

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi manufaktur, konstruksi, dan industri alat berat pada era modern sangat erat kaitannya dengan pemanfaatan material logam. Salah satu jenis material yang paling banyak digunakan adalah baja, karena memiliki kombinasi antara kekuatan mekanik yang baik, kemampuan fabrikasi yang mudah, serta harga yang relatif ekonomis dibandingkan material teknik lainnya seperti paduan aluminium atau paduan titanium (Callister & Rethwisch, 2018). Di antara berbagai jenis baja, baja karbon rendah merupakan material yang paling dominan penggunaannya, khususnya pada sektor konstruksi bangunan, jembatan, pipa saluran fluida, rangka kendaraan, serta komponen mesin (Krauss, 2015). Baja karbon rendah umumnya mengandung karbon kurang dari 0,3% sehingga memiliki sifat ulet, mudah dibentuk, serta mudah dilas, walaupun kekuatan tariknya relatif lebih rendah dibandingkan baja karbon sedang atau tinggi.

Dalam penerapannya di lapangan, baja karbon rendah maupun baja karbon sedang tidak selalu digunakan dalam bentuk tunggal, melainkan seringkali harus disambung dengan material lain untuk membentuk struktur yang lebih besar dan kompleks. Penyambungan logam dapat dilakukan dengan berbagai cara, misalnya sambungan baut, paku keling (riveting), maupun sambungan las. Di antara metode tersebut, pengelasan menjadi pilihan utama karena mampu menghasilkan sambungan yang permanen, kuat, dan relatif lebih ekonomis. Pengelasan tidak hanya sekadar menyatukan dua material, tetapi juga memengaruhi sifat fisis, mekanik, dan struktur mikro dari daerah yang dilas (Sutanto, 2019).

Salah satu proses pengelasan yang paling banyak digunakan di berbagai industri adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) atau las busur manual dengan elektroda terbungkus. Proses ini dipilih karena peralatannya sederhana, fleksibel digunakan pada berbagai posisi pengelasan, serta mampu diaplikasikan pada berbagai ketebalan material. Selain itu, SMAW juga cocok digunakan baik untuk fabrikasi baru maupun untuk pekerjaan perbaikan (*repair welding*). Akan tetapi,

kualitas sambungan yang dihasilkan melalui proses SMAW sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain parameter pengelasan (arus, tegangan, kecepatan pengelasan), jenis elektroda, polaritas arus, keterampilan welder, hingga sifat dasar material yang disambung (Khurmi & Gupta, 2010).

Pada baja karbon rendah, proses pengelasan menimbulkan fenomena gradien temperatur yang cukup signifikan di daerah sekitar sambungan. Bagian logam yang langsung terkena busur listrik akan mencair dan membentuk logam las (*weld metal*), sedangkan daerah di sekitarnya akan mengalami pemanasan tanpa mencair, yang dikenal sebagai *Heat Affected Zone* (HAZ). Perbedaan tingkat pemanasan ini menimbulkan perubahan pada mikrostruktur baja, misalnya terbentuknya butir-butir ferrite, pearlite, bahkan kemungkinan terbentuknya struktur martensit atau bainit jika pendinginan berlangsung cepat. Perubahan mikrostruktur inilah yang pada gilirannya berpengaruh terhadap sifat mekanik baja, seperti kekerasan, keuletan, ketangguhan, maupun kekuatan tarik (Callister & Rethwisch, 2018).

Fenomena perubahan sifat mekanik dan mikrostruktur pada daerah sambungan ini menjadi sangat penting untuk diperhatikan. Sambungan las yang tidak memenuhi standar kualitas dapat berpotensi menimbulkan kegagalan struktur, yang dalam skala besar bisa berdampak pada kerugian material maupun korban jiwa. Beberapa kasus kerusakan pada konstruksi baja di lapangan kerap diakibatkan oleh kualitas las yang buruk, misalnya munculnya retak di HAZ, adanya cacat porositas, *incomplete fusion*, atau kelemahan pada logam las itu sendiri. Oleh karena itu, memahami bagaimana pengelasan SMAW memengaruhi sifat mekanik dan mikrostruktur baja karbon merupakan langkah penting untuk menjamin kualitas sambungan yang dihasilkan.

Penelitian mengenai sambungan las pada baja karbon rendah dan baja karbon sedang telah banyak dilakukan, namun masih terdapat variasi hasil yang dipengaruhi oleh parameter pengelasan yang berbeda. Misalnya, perbedaan arus atau kecepatan pengelasan dapat menghasilkan heat input yang berbeda, sehingga berimplikasi langsung pada ukuran butir mikrostruktur di daerah las dan HAZ. Heat input yang terlalu besar dapat menimbulkan pertumbuhan butir yang berlebihan sehingga menurunkan ketangguhan, sedangkan heat input yang terlalu rendah dapat

menimbulkan cacat pada sambungan akibat penetrasi yang kurang sempurna. Oleh karena itu, analisis sistematis mengenai sifat mekanik (misalnya kekuatan tarik, kekerasan, dan ketangguhan) serta mikrostruktur pada baja karbon hasil pengelasan SMAW menjadi sangat relevan untuk dilakukan.

Selain dari sisi akademis, penelitian ini juga memiliki manfaat praktis dalam industri. Baja karbon rendah merupakan material utama pada konstruksi ringan hingga menengah, seperti rangka baja, tangki penyimpanan, hingga komponen kendaraan. Kualitas sambungan las akan sangat menentukan umur pakai (*service life*) dari komponen tersebut. Dengan mengetahui perilaku sifat mekanik dan mikrostruktur sambungan hasil pengelasan SMAW, industri dapat menentukan parameter pengelasan yang sesuai untuk memperoleh kualitas sambungan optimal serta meminimalisasi potensi kegagalan.

Berdasarkan uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa proses pengelasan SMAW pada baja karbon berpotensi menimbulkan perubahan signifikan pada sifat mekanik dan mikrostrukturnya. Oleh karena itu, penelitian berjudul "*Analisa Pengaruh Masukan Panas Las SMAW Terhadap Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Sambungan Baja Karbon Rendah Dengan Baja Karbon Sedang*" perlu dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman lebih mendalam mengenai pengaruh proses pengelasan terhadap kualitas sambungan baja karbon sedang, sehingga hasilnya dapat menjadi acuan baik dalam aspek akademis maupun aplikatif di bidang teknik mesin, manufaktur, dan konstruksi.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perubahan parameter pengelasan berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur baja karbon. Misalnya, heat input yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pertumbuhan butir berlebihan dan menurunkan ketangguhan, sedangkan heat input rendah berpotensi menimbulkan cacat pada sambungan (Suryanto, 2017). Oleh karena itu, analisis mendalam mengenai sifat mekanik dan mikrostruktur hasil pengelasan SMAW pada baja karbon sedang menjadi penting untuk menjamin kualitas sambungan.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian "*Analisa Pengaruh Masukan Panas Las SMAW Terhadap Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Sambungan Baja Karbon*

Rendah dengan Baja Karbon Sedang” ini dirancang untuk menjawab pertanyaan kunci, Bagaimana variasi arus masukan pada proses las SMAW mempengaruhi evolusi mikrostruktur (WM dan HAZ) serta perubahan sifat mekanik (kuat tarik, kekerasan, dan ketangguhan) pada sambungan baja karbon rendah dengan baja karbon sedang. Hasil penelitian diharapkan memberikan pemahaman kuantitatif (mikrostruktur vs. parameter proses) serta rekomendasi parameter SMAW yang meminimalkan trade-off antara penetrasi/joinability dan sifat mekanik yang diinginkan. Dengan demikian penelitian ini tidak hanya mengisi celah akademis tetapi juga memberikan nilai aplikatif pada dunia industri yang masih mengandalkan SMAW dalam situasi-situasi kritis.

1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, dapat diidentifikasi beberapa permasalahan yang muncul, antara lain:

1. Proses pengelasan SMAW berpotensi menimbulkan perubahan sifat mekanik pada baja karbon rendah dan sedang akibat adanya perbedaan temperatur dan pendinginan pada daerah sambungan.
2. Perubahan mikrostruktur pada logam las, HAZ, dan logam induk dapat memengaruhi kualitas sambungan baja karbon rendah dan sedang.
3. Diperlukan analisis yang sistematis untuk mengetahui hubungan antara parameter pengelasan, sifat mekanik, dan mikrostruktur baja karbon rendah dan sedang yang dilas dengan SMAW.

1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian dengan judul Analisa Pengaruh Masukan Panas Las SMAW Terhadap Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Sambungan Baja Karbon Rendah dengan Baja Karbon Sedang ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang ingin dicapai, maka perlu ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Material Penelitian

- a. Material yang digunakan adalah baja karbon rendah dan sedang dengan kandungan karbon kurang dari 0,3% untuk baja karbon rendah dan 0,3 % - 0,6 % untuk baja karbon sedang.
- b. Jenis baja yang diteliti dibatasi hanya pada satu spesifikasi tertentu sesuai standar atau ASTM yang ditetapkan.

2. Proses Pengelasan

- a. Metode pengelasan yang digunakan adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dengan elektroda berlapis (*coated electrode*).
- b. Variasi parameter pengelasan (seperti arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan) ditentukan sesuai rancangan percobaan yang telah ditetapkan.
- c. Penelitian tidak membahas metode pengelasan lain seperti GMAW, GTAW, atau FCAW.

3. Jenis Sambungan Las

- a. Jenis sambungan yang digunakan hanya sambungan butt joint pada plat baja dengan ketebalan tertentu.
- b. Posisi pengelasan yang digunakan dibatasi (misalnya posisi datar/1G), tidak membahas variasi posisi lainnya.

4. Pengujian Mekanik

- a. Pengujian sifat mekanik difokuskan pada uji tertentu, misalnya:
 - Uji tarik (*tensile test*) untuk mengetahui kekuatan tarik sambungan .
 - Uji kekerasan (*hardness test*) pada daerah logam las, HAZ, dan logam induk.
 - Jika dilakukan, uji impak (*impact test*) terbatas pada pengukuran ketangguhan sambungan.
- b. Penelitian tidak mencakup pengujian sifat fisis lain seperti keausan, korosi, atau fatik.

5. Analisa Mikrostruktur

- a. Pengamatan mikrostruktur difokuskan pada tiga daerah utama logam las (weld metal), daerah terpengaruh panas (HAZ), dan logam induk (base metal).

- b. Pengamatan dilakukan menggunakan metode metalografi optik (mikroskop optik), tidak mencakup analisis lebih lanjut dengan SEM, TEM, atau XRD.

6. Lingkup Penelitian

- a. Penelitian hanya menganalisis hubungan antara parameter pengelasan, sifat mekanik, dan perubahan mikrostruktur.
- b. Faktor eksternal seperti lingkungan pengelasan (kelembaban, oksidasi, dll.) serta biaya ekonomi tidak dibahas.

1.4. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang serta batasan masalah yang telah diuraikan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh proses pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW) terhadap sifat mekanik sambungan baja karbon rendah dengan baja karbon sedang khususnya pada daerah logam las, HAZ, dan logam induk.
2. Bagaimana perubahan mikrostruktur yang terjadi pada daerah logam las, HAZ, dan logam induk setelah melalui proses pengelasan SMAW.
3. Apakah terdapat hubungan yang signifikan antara perubahan mikrostruktur dengan sifat mekanik (kekuatan tarik, kekerasan, dan/atau ketangguhan) pada sambungan baja karbon rendah dengan baja karbon sedang hasil pengelasan SMAW
4. Sejauh mana kualitas sambungan baja karbon rendah yang dihasilkan melalui proses SMAW dapat memenuhi kriteria kelayakan ditinjau dari sifat mekanik dan mikrostrukturnya

1.5. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian Analisa Pengaruh Masukan Panas Las SMAW Terhadap Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Sambungan Baja karbon rendah dengan baja karbon sedang ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis sifat mekanik sambungan las baja karbon rendah dengan baja karbon sedang hasil proses las Shielded Metal Arc Welding (SMAW) melalui pengujian mekanik, seperti uji kekuatan tarik dan uji kekerasan.
2. Mengamati dan menganalisis mikrostruktur pada daerah logam las, HAZ, dan logam induk untuk mengetahui perubahan struktur akibat proses pengelasan SMAW.
3. Mengkaji hubungan antara perubahan mikrostruktur dengan sifat mekanik sambungan baja karbon rendah dengan baja karbon sedang yang dilas menggunakan proses SMAW.

1.6. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian Analisa Pengaruh Masukan Panas Las SMAW Terhadap Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Sambungan Baja Karbon Rendah dengan Baja Karbon Sedang ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara akademis maupun praktis, antara lain :

1. Manfaat Akademis
 - a. Menambah wawasan dan pengetahuan mengenai pengaruh pengelasan SMAW terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur sambungan baja karbon rendah dengan baja karbon sedang.
 - b. Menjadi referensi atau bahan acuan untuk penelitian lebih lanjut yang berkaitan dengan pengelasan baja karbon rendah maupun material logam lainnya.
 - c. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik material dan teknik pengelasan.
2. Manfaat Praktis
 - a. Memberikan informasi bagi praktisi di bidang manufaktur, konstruksi, maupun perbengkelan mengenai kualitas sambungan baja karbon rendah dengan baja karbon sedang hasil pengelasan SMAW.
 - b. Menjadi masukan dalam menentukan parameter pengelasan yang tepat untuk menghasilkan sambungan yang memenuhi standar kekuatan dan ketahanan.

- c. Memberikan gambaran praktis bagi industri untuk meningkatkan mutu sambungan las serta meminimalkan risiko kegagalan pada struktur baja karbon sedang dan tinggi.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengelasan

Pengelasan ialah satu teknik penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan logam pengisi dan menghasilkan logam kontinyu. Pengelasan dilakukan dengan menggunakan energi panas untuk mencairkan logam. Energi panas yang digunakan untuk mencairkan logam tersebut dapat berasal dari energi listrik, pembakaran gas, sinar elektron, gesekan, gelombang *ultrasonic* ataupun yang lain (Sugiarto,2012)

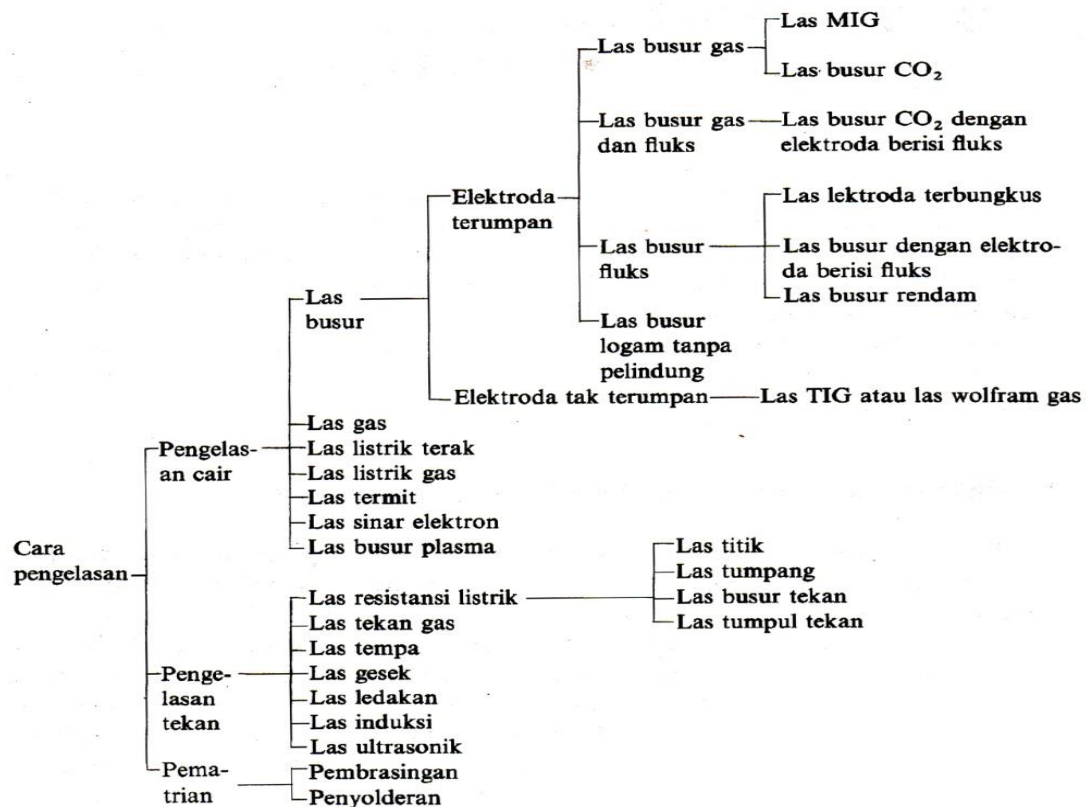
Prosedur pengelasan kelihatannya sangat sederhana, tetapi sebenarnya didalamnya banyak masalah-masalah yang harus diatasi dimana pemecahannya memerlukan bermacam-macam pengetahuan. Karena itu didalam pengelasan, pengetahuan harus turut serta mendampingi praktek, secara lebih terperinci dapat dikatakan bahwa perancangan konstruksi bangunan dan mesin dengan sambungan las, harus direncanakan pula tentang cara- cara pengelasan. Cara ini pemeriksaan, bahan las, dan jenis las yang akan digunakan, berdasarkan fungsi dari bagian-bagian bangunan atau mesin yang dirancang.

2.1.1. Klasifikasi Cara-cara Pengelasan dan Pemotongan

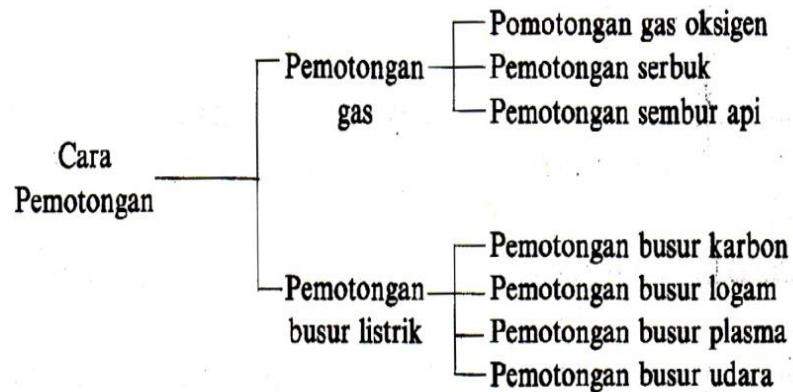
Sampai saat ini banyak sekali cara-cara pengklasifikasian yang digunakan dalam bidang las, ini disebabkan adanya kesepakatan dalam hal tersebut. Secara konvensional cara-cara kerja dan klasifikasi berdasarkan energi yang digunakan. Klasifikasi pertama membagi las dalam kelompok las cair, las tekan, las patri dan lain-lainnya. Sedangkan klasifikasi yang kedua membedakan adanya kelompok-kelompok seperti las listrik, las kimia, las mekanik dan seterusnya. Bila diadakan klasifikasi lebih rinci lagi, maka kedua klasifikasi tersebut diatas akan terburai dan terbentuk kelompok-kelompok yang banyak sekali. Diantara kedua klasifikasi tersebut diatas, kelihatannya klasifikasi berdasarkan cara kerja lebih banyak digunakan, karena itu pengklasifikasian yang diterangkan di dalam bab ini juga didasarkan pada cara kerja.

Berdasarkan klasifikasi ini pengelasan dapat dibagi dalam tiga kelas utama yaitu :

1. Pengelasan cair adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan sampai mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas yang terbakar.
2. Pengelasan tekan adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan kemudian ditekan hingga menjadi satu.
3. Pematiran adalah cara pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah. Dalam cara ini logam induk tidak turut cair.



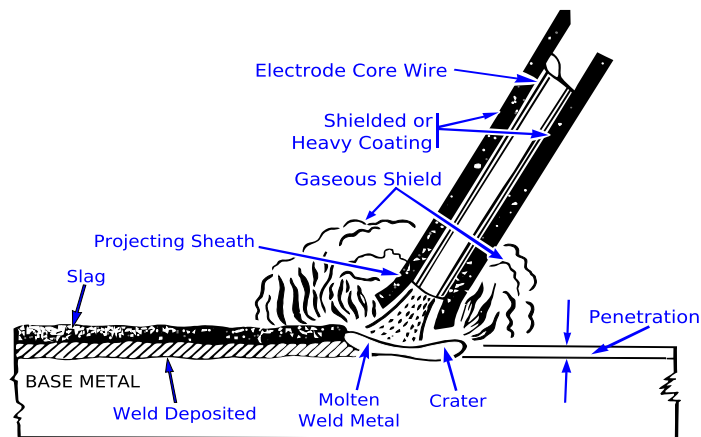
Gambar 2.1 Klasifikasi Cara Pengelasan



Gambar 2.2 Klasifikasi Cara Pemotongan

2.1.2. *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW)

Proses pengelasan (*welding*) merupakan salah satu proses penyambungan material (*material joining*). Adapun untuk definisi dari proses pengelasan yang mengacu pada AWS (*American Welding Society*), proses pengelasan adalah proses penyambungan antara metal atau *non-metal* yang menghasilkan satu bagian yang menyatu, dengan memanaskan material yang akan disambung sampai pada suhu pengelasan tertentu, dengan atau tanpa penekanan, dan dengan atau tanpa logam pengisi. Meskipun dalam metode proses pengelasan tidak hanya berupa proses penyambungan, tetapi juga bisa berupa proses pemotongan dan *brazing*. Proses pengelasan dibedakan menjadi beberapa jenis, dan SMAW merupakan salah satu proses pengelasan yang umum digunakan, utamanya pada pengelasan singkat dalam produksi, pemeliharaan dan perbaikan, dan untuk bidang konstruksi. SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) adalah proses pengelasan dengan mencairkan material dasar yang menggunakan panas dari listrik antara penutup *metal* (elektroda), sebagaimana gambar dibawah.



Gambar. 2.3 Gambar Pencairan Elektroda Stik

2.1.3. Proses Terjadinya Las Listrik SMAW

Proses pengelasan SMAW yang umumnya disebut las listrik adalah proses pengelasan yang dapat menggunakan panas untuk mencairkan material dasar dan elektroda. Panas tersebut ditimbulkan oleh lonjakan ion listrik yang terjadi antara katoda dan anoda (ujung elektroda dan permukaan plat yang akan di las). Panas yang timbul dari lonjakan ion listrik ini besarnya dapat mencapai 4000°C . Sumber tegangan yang digunakan ada dua macam yaitu arus las listrik AC (Arus bolak-balik) dan arus listrik DC (Arus searah). Proses terjadinya pengelasan karena adanya kontak antara ujung elektroda dan material dasar sehingga terjadi hubungan pendek dan saat itu terjadi hubungan pendek tersebut juru las (welder) harus menarik elektroda sehingga terbentuk busur listrik yaitu lonjakan ion yang menimbulkan panas. Panas akan mencairkan elektroda dan material dasar sehingga cairan elektroda dan cairan material dasar akan menyatu membentuk logam lasan (weld metal). Untuk menghasilkan busur las yang baik dan konstan juru las harus menjaga jarak ujung elektroda dan permukaan material dasar tetap sama. Adapun jarak yang paling baik adalah sama dengan diameter elektroda yang dipakai. Adapun besarnya panas atau temperature (H) yang dapat melelehkan sebagian bahan merupakan perkalian antara tegangan listrik (E) dengan kuat arus (I) dan waktu (t) yang dinyatakan dalam satuan panas joule seperti rumus di bawah ini :

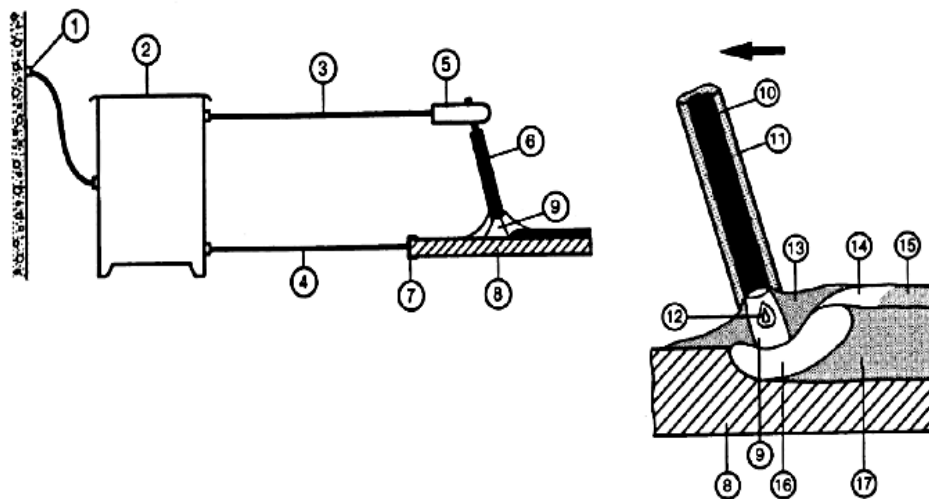
$$H = E \times I \times t \quad (2.1)$$

Dimana :

- H : Panas (Joule)
- E : Tegangan Listrik (Volt)
- I : Kuat Arus (Ampere)
- t : Waktu (Detik)

2.1.4. Peralatan Las SMAW

Didalam proses pengelasan diperlukan arus listrik khusus, dimana arus listriknya dapat diatur dan tegangan bebas muatannya terbatas, serta tinggi tegangan maksimal harus sampai dengan batas yang diijinkan skema peralatan las listrik dapat dilihat sebagaimana gambar dibawah



Gambar 2.4 Las Listrik

Keterangan :

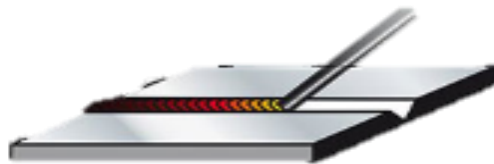
1. Sumber Arus listrik.
2. Sumber Arus Las (Mesin Las).
3. Kabel Arus Las (Elektroda).
4. Kabel Arus Las (kabel massa).
5. Pemegang Elektroda.
6. Elektroda.
7. Klem massa pada Benda Kerja.

8. Benda Kerja.
9. Busur Las.
10. Inti Elektroda.
11. Salutan/selubung Elektroda.
12. Tetesan Cairan Elektroda.
13. Gas Pelindung dari Salutan Elektroda.
14. Terak Cair.
15. Terak Padat.
16. Kawah Las / cairan las.
17. Hasil Lasan.

2.1.5. Posisi Pada Pengelasan

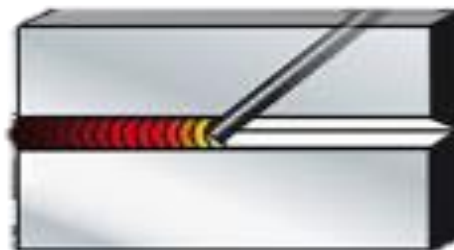
Posisi pada pengelasan atau sikap pengelasan adalah pengaturan posisi dan gerakan arah dari pada elektroda sewaktu mengelas. Adapun posisi terdiri dari 4 macam yaitu :

- a. Pengelasan datar (*Down Hand*) 1G



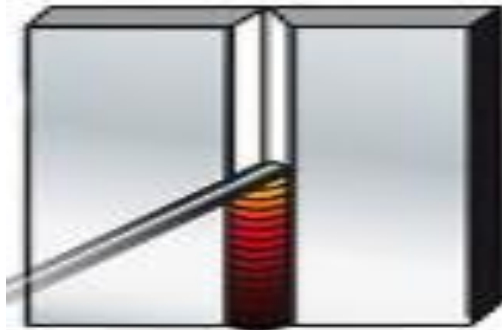
Gambar 2.5 Pengelasan 1G

- b. Posisi Horizontal 2G



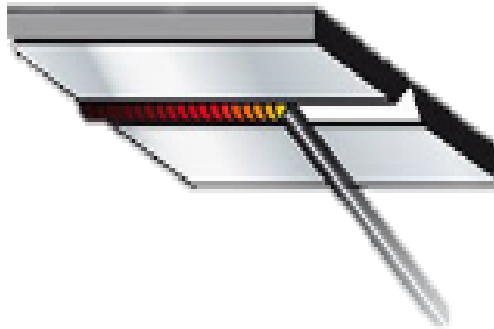
Gambar 2.6 Posisi 2G

c. Posisi Vertikal 3G



Gambar. 2.7 Posisi 3G

d. Posisi Diatas Kepala (*Over Head*) 4G



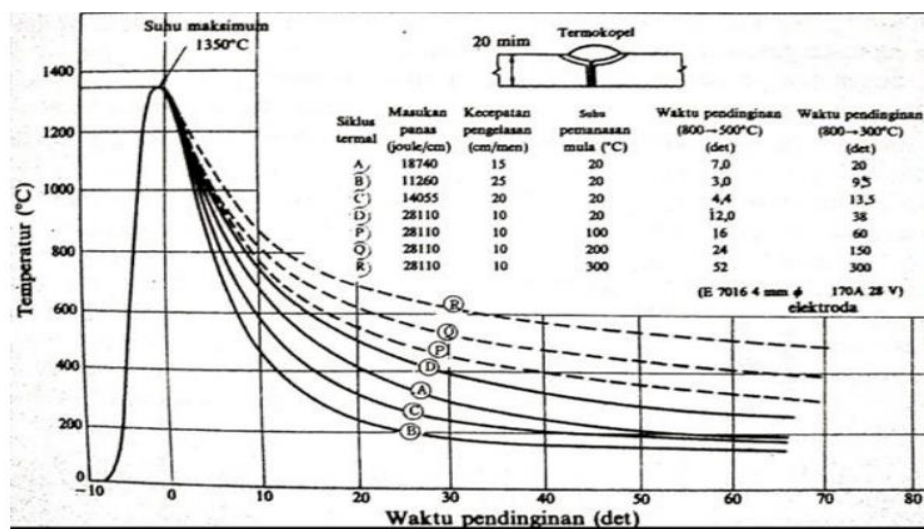
Gambar 2.8 Posisi 4G

2.1.6. Daerah Pengelasan

Daerah lasan terdiri dari 3 bagian yaitu logam lasan, daerah pengaruh panas yang dalam bahasa inggrisnya adalah “*Heat Affected Zone*” dan disingkat menjadi daerah HAZ, dan logam induk yang tak terpengaruhi. Logam las adalah bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. 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 dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan struktur dan sifat. Disamping ketiga pembagian utama tersebut masih terdapat satu daerah khusus yang membatasi antara logam las dan daerah pengaruh panas, yang disebut batas las. Dalam membahas siklus termal daerah lasan hal-hal yang perlu dibahas meliputi proses

pembekuan, reaksi yang terjadi dan struktur mikro yang terbentuk yang masing-masing yang dibahas tersendiri.

Siklus termal las adalah proses pemanasan dan pendinginan di daerah lasan. Karena itu banyak sekali usaha-usaha pendekatan untuk menentukan lamanya waktu pendinginan tersebut. Pendekatan ini biasanya dinyatakan dalam bentuk rumus empiris. Struktur mikro dan sifat mekanik dari daerah HAZ sebagian besar tergantung pada lamanya pendinginan dari temperatur 800°C sampai 500°C. Sedangkan retak dingin, di mana hidrogen memegang peranan penting, terjadinya sangat tergantung oleh lamanya pendinginan dari temperatur 800°C sampai 300°C atau 100°C.



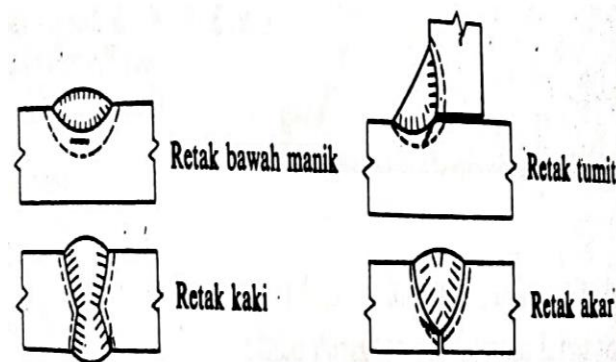
Gambar 2.9 Siklus Termal Dalam Las Busur Tangan

2.1.7. Retak Dalam Pengelasan

Retak las mengacu pada cekungan yang tertinggal pada ujung las dimana kolom las dibiarkan tidak terisi. Sebagian besar bentuk retak las diakibatkan oleh regangan penyusutan yang terjadi saat logam las mendingin. Jika kontraksi dibatasi, regangan akan menimbulkan tegangan sisa yang menyebabkan keretakan. Retakan las berpotensi menimbulkan bencana karena dapat menimbulkan intensitas tegangan tinggi yang dapat mengakibatkan kegagalan tiba-tiba yang tidak terduga

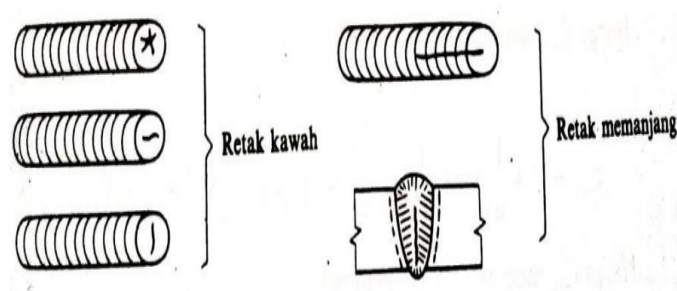
di bawah beban desain, atau dalam kasus pembebanan siklik, kegagalan setelah siklus beban lebih sedikit dari yang diperkirakan.

Retak las dapat dibagi dalam dua kelompok yaitu kelompok retak dingin dan kelompok retak panas. Retak dingin adalah retak yang terjadi di daerah las pada suhu di bawah suhu transformasi martensit (M_s) yang tingginya kira-kira 300°C , sedangkan retak panas adalah retak yang terjadi pada suhu di atas 550°C . Retak dingin dapat terjadi tidak hanya pada daerah HAZ, tetapi juga pada logam las. Retak dingin daerah pengaruh panas yang sering terjadi dapat dilihat dalam gambar 2.8. Retak dingin utama pada daerah ini adalah retak bawah manik las, retak akar dan retak kaki. Sedangkan retak dingin pada logam las biasanya adalah retak memanjang dan retak melintang.



Gambar 2.10 Retak Dingin

Retak panas dibagi menjadi dalam dua kelas yaitu retak karena pembebanan tegangan pada daerah pengaruh panas yang terjadi pada suhu antara 550°C - 700°C dan retak yang terjadi pada suhu di atas 900°C yang terjadi pada peristiwa pembekuan logam las. Retak panas yang sering terjadi pada logam las karena pembekuan biasanya berbentuk retak kawah, dan retak memanjang. Pada pengelasan baja tahan karat austenit, biasanya terjadi retak panas di daerah HAZ dan logam las. Retak panas karena pembebasan tegangan pada umumnya terjadi pada daerah kaki di dalam daerah pengaruh panas.



Gambar 2.11 Retak Panas

2.1.8. Jenis-jenis Retak Las

Jenis-jenis retak las yang umum diketahui sebagai berikut :

1. Retak Dingin

Retak dingin di daerah pengaruh panas atau HAZ biasanya terjadi antara beberapa menit sampai 48 jam sesudah pengelasan, karena itu retak ini disebut juga retak lambat. Penyebab retak las disebabkan oleh 3 hal berikut:

a. Struktur daerah pengaruh panas (HAZ).

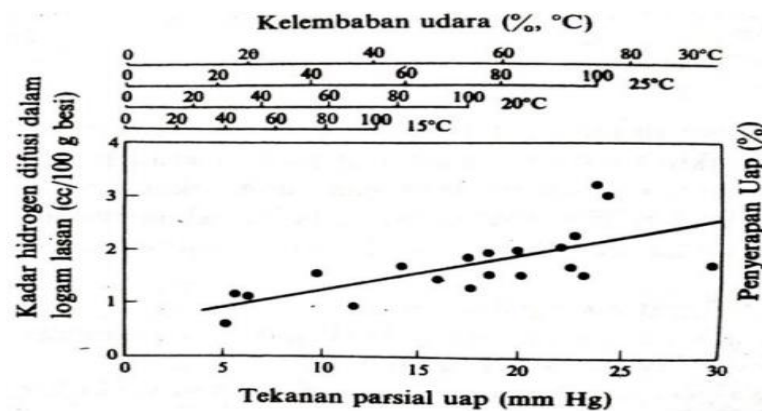
Struktur dari daerah pengaruh panas ditentukan oleh komposisi kimia dari logam induk dan kecepatan pendinginan dari daerah las. Retak dingin di daerah HAZ dalam pengelasan baja biasanya terjadi pada daerah martensit. Pengaruh dari unsur paduan terhadap kepekaan retak dingin dari daerah HAZ biasanya dapat dilihat dari harga ekuivalen karbon dari unsur-unsur yang dikandung (Cek) dan harga parameter retak (PCM). Dalam hal ini jika nilai dari Cek dan PCM turun, maka kepekaan terhadap retak dingin dari daerah pengaruh panas juga turun. Kekuatan baja yang turun karena turunnya Cek dan PCM dapat diperbaiki dengan mengatur jenis dan banyaknya unsur yang dicampurkan pada waktu pembuatan baja. Selain itu dapat juga diperbaiki dengan memilih kondisi pengerolan, misal dilakukan pada suhu rendah atau memilih dan mengatur proses perlakuan panas yang digunakan.

b. Hidrogen difusi dalam daerah las.

Retak las juga dipengaruhi oleh adanya difusi hidrogen dari logam las ke dalam daerah pengaruh panas. Pada waktu logam las mencair, logam ini menyerap hidrogen dengan jumlah besar yang dilepaskan dengan cara difusi pada suhu rendah

karena pada suhu tersebut kelarutan hidrogen menurun. Hidrogen yang didifusikan ini menyebabkan terjadinya retak di daerah pengaruh panas.

Sumber dari hidrogen yang diserap adalah air dan zat organik yang terkandung di dalam fluks atau kelembaban udara atmosfer. Di samping itu minyak, zat organik dan air yang melekat pada rongga-rongga dan permukaan pelat atau kawat las juga merupakan sumber hidrogen. Hubungan antara tekanan parsial uap air dalam atmosfer dan hidrogen difusi dalam logam las serta hubungan antara lamanya elektroda di atmosfer dan kadar uap dalam fluks. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa bila elektroda terlalu lama diletakkan di luar, fluksnya akan mengisap uap air dan akibatnya logam yang dilas dengan elektroda ini kepekaannya terhadap retak las akan naik.



Gambar 2.12 Pengaruh Udara Terhadap Kadar Hidrogen Difusi Dalam

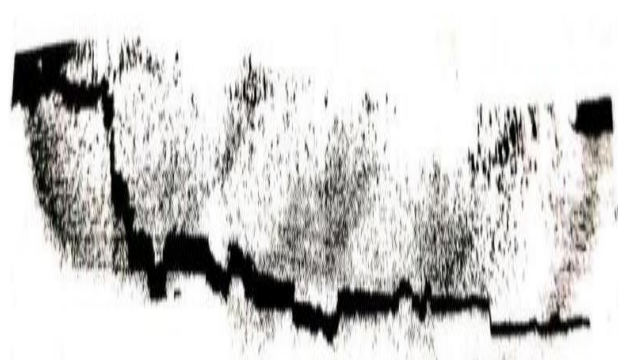
Usaha untuk menghindari retak las dapat dilakukan dengan menghilangkan sumber hidrogen dan melepaskan hidrogen yang telah diserap. Untuk hal ini dilakukan penurunan kecepatan pendinginan dengan memberikan pemanasan mula pada temperatur antara 50 sampai 200°C atau memberikan pemanasan kemudian pada temperatur antara 200°C sampai 300°C. Dalam usaha mengurangi hidrogen difusi ini dapat juga digunakan fluks yang mengandung banyak karbonat. Dengan fluks ini akan dihasilkan gas karbon dioksida yang dapat menurunkan tekanan parsial hidrogen di dalam busur listrik yang dengan sendirinya akan mengurangi hidrogen difusi.

c. Tegangan.

Tegangan yang dapat mempengaruhi terjadinya retak las adalah tegangan sisa dan tegangan termal. Tegangan sisa banyak sekali tergantung pada rancangan las, proses pengelasan yang digunakan dan pengawasannya. Kenaikan dari tebal plat akan mempertinggi besarnya tegangan sisa dan akan menyebabkan terjadinya retak las. Untuk menghindari retak las dalam las sudut pada pengelasan baja dengan kepekaan retak las yang tinggi dapat digunakan elektroda terbungkus yang mempunyai logam las dengan kekuatan rendah dan keuletan tinggi.

2. Retak Lamel

Pada konstruksi kerangka yang besar seperti bangunan laut, biasanya digunakan plat tebal, sehingga pada daerah las terjadi tegangan yang besar pula. Butiran dengan bentuk kubus seperti MnS atau Mn Si O₃ biasanya lebih peka terhadap retak lamel dari pada butiran berbentuk bulat. Karena hal tersebut, maka pada baja tahan retak biasanya kadar belerang diusahakan serendah-rendahnya. Penambahan unsur Ce atau Ca pada baja dapat membentuk butiran bukan logam yang berbentuk bulat, sehingga pengurangan kepekaan baja terhadap retak lamel di samping pengurangan kadar S, dapat juga dilakukan dengan penambahan Ce dan Ca. Sifatnya yang khusus, retak lamel juga mempunyai sifat seperti retak las pada umumnya. Karena itu retak lamel di samping sangat dipengaruhi oleh bentuk butir bukan logam, juga dipengaruhi oleh harga Cek atau PCM kadar hidrogen difusi dan tegangan sisa.



Gambar 2.13 Retak Lamel

3. Retak Panas

Retak panas biasanya terjadi pada waktu logam las mendingin setelah pembekuan selesai. Retak ini terjadi karena adanya tegangan yang timbul yang disebabkan oleh penyusutan dan sifat baja yang ketangguhannya turun pada suhu sedikit dibawah suhu pembekuan. Dengan demikian maka retak ini akan terjadi pada batas butir, karena pada tempat tersebut biasanya terbentuk senyawa dengan titik cair rendah. Karena itu unsur seperti Si, Ni, S, dan P akan mempertinggi kepekaan baja terhadap retak jenis ini. Usaha menghindari retak panas adalah menurunkan kadar Si dan Ni serendah mungkin dan menghilangkan kandungan S dan P sejauh mungkin. Dalam hal baja tahan karat austenit menghindarinya adalah mengusahakan agar 5 sampai 10% dari ferit terdapat dalam struktur austenit.

Cara menghindari retak las adalah mengetahui sebab utama dari terjadinya retak las seperti telah diterangkan diatas adalah terbentuknya struktur martensit pada daerah HAZ. Terjadinya hidrogen difusi pada logam las dan besarnya tegangan yang bekerja pada daerah las. Karena itu dalam menghindari terjadinya retak las pada daerah pengaruh panas, maka faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya hal-hal di atas harus diusahakan serendah-rendahnya. Usaha penanggulangan retak las dapat disimpulkan sebagai berikut :

- a. Sejauh mungkin menggunakan baja dengan harga Cek dan PCM rendah, sehingga terbentuknya struktur martensit pada daerah HAZ dapat dihindari.
- b. Sedapat mungkin menggunakan elektroda dengan fluks yang mempunyai kadar hidrogen rendah.
- c. Menghilangkan kristal air yang terkandung dalam fluks basa yang sering digunakan dalam las busur rendam.
- d. Elektroda yang akan digunakan harus dipanggang lebih dahulu dan penyimpanannya harus sedemikian rupa sehingga elektroda yang sudah dipanggang tersebut tidak menyerap uap air.
- e. Sebelum mengelas, pada daerah sekitar kampuh harus dibersihkan dari air, karat, debu, minyak dan zat organik yang dapat menjadi sumber hidrogen.
- f. Penggunaan CO₂, sebagai gas pelindung akan sangat mengurangi terjadinya difusi hidrogen.

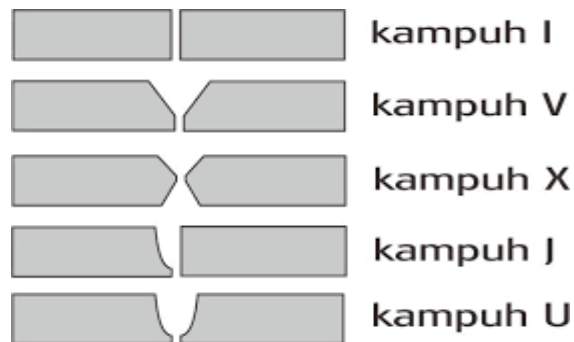
- g. Untuk melepaskan kadar hidrogen difusi dapat digunakan las dengan masukan panas tinggi, atau dilakukan pemanasan mula dan penahanan suhu lapisan las yang dapat memperlambat pendinginan.
- h. Penurunan kadar hidrogen difusi dapat juga dilakukan dengan perlakuan panas kemudian.
- i. Menghindari pengelasan pada waktu hujan atau di tempat di mana daerah las dapat kebasahan.
- j. Tegangan yang terjadi pada daerah las harus diusahakan serendah mungkin dengan pemilihan dan pengawasan rancangan dan cara pengelasannya yang tepat.

2.1.9. Jenis Sambungan Las

Jenis Sambungan Pengelasan adalah tipe sambungan material atau plat yang digunakan untuk proses pengelasan. Pada dasarnya dalam memilih bentuk sambungan pengelasan harus menuju kepada penurunan masukan panas dan penurunan logam las sampai kepada harga terendah dan tidak menurunkan mutu sambungan. Untuk sambungan las pada saat pembakarannya dapat mengisi pada seluruh tebalnya pelat. Sebelum pengelasan dilaksanakan sambungan las harus melalui proses pengerjaan awal. Karat, minyak, cat harus dihilangkan. Untuk memperoleh pembakaran yang baik, pemilihan ukuran elektroda yang sesuai sangat diperlukan. Jenis sambungan las mempunyai beberapa macam yang menjadi jenis sambungan utama yaitu *Butt Joint*, *Fillet (T) Joint*, *Corner Joint*, *Lap Joint* dan *Edge Joint*.

a. *Butt Joint*

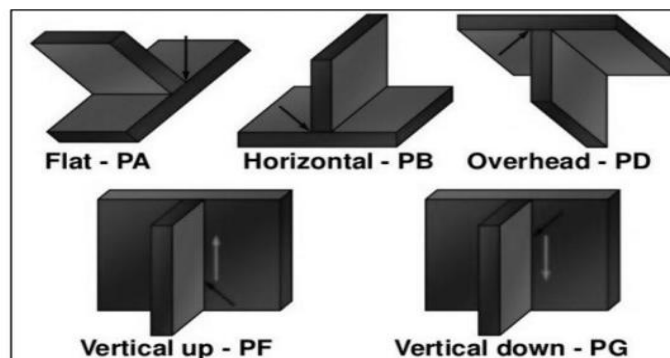
Sambungan butt joint adalah jenis sambungan tumpul, dalam aplikasinya jenis sambungan ini terdapat berbagai macam jenis kampuh atau groove yaitu V groove (kampuh V), single bevel, J groove, U Groove, Square Groove untuk melihat macam macam kampuh las lebih detail silahkan lihat gambar berikut ini.



Gambar 2.14 Jenis-Jenis Kampuh

b. Fillet Joint

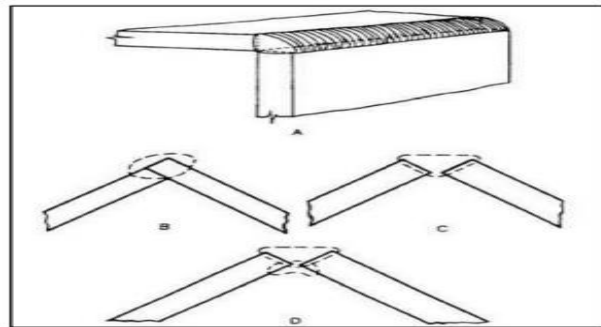
Tee Joint adalah jenis sambungan yang berbentuk seperti huruf T, tipe sambungan ini banyak diaplikasikan untuk pembutan kontruksi atap, konveyor dan jenis konstruksi lainnya. Untuk tipe groove juga terkadang digunakan untuk sambungan fillet adalah double bevel, namun hal tersebut sangat jarang kecuali pelat atau materialnya sangat tebal. Berikut ini gambar sambungan T pada pengelasan.



Gambar 2.15 Sambungan Fillet Join

c. Corner Joint

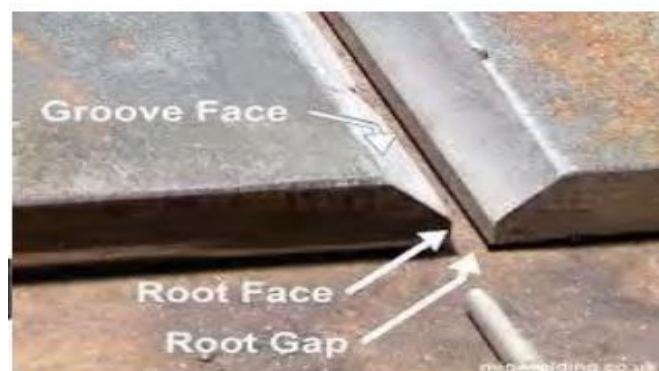
Corner Joint mempunyai desain sambungan yang hampir sama dengan T Joint, namun yang membedakannya adalah letak dari materialnya. Pada sambungan ini materialnya yang disambung adalah bagian ujung dengan ujung. Ada dua jenis corner joint, yaitu close dan open. Untuk detailnya silahkan lihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.16 Sambungan Corner Joint

2. *Build Up*

Build Up pada sambungan pengelasan adalah pemberian penambahan lapisan lasan pada area kampuh pengelasan atau bevel yang dilakukan untuk memenuhi kriteria dari root gap requirement pada WPS (*Welding Procedure Specification*). Dalam kondisi nyatanya root gap pada sambungan pelat pada pengelasan yaitu ± 3 mm sehingga selama proses pengelasannya tersebut root atau akar las akan muncul dan memenuhi dari prosedur yang diterapkan, tetapi sering kali jarak root gap dari sambungan tersebut tidak memenuhi kriteria 3 mm yang disyaratkan, kebanyakan kondisinya jarak root gap terlalu lebar sehingga demi memenuhi jarak gap yang kurang sesuai tersebut dilakukan tindakan build up tersebut. Berikut adalah gambar yang menunjukkan root gap yang sesuai dan dengan penambahan build up. Lihat gambar 2.4 dan gambar 2.5 dibawah :



Gambar 2.17 Penambahan Bahan pada Sambungan

2.1.10. Jenis Elektroda

Pada las busur listrik manual (SMAW), elektroda yang digunakan adalah elektroda terbungkus, dimana terdiri dari batang kawat (inti) dan salutannya (*flux*). Kawat elektroda dan salutannya akan mencair didalam busur selama proses pengelasan dan membentuk rigi-rigi las (kampuh las). Dimana salutan (*fluks*) dari elektroda tersebut berfungsi sebagai gas pelindung, yang mana dapat melindungi cairan las dari pengaruh udara luar. Adapun salutan (*fluks*) ini terdiri dari campuran bahan mineral dan zat kimia inilah yang menentukan karakter pengoperasian dan komposisi pada akhir pengelasan. Jenis arus las yang dipakai adalah arus AC, DC+ atau DC-, dan akan berubah sesuai dengan jenis elektroda yang digunakan serta diharapkan dapat memilih jenis elektroda secara berhati-hati sebelum digunakan untuk mengelas. Karena bila arus las yang digunakan sesuai dengan ukuran dan jenis elektrodanya, maka akan dapat menghasilkan lasan yang baik dan ideal. Bila arus las nya tidak sesuai, maka akan menyebabkan hasil lasan menjadi tidak memuaskan atau dapat dikatakan performansi dari elektroda menjadi buruk. Elektroda perlu dan harus disimpan ditempat yang kering dengan temperatur ruangan kira-kira 40° C, agar tidak lembab karena adanya pengaruh kelembaban udara. Dan secepat mungkin ditutup kembali (dirapatkan) bila bungkus elektroda tersebut terbuka, dan juga seharusnya disimpan kembali didalam kabinet yang mempunyai sirkulasi udara yang temperaturnya dapat dikontrol antara 40° C sampai dengan 100° C dan juga tergantung dari jenis elektrodanya. Contoh, elektroda *low hydrogen* dengan temperatur 100°C dan elektroda rutil dengan temperatur 40° C. Jadi dapat dikatakan bahwa penyimpanan, penanganan, dan perawatan elektroda tersebut adalah sangat penting artinya karena dapat menjaga agar salutan dari elektroda tetap dalam kondisi yang baik. Karena elektroda dapat menyerap embun (kelembaban udara) bila penyimpanannya tidak benar, dan dengan kelembaban ini akan berdampak hilangnya karakter elektroda serta kualitas endapan logam lasan. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya porositas pada hasil lasan dan menambah lemahnya struktur lasan yang mengakibatkan retak pada saat pemakaian. Masalah-masalah yang muncul akibat salutan elektroda yang terlalu lembab yaitu :

1. Sulit dalam membuang terak.
2. Salutan menjadi merah terbakar terutama jenis cellulose.
3. Terjadinya porosity pada logam hasil lasan.
4. Nyala busur menjadi tidak stabil.
5. Percikan busur las berlebihan.
6. Retak pada logam las atau pada daerah pengaruh panas (HAZ).

2.1.11. Elektroda Berselaput

Elektroda berselaput yang dipakai pada las busur listrik mempunyai perbedaan komposisi selaput maupun kawat inti. Pelapisan fluksi pada kawat inti dapat dengan cara destrusi, semprot atau celup. Ukuran standar diameter kawat inti dari 1,5 mm sampai 7 mm dengan panjang antara 350 sampai 450 mm. Jenis-jenis selaput fluksi pada elektroda misalnya selulosa, kalsium karbonat (CaCO_3), titanium dioksida (rutil), kaolin, kalium oksida mangan, oksida besi, serbuk besi, besi silikon, besi mangan dan sebagainya dengan persentase yang berbeda-beda, untuk tiap jenis elektroda.

Tebal selaput elektroda berkisar antara 70% sampai 50% dari diameter elektroda tergantung dari jenis selaput. Pada waktu pengelasan, selaput elektroda ini akan turut mencair dan menghasilkan gas CO_2 yang melindungi cairan las, busur listrik dan sebagian benda kerja terhadap udara luar. Udara luar yang mengandung O_2 dan N akan dapat mempengaruhi sifat mekanik dari logam las. Cairan selaput yang disebut terak akan terapung dan membeku melapisi permukaan las yang masih panas.

2.1.12. Klasifikasi Elektroda

Elektroda baja lunak dan baja paduan rendah untuk las busur listrik menurut klasifikasi AWS (*American Welding Society*) dinyatakan dengan tanda E XXXX yang artinya sebagai berikut :

1. E : menyatakan elektroda busur listrik.
2. XX (dua angka) : sesudah E menyatakan kekuatan tarik deposit las dalam ribuan lb/in^2 lihat tabel

3. X (angka ketiga) : menyatakan posisi pangelasan.
4. Angka 1 untuk pengelasan segala posisi. angka 2 untuk pengelasan posisi datar di bawah tangan
5. X (angka keempat) menyatakan jenis selaput dan jenis arus yang cocok dipakai untuk pengelasan lihat table.

Contoh : E 6013 Artinya:

Kekuatan tarik minimum dan deposit las adalah 60.000 lb/in² atau 42 kg/mm², Dapat dipakai untuk pengelasan segala posisi Jenis selaput elektroda Rutil-Kalium dan pengelasan dengan arus AC atau DC + atau DC –.

2.2. Baja

Baja merupakan logam paduan antara besi (Fe) dan karbon (C) dengan kadar karbon maksimum 1,7%. Paduan antara besi dan karbon dengan kadar karbon 1,7% sampai 3,5% dinamakan besi cor. Besi cor adalah baja yang mempunyai kadar karbon rendah (Indiyanto, 2005). Besi dan baja merupakan bahan yang paling banyak digunakan dalam bidang industri. Tabel 2.1 menunjukkan karakteristik baja berdasarkan struktur kristal (Surdia dan Saito, 1999)

Struktur kristal face center cubic (fcc) memiliki atom yang terletak pada pusat bidang dan di setiap titik sudut kubusnya. Struktur kristal body center cubic (bcc) memiliki atom pada tiap titik sudut kubus dan satu atom di pusat kubus. Pada baja karbon dengan kadar karbon dalam martensit $FeC < 0,2\%C$, struktur kristal fcc akanbertransformasi menjadi bcc. Apabila kadar karbon pada paduan Fe-C meningkat, struktur kristal bcc berubah menjadi body center tetragonal (bct). Struktur bcc akan berubah menjadi bct akibat pendinginan cepat (quenching). Berdasarkan komposisi kimianya, baja diklasifikasikan menjadi baja karbon dan baja paduan.

Baja karbon terdiri dari besi dan karbon. Berdasarkan kandungan karbon, baja ini dibagi menjadi tiga macam yaitu:

1. Baja Karbon Ringan

Baja karbon ringan merupakan baja yang mengandung 0,10 – 0,25%C. Baja ini memiliki ketangguhan dan keuletan yang tinggi, mudah dibentuk dan dilas,

sehingga dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan komponen bodi mobil, struktur bangunan, pedal gas, rem, pagar dan lain-lain.

2. Baja Karbon Menengah

Baja karbon menengah merupakan baja yang mengandung 0,20 – 0,50% C. Baja karbon menengah memiliki kekerasan dan kuat tarik yang lebih tinggi dibanding baja karbon ringan. Baja jenis ini biasa digunakan sebagai bahan baku pembuatan alat-alat pertanian seperti cangkul, sekop, dan garpu.

3. Baja Karbon Tinggi

Baja karbon tinggi mengandung 0,5 – 1,7%C. Baja karbon tinggi memiliki keuletan rendah, ketahanan panas, dan kuat tarik tinggi sehingga banyak digunakan untuk material peralatan sarana atau mekanik (Fox, 1979).

2.2.1. Baja Paduan

Baja paduan merupakan baja yang terdiri dari beberapa unsur seperti nikel, mangan, kromium, dan molibdenum. Setiap unsur berguna untuk memperoleh sifat-sifat baja yang diinginkan, seperti sifat kekuatan, kekerasan, keuletan, dan ketahanan terhadap korosi. Paduan dari beberapa unsur yang berbeda menghasilkan sifat khas dari baja. Berdasarkan kadar paduannya, baja paduan dibagi menjadi tiga yaitu:

1. Baja paduan rendah

Baja paduan rendah merupakan baja yang terdiri dari unsur Cr, Mn, S, Si, P dan lain-lain dengan berat elemen paduannya kurang dari 2,5%.

2. Baja paduan menengah

Baja paduan menengah merupakan baja yang terdiri dari unsur Cr, Mn, S, Si, P dan lain-lain dengan berat elemen paduannya 2,5 – 10 %.

3. Baja paduan tinggi

Baja paduan tinggi merupakan baja yang terdiri dari unsur Cr, Mn, S, Si, P dan lain-lain dengan berat elemen paduannya lebih dari 10% (Amanto dan Daryanto, 1999).

4. Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)

Baja tahan karat merupakan baja paduan tinggi dengan kandungan unsur kromium minimal 10%, sehingga mempunyai sifat tahan korosi. Selain unsur kromium

terdapat unsur tambahan lain yaitu Ni, Mo, Mn, Al, Cu, Ti, C, dan Nb (Yunaidi, 2016). Setiap unsur memiliki pengaruh dalam proses oksidasi suhu tinggi. Proses oksidasi akan menghasilkan senyawa FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃, Cr₂O₃, dan CrO (Bandriyana dkk., 2004).

Pengaruh unsur tambahan dalam baja tahan karat antara lain:

a. Nikel (Ni)

Nikel (Ni) adalah unsur yang sangat penting dalam pembuatan baja tahan karat. Nikel dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan serta ketahanan terhadap korosi.

b. Molibdenum (Mo)

Molibdenum (Mo) berfungsi untuk meningkatkan kekuatan, kekerasan, ketangguhan, dan ketahanan baja terhadap korosi.

c. Mangan (Mn)

Mangan (Mn) dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik. Selain itu, dapat mengurangi distorsi pada baja.

d. Aluminium (Al)

Aluminium (Al) dapat meningkatkan ketahanan korosi pada saat oksidasi.

e. Tembaga (Cu)

Tembaga (Cu) dapat meningkatkan ketahanan korosi dalam larutan asam tertentu, menurunkan kekerasan, dan meningkatkan machinability.

f. Titanium (Ti)

Titanium (Ti) digunakan sebagai penstabil unsur dalam baja tahan karat.

g. Karbon (C)

Karbon (C) merupakan komponen utama dari baja karena dapat meningkatkan kekuatan tarik, kekerasan, dan ketahanan. Unsur karbon dapat menurunkan keuletan, ketangguhan, dan machinability pada baja.

h. Kromium (Cr)

Kromium (Cr) dapat meningkatkan kekuatan tarik, kekerasan, ketangguhan, ketahanan terhadap abrasi dan korosi karena membentuk lapisan pasif kromium oksida (Outokumpu, 2013).

5. Baja Tahan Karat SS 304

Baja tahan karat austenitik tipe 304 merupakan baja paduan dengan kandungan Cr 18 – 20%, dan Ni 8 – 10,5% (Roberge, 2000). Baja jenis ini biasa digunakan sebagai bahan konstruksi utama dalam beberapa industri seperti industri nuklir, kimia, dan makanan. Baja ini memiliki ketahanan korosi yang baik karena terdapat lapisan kromium oksida pada permukaannya (Riszi dan Harmami, 2015). Ketahanan korosi SS-304 akan menurun jika direndam secara terus menerus dalam larutan asam maupun air laut. Semakin lama baja tersebut direndam dalam medium korosif, laju korosinya akan semakin menurun (Iliyasu et al., 2012). SS-304 merupakan baja yang memiliki tingkat kekerasan rendah sekitar 123 HB dan kekuatan tarik sebesar 505 N/mm² (Nasir, 2014). Tabel 2.2 menunjukkan komposisi unsur kimia penyusun baja SS-304.

Tabel 2.1 Unsur Kandungan SS 304

| Unsur | Fe | c | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | S | P |
|-------|------|-------|-----|-------|-------|-------|----|-------|-----|
| % | 72.0 | 0.042 | 0.5 | 1.197 | 17.28 | 0.024 | 8. | 0.000 | 0.0 |
| | 7 | 3 | 7 | 3 | 9 | 1 | 4 | 8 | 4 |

2.3. Sifat Mekanik

Sifat-sifat mekanik baja karbon rendah dapat dilihat pada tabel 2.2 sebagaimana berikut :

Tabel 2.2 Sifat Mekanik Baja Karbon Rendah

| Sifat Mekanik | Kisaran Nilai | Keterangan |
|-----------------------------------|---------------|--|
| Kadar Karbon (C) | $\leq 0,30$ % | Umumnya 0,05 – 0,25 % |
| Kekuatan Tarik (Tensile Strength) | 350 – 600 MPa | Relatif rendah, mudah dibentuk |
| Kekuatan Luluh (Yield Strength) | 200 – 400 MPa | Tergantung proses perlakuan panas & cold working |
| Kekerasan (Hardness Brinell) | 100 – 180 HB | Masih lunak dibanding baja sedang/tinggi karbon |

| | | |
|------------------------------|-------------|---|
| Perpanjangan (Elongation) | 25 – 40 % | Sangat ulet, mudah dibentuk & dilas |
| Ketangguhan (Toughness) | Tinggi | Mampu menyerap energi tumbukan dengan baik |
| Daya Las | Sangat baik | Cocok untuk pengelasan tanpa perlakuan khusus |
| Machinability | Baik | Mudah dikerjakan dengan mesin perkakas |
| Korosi | Rendah | Mudah berkarat tanpa pelapisan/proteksi |

Sifat mekanik adalah salah satu sifat terpenting, karena sifat mekanik menyatakan kemampuan suatu bahan (tentunya juga komponen bahan tersebut) untuk menerima beban/gaya/energi tanpa menimbulkan kerusakan pada bahan atau komponen tersebut. Sifat logam dapat diketahui dengan cara melakukan pengujian terhadap logam tersebut. Pengujian biasanya dilakukan terhadap spesimen/batang uji dengan bentuk dan ukuran yang standard, demikian juga prosedur pengujian yang dilakukan. Sering kali bila suatu bahan mempunyai sifat mekanik yang baik tetapi kurang baik pada sifat yang lain maka diambil langkah untuk mengatasi kekurangan tersebut dengan berbagai cara. Beberapa sifat mekanik yang penting antara lain :

1. Kekuatan (*strength*) menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan bahan menjadi patah. Kekuatan ini ada beberapa macam, tergantung pada jenis bahan yang bekerja, yaitu kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan tekan, kekuatan torsi dan kekuatan lengkung.
2. Kekerasan (*hardness*) dapat didefinisikan sebagai kemampuan bahan untuk tahan terhadap penggoresan, pengikisan (abrasi), indentasi atau penetrasi. Sifat ini berkaitan dengan sifat tahan aus (*wear resistance*).

2.4. Uji Tarik

Logam hasil pengelasan dapat dilakukan dengan pengujian merusak dan pengujian tidak merusak. Pengujian merusak dapat dilakukan dengan uji mekanik untuk mengetahui kekuatan sambungan logam hasil pengelasan, yang salah satunya dapat dilakukan suatu uji tarik yang telah distandarisasi. Kekuatan tarik sambungan las sangat dipengaruhi oleh sifat logam induk, daerah HAZ, sifat logam las, dan geometri serta distribusi tegangan dalam sambungan. Untuk melaksanakan pengujian tarik dibutuhkan batang tarik. Batang tarik, dengan ukuran-ukuran yang dinormalisasikan, dibubut dari spesimen yang akan diuji. Uji tarik merupakan salah satu dari beberapa pengujian yang umum digunakan untuk mengetahui sifat mekanik dari satu material. Dalam bentuk yang sederhana, uji tarik dilakukan dengan menjepit kedua ujung spesimen uji tarik pada rangka beban uji tarik. Gaya tarik terhadap spesimen uji tarik diberikan oleh mesin uji tarik (*Universal Testing Machine*) yang menyebabkan terjadinya pemanjangan spesimen uji dan sampai terjadi patah. Dalam pengujian, spesimen uji dibebani dengan kenaikan beban sedikit demi sedikit hingga spesimen uji tersebut patah, kemudian sifat-sifat tariknya dapat dihitung dengan persamaan :

$$\sigma_1 = \frac{F}{A_0} \quad (2.2)$$

Dimana :

σ_1 : Tegangan (N/mm^2)

F : Gaya (N)

A_0 : Luasan Awal (mm^2)

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2.3)$$

Dimana :

ε : Regangan

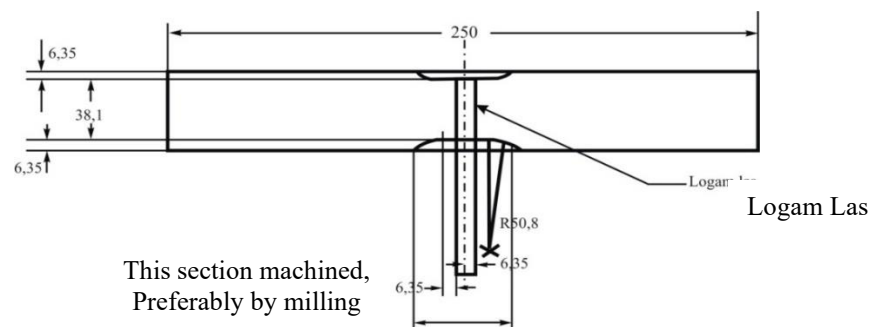
L : Panjang Mula dari Batang Uji (mm)

L_0 : Panjang Batang Uji Yang dibebani (mm)

Uji tarik suatu material dapat dilakukan dengan menggunakan *universal testing machine* . Benda uji dijepit pada mesin uji tarik, kemudian beban *static* dinaikkan secara bertahap sampai spesimen putus. Besarnya beban dan

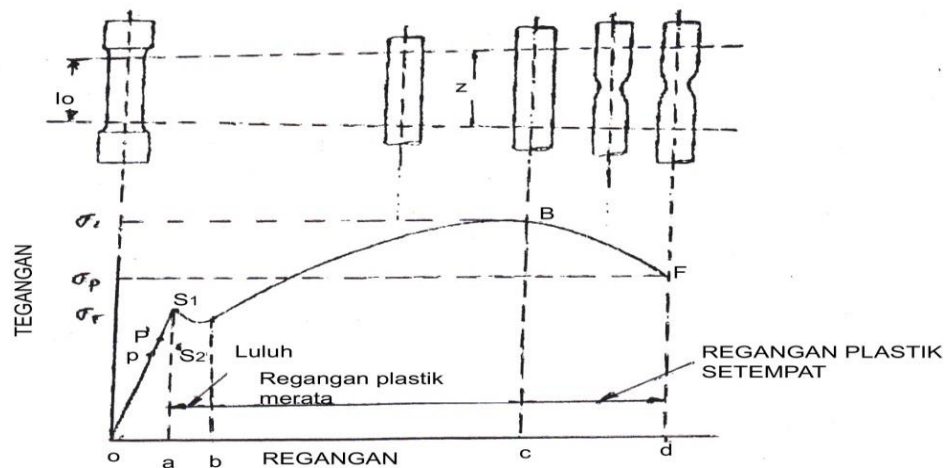
pertambahan panjang dihubungkan langsung dengan plotter, sehingga diperoleh grafik tegangan (Mpa) dan regangan (%) yang memberikan informasi data berupa tegangan luluh (σ_{ys}) tegangan ultimate (σ_{ult}), modulus elastisitas bahan (E), ketangguhan dan keuletan sambungan las yang diuji tarik.

Dalam sambungan las sifat tarik berhubungan dengan sifat dari logam jenis induk, jenis elektroda yang digunakan, sifat dari daerah HAZ, sifat logam las dan sifat dinamik dari sambungan berhubungan erat dengan geometri dan distribusi tegangan dalam sambungan.



Gambar 2.18 Batang Uji Tarik

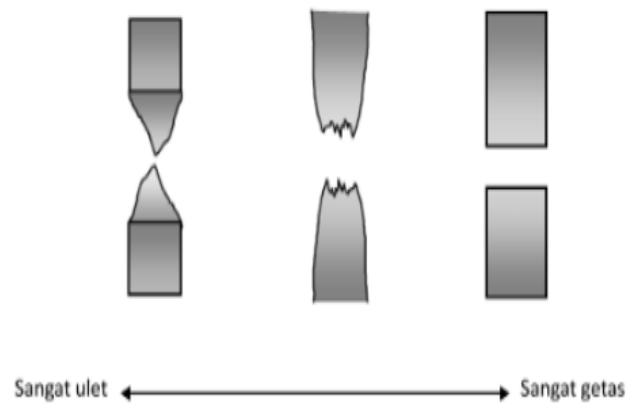
Dalam pengujian batang uji tersebut dibebani dengan kenaikan beban sedikit demi sedikit batang uji patah. Untuk mengetahui kekuatan tarik dapat dilihat dengan bentuk kurva tegangan regangan teknik seperti gambar 2.19 berikut ini



Gambar 2.19 Kurva tegangan – regangan

2.4.1. Analisa Patahan Hasil Uji Tarik

Dilihat dari specimen yang putus saat pengujian tarik bentuk patahan dari specimen dapat dilihat sebagai berikut digambar bawah ini.



Gambar 2.20 Sifat Base Metal Dari Patahan

2.5. Uji Mikrostruktur (*Metallographic Test*)

Uji mikrostruktur adalah metode pengamatan struktur internal logam dengan menggunakan mikroskop optik atau mikroskop elektron setelah specimen melalui tahapan persiapan metalografi. Tujuannya untuk mengetahui bentuk, ukuran, dan distribusi fasa atau butir pada material.

Tujuan Uji Mikrostruktur adalah :

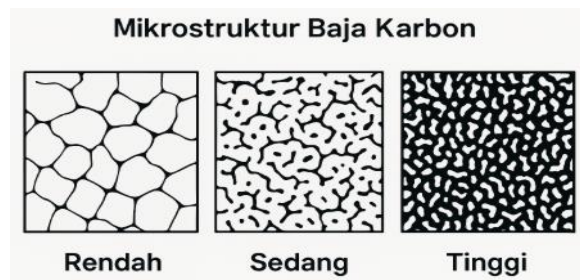
1. Mengetahui ukuran butir kristal dan distribusinya.
2. Mengidentifikasi fasa-fasa logam (contoh pada baja: ferit, perlit, martensit, bainit, austenit).
3. Mengevaluasi pengaruh perlakuan panas, pengelasan, deformasi, maupun pendinginan terhadap struktur logam.
4. Menganalisis adanya cacat mikro seperti porositas, retakan mikro, segregasi, atau inklusi.
5. Menghubungkan struktur mikro dengan sifat mekanik (misalnya kekerasan, kekuatan, keuletan)

Hasil yang Diamati

1. Baja Karbon Rendah : Didominasi struktur ferit (putih) dengan sedikit perlit (hitam).
2. Baja Karbon Sedang : Kombinasi seimbang antara ferit dan perlit.
3. Baja Karbon Tinggi : Didominasi oleh perlit dengan sedikit ferit.

Jadi, uji mikrostruktur sangat penting karena dapat menjelaskan fenomena di balik perubahan sifat mekanik baja akibat proses pengelasan, perlakuan panas, maupun pendinginan.

Gambar skematis mikrostruktur baja karbon rendah, sedang, dan tinggi secara visual



Gambar 2.21. Mikrostruktur Baja Karbon

2.6. Uji Kekerasan

Kekerasan adalah kemampuan suatu material untuk menahan penetrasi (indentasi), gesekan (abrasi), atau deformasi plastis. Dalam konteks pengelasan, uji kekerasan crucial untuk mengevaluasi sifat material di zona las (Fusion Zone), zona terpengaruh panas (Heat-Affected Zone/HAZ), dan logam induk (Base Metal).

Kekerasan Rockwell Tipe C (HRC) merupakan metode pengujian kekerasan yang mengukur kedalaman indentasi permanen akibat pembebanan dua tahap. Prinsipnya dimulai dengan penerapan gaya minor 10 kgf untuk menetapkan bidang referensi nol, yang kemudian diikuti penambahan gaya mayor 150 kgf dengan menggunakan indenter kerucut intan (diamond brale). Setelah gaya mayor dilepaskan, kedalaman sisa indentasi (h) diukur dan dikonversi menjadi nilai kekerasan melalui rumus sebagai berikut :

$$HRX = N - (h/s) \quad (2.4)$$

Dimana :

HRX : Nilai Kekerasan Rockwell

N : Sebuah konstanta numerik yang bergantung pada skala.

H : Kedalaman permanen indentasi, dalam milimeter (mm). Ini adalah selisih kedalaman sebelum dan sesudah penerapan major load.

S : Faktor skala (sebuah konstanta), yang juga bergantung pada skala.

Nilai Konstanta N dan S untuk Skala C (HRC) adalah sebagai berikut :

$$N = 100$$

$$S = 0.002 \text{ mm}$$

Dengan memasukkan nilai ini, rumus khusus untuk HRC menjadi:

$$HRC = 100 - (h / 0.002) \quad (2.5)$$

Konstanta dalam rumus ini menjamin hubungan berbanding terbalik yang terstandarisasi, di mana material dengan kedalaman indentasi lebih kecil akan menghasilkan angka kekerasan yang lebih tinggi (ASTM International, 2022).

Dalam konteks pengelasan, uji HRC memiliki signifikansi tinggi untuk melakukan pemetaan kekerasan (*hardness traverse*) melintasi sambungan las. Metode ini sangat efektif untuk mengidentifikasi variasi kekerasan, khususnya pada Zona Terpengaruh Panas (*Heat-Affected Zone/HAZ*), di mana siklus termal pengelasan dapat menyebabkan pengerasan yang ditandai dengan nilai HRC yang meningkat drastis akibat pembentukan martensit. Dengan prosedurnya yang cepat dan langsung memberikan pembacaan numerik, uji HRC menjadi alat yang vital untuk mengevaluasi pengaruh parameter pengelasan dan efektivitas Perlakuan Panas Pasca Las (PWHT) dalam mengendalikan sifat mekanik sambungan (Davis, 2004).

2.7. Kajian Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pengaruh parameter pengelasan terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur pada material baja telah menjadi topik yang luas dikaji. Secara khusus, proses *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) sebagai salah satu metode

yang paling umum digunakan, menjadi fokus dari berbagai studi. (Muthanna dan Abdulrahman, 2018) meneliti pengaruh kuat arus listrik pada pengelasan SMAW terhadap baja karbon menengah AISI 1045. Hasil penelitian mereka mengungkapkan bahwa peningkatan kuat arus dari 110 A hingga 130 A menyebabkan kenaikan masukan panas, yang berimplikasi pada menurunnya kekerasan dan kekuatan tarik di Daerah Pengaruh Panas (Heat-Affected Zone/HAZ). Penurunan ini diakibatkan oleh pertumbuhan butir (grain growth) yang signifikan pada austenit serta pembentukan struktur ferit dan perlit yang kasar. Temuan ini menegaskan bahwa kontrol terhadap masukan panas merupakan faktor kritis dalam menjaga integritas mekanik sambungan.

Lebih lanjut, kompleksitas yang lebih tinggi muncul ketika proses pengelasan melibatkan penyambungan material yang tidak sejenis (dissimilar welding). (Raghuvir et al., 2021) menyelidiki las dissimilar antara baja karbon rendah AISI 1018 dan baja karbon tinggi AISI 1080 menggunakan proses SMAW. Studi mereka menunjukkan bahwa gradien komposisi kimia yang tajam di zona fusion line memicu difusi karbon dari sisi baja karbon tinggi menuju daerah HAZ baja karbon rendah. Fenomena ini mengakibatkan terbentuknya suatu zona yang lunak (soft zone) di HAZ baja karbon tinggi akibat dekarburisasi, dan sekaligus zona yang mengeras (hard zone) di HAZ baja karbon rendah akibat karbon yang terperangkap. Zona yang mengeras ini identik dengan pembentukan martensit, yang meskipun meningkatkan kekerasan lokal, namun sangat rentan terhadap retak karena sifatnya yang getas.

Menyoroti masalah pembentukan fase getas tersebut, penelitian oleh (Aloraier et al., 2020) memberikan analisis mendalam tentang mikrostruktur di HAZ pada pengelasan baja. Mereka menyimpulkan bahwa laju pendinginan setelah pengelasan, yang secara langsung dipengaruhi oleh besarnya masukan panas, adalah penentu utama fase mikro yang terbentuk. Masukan panas yang terlalu tinggi akan menyebabkan laju pendinginan yang lebih lambat, yang dapat mengurangi risiko pembentukan martensit. Namun, konsekuensinya adalah pertumbuhan butir yang berlebihan di HAZ yang justru melemahkan sifat mekaniknya. Sebaliknya, masukan panas yang rendah menghasilkan laju pendinginan yang sangat cepat,

yang pada baja karbon tinggi dan menengah berpotensi besar membentuk martensit yang tidak ditemper (*as-quenched martensite*), sehingga meningkatkan kerapuhan sambungan.

Berdasarkan tinjauan terhadap beberapa penelitian sebelumnya di atas, dapat diidentifikasi bahwa meskipun pengaruh masukan panas terhadap material sejenis telah banyak dipahami, aplikasinya pada sambungan dissimilar baja karbon sedang dengan baja karbon tinggi masih memerlukan eksplorasi yang lebih mendalam. Interaksi antara variasi masukan panas, transformasi fasa mikro yang kompleks di kedua sisi HAZ yang berbeda, dan dampak akhirnya terhadap sifat mekanik gabungan (seperti kekuatan tarik, kekerasan, dan ketangguhan) dari sambungan dissimilar tersebut belum sepenuhnya terkuantifikasi. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk secara spesifik menganalisis pengaruh sistematis variasi masukan panas proses SMAW terhadap evolusi mikrostruktur dan sifat mekanik pada sambungan baja karbon sedang (AISI 1045) dengan baja karbon tinggi (AISI 1080), guna menentukan parameter masukan panas yang optimal untuk aplikasi tersebut.