

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Perkembangan industri manufaktur dan konstruksi dewasa ini menuntut adanya teknologi penyambungan logam yang kuat, efisien, dan ekonomis. Salah satu metode penyambungan logam yang paling banyak digunakan adalah pengelasan (welding). Proses pengelasan berperan penting dalam pembuatan struktur baja, permesinan, otomotif, dan berbagai komponen teknik lainnya karena mampu menyatukan dua atau lebih logam dengan kekuatan mendekati bahan aslinya

Dari berbagai jenis proses pengelasan yang tersedia, *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) atau yang dikenal dengan las busur listrik manual merupakan salah satu metode yang paling umum digunakan karena peralatannya sederhana, mudah diaplikasikan di lapangan, dan biaya operasionalnya relatif rendah. Proses SMAW menggunakan elektroda berlapis fluks yang berfungsi untuk menghasilkan gas pelindung sekaligus membentuk terak pelindung pada logam cair.

Namun demikian, proses pengelasan tidak hanya menghasilkan sambungan logam, tetapi juga menimbulkan perubahan termal yang signifikan pada logam induk dan logam las. Panas tinggi yang terjadi selama pengelasan menyebabkan logam mengalami proses pemanasan dan pendinginan yang tidak merata, sehingga menimbulkan tegangan sisa, distorsi, serta perubahan struktur mikro pada daerah sekitar las (*Heat Affected Zone* atau HAZ). Perubahan ini secara langsung berpengaruh terhadap sifat mekanik sambungan las, seperti kekuatan tarik, kekerasan, dan keuletan.

Salah satu faktor penting yang berpengaruh terhadap sifat akhir sambungan las adalah laju pendinginan setelah proses pengelasan. Laju pendinginan dapat dikendalikan dengan memilih media pendingin (quenching medium) yang digunakan setelah proses pengelasan. Variasi media pendingin akan memberikan

pengaruh yang berbeda terhadap struktur mikro dan sifat mekanik logam hasil lasan.

Dalam konteks ini, baja karbon rendah merupakan material yang banyak digunakan di dunia industri, terutama pada konstruksi, komponen mesin, dan peralatan teknik, karena memiliki sifat mudah dilas (*good weldability*), ulet, dan ekonomis. Namun demikian, baja karbon rendah tetap mengalami perubahan mikrostruktur akibat pemanasan dan pendinginan saat proses las, yang dapat memengaruhi performa mekaniknya. Oleh karena itu, pengendalian proses pendinginan pasca las menjadi aspek penting untuk menjamin kualitas sambungan.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa media pendingin seperti udara, air, oli, memberikan pengaruh yang berbeda terhadap hasil pengelasan. Pendinginan cepat (seperti pada air) cenderung menghasilkan struktur martensit yang keras namun getas, sedangkan pendinginan lambat (seperti udara) menghasilkan struktur ferit-perlit yang lebih ulet namun memiliki kekerasan lebih rendah. Sementara itu, pendinginan dengan oli sering dianggap sebagai kompromi antara kekerasan dan keuletan, karena laju pendinginannya berada di antara air dan udara.

Dengan demikian, pemilihan media pendingin yang tepat menjadi sangat penting dalam pengendalian kualitas hasil lasan. Analisis terhadap pengaruh media pendingin pasca las terhadap sifat mekanik (seperti kekuatan tarik dan kekerasan) serta struktur mikro baja karbon rendah akan memberikan pemahaman yang lebih baik tentang perilaku material dan membantu menentukan media pendingin paling sesuai untuk aplikasi tertentu.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis eksperimental terhadap pengaruh variasi media pendingin pasca las pada sambungan baja karbon rendah yang dilas dengan proses SMAW. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan teknologi pengelasan yang lebih terkendali, terutama dalam hal peningkatan sifat mekanik dan kestabilan struktur mikro sambungan las.

Perbedaan kandungan karbon antara baja karbon rendah, sedang dan tinggi juga berpengaruh terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur las. Baja karbon tinggi biasanya memiliki kemampuan pengerasan yang lebih besar, sehingga saat terkena heat input tinggi, HAZ-nya rentan terhadap pembentukan martensit dan retakan, khususnya jika cooling rate terlalu cepat. Sebaliknya, baja karbon sedang lebih mudah diproses tetapi bisa mendapati dampak negatif serupa jika parameter pengelasan tidak dikontrol dengan baik.

Gap penelitian : Terdapat kebutuhan untuk mempelajari secara komparatif pengaruh variasi media pendingin dalam proses las SMAW terhadap sambungan baja karbon rendah meliputi sifat mekanik (kekuatan tarik, keuletan, kekerasan) dan perubahan mikrostruktur (susunan fase, ukuran butir, HAZ).

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 pengelasan SMAW, industri dapat menentukan parameter pengelasan yang sesuai untuk memperoleh kualitas sambungan optimal serta meminimalisasi potensi kegagalan.

1.2. Identifikasi Masalah

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

1. Proses pendinginan pasca las berperan penting dalam menentukan sifat mekanik dan struktur mikro hasil lasan
2. Variasi media pendingin (udara, oli, dan air) menghasilkan laju pendinginan yang berbeda-beda, sehingga memengaruhi distribusi struktur mikro pada daerah logam las dan HAZ
3. Belum terdapat data eksperimental yang lengkap mengenai perbandingan pengaruh ketiga media pendingin tersebut terhadap baja karbon rendah yang dilas dengan metode SMAW

4. Diperlukan analisis mendalam untuk mengetahui media pendingin mana yang menghasilkan sifat mekanik dan struktur mikro paling optimal.

1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian dengan judul Analisa Pengaruh Media Pendingin Pasca Las SMAW Terhadap Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Pada Sambungan Baja Karbon Rendah 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 dengan spesifikasi tertentu (misalnya ASTM E-8M atau sejenisnya).
- b. Proses pengelasan yang digunakan adalah Shielded Metal Arc Welding (SMAW) dengan satu jenis elektroda (misalnya E6013).
- c. Media pendingin yang digunakan terdiri dari tiga jenis, yaitu udara, oli, dan air.
- d. Parameter pengelasan (arus, tegangan, jenis elektroda, dan kecepatan pengelasan) dijaga konstan.
- e. Pengujian yang dilakukan meliputi uji tarik, uji kekerasan, dan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik.
- f. Aspek yang dianalisis hanya terbatas pada pengaruh variasi media pendingin terhadap sifat mekanik dan struktur mikro sambungan las, tanpa memperhitungkan faktor korosi, kelelahan (fatigue), atau tegangan sisa jangka panjang.

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.
- b. Penelitian tidak mencakup pengujian sifat fisis lain seperti keausan, korosi, atau fatik.

5. Analisa Mikrostruktur

- a. Pengamatan mikrostruktur difokuskan pada daerah utama logam las (*weld metal*) atau 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 variasi media pendingin pasca pengelasan, terhadap 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 variasi media pendingin pasca las (udara, oli, dan air) terhadap sifat mekanik sambungan baja karbon rendah hasil pengelasan SMAW.

2. Bagaimana perubahan struktur mikro sambungan las akibat perbedaan media pendingin tersebut.
3. Media pendingin manakah yang memberikan kombinasi sifat mekanik dan struktur mikro paling optimal pada sambungan baja karbon rendah.

1.5. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian Analisa Pengaruh Media Pendingin Pasca Las SMAW Terhadap Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Pada Sambungan Baja Karbon Rendah ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh variasi media pendingin pasca las terhadap sifat mekanik (kekuatan tarik dan kekerasan) pada sambungan baja karbon rendah hasil proses SMAW.
2. Mengetahui dan membandingkan perubahan struktur mikro pada daerah las dan HAZ akibat perbedaan media pendingin.
3. Menentukan media pendingin yang menghasilkan sifat mekanik dan mikrostruktur terbaik pada sambungan baja karbon rendah.

1.6. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara akademis maupun praktis, antara lain:

1. Manfaat Akademis
 - Memberikan tambahan pengetahuan mengenai hubungan antara laju pendinginan, struktur mikro, dan sifat mekanik pada baja karbon rendah hasil pengelasan SMAW
 - Menjadi referensi ilmiah bagi mahasiswa dan peneliti dalam bidang material teknik dan teknik pengelasan terkait perlakuan termal pasca las.
 - Menambah literatur akademik mengenai pengaruh variasi media pendingin terhadap hasil las baja karbon rendah.

2. Manfaat Praktis

- Menjadi dasar pertimbangan bagi praktisi industri dalam menentukan media pendingin yang sesuai untuk meningkatkan kualitas sambungan las baja karbon rendah.
- Membantu meningkatkan efisiensi dan mutu produk las di sektor industri manufaktur dan konstruksi.
- Memberikan rekomendasi proses pasca las yang tepat guna mengurangi cacat, distorsi, dan menstabilkan sifat mekanik sambungan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kajian Penelitian Terdahulu

Berbagai studi eksperimental dan tinjauan menunjukkan bahwa laju pendinginan setelah proses pengelasan adalah faktor kunci yang menentukan evolusi mikrostruktur (proporsi ferrit, perlit, bainit, martensit, acicular ferrite) dan sifat mekanik (kekuatan tarik, yield, kekerasan, toughness) pada daerah las dan HAZ (*heat-affected zone*). Secara umum, laju pendinginan yang lebih cepat cenderung meningkatkan kekerasan dan yield strength tetapi dapat mengurangi keuletan/toughness karena pembentukan fasies bainit/martensit atau M-A constituents.

Beberapa penelitian membandingkan efek pendinginan menggunakan air, oli, udara atau media lain:

- a. Water quenching menghasilkan laju pendinginan terbesar sering meningkatkan kekerasan dan yield strength, namun dapat menurunkan toughness dan menyebabkan distorsi/retak termal jika tidak dikontrol.
- b. Oil quenching umumnya memberi laju pendinginan menengah — beberapa studi melaporkan kombinasi kekuatan dan keuletan yang lebih baik pada oil-quenched dibandingkan water-quenched untuk beberapa campuran baja.
- c. Pendinginan dengan udara (natural cooling) menghasilkan laju pendinginan paling lambat, cenderung menghasilkan mikrostruktur kasar (lebih banyak ferrit/perlit) sehingga kekuatan menurun dibanding quench cepat, tapi toughness lebih baik.
- d. Penggunaan media padat (mis. pasir kering) atau pendinginan lokal dapat mengubah gradien suhu sehingga mempengaruhi HAZ dan distorsi literatur empiris relatif lebih sedikit untuk aplikasi pasca-SMAW pada baja karbon rendah, sehingga studi perbandingan langsung (air vs oli vs udara) untuk SMAW diperlukan.

Pengaruh pada sambungan SMAW (*shielded metal arc welding*), Studi spesifik pada sambungan yang dibuat dengan SMAW menunjukkan bahwa microstructure zona pengelasan dan daerah selubung las sangat dipengaruhi oleh input panas (heat input), metalografi deposit las (mis. munculnya acicular ferrite) dan laju pendinginan. Formasi acicular ferrite (AF) pada daerah las umumnya meningkatkan ketangguhan, namun pembentukan M–A atau bainit kasar pada pendinginan cepat dapat meningkatkan kekerasan tetapi menurunkan toughness.

b. Gambaran umum penelitian SMAW pada baja karbon rendah

Penelitian mengenai sambungan SMAW pada baja karbon rendah seperti ST37, SS400, AISI 1018/1020, S275 secara konsisten menekankan bahwa parameter proses terutama arus, tegangan, kecepatan gerak, dan total heat input sangat menentukan sifat mekanik (kekuatan tarik, luluh, ketangguhan impak, kekerasan) serta evolusi mikrostruktur di daerah logam las (WZ) dan heat-affected zone (HAZ). Studi parametris pada baja karbon rendah menunjukkan pola umum: kenaikan heat input cenderung memperhalus profil manik namun membesarkan butir HAZ, yang berdampak pada penurunan kekuatan dan ketangguhan, sementara kekerasan lokal dapat meningkat karena transformasi fasa tertentu atau segregasi/penambahan unsur dari flux elektroda.

c. Pengaruh parameter proses terhadap sifat mekanik

Sejumlah studi eksperimental klasik dan mutakhir melaporkan bahwa kenaikan arus/tegangan (heat input) menaikkan kekerasan, tetapi menurunkan kekuatan tarik/luluh dan ketangguhan impak akibat pembesaran butir dan potensi cacat (porositas/inklusi) yang meningkat. Peningkatan kecepatan pengelasan dalam rentang tertentu dapat menaikkan kekerasan karena laju pendinginan yang lebih cepat, namun efeknya terhadap tarik/luluh tidak selalu linear. Hasil uji menunjukkan adanya kompromi antara kekuatan, ketangguhan, dan kekerasan yang harus dioptimasi melalui pemilihan parameter.

Pada baja AISI 1018 ($\approx 0,18\%$ C), eksperimen dengan variasi arus 55–90 A menggunakan elektroda low-hydrogen melaporkan perubahan signifikan pada hasil uji tarik, tekuk, impak, mikro-kekerasan, dan metalografi. Temuan ini menegaskan sensitivitas sambungan baja karbon rendah terhadap variasi arus dan

standar pengujian (ASTM/AWS) yang digunakan. Secara lebih umum (termasuk pada baja struktural kelas S275), telaah 2024 menegaskan kembali bahwa heat input yang lebih rendah cenderung menghasilkan butir lebih halus dan kekuatan tarik lebih tinggi, namun berisiko menaikkan tegangan sisa dan cacat (retak/pori) bila kontrol proses kurang baik. Heat input lebih tinggi memperbesar butir di HAZ yang menurunkan resistansi rambat retak dan ketangguhan menuntut penyeimbangan parameter agar sifat gabungan optimal.

- Evolusi mikrostruktur pada WZ/HAZ baja karbon rendah

Pada baja karbon rendah, mikrostruktur dasar ferrite-pearlite di daerah induk akan berubah sesuai siklus termal las. Beberapa studi melaporkan ferrite kolumnar/akikular di WZ dan perbesaran butir ferrite-pearlite di HAZ untuk heat input tinggi; pada pendinginan lebih cepat dapat muncul struktur lebih keras (mis. bainit/ martensit lokal) yang meningkatkan kekerasan tetapi berpotensi menurunkan ketangguhan. Deskripsi HAZ juga memuat pengamatan Widmanstätten ferrite dan fenomena pertumbuhan butir/rekristalisasi sepanjang gradien panas.

- Peran jenis elektroda (E6013 vs E7018, dsb.)

Perbandingan elektroda rutilik E6013 dan low-hydrogen E7018 pada baja karbon rendah menunjukkan perbedaan kebiasaan flux, kandungan hidrogen difusibel, serta kadar Mn/Si yang berkontribusi pada pembentukan ferrite akikular dan penguatan larutan padat di WZ. Umumnya, E7018 memberi ketangguhan lebih baik dan risiko retak hidrogen lebih rendah, sementara E6013 lebih mudah dinyalakan dan cocok untuk posisi tertentu namun kurang unggul pada ketangguhan sambungan tebal/terbebani. Studi komparatif dan laporan terkait low-hydrogen electrodes mendukung pola ini.

Di konteks Indonesia, penelitian yang memvariasikan arus pada baja karbon rendah dengan elektroda E7016/E7018 mendapati tren serupa: arus optimum berada pada rentang menengah (bergantung tebal pelat/diameter elektroda), di mana kekuatan tarik dan kekerasan mencapai kombinasi terbaik tanpa menurunkan ketangguhan secara drastis.

- Pengaruh PWHT dan media pendinginan

Beberapa karya menilai *Post-Weld Heat Treatment* (PWHT) atau perlakuan panas sederhana (normalizing/tempering) serta media pendinginan pasca-pengelasan. Hasilnya, PWHT cenderung memperhalus butir HAZ, menurunkan tegangan sisa, dan meningkatkan ketangguhan dengan sedikit penalti pada kekerasan maksimum. Variasi desain kampuh juga berpengaruh terhadap distribusi panas dan gradien mikrostruktur. Studi terbaru pada baja karbon rendah menunjukkan kombinasi desain kampuh + PWHT mampu memperbaiki homogenitas mikrostruktur dan menaikkan performa mekanik sambungan.

- Metodologi uji yang lazim

Penelitian-penelitian terdahulu umumnya mengacu pada ASTM E8 (tarik), ASTM E23/ISO 148 (impak Charpy V-notch), ASTM E384 (mikro-kekerasan Vickers), serta panduan AWS D1.1 untuk kualifikasi/prosedur. Pendekatan ini dipakai dalam studi eksperimental AISI 1018 dan beberapa penelitian parametris lain, memastikan hasil yang dapat dibandingkan antar studi.

- Celah penelitian (research gap)

Dari telaah di atas, beberapa kesenjangan yang masih relevan untuk ditangani pada baja karbon rendah adalah:

1. Banyak studi fokus pada satu atau dua parameter saja (mis. arus/kecepatan) tanpa pemetaan simultan heat input terhadap kombinasi kekuatan ketangguhan kekerasan yang komprehensif.
2. Banyak studi menguji cooling media pada baja paduan atau baja menengah (*low-alloy*, HSLA) atau pada proses selain SMAW (GTAW, GMAW). Perbandingan spesifik antara air, oli, pasir sebagai media pendingin pasca-SMAW pada baja karbon rendah muncul relatif sedikit atau tidak konsisten.
3. Perbedaan parameter praktik (ketebalan pelat, jenis elektroda SMAW, heat input, profil pendinginan) membuat generalisasi sulit diperlukan studi sistematis yang mengontrol variabel-variabel ini untuk menilai secara kuantitatif pengaruh media pendingin pada mikrostruktur HAZ/WM dan sifat mekanik.

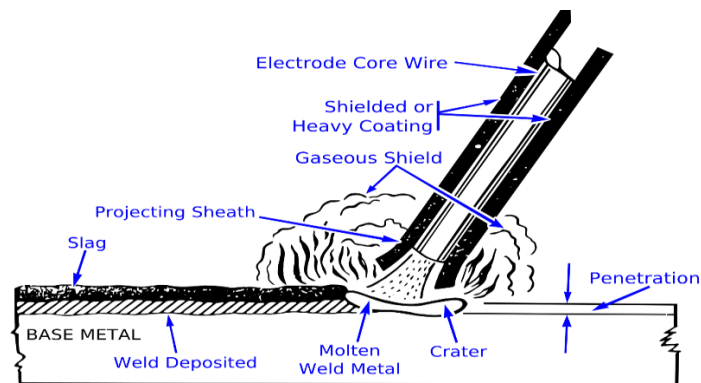
Implikasi : studi yang membandingkan media pendingin (mis. udara, oli, air) pasca-SMAW pada baja karbon rendah akan mengisi gap ini terutama bila mengukur cooling curves (termokopel), mikrostruktur (OM/SEM), kekerasan (HV), uji tarik dan uji impak/toughness

2.2. Landasan Teori

Pengelasan (*Welding*) adalah salah satu teknik penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan logam pengisi dengan atau tanpa tekanan. Pengelasan atau Welding didefinisikan oleh DIN (*Deutsche Industrie Normen*) adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dengan kata lain, pengelasan adalah suatu proses penyambungan logam menjadi satu akibat panas atau tanpa pengaruh tekanan atau dapat juga didefinisikan sebagai ikatan metalurgi yang ditimbulkan oleh gaya tarik menarik antar logam. Mengelas adalah suatu aktifitas menyambung dua bagian benda atau lebih dengan cara memanaskan atau menekan atau gabungan dari keduanya sedemikian rupa sehingga menyatu seperti benda utuh. Penyambungan bisa dengan atau tanpa bahan tambah (*Filler Metal*) yang sama atau berbeda titik cair maupun strukturnya.

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.

2.2.1. SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*)



Gambar 2.1 Gambar Pencairan Elektroda Stik

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).

2.2.2. 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 lompatan ion yang menimbulkan panas. Panas akan mencairkan elektroda dan material dasar sehingga cairan elektroda dan cairan material dasar akan meyatu 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 :

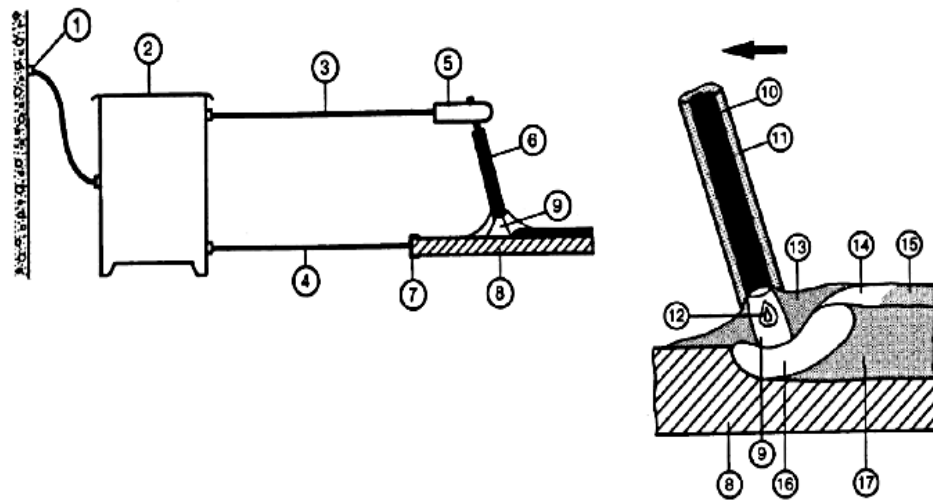
$$H = E \times I \times t \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana :

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

2.2.3. 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.



Gambar 2.2 Las Listrik

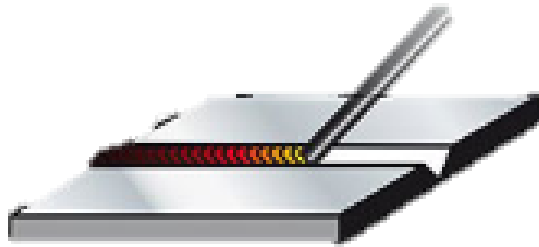
Keterangan :

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.

2.2.4. Posisi Pada Pengelasan

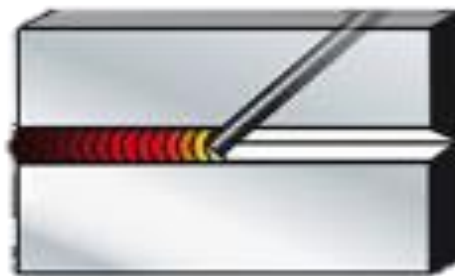
Posisi pada pengelasan atau sikap pengelasan adalah pengaturan posisi dan gerakan arah dari pada elektroda sewaktu mengelas. Adapun posisi terdiri dari 4 macam yaitu:

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



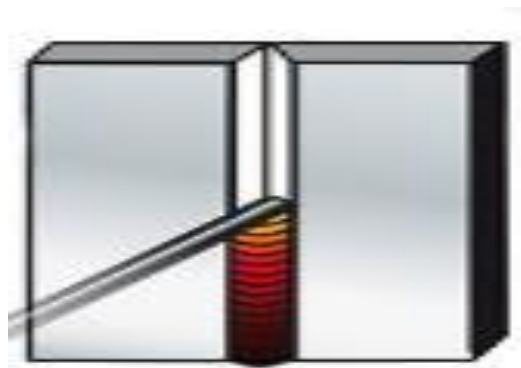
Gambar 2.3 Pengelasan 1G

- b. Posisi Horizontal 2G



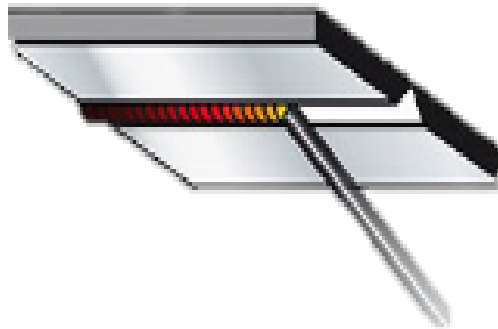
Gambar 2.4 Posisi 2G

- c. Posisi Vertikal 3G



Gambar 2.5 Posisi 3G

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



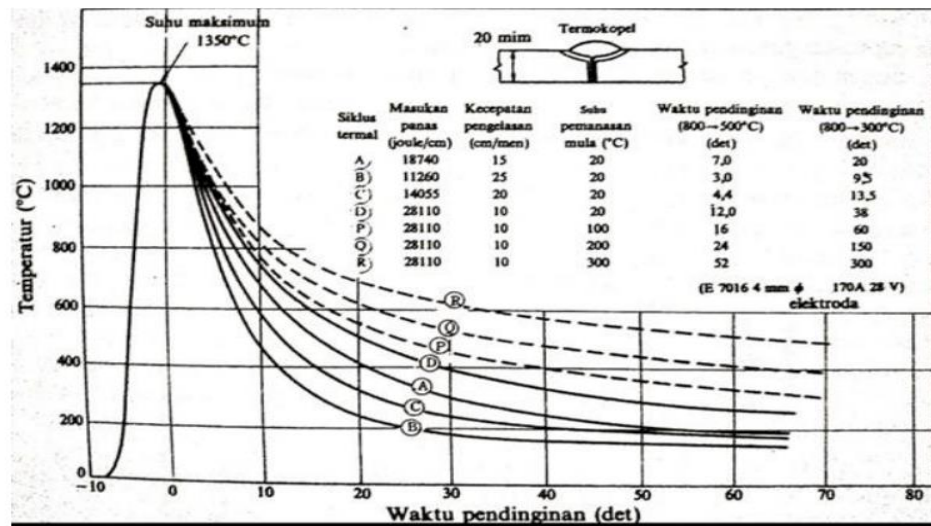
Gambar 2.6 Posisi 4G

2.2.5. 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.



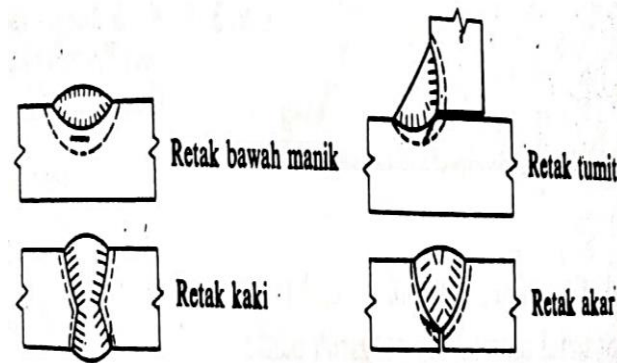
Gambar 2.7 Siklus Termal Dalam Las Busur Tangan

2.2.6. Retak Dalam Pengelasan

Retak las mengacu pada cekungan yang tertinggal pada ujung las dimana kolam 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.

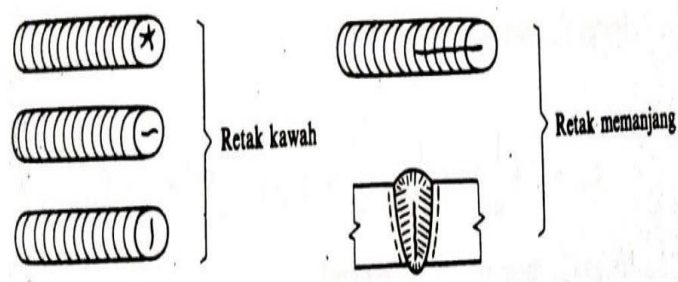
Retak las dapat dibagi dalam dua kelompok yaitu kelompok retak dingin dan kelompok retak panas. Retak dingin adalah retak yang terjadi di daerah las pada suhu di bawah suhu transformasi martensit (M_s) yang tingginya kira-kira 300°C, sedangkan retak panas adalah retak yang terjadi pada suhu di atas 550°C. 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 2.8 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 2.9 Retak Panas

2.2.7. Penyebab Retak Las

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. Retak dingin disebabkan oleh 3 hal berikut :

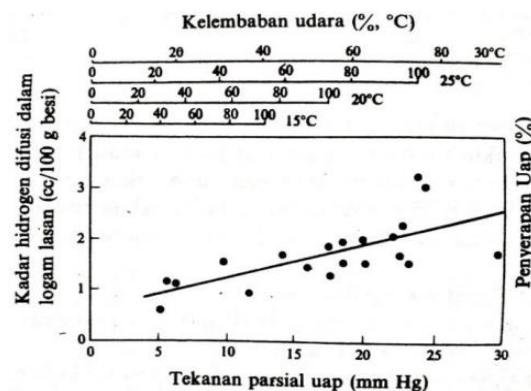
a. Struktur daerah pengaruh panas (HAZ).

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 kelmebaban 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 ditunjukkan pada gambar 2.15 dan 2.16. 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 2.10 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.

d. Cara menghindari retak las

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-

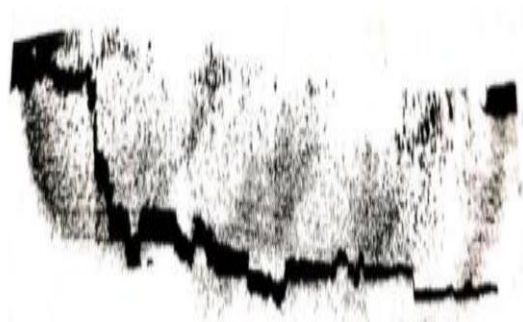
faktor yang menyebabkan terjadinya hal-hal di atas harus diusahakan serendah-rendahnya. Usaha penanggulangan retak las dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Sejauh mungkin menggunakan baja dengan harga Cek dan PCM rendah, sehingga terbentuknya struktur martensit pada daerah HAZ dapat dihindari.
2. Sedapat mungkin menggunakan elektroda dengan fluks yang mempunyai kadar hidrogen rendah.
3. Menghilangkan kristal air yang terkandung dalam fluks basa yang sering digunakan dalam las busur rendam.
4. Elektroda yang akan digunakan harus dipanggang lebih dahulu dan penyimpanannya harus sedemikian rupa sehingga elektroda yang sudah dipanggang tersebut tidak menyerap uap air.
5. Sebelum mengelas, pada daerah sekitar kampuh harus dibersihkan dari air, karat, debu, minyak dan zat organik yang dapat menjadi sumber hidrogen.
6. Penggunaan CO₂, sebagai gas pelindung akan sangat mengurangi terjadinya difusi hidrogen.
7. 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.
8. Penurunan kadar hidrogen difusi dapat juga dilakukan dengan perlakuan panas kemudian.
9. Menghindari pengelasan pada waktu hujan atau di tempat di mana daerah las dapat kebasahan.
- d. Tegangan yang terjadi pada daerah las harus diusahakan serendah mungkin dengan pemilihan dan pengawasan rancangan dan cara pengelasannya yang tepat.

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 mempengaruhi oleh bentuk butir bukan logam, juga dipengaruhi oleh harga Cek atau PCM kadar hidrogen difusi dan tegangan sisa.



Gambar 2.11 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.

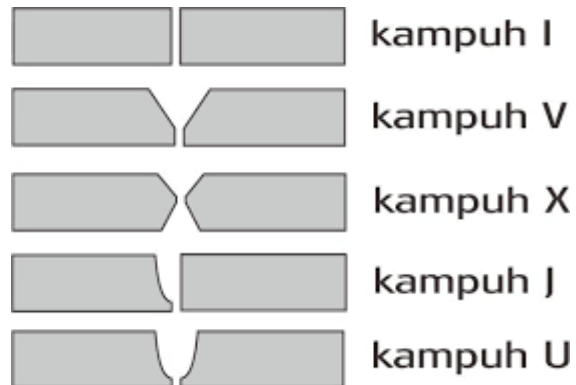
2.2.8. Jenis Sambungan Las

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*

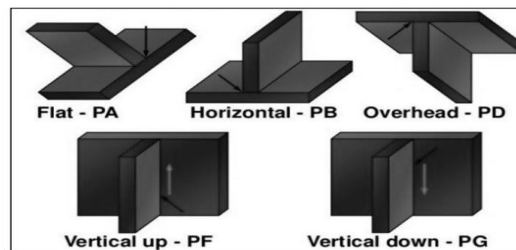
Sambungan butt joint adalah jenis sambungan tumpul, dalam aplikasinya jenis sambungan ini terdapat berbagai macam jenis kampuh atau groove yaitu V groove (kampuh V), single bevel, J groove, U Groove, Square Groove untuk melihat macam macam kampuh las lebih detail silahkan lihat gambar berikut ini.



Gambar 2.12 Jenis-Jenis Kampuh

b. *Fillet Joint*

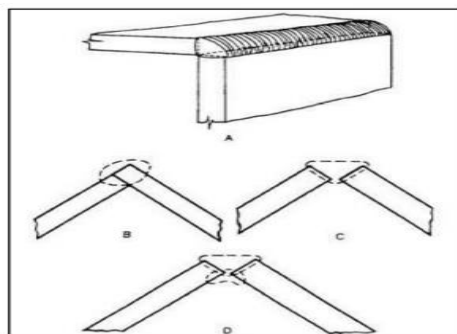
T Joint adalah jenis sambungan yang berbentuk seperti huruf T, tipe sambungan ini banyak diaplikasikan untuk pembutan konstruksi atap, konveyor dan jenis konstruksi lainnya. Untuk tipe groove juga terkadang digunakan untuk sambungan fillet adalah double bevel, namun hal tersebut sangat jarang kecuali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



Gambar 2.13 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.

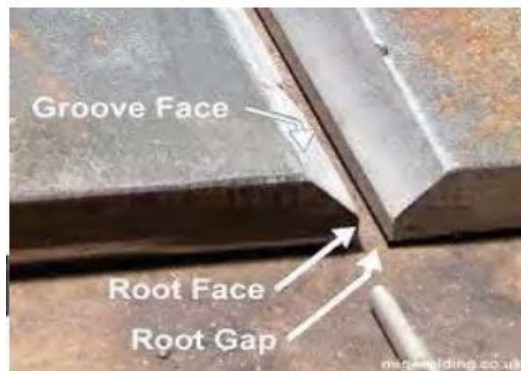


Gambar 2.14 Sambungan Corner Joint

4. 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 $\pm 3\text{mm}$ 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 3mm 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 2.15 Penambahan Bahan pada Sambungan

2.2.9. 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 porosity 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).

2.2.10. 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 (Ca CO₃), 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 CO₂ yang melindungi cairan las, busur listrik dan sebagian benda kerja terhadap udara luar. Udara luar yang

mengandung O₂ 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.

2.2.11. 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/in² lihat table.
3. X (angka ketiga) : menyatakan posisi pengelasan.
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 –.

2.3. 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. Pada baja karbon dengan kadar karbon dalam martensit $FeC < 0,2\%C$, struktur kristal fcc akan bertransformasi

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).

2.3.1. 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 %. 2.1.2.3.

3. Baja paduan tinggi

Baja paduan tinggi merupakan baja yang terdiri dari unsur Cr, Mn, S, Si, P dan lainlain 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)

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.

g. 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 (Riszki 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. SS-304 merupakan baja yang memiliki tingkat kekerasan rendah sekitar 123 HB dan kekuatan tarik sebesar 505 N/mm².

Tabel 2.1 Unsur Kandungan SS 304

Unsur	Fe	c	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
%	72.07	0.0423	0.57	1.1973	17.289	0.0241	8.4	0.0008	0.04

2.4 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 :

4. 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.
5. 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*).

2.5. 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 tarikannya dapat dihitung dengan persamaan :

$$\sigma_1 = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots 2.2$$

Dimana :

σ_1 : Tegangan (N/mm^2)

F: Gaya (N)

A_0 : Luasan Awal (mm^2)

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100\% \dots\dots\dots 2.3$$

Dimana :

ε : Regangan

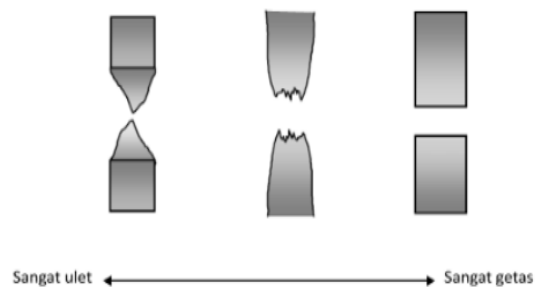
L: Panjang Mula dari Batang Uji (mm)

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.

2.5.1. Analisa Patahan Hasil Uji Tarik

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



Gambar 2.16 Sifat Base Metal Dari Patahan

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. Uji Mikrostruktur (Metallographic Test)

Uji mikrostruktur adalah metode pengamatan struktur internal logam dengan menggunakan mikroskop optik atau mikroskop elektron setelah spesimen 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)

Tahapan Persiapan Uji Mikrostruktur

1. Pemotongan (Cutting): Spesimen dipotong dari material dengan hati-hati agar tidak menimbulkan perubahan struktur akibat panas.
2. Mounting: Sampel dipasang dalam resin/bahan cetak agar mudah ditangani.
3. Pengamplasan (Grinding): Dilakukan bertahap dengan kertas amplas kasar → halus.

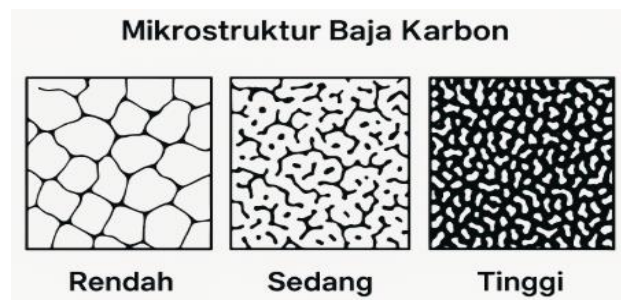
4. Pemolesan (Polishing): Menggunakan pasta alumina atau diamond paste hingga permukaan cermin.
5. Etsa (Etching): Direndam/digosok dengan larutan kimia (contoh: Nital 2% untuk baja karbon) agar batas butir dan fasa tampak jelas.
6. Pengamatan: Menggunakan mikroskop metalografi optik (100–1000x) atau SEM.

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. 17 Skematis Mikrostruktur