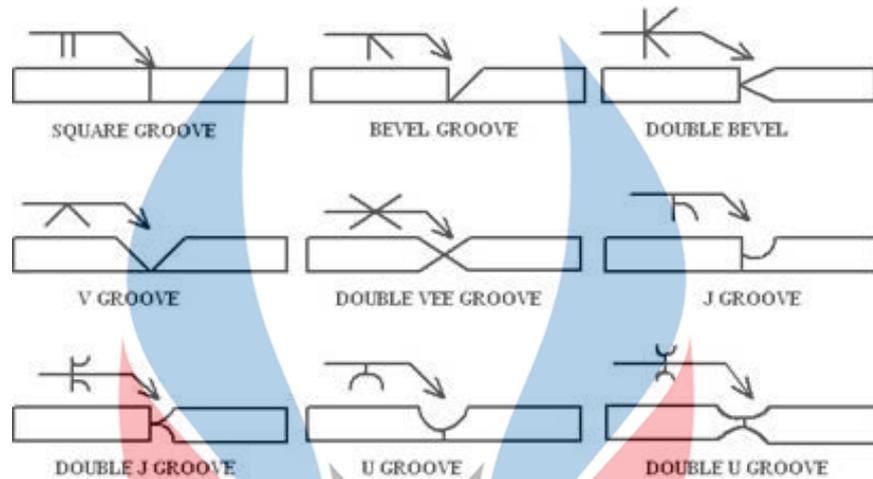


Gambar 2.8 Lapisan Pengelasan (Rudarmel, 1996)

Adapun definisi dari istilah-istilah pada gambar 2.10 di antaranya, *root pass* yaitu jalur las awal yang menghubungkan dua bagian material, terkadang disebut *bead*, *root bead*, *stringer*, dan *stringer bead*. *Hot pass* yaitu jalur las kedua dan terkadang jalur ketiga dalam sambungan pengelasan. Digunakan untuk memperkuat *root pass*. *Filler pass* yaitu jalur pengisi sebagian besar sambungan pengelasan yang tersisa. *Cover pass* yaitu lapisan akhir dari pengelasan, terkadang disebut *cap*.

Base metal yaitu logam dasar atau logam yang akan disambungkan (Rudermal, 1996).

www.itk.ac.id



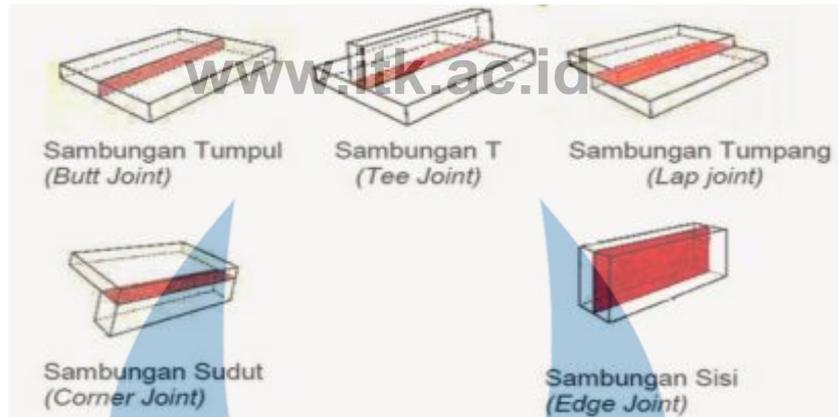
Gambar 2.9 Jenis Kampuh Pengelasan (Gunawan, 2017)

Pada sambungan pengelasan, kampuh pengelasan harus dirancang untuk pengelasan yang efisien secara ekonomis, mudah dalam pelaksanaannya, dan untuk meminimalkan jumlah endapan tanpa menyebabkan cacat las. Setelah menentukan jenis pengelasan dan jenis sambungan, maka tahap selanjutnya adalah mempersiapkan sisi yang akan dilas dengan membentuk kampuh. Adapun jenis kampuh yang digunakan dalam pengelasan ialah sebagai berikut.

2.7. Jenis Sambungan Pengelasan

Pembuatan struktur las meliputi proses pemotongan material sesuai dengan ukuran yang telah ditentukan. Tiap-tiap daerah yang disambung disebut sebagai sambungan. Terdapat beberapa variasi sambungan dalam pengelasan sebagai pilihan berdasarkan ketebalan dan kualitas material, metode pengelasan, bentuk struktur dan lain sebagainya.

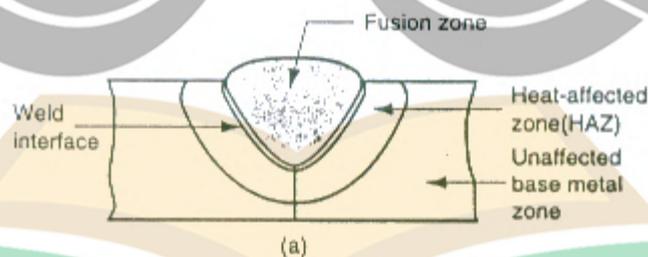
www.itk.ac.id



Gambar 2.9 Jenis Sambungan Pengelasan (Wiryosumarto, 2000)

2.8. Daerah Hasil Pengelasan

Daerah lasan terdiri dari 3 bagian yaitu logam lasan, daerah pengaruh panas atau *heat affected zone* (HAZ) dan logam induk yang tak terpengaruhi. Logam las adalah bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Daerah pengaruh panas atau daerah HAZ adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat. Logam induk tak terpengaruhi adalah bagian logam dasar di mana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan struktur dan sifat (Wiryosumarto, 2000)



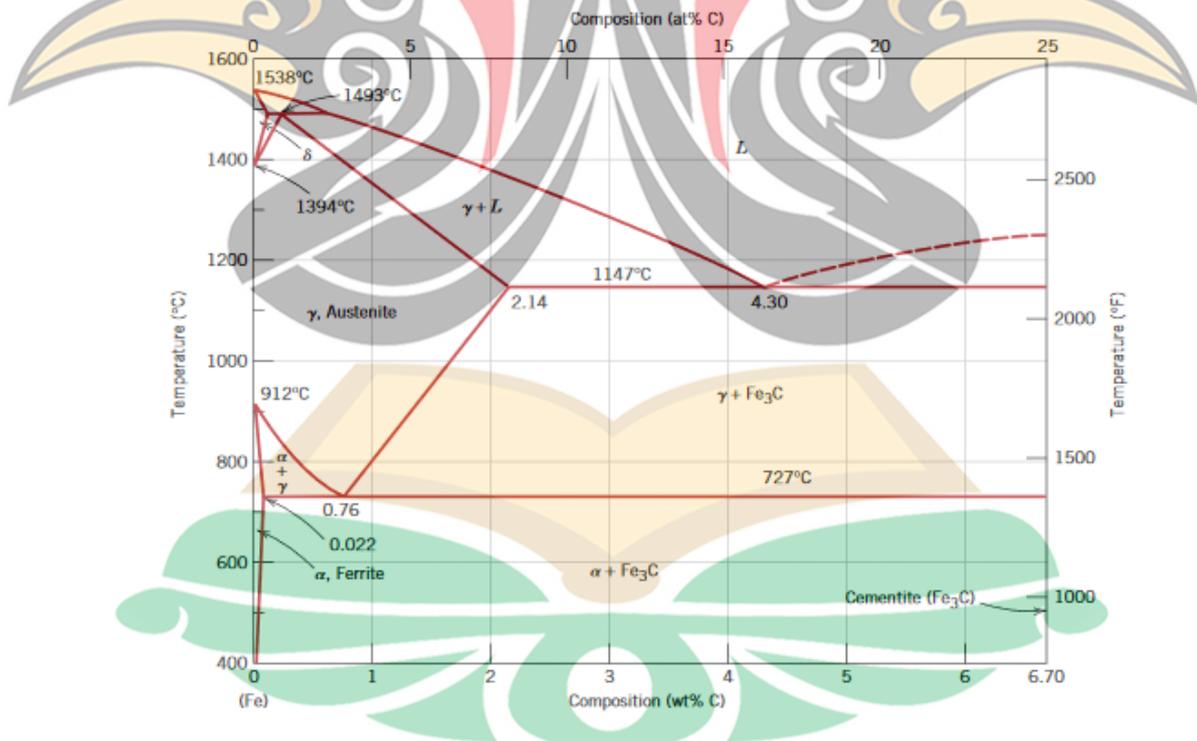
Gambar 2.10 Daerah Hasil Pengelasan (Wiryosumarto, 2000)

2.9. Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Diagram fasa Fe-Fe₃C merupakan sebagian potongan dari diagram fasa Fe-C. Besi murni selama dipanaskan, mengalami dua perubahan struktur kristal sebelum melebur. Pada temperatur ruangan, bentuk stabil dari besi yang disebut ferit atau besi- α memiliki struktur kristal BCC. Ferit mengalami transformasi

isomorfik ke austenit FCC atau besi- γ pada temperatur 912°C (1674°F). Austenit bertahan hingga temperatur 1400°C (2541°F). Pada temperatur tersebut austenit FCC kembali ke fasa BCC yang disebut besi- δ . Hingga akhirnya, besi melebur pada temperatur 1538°C (2800°F).

Karbon merupakan sebuah senyawa tak murni yang menyisip ke dalam besi dan membentuk sebuah larutan padat pada masing-masing dari fasa yang terbentuk. Setiap unit sel mengandung sebuah atom karbon yang tersisip. Dalam ferit, hanya karbon dengan konsentrasi yang kecil yaitu maksimum sebesar 0,022% yang dapat terlarut pada temperatur 727°C (1341°F). Batas kelarutan dapat dijelaskan dengan bentuk dan ukuran dari posisi interstitial BCC. Meskipun karbon yang berada dalam besi memiliki konsentrasi yang relatif rendah, secara signifikan akan mempengaruhi sifat mekanik dari ferit. Ferit memiliki sifat yang relatif lunak dan dapat dimagnetisasi pada temperatur di bawah 768°C (1414°F) serta memiliki massa jenis sebesar 7,88 g/cm³.



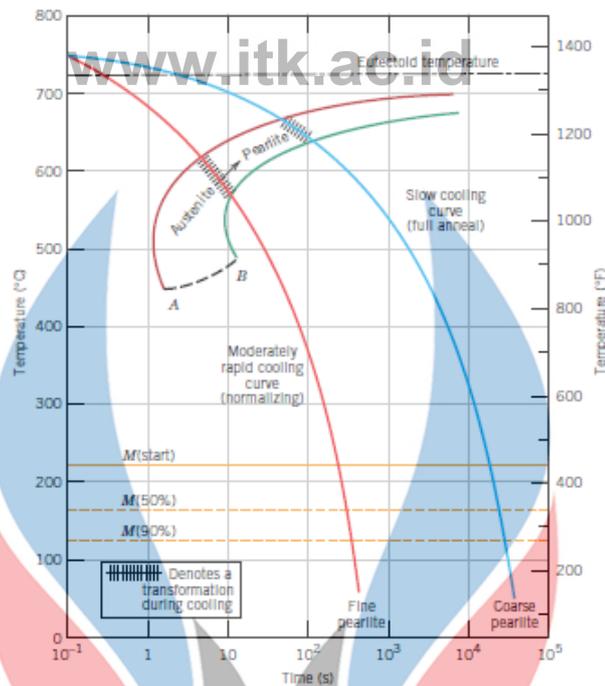
Gambar 2.11 Diagram Fasa Fe-Fe₃C (ASM International, 1990)

Austenit atau besi- γ , bila hanya dipadukan dengan karbon, akan menjadi tidak stabil di bawah temperatur 727°C (1341°F). Batas kelarutan karbon maksimum di dalam austenit adalah 2,44% pada temperatur 1147°C (2097°F). Batas kelarutan ini kira-kira 100 kali lebih besar daripada ferit karena struktur oktahedral FCC lebih besar daripada struktur tetrahedral BCC. Oleh karena itu, regangan yang dikenakan atom besi di sekitarnya jauh lebih rendah. Besi- δ hampir sama dengan ferit kecuali temperatur dimana masing-masing kedua fasa tersebut terbentuk. Besi- δ hanya stabil di suhu yang relatif tinggi.

Sementit (Fe_3C) terbentuk ketika batas kelarutan karbon dalam ferit melebihi 727°C (1341°F). Sementit bersifat sangat keras dan rapuh, sehingga dapat meningkatkan kekuatan baja. Sementit merupakan fasa metastabil. Artinya, sementit akan tetap sebagai senyawa pada temperatur kamar. Namun, apabila dipanaskan hingga temperatur antara 650°C dan 700°C (1200°F dan 1300°F) selama beberapa tahun, secara bertahap akan berubah menjadi ferit dan karbon dalam bentuk grafit (Callister, 2014).

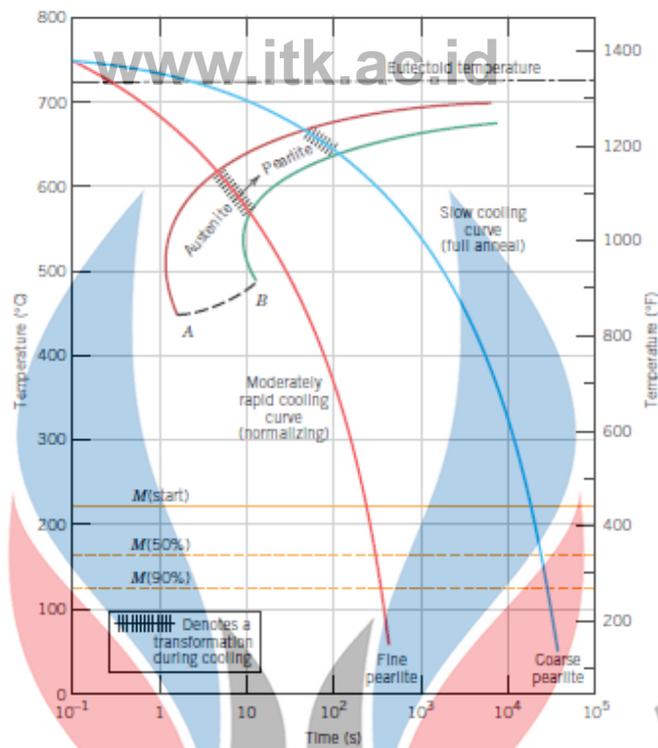
2.10. Diagram CCT

Perlakuan panas isothermal bukan merupakan cara yang paling praktis untuk dilakukan karena paduan harus didinginkan dengan cepat dan ditahan pada temperatur di atas eutektoid. Dengan demikian, diagram transformasi isothermal hanya valid untuk kondisi dimana temperatur konstan. Kebanyakan perlakuan panas untuk baja melibatkan pendinginan terus-menerus hingga ke temperatur kamar, sehingga diagram transformasi isothermal perlu dimodifikasi untuk transformasi yang terjadi karena temperatur yang terus berubah. Pada diagram CCT, kurva sedikit bergeser ke waktu yang lebih lama dan temperatur yang lebih rendah. Beberapa kontrol mungkin akan dipertahankan, bergantung bagaimana kondisi lingkungan.

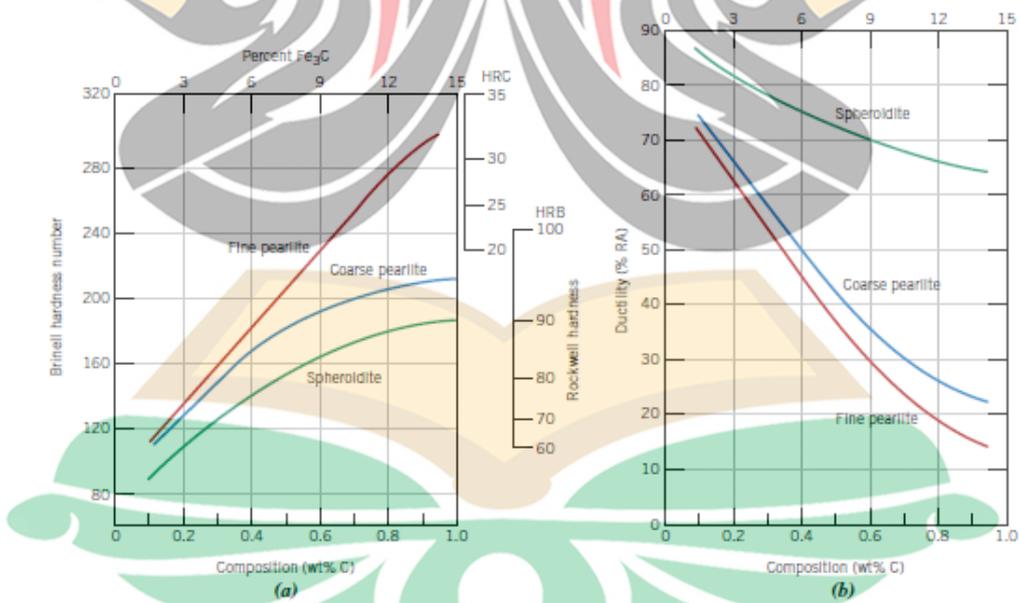


Gambar 2.12 Diagram CCT Pada Baja Eutektoid Dengan Pendinginan Cukup Cepat dan Pendinginan Lambat (Callister, 2014)

Pendinginan sedang akan menghasilkan fasa berupa perlit halus dan pendinginan lambat akan menghasilkan fasa berupa perlit kasar. Karbon dan unsur paduan lain akan menggeser perlit (sebagai fasa proeutektoid) dan hidung bainit ke waktu yang lebih lama sehingga menurunkan laju pendinginan kritis. Sementit bersifat jauh lebih keras tetapi lebih rapuh daripada ferit. Karenanya, meningkatkan fraksi Fe_3C dalam paduan baja sambil menahan elemen mikrostruktur lain akan menghasilkan sifat yang lebih keras dan kuat. Ketebalan lapisan masing-masing fasa ferit dan sementit pada mikrostruktur juga akan mempengaruhi sifat mekanik baja. Perlit halus lebih keras dan kuat dibandingkan dengan perlit kasar (Callister, 2014).



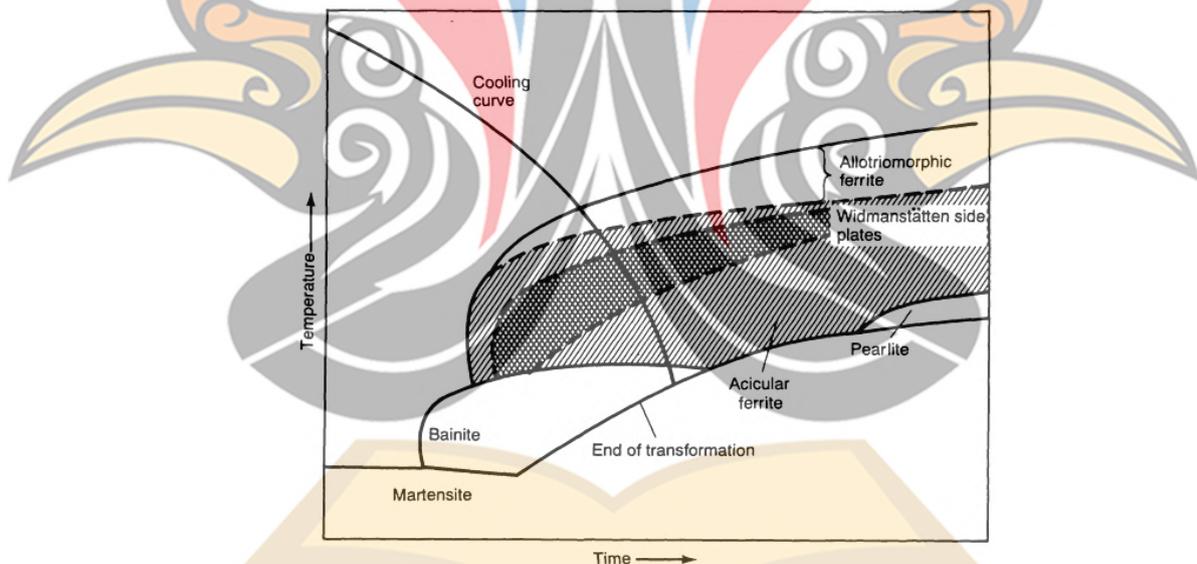
Gambar 2.13 Diagram CCT Pada Baja Eutektoid Dengan Pendinginan Cukup Cepat dan Pendinginan Lambat (Callister, 2014)



Gambar 2.14 Perbandingan Sifat Mekanik Pada Fasa Perlit Halus, Perlit Kasar dan Sferoidit Berdasarkan Nilai (a) Kekerasan dan (b) Keuletan (ASM

International, 1981)

Dalam proses pengelasan, adanya transformasi austenit menjadi ferit merupakan tahap penting yang dapat mempengaruhi struktur logam las, hal ini disebabkan karena sifat-sifat mekanis material ditentukan pada tahap tersebut. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi transformasi austenit menjadi ferit yaitu antara lain masukan panas (*heat input*), komposisi kimia las, kecepatan pendinginan (*travel speed*) dan bentuk sambungan pengelasan. Struktur mikro pada baja umumnya tergantung dari kecepatan pendinginannya dari temperatur daerah austenit sampai temperatur kamar. Karena perubahan struktur ini maka sifat-sifat mekanik yang dimiliki pada baja juga akan mengalami perubahan. Hubungan antara kecepatan pendinginan dengan struktur mikro yang terbentuk biasanya dapat digambarkan dalam diagram yang menghubungkan waktu, suhu dan transformasi, diagram tersebut dikenal dengan diagram CCT (*Continuous Cooling Transformation*) (Avner, 1974).



Gambar 2.15 Skema Diagram CCT Pada Pengelasan (ASM International, 1993)

2.11. *Liquid Penetrant Test*

Liquid Penetrant Test merupakan salah satu metode pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Test*) pada suatu material, pengujian ini dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan atau diskontinuitas yang terbuka pada permukaan. Penggunaan uji penetrant sangat luas, selain untuk memeriksa

sambungan pengelasan dan permukaan pada benda kerja, metode uji penetrasi ini juga bisa untuk mendeteksi retak yang terjadi pada komponen pesawat seperti part mesin (*crank shaft, gear*), *part aircraft, landing gear*, dan pada *aircraft support assembly*.

Metode *penetrant* ini menggunakan cairan penetrant yang berdaya resap tinggi, dapat berupa cairan warna merah atau hijau fluorescent (bersinar jika terkena cahaya ultraviolet), cairan berwarna terang ini bertujuan untuk mengetahui keretakan atau kerusakan pada material solid baik logam maupun non-logam. Ada dua tipe metode *Penetrant Testing* ini yaitu sebagai berikut.

1. *Fluorescent Dye Penetrant*

Liquid penetrant jenis ini adalah liquid penetrant yang dapat berkilau bila dilihat dibawah cahaya ultraviolet di ruang gelap. Pemilihan penggunaan sensitivitas penetrant bergantung pada kekritisian inspeksi, kondisi permukaan yang diselidiki, jenis proses (system) dan tingkat sensitivitas yang diinginkan.

2. *Visible Dye Penetrant*

Pada umumnya visible penetrant berwarna merah. Hal ini ditunjukkan pada tanda-tanda keretakan yang kontras terhadap latar belakang warna developernya. Proses ini tidak membutuhkan cahaya ultraviolet, tetapi membutuhkan cahaya putih yang cukup memadai untuk pengamatan. Sensitivitas penetrant jenis ini tidak setinggi jenis fluorescent, tetapi cukup memadai untuk berbagai pengetesan di bidang Industri.

Pada setiap tipe pemeriksaan masing-masing terbagi dalam tiga bagian sebagai berikut.

1. *Water Washable Fluorescent*

Penetrant jenis ini mengandung zat emulsi, jadi prosesnya cepat dan efisien, karena mudah di bilas dengan air, tetapi pembilasan harus dilaksanakan dengan hati-hati karena penetrant dapat terbilas habis dari retak. Derajat dan kecepatan pembilasan untuk proses ini bergantung pada karakteristik dari *spray-nozzle*, tekanan dan temperature air selama pembilasan, kondisi permukaan benda kerja dan karakteristik penetrant itu sendiri.

2. *Post Emulsifiable Fluorescent*

Teknik ini digunakan untuk memeriksa retak-retak yang sangat kecil, karena memiliki kemampuan penetrant yang bagus dan tidak larut dalam air, sehingga penetrant yang digunakan adalah yang tidak mudah di bilas dengan air (*not water-washable*). *Penetrant* jenis ini membutuhkan langkah tambahan pada saat pemeriksaan, yaitu proses pencelupan *emulsifiable* yang mengakibatkan penetrant dapat dengan mudah dibilas dengan air. Oleh karena itu, waktu lamanya *emulsifiable* dibiarkan pada permukaan benda kerja harus dibatasi, agar *penetrant* yang berada di dalam retakan tidak menjadi *water-washable* sehingga *penetrant* yang ada di retakan tidak ikut terbasuh.

3. *Solvent Removable Fluorescent*

Penetrant jenis ini berupa penetrant yang tidak mengandung zat pengemulsi, pada saat pemeriksaan menggunakan pembersih pelarut secara khusus, yang dapat dicapai dengan cara mengelap permukaan benda kerja dari penetrant dengan kain lap yang dibasahi dengan pelarut sampai lembab, pelarut tidak boleh berlebihan. Proses seperti ini merupakan proses *liquid penetrant inspection* yang paling sensitif bila dilakukan dengan cara yang benar. Solvent yang digunakan pada saat pemeriksaan penetrant tersebut berbeda dengan saat pembersihan awal (pembersihan komponen).

Dari keterangan diatas perlu diketahui bahwa masing-masing metode menggunakan bahan-bahan penetrant tertentu yang harus mengikuti konsep keluarga yaitu pada proses penggunaan cairan *penetrant*, *remover* dan *developer* harus satu produk atau pabrik.

Penetrant fluorescent maupun *visible* dapat diaplikasikan dengan salah satu dari cara berikut.

- a. Penyemprotan, biasanya menggunakan alat penyemprot bertekanan rendah atau dari kaleng semprot bertekanan.
- b. Kuas atau kain, biasanya diaplikasikan dengan kain lap, kapas, atau kuas, apabila menguji sebagian kecil/lokasi dari suatu benda.
- c. Pencelupan, benda uji dibenamkan ke dalam tangki penetrant, lalu diangkat dan ditiriskan.

- d. Penuangan, penetrant dituangkan di atas permukaan benda dan setelah itu ditiriskan (Callister, 2014).

2.12. Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro bertujuan untuk mengetahui suatu fisik logam yang nampak pada bagian luar dan untuk mengetahui susunan fasa pada suatu benda uji atau spesimen. Salah satu cara dalam mengamati struktur mikro suatu bahan yaitu dengan teknik metalografi (pengujian mikroskopik). Metalografi merupakan suatu ilmu yang mempelajari karakteristik mikrostruktur suatu logam, paduan logam dan material lainnya serta hubungannya dengan sifat-sifat material tersebut. Dalam pengujiannya membutuhkan mikroskop yang berfungsi untuk menunjukkan atau menentukan ukuran butir, ukuran bentuk, dan distribusi berbagai fasa yang memiliki efek yang cukup besar terhadap sifat mekanik suatu logam. Standar uji yang digunakan dalam pengujian yaitu ASTM E3 dan ASTM E7. ASTM E3 (*Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*) berisi tentang persiapan sebelum pelaksanaan foto mikro seperti pemilihan permukaan pada spesimen, pembuatan ukuran dan juga pemotongan pada spesimen, pembersihan dan penghalusan permukaan spesimen, pelapisan spesimen (resin), proses gerinda, poles, dan proses pengetsaan. Sedangkan pada ASTM E7 (standar terminologi *Relating to Metallography*) berisi tentang istilah, proses dan syarat-syarat pada uji metalografi (Avner, 1974).

Dalam preparasi spesimen untuk pengujian mikroskopik dilakukan melalui lima tahapan sebagai berikut.

1. *Sectioning*

Spesimen untuk pengujian metalografi biasanya diambil dari material induk dengan melibatkan operasi pemotongan. Proses pemotongan induk dikerjakan dengan material abrasive-wheel cutting atau gergaji sehingga diperoleh spesimen dengan dimensi sesuai dengan yang dikehendaki. Spesimen yang dipotong tersebut harus memenuhi criteria persyarataan untuk metalografi.

2. *Mounting*

Tujuan dari pembedaan adalah untuk kenyamanan dalam menganalisis spesimen dengan bentuk dan ukuran yang sulit selama proses

penggerindaan, pemolesan, dan pengamatan metalografi. Tujuan kedua adalah melindungi ujung-ujung ekstrim dan cacat permukaan selama proses metalografi. Selain itu pembersihan juga digunakan sebagai sarana untuk menangani spesimen radioaktif.

3. *Grinding*

Penggerindaan dilakukan untuk mengeliminasi sisi-sisi tajam dan goresan dari spesimen akibat proses pemotongan. Proses penggerindaan dilakukan dengan menggunakan kertas gerinda grade 80, 100, 120, 240, 320, 500, 800, 1000, 1200, 1500 dan 2000 dengan penggantian bertahap. Ketika dilakukan penggantian kertas gerinda posisi spesimen harus diputar 90° dari posisi spesimen ketika menggunakan kertas gerinda grade sebelumnya. Perlakuan ini ditujukan untuk menghilangkan goresan yang mungkin terbentuk ketika dilakukan penggerindaan.

4. *Polishing*

Pemolesan merupakan tahapan yang dilakukan untuk menyempurnakan hasil dari proses penggerindaan. Pada proses ini akan terjadi penghapusan goresan-goresan halus yang mungkin tersisa dari proses penggerindaan. Sehingga melalui proses pemolesan ini akan didapatkan spesimen yang bebas dari goresan yang dapat menyebabkan hasil tidak maksimal saat metalografi. Pada umumnya pemolesan dilakukan dengan pasta abrasif seperti dengan menggunakan pasta alumina dan pasta intan.

5. *Etching*

Pengetsaan adalah suatu proses yang dilakukan untuk menampakkan batas butir yang terbentuk pada logam. Prinsip dasar pengetsaan adalah melalui proses korosi terkendali. Pengendalian ini dapat berupa pengendalian waktu dan pengendalian bahan korosif yang digunakan. Proses terjadinya perbedaan warna, besar butir, bentuk dan ukuran butir yang mendasari penentuan dari jenis dan sifat fasa pada hasil pengamatan foto mikro adalah di akibatkan adanya proses pengetsaan. Prinsip dari pengetsaan sebenarnya merupakan proses pengikisan mikro terkendali yang menghasilkan alur pada permukaan akibat *crystal faceting* yaitu orientasi kristal yang berbeda (batas butir), akan terjadi reaksi kimia yang berbeda intensitasnya. Maka atom-atomnya akan lebih mudah terlepas sehingga terkikis lebih aman. Akibatnya adanya perbedaan ini dan bergantung pada arah

cahaya pantulan yang tertangkap oleh lensa maka akan tampak bahwa fasa yang lebih lunak akan terlihat lebih terang dan fasa yang lebih keras akan terlihat gelap. Begitu juga akan terlihat bentuk dan ukuran butirannya sehingga dapat dibedakan fasa-fasa yang terlihat dalam bahan yang akan diuji (Geels, 2006).

2.13. Metode Planimetri (*Jeffries Method*)

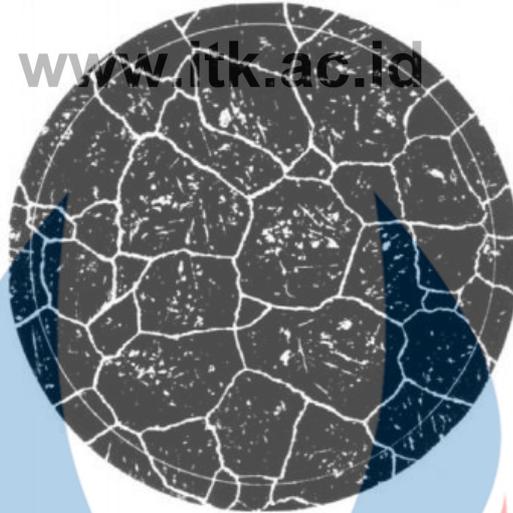
Pengukuran besar butir dilakukan dengan mengolah data hasil metalografi baja yang telah dilakukan *annealing*. Foto struktur mikro menunjukkan bahwa fasa yang terjadi merupakan fasa ferit dan sebagian kecil fasa perlit. Pengukuran dan perhitungan besar butir dilakukan dengan metode planimetri (*Jeffries method*) yaitu menghitung besar butir persatuan luas pada lingkaran berdiameter 79,8 mm (luas lingkaran 5000 mm²) (Suhartono, 2005).

Metode pengujian *grain size* merupakan penentuan ukuran butir rata-rata dalam bahan logam terutama prosedur pengukuran dan dasar basis geometrisnya murni tidak tergantung pada logam atau paduan yang bersangkutan. Bahkan prosedur dasar juga dapat digunakan untuk memperkirakan butiran rata-rata, kristal, atau ukuran sel dalam bahan bukan logam. Metode perbandingan (*comparison method*) dapat digunakan jika struktur material mendekati tampilan salah satu grafik perbandingan standar. Prosedur metode perbandingan (*comparison method*) tidak memerlukan penghitungan butir, pemotongan, atau persimpangan, tetapi, seperti namanya, melibatkan perbandingan struktur butir dengan serangkaian gambar bertingkat, baik dalam bentuk *wall chart*, atau lembaran plastik bening sebagai pembanding.

$$N_A = f\left(n_1 + \frac{1}{2}n_0\right) \dots\dots\dots (2.1)$$

$$G = 3.321928 \log N_A - 2.954 \dots\dots\dots (2.2)$$

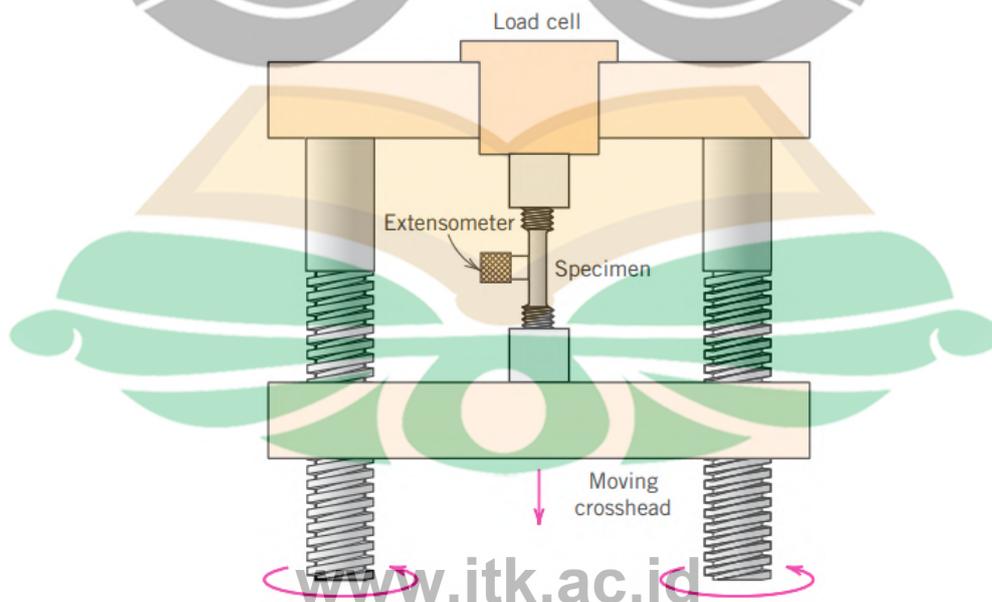
(ASTM E112, 2010)



Gambar 2.16 Contoh Butir Austenit dalam Pelat Baja dengan Ukuran ASTM G3 Pada Perbesaran 100X (ASTM E112, 2010)

2.14. Pengujian Tarik

Pengujian tarik merupakan salah satu uji tegangan-regangan mekanik yang paling umum digunakan. Pengujian ini dapat digunakan untuk memastikan beberapa sifat mekanik pada material yang penting dalam pendesain seperti kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan keuletan dari suatu material. Pada pengujian ini, benda uji mengalami deformasi dengan beban tarik yang meningkat secara bertahap yang diterapkan secara uniaksial di sepanjang sumbu panjang spesimen.



Gambar 2.17 Pengujian Tarik (Callister, 2014)

Output dari pengujian tarik dicatat (biasanya pada komputer) sebagai beban atau gaya versus perpanjangan. Karakteristik bebam-deformasi ini tergantung pada ukuran spesimen. Sebagai contoh, diperlukan dua kali beban untuk menghasilkan perpanjangan yang sama jika luas spesimen digandakan. Untuk meminimalkan faktor-faktor geometris tersebut, beban dan perpanjangan dinormalisasikan ke masing-masing parameter tegangan teknik dan regangan teknik. Tegangan didefinikan oleh persamaan sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots(2.1)$$

di mana F adalah beban sesaat yang diterapkan tegak lurus terhadap potongan melintang spesimen, dalam satuan newton (N) atau gaya pound (lbf), dan A₀ adalah luas penampang asli sebelum beban diterapkan (m² atau in.²). Satuan tegangan teknik megapascal, MPa (SI) (di mana 1 MPa = 106 N/m²), dan pound gaya per inci persegi, psi.

Regangan teknik didefinisikan oleh persamaan sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} \dots\dots\dots(2.2)$$

di mana l₀ adalah panjang awal sebelum beban diterapkan dan l_i adalah panjang sesaat. Kadang-kadang kuantitas l_i - l₀ dilambangkan sebagai Δl dan merupakan pertambahan panjang akibat deformasi. Regangan teknik tidak memiliki satuan, tetapi meter per meter atau inci per inci sering digunakan, nilai regangan jelas tidak tergantung pada sistem unit. Kadang-kadang regangan juga dinyatakan sebagai persentase, di mana nilai regangan dikalikan dengan 100 (Callister, 2014).

2.15. Penelitian Terdahulu

Berikut adalah rangkuman hasil penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang telah dilakukan.

Tabel 2.6 Penelitian Terdahulu

No	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
1	Ramadani, R., dkk, 2016	Metode: Pengelasan kombinasi SMAW-FCAW dengan variasi sudut bevel (0° , 40° , dan 60°) terhadap ketangguhan baja API 5L. Hasil: Didapatkan nilai kekuatan impak pada sudut bevel 60° pada bagian <i>weld</i> sebesar 2,01 J/mm ² dan HAZ sebesar 2,08 J/mm ² , pada sudut bevel 40° pada bagian <i>weld</i> sebesar 2,10 J/mm ² dan HAZ sebesar 2,13 J/mm ² , dan pada sudut bevel 0° pada bagian <i>weld</i> sebesar 1,72 J/mm ² dan HAZ sebesar 1,13 J/mm ² . Adapun nilai kekerasan pada sudut bevel 60° pada bagian <i>weld</i> sebesar 152 HVN dan HAZ sebesar 135,41 HVN, pada sudut bevel 40° pada bagian <i>weld</i> sebesar 148,03 HVN dan HAZ sebesar 117,83 HVN, dan pada sudut bevel 0° pada bagian <i>weld</i> sebesar 160,10 HVN dan HAZ sebesar 137,93 HVN.
2	Nugroho, Adi, dan Setiawan, Eko, 2018	Metode: Pengelasan SMAW dengan variasi arus (90, 100, 110, 120) terhadap kekuatan tarik baja ASTM A36. Hasil: Didapatkan rata-rata UTS pada spesimen dengan arus 90 A sebesar 369,69 MPa, pada spesimen dengan arus 100 A sebesar 397,59 MPa, pada spesimen dengan arus 110 A sebesar 467,78 MPa, dan pada spesimen dengan arus 120 A sebesar 426,89 MPa.

3 Pratama, M., dkk, Metode: Pengelasan FCAW dengan variasi
2019 kampuh (V dan U) dan posisi pengelasan (1G dan

2G) terhadap kekuatan tarik, tekuk dan mikrografi
baja JIS G3101 SS400.

Hasil: Didapatkan UTS rata-rata pada sambungan
pengelasan FCAW dengan kampuh V posisi 1G
sebesar 410 MPa, kampuh V posisi 2G sebesar
311,66 MPa, kampuh U posisi 1G sebesar 377
MPa, kampuh U posisi 2G sebesar 400,66 MPa,
dan *raw material* sebesar 391 MPa. Adapun
keuletan pada sambungan pengelasan FCAW
dengan kampuh V posisi 1G sebesar 41,67%,
kampuh V posisi 2G sebesar 42,66%, kampuh U
posisi 1G sebesar 39,33%, kampuh U posisi 2G
sebesar 37,67%, dan *raw material* sebesar 47%.
Adapun modulus elastisitas pada sambungan
pengelasan FCAW dengan kampuh V posisi 1G
sebesar 6,79 GPa, kampuh V posisi 2G sebesar
6,06 GPa, kampuh U posisi 1G sebesar 6,45 GPa,
kampuh U posisi 2G sebesar 6,83 GPa, dan *raw
material* sebesar 6,06 GPa. Adapun kekuatan
tekuk pada sambungan pengelasan FCAW
dengan kampuh V posisi 1G sebesar 569,41 MPa,
kampuh V posisi 2G sebesar 541,68 MPa,
kampuh U posisi 1G sebesar 558,88 MPa,
kampuh U posisi 2G sebesar 555,53 MPa, dan
raw material sebesar 515,28 MPa.