

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian menunjukkan kekuatan tarik tertinggi pada kecepatan kawat las 0.15 m/detik sebesar 467.1 MPa dan kekuatan tarik minimumnya sebesar 326.9 MPa pada kecepatan kawat las 0.18 m/detik. Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa pada pengelasan baja karbon rendah SS400 semakin tinggi kecepatan kawat las mengalami kekerasan spesimen semakin rendah dikarenakan masuknya panas pada saat pengelasan kekerasan terendah pada spesimen kecepatan kawat 0.18 m/detik terletak pada daerah HAZ sebesar 116.9 VHN dan di daerah las sebesar 179 VHN, kekerasan tertinggi pada spesimen dengan kecepatan kawat 0.12 m/detik sebesar 149.5 VHN daerah HAZ dan 187.3 VHN di daerah Las. Hasil uji struktur mikro menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan kawat las, struktur mikro dengan butiran ferit yang terbentuk pada daerah HAZ lebih besar pada spesimen kecepatan kawat las 0,18 m/detik. Pada daerah las terbentuk Widmanstatten Ferrite (WF) ditunjukkan garis-garis seperti jaring laba-laba, dan terbentuknya Widmanstatten ferrite (WF) ini akan mempengaruhi kualitas hasil lasan (Hakam, 2014: 75).

Penelitian ini merupakan penelitian yang menganalisis kekuatan tarik pada material baja karbon rendah dengan pengelasan *Metal Inert Gas* (MIG) dengan empat variasi arus, yaitu 100 A, 125 A, 150 A, 175 A.

Spesimen yang digunakan adalah material plat baja karbon rendah TRS 400 dengan ketebalan 8 mm yang dilas dengan kawat las merk ENKA dengan diameter 1 mm. Hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa nilai rata-rata kekuatan spesimen kontrol sebesar $438,5 \text{ N/mm}^2$ atau $44,75 \text{ kgf/mm}^2$, dan nilai rata-rata kekuatan tarik dengan arus 175 A sebesar $415,6 \text{ N/mm}^2$ atau $42,33 \text{ kgf/mm}^2$. Hasil pengelasan menggunakan arus 100 A memiliki kekuatan tarik yang ideal. Hal ini diakibatkan karena arus 100 A sudah termasuk dalam standar arus pengelasan dengan ketebalan material 8 mm (Huda & Jasman, 2019 : 227).

2.2 Sifat Material Bahan

Secara umum atau karakteristik bahan atau material dapat dikelompokkan menjadi 4, yaitu sifat mekanik, sifat fisik, sifat teknologi, dan sifat kimia. Pada penelitian ini, sifat yang diamati pada material uji ialah sifat mekanik (uji tarik) dan sifat fisik (uji struktur mikro).

2.2.1 Sifat Mekanik

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 standar, 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:

- 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.
- 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*).

Sifat-sifat mekanik material yang sering diuji secara rinci untuk mengetahui kemampuan dari material yang akan digunakan adalah kekuatan (*strength*) merupakan kemampuan suatu material untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan material menjadi patah, kekakuan (*stiffness*) adalah kemampuan suatu material untuk menerima tegangan atau beban tanpa mengakibatkan deformasi atau defleksi, kekenyalan (*elasticity*) didefinisikan sebagai kemampuan material untuk menerima tegangan tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk yang permanen setelah tegangan dihilangkan, plastisitas (*plasticity*) adalah kemampuan material untuk mengalami

deformasi plastik (perubahan bentuk secara permanen) tanpa mengalami kerusakan, keuletan (*ductility*) adalah suatu sifat material yang digambarkan seperti kabel dengan aplikasi kekuatan tarik.

Material *ductile* ini harus kuat dan lentur, ketangguhan (*toughness*) merupakan kemampuan material untuk menyerap sejumlah energi tanpa mengakibatkan terjadinya kerusakan, kegetasan (*brittleness*) adalah suatu sifat bahan yang mempunyai sifat berlawanan dengan keuletan, kelelahan (*fatigue*) merupakan kecenderungan dari logam untuk menjadi patah bila menerima beban bolak-balik (*dynamic load*) yang besarnya masih jauh dibawah batas kekuatan elastiknya, melar (*creep*), merupakan kecenderungan suatu logam untuk mengalami deformasi plastik bila pembebanan yang besarnya relatif tetap dilakukan dalam waktu yang lama pada suhu yang tinggi dan kekerasan (*hardness*) merupakan ketahanan material terhadap penekanan atau penetrasi (Rusjdi, 2016 : 24).

Sifat mekanik merupakan sifat dari suatu benda yang berkaitan dengan kemampuan benda tersebut dalam menerima beban atau gaya berat. Sifat mekanik dapat diketahui dengan dilakukan pengujian terlebih dahulu. Sifat mekanik suatu material antara lain: kekerasan, kekuatan tarik, modulus elastisitas, kekuatan tekan, kekuatan impact, ketahanan/ kekuatan lelah dan mampu mesin (*machinability*).

2.2.2 Sifat Fisik

Bahan teknik umumnya digunakan karena memiliki sifat-sifat

tertentu yang dibutuhkan. Sifat bahan teknik tersebut dibedakan menjadi 2, yaitu sifat fisik dan sifat mekanik. Sifat fisik merupakan sifat yang menunjukkan keadaan fisik suatu benda atau unsur tanpa dipengaruhi beban atau gaya. Sifat fisik pada suatu benda dapat diketahui secara langsung tanpa perlu mengubah atau memodifikasi benda tersebut, akan tetapi tidak semua sifat fisik dapat diketahui secara langsung. Contoh sifat fisik suatu benda atau unsur antara lain, wujud atau fasa zat, warna, berat jenis, berat atom, titik leleh, titik didih, tahanan listrik, daya hantar listrik dan ketahanan korosi.

Pengertian sifat fisis bahan yaitu bagaimana keadaan bahan itu bila mengalami peristiwa fisika, misalnya keadaan bahan ketika terkena pengaruh panas. Karena panas yang diterimanya pada suhu tertentu bahan akan mencair atau hanya mengalami perubahan bentuk dan ukurannya. Perubahan bentuk ini dapat mempengaruhi perubahan fasa yang ada didalam bahan tersebut. Pada sifat fisik disini akan dibahas tentang struktur mikro, untuk mengetahui struktur mikro dengan menggunakan mikroskop.

Pada proses pengelasan, transformasi γ (austenit) ke α (ferit) merupakan tahap yang paling krusial karena struktur mikro logam las yang berarti juga sifat-sifat mekanisnya sangat ditentukan pada tahap ini. Diantara faktor-faktor yang mempengaruhi transformasi γ (austenit) ke α (ferit) adalah masukan panas (heat input), komposisi kimia las, kecepatan pendinginan dan bentuk sambungan las seperti

ditunjukkan oleh diagram CCT (*Continuous Cooling Transformstion*), struktur mikro logam las baja terdiri dari kombinasi dua atau lebih fasa-fasa berikut yang disusun berdasarkan suhu pembentuknya :

1. Ferit batas butir (*grain boundary ferrite*), terbentuk antara suhu 1000 sampai 650°C sepanjang batas butir austenit.
2. Ferit Widmanstatten (*Widmanstatten ferrite side plates*), terbentuk antara suhu 1000 sampai 650°C.
3. Ferit terbentuk antara suhu 650°C
4. Bainit terbentuk antara suhu 500°C.
5. Martensit terbentuk jika proses pendinginannya sangat cepat.

2.3 Material Logam

Logam adalah bahan/material teknik yang sangat banyak di gunakan dalam berbagai bidang. Dalam dunia keteknikan, logam merupakan material yang paling mendominasi dari bahan-bahan teknik lainnya sebagai bahan yang paling utama dalam pembuatan mesin.

2.3.1 Material Baja

Baja adalah merupakan suatu campuran dari besi (Fe) dan karbon (C), dimana unsur karbon (C) menjadi dasar. Disamping unsur Fe Dan C, baja juga mengandung unsur campuran lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), dan mangan (Mn) yang jumlahnya dibatasi. Baja karbon sedang dan baja karbon tinggi mengandung banyak karbon dan unsur lain dapat memperkeras baja, karena itu daerah pengaruh panas atau HAZ pada baja ini mudah menjadi keras bila dibandingkan baja karbon rendah. Sifatnya yang mudah menjadi keras ditambah

dengan adanya hidrogen difusi menyebabkan baja ini sangat peka terhadap retak las. Disamping itu pengelasan dengan menggunakan elektroda yang sama kuat dengan logam lasnya dengan pemanasan mula dan suhu pemanasan tergantung dari kadar karbon. Baja karbon adalah baja yang mengandung karbon antara 0,1% - 1,7%. Berdasarkan tingkatan banyaknya kadar karbon, baja digolongkan menjadi 3 tingkatan :

- a. Baja karbon rendah (mengandung karbon kurang dari 0,30%)
- b. Baja karbon sedang (mengandung karbon antara 0,30% - 0,60%)
- c. Baja karbon tinggi (mengandung karbon antara 0,6% - 1,5%)

Sebagian dari baja umumnya digolongkan menurut konsentrasi karbon, yakni ke dalam rendah, menengah, dan jenis karbon tinggi. Pada penelitian ini digunakan baja karbon rendah. Klasifikasi baja karbon rendah juga disebut baja lunak banyak sekali digunakan untuk konstruksi umum. Baja karbon ini dibagi lagi dalam beberapa klasifikasi. Baja karbon rendah sendiri mempunyai sifat mampu las yang baik. Ada beberapa faktor yang sangat mempengaruhi mampu las dari baja karbon rendah yaitu : a) kekuatan tarik dan kepekaan terhadap retak las. b) Baja dapat disambung dengan proses pengelasan. c) Kemampuan las baja tergantung dari komponen kimia baja dengan menaikkan dan menurunkan kadar karbon dan menaikkan kadar Mangan.

Baja karbon rendah mempunyai kepekaan retak las yang rendah bila dibandingkan dengan baja karbon lainnya atau dengan baja karbon paduan. Tetapi retak las pada baja ini dapat terjadi dengan mudah pada pengelasan plat tebal atau bila di dalam baja tersebut terdapat belerang bebas yang cukup tinggi. Cara

pengelasan baja karbon rendah dapat dilas dengan semua cara pengelasan yang ada. Pada kenyataannya baja karbon rendah adalah baja yang mudah dilas. Berikut klasifikasi dari baja dapat dilihat pada Tabel 2.1 sebagai berikut :

Tabel 2.1 Klasifikasi material baja

Jenis dan kelas		Kadar karbon (%)	Kekuatan luluh (kg/mm ²)	Kekuatan tarik (kg/mm ²)	Panjang (%)	Keras Brinell	Penggunaan
Baja karbon rendah	Baja lunak khusus	0,08	18 – 28	32 - 36	40 - 30	95 - 100	Plat tipis
	Baja sangat lunak	0,08-0,12	20 – 29	36 - 36	40 - 30	80 - 120	Batang, kawat
	Baja lunak	0,12-0,20	22 - 30	38 - 48	36 - 24	100 - 130	Konstruksi umum
	Baja setengah lunak baja	0,20-0,30	24 - 36	44 - 55	32 - 2 2	112 - 145	Konstruksi umum
Baja karbon sedang	Baja setengah keras	0,30-0,40	30 - 40	50 - 60	30 - 17	140 - 170	Alat – alat mesin
Baja karbon keras	Baja keras	0,40-0,50	34 - 46	58 - 70	26 - 14	160 - 200	Perkakas
	Baja sangat keras	0,50-0,80	36 - 47	65 - 100	20 - 11	180 - 235	Rel, pegas, dan kawat

Baja banyak digunakan karena baja mempunyai sifat mekanis lebih baik dari pada besi, sifat baja antara lain :

1. Tangguh dan ulet;
2. Mudah ditempa;
3. Mudah diproses;
4. Sifatnya dapat diubah dengan mengubah karbon;
5. Sifatnya dapat diubah dengan perlakuan panas;

6. Kadar karbon lebih rendah di banding besi;
7. Banyak dipakai untuk berbagai bahan peralatan.

Walaupun baja lebih sering digunakan, namun baja mempunyai kelemahan, yaitu ketahanan terhadap korosinya rendah. Baja dapat (dua unsur atau lebih digabung sehingga dihasilkan sifat lain) menghasilkan pepaduan, yaitu larutan padat/ *solid solution* (dapat memperbaiki sifat fisika/ kimia) dan senyawa (lebih keras dari larutan padat, dapat memperbaiki sifat mekanik). *Austemper* termasuk salah satu cara perlakuan panas yang bertujuan meningkatkan ketangguhan (*toughness*) material. Komponen yang mengalami proses ini akan memiliki ketangguhan yang lebih tinggi, kekuatan impaknya menjadi lebih baik, kekuatan tarik dan kekerasan juga meningkat. Dalam melakukan proses *austemper*, dapat dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu: (1) Tahap pemanasan; (2) Penahanan suhu austenisasi selama waktu tahan tertentu; (3) Tahap pendinginan; (4) Penahan suhu *austemper*; dan (5) Pendinginan dalam media udara (Stifler *et al.* 2016 : 64).

Struktur mikro baja karbon, diantaranya Besi Delta (δ) merupakan salah satu fasa yang hanya berada antara temperatur 1400°C sampai 1539°C. Besi delta mempunyai sel satuan kubus pusat badan atau *Body Center Cubic* (BCC). Austenit (γ) Austenit atau besi gamma (γ) mempunyai sel satuan kubus muka atau *Face Center Cubic* (FCC). Austenit mempunyai sifat lunak dan ulet. Ferit (α) Ferit merupakan sel satuan kubus pusat badan atau BCC (*body centre cubic*) dan berada dibawah temperatur 910°C. Ferit lebih lunak dari sementit (Fe_3C). sifat ferit adalah lunak dan ulet sehingga bisa membuat material memiliki kemampuan untuk diberikan pembentukan atau mudah dibentuk dan biasanya material yang

mengandung ferit ini sering digunakan untuk keperluan konstruksi. Perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$).

Perlit merupakan campuran antara ferit dan sementit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) dengan lapisan-lapisan halus. Fase ini terjadi dibawah temperatur 723°C . Perlit mempunyai sifat kuat dan keras dari ferit tetapi kurang ulet. Pada waktu pendinginan dari austenit terjadi perubahan atau transformasi austenit. Bila pendinginan ini terjadi sangat cepat, karbon tidak sempat berdifusi sehingga terbentuknya fasa martensit. Ledeburit mempunyai kandungan karbon 4,43%, yaitu berupa campuran eutektoid dan sementit. Ledeburit memiliki sifat yang sangat keras namun getas. Sementit (Fe_3C) merupakan senyawa logam yang memiliki kekerasan tinggi diantara fasa-fasa yang terdapat pada baja dan bersifat getas. Sementit mempunyai kandungan karbon 6,67% dari berat molekul (Darmawi 2009).

Baja SS400 adalah baja karbon rendah (*mild steel*) yang memiliki kandungan karbon kurang dari 0,30% dan *tensile strength* sekitar 400 N/mm^2 . Baja SS400 banyak digunakan untuk bidang konstruksi mulai dari bangunan, jembatan, sampai pembuatan kerangka kereta api.

Tabel 2.2 Komposisi kimia baja karbon rendah SS400

Komposisi Kimia	C \leq 16mm maks.	C $>$ 16mm maks.	Si maks.	Mn maks.	P maks.	S maks.
%, masa	0,17	0,20	-	1,40	0,045	0,045

Dari komposisi kimia (*chemical composition*) unsur-unsur yang terdapat dalam

material SS 400 tidak menunjukkan ciri khas yang dipunyai material baja tahan karat yang memiliki kadar krom (Cr) dan Nikel (Ni). Untuk baja tahan karat tipe 304/SS304 minimal memiliki kadar Cr-Ni: 18-8, yakni: 18% krom dan 8% nikel.

Tabel 2.3 Sifat mekanik baja karbon rendah SS400 (Hamdi *et al.*, 2020: 2)

Tipe	Yield Strength min. (Mpa)		Kuat Tarik (Mpa)	Elongation min. %			Impact Resistance min.[J]
	Tebal < 16 mm	Tebal ≥ 16 mm		Tebal < 5 mm	Tebal 5-16 mm	Tebal ≥ 16 mm	
SS400	245	235	400-510	21	17	21	-

Baja ini memiliki kelemahan, yaitu masih seringnya terjadi keausan. Untuk itu perlu ditingkatkan kekerasan pada permukaan baja agar meningkatkan umur pakainya. Namun baja ini tidak bisa ditingkatkan kekerasannya dengan *heat treatment* karena tergolong ke dalam baja karbon rendah yang akan sulit membentuk fasa martensit. Diperlukan usaha peningkatan kekerasan dengan cara selain proses perlakuan panas.

2.3.2 Material *Stainless Steel*

Stainless steel merupakan baja tahan karat austenitik dan feritik yang terdiri dari paduan logam Fe, Cr, dan Ni yang memberikan sifat mekanik yang baik dan ketahanan terhadap korosi pada temperatur yang tinggi. Beberapa unit yang sudah terpasang menggunakan tekanan uap superkritis, dimana tekanannya lebih dari

22,1 MPa, akan tetapi titik volume jenis uap air dan air adalah sama. *Stainless steel* mempunyai struktur atom kubik dengan karbon dalam susunan padat bercelah. *Stainless steel* austenitik tahan terhadap korosi dan memiliki daya mekanik yang baik, akan tetapi ada beberapa degradasi sebagai akibat terkena neutron cepat. Daya mekanik tidak berubah dari tipe yang satu ke tipe dingin.yang lain.

Stainless steel juga dikenal dengan nama lain seperti CRES atau baja tahan korosi, baja inox. Komponen *stainless steel* adalah besi, krom, karbon, nikel, molibdenum dan sejumlah kecil logam lainnya. Komponen ini hadir dalam proporsi yang bervariasi dalam varietas yang berbeda. Dalam *stainless steel*, kandungan krom tidak boleh kurang dari 11%. Beberapa sifat fisik penting dari *stainless steel*, diantaranya zat keras dan kuat, bukan konduktor yang baik (panas dan listrik), memiliki kekuatan ulet tinggi (dapat dengan mudah dibentuk atau bengkok atau digambar dalam bentuk kabel), sebagian varietas dari *stainless steel* memiliki permeabilitas magnetis, sangat tertarik terhadap magnet, tahan terhadap korosi, tidak bisa teroksidasi dengan mudah, dapat mempertahankan ujung tombak untuk suatu jangka waktu yang panjang, bahkan pada suhu yang sangat tinggi, mampu mempertahankan kekuatan dan tahanan terhadap oksidasi dan korosi (Gundara & Biggunah, 2021:235).

Baja tahan karat tipe 304 (*stainless steel* 304) merupakan baja paduan jenis austenitik. Baja austenitik memiliki kandungan kromium dan nikel yang lebih tinggi yang membuatnya secara teoritis menjadi non-magnetik. *Stainless steel* 304 mengandung sekitar 18% kromium dan 8% nikel. Adapun sifat mekanik dan

hambatan jenis dari *stainless steel* 304 dapat dilihat pada Tabel 2.4 di bawah ini :

Tabel 2.4 Sifat mekanik *stainless steel* 304 (Lenntech, 2022)

Sifat Mekanik dan Resistivitas Listrik	Nilai
Kekerasan, <i>Rockwell Ball</i>	82 HRB
Kekuatan Tarik, <i>Ultimate</i>	621 Mpa
Kekuatan Tarik, <i>Yield</i>	290 Mpa
Perpanjangan	55%
Modulus Elastisitas	193 Gpa
Resistivitas Listrik	$6,90 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$

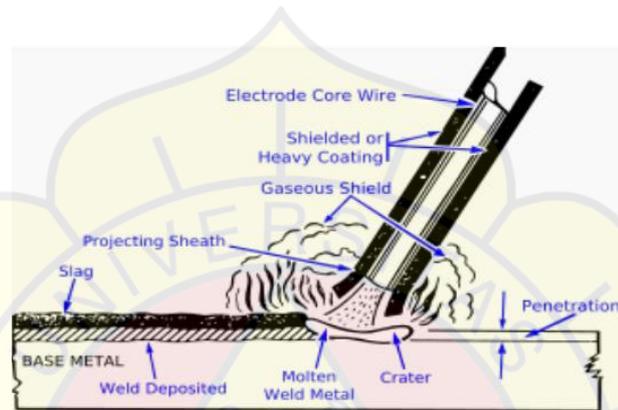
Jenis baja tahan karat ini merupakan yang paling mudah dilas dan dibentuk daripada jenis baja tahan karat yang lainnya. *Stainless steel* 304 banyak diaplikasikan untuk peralatan dapur dan peralatan medis.

2.4 Pengelasan

Teknologi pengelasan merupakan bagian teknologi manufaktur. Secara umum pengelasan dapat diartikan sebagai suatu ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan pada saat logam dalam keadaan cair. Pada sambungan-sambungan konstruksi mesin, banyaknya penggunaan teknik pengelasan karena dengan menggunakan teknik ini sambungan menjadi lebih ringan dan lebih sederhana dalam pembuatannya dan akhirnya biaya produksi dapat lebih murah. Berikut klasifikasi pengelasan terdiri dari beberapa metode, diantaranya :

- a. SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) SMAW adalah las busur nyala api

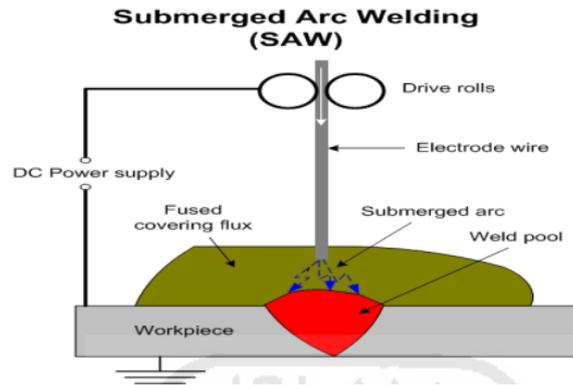
listrik terlindung dengan mempergunakan busur nyala listrik sebagai sumber pemanas pencair logam. Jenis ini paling banyak dipakai dimana-mana hampir untuk semua pekerjaan pengelasan. Tegangan yang dipakai hanya 23 sampai dengan 45 Volt AC atau DC, sedangkan untuk pencairan pengelasan dibutuhkan arus hingga 500 A. Namun secara umum yang dipakai berkisar 80-200 A. Skema pengelasan SMAW dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*)

(Supriyanto, 2011 : 11)

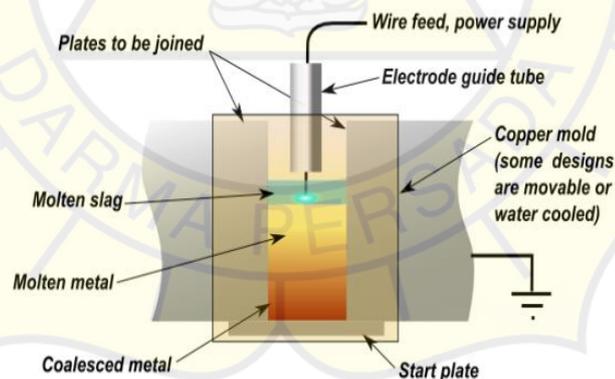
- b. SAW (*Submerged Arc Welding*) SMAW adalah las busur terbenam atau pengelasan dengan busur nyala api listrik. Untuk mencegah oksidasi cairan metal induk dan material tambahan, dipergunakan butiran-butiran fluks/slag sehingga busur nyala api terpendam didalam ukuran-ukuran fluks tersebut. Skema pengelasan SAW dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pengelasan SAW (*Submerged ARC Welding*)

(Supriyanto, 2011: 12)

- c. ESW (*Electro Slag Welding*) ESW adalah pengelasan busur terhenti, pengelasan sejenis SAW namun bedanya pada ESW busurnya nyala mencairkan fluks,, busur terhenti dan proses pencairan fluks berjalan terus dan menjadi bahan pengantar arus listrik (konduktif), sehingga elektroda terhubung dengan beda yang dilas melalui konduktor tersebut. Skema pengelasan ESW dapat dilihat pada Gambar 2.3.



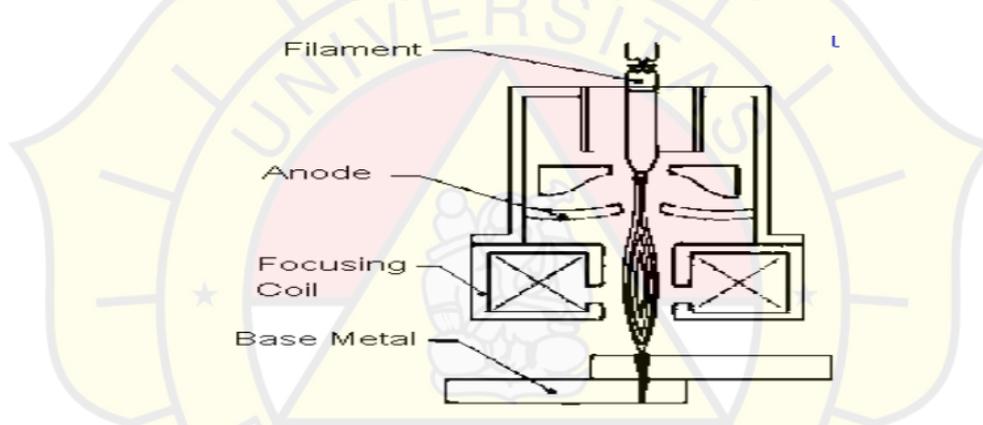
Gambar 2.3 Pengelasan ESW (*Electro Slag Welding*)

(Supriyanto, 2011 : 12)

- d. ERW (*Electric Resistance Welding*) ERW adalah las tahanan listrik yaitu dengan tahanan yang besar, panas yang dihasilkan oleh aliran listrik menjadi

semakin tinggi sehingga mencairkan logam yang akan dilas. Contohnya adalah pada pembuatan pipa ERW, pengelasan plat dinding-dinding pesawat atau pada pagar kawat.

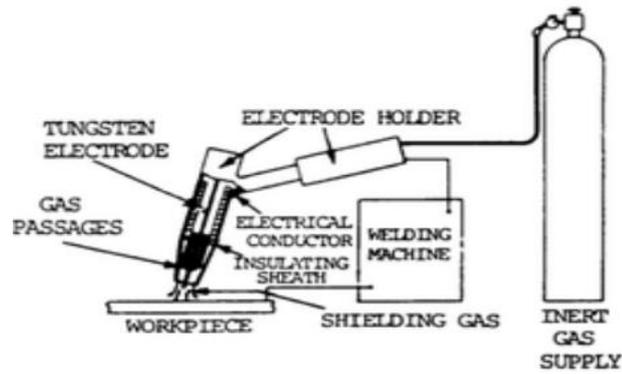
- e. EBW (*Electron Beam Welding*) EBW adalah las dengan proses pemboman elektron, suatu pengelasan ruang pencairan disebabkan oleh panas yang dihasilkan oleh suatu berkas loncatan elektron yang dimampatkan dan diarahkan pada benda yang akan dilas. Pengelasan ini dilakukan didalam ruang hampa, sehingga mengecilkan kemungkinan oksidasi atau kontaminasi. Skema pengelasan EBW dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pengelasan EBM (*Electro Beam Welding*)

(Supriyanto, 2011 : 13)

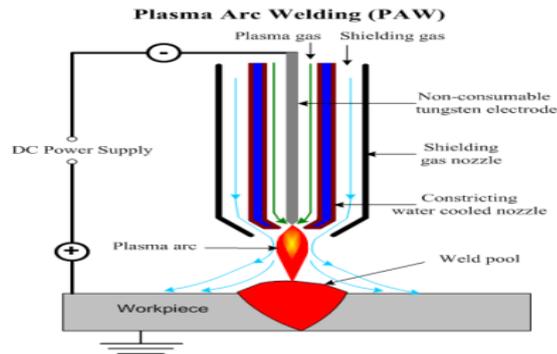
- f. GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) atau TIG (*Tungsten Inert Gas*) GTAW adalah pengelasan dengan memakai busur nyala dengan tungsten/elektroda yang terbuat dari wolfram, sedangkan bahan penambahnya digunakan bahan sejenis dengan material induknya. Skema pengelasan GTAW dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pengelasan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*)

(Supriyanto, 2011 : 14)

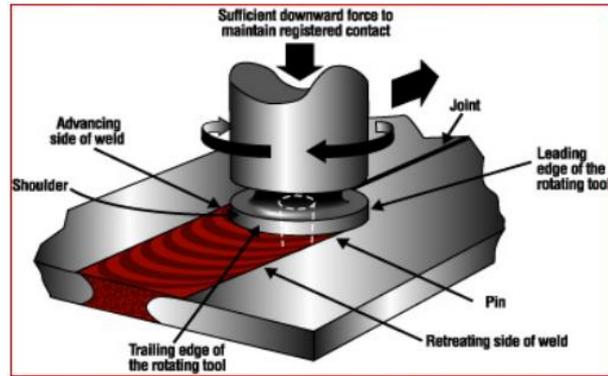
- g. FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) Pada hakikatnya hampir sama dengan pengelasan GMAW. Gas pelindungnya juga sama-sama menggunakan karbon dioksida. Biasanya pada mesin las FCAW ditambah robot yang bertugas untuk menjalankan pengelasan biasanya disebut dengan super anemo.
- h. PAW (*Plasma Arc Welding*) PAW adalah las listrik dengan plasma yang sejenis dengan GTAW hanya pada proses ini gas pelindung menggunakan bahan campuran antar Argon (Ar) , Nitrogen (N) dan Hidrogen (H) yang lazim disebut dengan plasma. Plasma adalah gas yang luminous dengan derajat pengantar arus dan kapasitas termin/panas yang tinggi yang dapat menampung temperatur diatas 5000°C. Skema pengelasan PAW dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Pengelasan PAW (*Plasma Arc Welding*)

(Supriyanto, 2011 : 15)

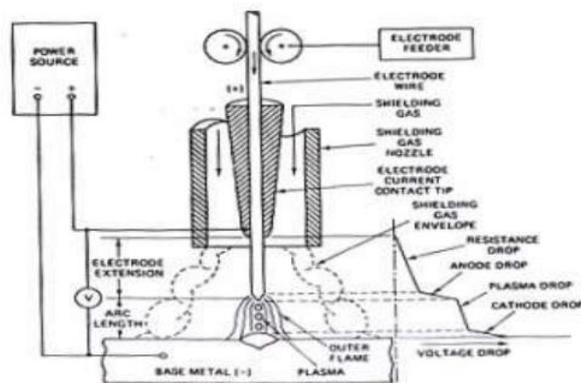
- i. OAW (*Oxygen Acetylene Welding*) OAW adalah sejenis las karbit/las otogen. Panas yang didapat dari hasil pembakaran gas asetilen dengan zat asam atau oksigen. Ada juga yang sejenis las ini dan memakai gas propana sebagai ganti asetilen. Ada pula yang memakai bahan pemanas yang terdiri dari campuran gas hidrogen (H) dan zat asam yang disebut OHW (*Oxy hidrogen Welding*).
- j. FSW (*Friction Stir Welding*) FSW adalah penekanan tools pada sisi sambungan yang akan dilas pada plat aluminium, pemutaran tools harus cepat pada saat bergesekan dengan aluminium, sehingga menyebabkan dan plat aluminium yang akan disambung meleleh dan menyambung, serta dibarengi berjalannya *tools* atau meja kerja (tempat aluminium) supaya aluminium tidak bolong atau meleleh semua. Pengelasan ini tidak memerlukan bahan tambah (*filler*) sehingga menghemat bahan tambahannya yang bisa dipakai pada pengelasan pada umumnya. Skema pengelasan FSW dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*)

(Supriyanto, 2011 : 16)

- k. RSW (*Resistance Spot Welding*) Pengelasan titik (*Spot Welding*) merupakan suatu bentuk pengelasan tahanan dimana las dihasilkan pada suatu titik pada benda kerja diantara elektroda-elektroda pembawa arus, las akan mempunyai luas yang kira-kira sama dengan ujung elektroda atau sekecil ujung elektroda dari ukuran yang berbeda-beda. Gaya yang dikenakan terhadap titik yang biasanya melalui elektroda, secara kontinyu diseluruh proses (tidak ada busur api yang terbentuk).
- i. GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) terdiri dari : MAG (*Metal Active Gas*) dan MIG (*Metal Inert Gas*). MAG pengelasan dengan gas nyala yang dihasilkan berasal dari unsur nyala listrik, yang dipakai sebagai pencair metal yang dilas dan metal penambah. Sebagai pelindung oksidasi dipakai gas pelindung yang berupa gas kekal (*inert*). MIG digunakan untuk mengelas besi atau baja, sedangkan gas pelindungnya adalah menggunakan karbon dioksida. Skema pengelasan MIG dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Proses Pengelasan Las MIG

(Supriyanto, 2011 : 16)

Prinsip dasar dari proses MIG ini tidak jauh berbeda dengan SMAW, yaitu penyambungan yang diperoleh dari proses pencairan sambungan logam induk dan elektroda yang nantinya membeku membentuk logam las. Perbedaan lain yang cukup terlihat antara MIG dan SMAW adalah pada pemakaian jenis pelindung logam gas. Pada SMAW pelindung logam las berupa fluks, sedangkan pada MIG pelindung ini berupa gas. Gas yang dimaksud bisa *inert* atau *active*. Dengan demikian karena tidak menggunakan fluks, maka hasil pengelasannya tidak terdapat kerak. Proses MIG ini selain dipakai untuk mengelas baja karbon juga sangat baik dipakai untuk mengelas baja tahan karat atau Stainless Steel serta mengelas logam-logam lain yang afinitas terhadap Oksigen sangat besar seperti Aluminium (Al) dan Titanium (Ti). Gas yang digunakan pada pengelasan MIG adalah gas inert seperti argon atau campuran argon-helium.

Menurut Irawan & Wardhani (2020), kelebihan dari las MIG, diantaranya las MIG lebih cepat dari pada metode pengelasan tradisional dan menghasilkan hasil yang lebih tahan lama, terus-menerus, dapat digunakan dengan berbagai

paduan dan logam yang membuatnya menjadi panutan dalam proses serbaguna, dan MIG digunakan untuk mengelas besi dan baja. Sedangkan kekurangan dari las MIG, diantaranya peralatan pengelasan yang kompleks dan besar untuk digunakan, peralatan yang memerlukan sumber arus kontinyu dan terus-menerus memberi elektroda kawat melalui pistol, pengelasan MIG tidak dapat digunakan di daerah terbuka karena angin akan menyebabkan gas lebih banyak bermasalah untuk tukang las MIG, dan mengelas kurang bersih dengan menghasilkan seperti hujan rintik-rintik.

2.5 Sambungan Las

Sambungan las adalah sebuah sambungan permanen yang diperoleh dengan peleburan sisi dua bagian yang disambung bersamaan, dengan atau tanpa tekanan dan bahan pengisi. Panas yang dibutuhkan untuk peleburan bahan diperoleh dengan pembakaran gas (untuk pengelasan gas) atau bunga api listrik (untuk las listrik). Pengelasan secara intensif digunakan dalam fabrikasi sebagai metode alternatif untuk pengecoran atau *forging* (tempa) dan sebagai pengganti sambungan baut dan keling. Sambungan las juga digunakan sebagai media perbaikan misalnya untuk menyatukan logam akibat crack (retak), untuk menambah luka kecil yang patah seperti gigi *gear*.

Sambungan las adalah sambungan antara dua atau lebih permukaan logam dengan cara mengaplikasikan pemanasan lokal pada permukaan benda yang disambung. Sambungan las pada umumnya adalah titik lemah dari suatu struktur dan sering menjadi lokasi kegagalan pada pengelasan logam tidak sejenis.

Berbagai upaya telah dilakukan untuk meningkatkan kualitas dan performa dari sambungan las, salah satunya adalah pemanasan awal (*preheat*) (Wicaksono & Ilman 2021).

Setiap proses pengelasan pasti memiliki desain sambungan yang berfungsi untuk mendapatkan hasil sambungan yang baik atau lolos pengujian sesuai standart atau kode yang digunakan. Oleh karena itu pemilihan jenis sambungan pengelasan sangat penting sebelum melakukan proses pengelasan. Jenis sambungan pada pengelasan sangat banyak macamnya, mulai dari sambungan Butt Joint atau sambungan tumpul, Sambungan T Joint atau sambungan Fillet, Sambungan sudut atau Corner Joint atau juga sambungan tumpang atau Lap Joint. Jenis-jenis sambungan las tersebut mempunyai tujuan tertentu (Azwinur *et al.* 2018 : 9-16).

Bentuk Sambungan Las Sambungan (*joint*) las yaitu beberapa komponen material yang disatukan menjadi satu kesatuan. Ada lima jenis sambungan las dasar, ialah sebagai berikut :

- a. *Butt joint* merupakan sambungan dimana kedua benda kerja berada pada bidang yang sama dan disambungkan pada ujung kedua benda kerja yang saling berdekatan.
- b. *Lap joint* merupakan sambungan yang terdiri dari dua benda kerja yang saling bertumpukan.
- c. *T-joint* merupakan sambungan dimana salah satu benda kerja tegak lurus dengan benda kerja lainnya sehingga membentuk huruf T.
- d. *Edge joint* merupakan sambungan dimana kedua benda kerja sejajar satu

sama lain dengan catatan salah satu ujung dari kedua benda kerja tersebut berada pada tingkat yang sama.

- e. *Corner joint* merupakan sambungan dimana kedua benda kerja membentuk sudut sehingga keduanya dapat disambungkan pada bagian pojok dari sudut tersebut.

Terdapat beberapa tipe penyambungan las yang sering dipakai pada dunia industri misalnya adalah tipe pengelasan *Metal Inert Gas* (MIG). Pengelasan MIG adalah penyambungan las listrik menggunakan elektrode terumpan, mempunyai efisiensi cukup tinggi dan biaya yang cukup murah. Didalam logam las yang jumlah energi panasnya semakin besar tidak berbanding langsung menyebabkan peningkatan mutu pengelasan sebab akan dipengaruhi hal lain juga misalnya struktur didalam pengelasan dan kekuatan tarik logam saat diberikan pemanasan tambahan. Meskipun sebagian eksperimen sudah dilaksanakan pada proses penyambungan las dengan menggunakan *Metal Inert Gas*, namun sampai dengan sekarang tidak banyak yang melaksanakan penelitian pengaruh antara variasi arus listrik dan sifat mekanik (kekuatan tarik) area sambungan las (Gumara & Drastiawati, 2021 : 65-68).

Salah satu hal penting yang berpengaruh dalam urutan pengelasan dan mutu suatu penyambungan las yaitu penentuan bahan las. Untuk menentukan bahan las pada konstruksi las sebagian besar digunakan bahan yang terbuat dari jenis baja karbon rendah. Pertimbangan yang digunakan adalah harga yang cukup murah dan banyak tersedia dipasaran. Penggunaan material baja karbon rendah ditentukan sebab baja karbon rendah mempunyai kepekaan terhadap keretakan las

yang cukup tinggi (Wiryosumarto, 2000: 91).

2.6 Arus

Arus listrik (I) didefinisikan sebagai perubahan muatan yang pindah melewati suatu titik per satuan waktu didalam sistem yang berkonduksi. Arus listrik disebabkan adanya medan listrik E dimana arus listrik mengalir searah dengan medan listrik. Dalam pembahasan tentang arus listrik dikenal istilah rapat arus (J) yang menyatakan besarnya arus yang melewati luas penampang (A). secara matematis rapat arus listrik dinyatakan dalam persamaan :

$$J = \frac{I}{A} \dots\dots\dots$$

(1)

dengan:

J = rapat arus (A/m^2)

A = luas penampang (m^2)

I = arus listrik (A)

Arus las merupakan parameter las yang langsung mempengaruhi penembusan dan kecepatan pencairan logam induk. Makin tinggi arus las makin besar pula penembusan dan kecepatan pencairannya. Besar arus pada pengelasan mempengaruhi hasil las bila arus terlalu rendah maka perpindahan cairan dari ujung elektroda yang digunakan sangat sulit dan busur listrik yang terjadi tidak stabil. Panas yang terjadi tidak cukup untuk melelehkan logam dasar, sehingga menghasilkan bentuk rigi-rigi las yang kecil dan tidak rata serta penembusan kurang dalam. Jika arus terlalu besar, maka akan menghasilkan manik melebar, butiran percikan kecil, penetrasi dalam serta penguatan matrik las tinggi.

Besarnya arus pengelasan yang diperlukan bergantung pada diameter elektroda, tebal bahan yang dilas, jenis elektroda yang digunakan, geometri sambungan, diameter inti elektroda, posisi pengelasan.

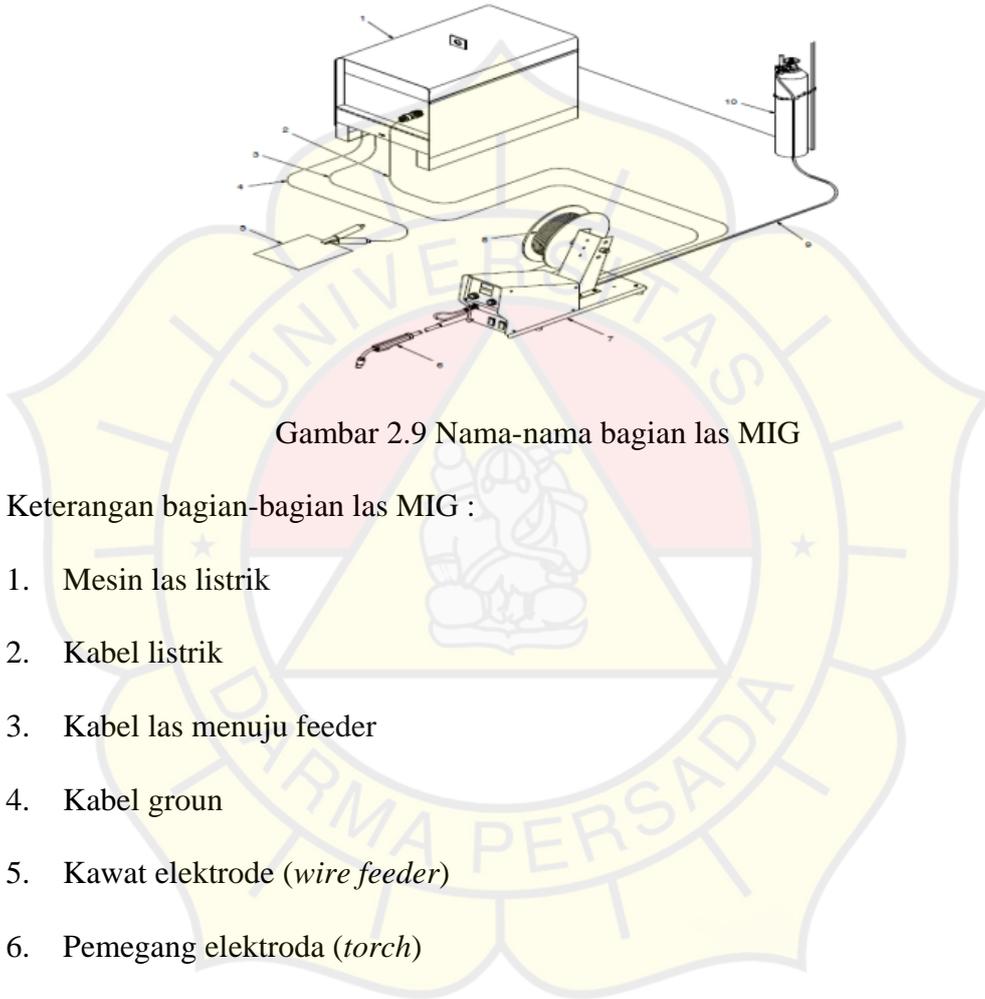
Tabel 2.5 Hubungan diameter elektroda dan arus pengelasan (Hary, 2006)

Diameter Kawat Las (mm)	Arus Las (Ampere)
1.6	25 – 45
2.0	50 – 75
2.5	75 – 95
3.25	95 – 130
4.0	135 – 180
5.0	155 - 240

Daerah las mempunyai kapasitas panas tinggi maka diperlukan arus yang tinggi. Arus las merupakan parameter las yang langsung mempengaruhi penembusan dan kecepatan pencairan logam induk. Makin tinggi arus las makin besar penembusan dan kecepatan pencairannya. Besar arus pada pengelasan mempengaruhi hasil las bila arus terlalu rendah maka perpindahan cairan dari ujung elektroda yang digunakan sangat sulit dan busur listrik yang terjadi tidak stabil. Panas yang terjadi tidak cukup untuk melelehkan logam dasar, sehingga menghasilkan bentuk rigi-rigi las yang kecil dan tidak rata serta penembusan kurang dalam. Jika arus terlalu besar, maka akan menghasilkan manik melebar, butiran percikan kecil, penetrasi dalam serta penguatan matrik las tinggi.

Arus listrik mengalir pada elektroda akibat adanya penurunan beda potensial

atau tegangan antara elektroda dengan logam yang dilas (*base metal*). Panas ditransfer ke logam induk oleh busur yang timbul. Elektroda, kawat pengisi kawah las dan lasan yang telah membeku pada kampuh las dilindungi dari oksidasi oleh gas pelindung (*shielding gas*), yang umumnya adalah gas argon atau campuran argon helium, seperti skema mesin las MIG dibawah ini:



Gambar 2.9 Nama-nama bagian las MIG

Keterangan bagian-bagian las MIG :

1. Mesin las listrik
2. Kabel listrik
3. Kabel las menuju feeder
4. Kabel groun
5. Kawat elektrode (*wire feeder*)
6. Pemegang elektroda (*torch*)
7. Pengontrol elektroda
8. Benda kerja
9. Selang gas (*gas hose*)
10. Tabung gas pelindung

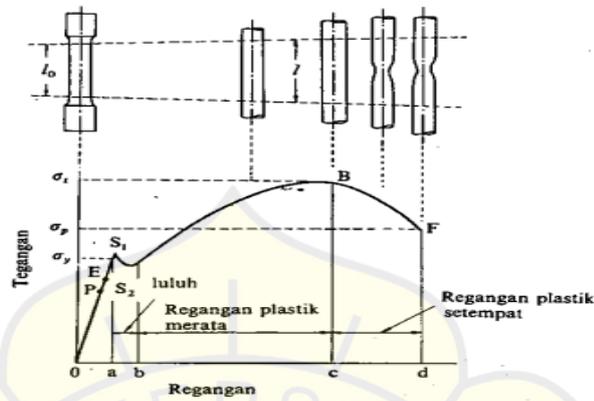
2.7 Kecepatan

Kecepatan adalah jarak yang ditempuh dalam satuan waktu tertentu. Contoh satuan kecepatan adalah km/jam, m/menit, m/detik, dan sebagainya. Rumus kecepatan adalah jarak dibagi waktu atau ditulis $v = s \div t$. Kecepatan pengelasan sangat bergantung pada besar kuat arus yang digunakan, jenis elektroda, diameter inti elektroda, bahan yang akan dilas, geometri sambungan dan lain sebagainya. Dalam pengelasan, kecepatan yang tinggi dapat menyebabkan kurangnya penetrasi, berkurangnya kekuatan sambungan dan mengakibatkan masukan panas yang diterima persatuan panjang akan menjadi lebih kecil. Hal ini dapat berdampak pada pendinginan yang cepat sehingga dapat memperkeras daerah terpengaruh panas. Kecepatan las yang terlalu tinggi dapat merubah sifat mekanik daerah lasan yang berupa naiknya kekuatan tarik dan perpanjangan yang rendah.

2.8 Pengujian Tarik

Proses pengujian tarik bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik benda uji. Pengujian tarik untuk kekuatan tarik daerah las dimaksudkan untuk mengetahui apakah kekuatan las mempunyai nilai yang sama, lebih rendah atau lebih tinggi dari kelompok *raw material*. Pengujian tarik untuk kualitas kekuatan tarik dimaksudkan untuk mengetahui berapa nilai kekuatannya dan dimanakah letak putusnya suatu sambungan las. Pembebanan tarik adalah pembebanan yang diberikan pada benda dengan memberikan gaya tarik berlawanan arah pada salah satu ujung benda. Penarikan gaya terhadap beban akan mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi) bahan tersebut. Proses pembuatan spesimen bertujuan untuk mendapatkan ukuran dan bentuk spesimen sesuai dengan standar untuk sebuah spesimen dalam suatu proses pengujian (Huda & Jasman 2019).

Pada pengujian tarik beban diberikan secara kontinu dan pelan-pelan bertambah besar, bersamaan dengan itu dilakukan pengamatan mengenai perpanjangan yang dialami benda uji dan dihasilkan kurva tegangan-regangan.



Gambar 2.10 Kurva tegangan-regangan (Nukman, 2009 : 39)

Uji tarik banyak dilakukan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu bahan dan sebagai data pendukung bagi spesifikasi bahan. Berikut adalah sifat-sifat yang dihasilkan oleh pengujian tarik:

1. Kekuatan tarik maksimum (σ) merupakan tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh material sebelum terjadinya perpatahan (*fracture*). Pada bahan yang bersifat getas, dimana tegangan maksimum itu merupakan sekaligus tegangan perpatahan (titik putus). Dirumuskan:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana, σ adalah tegangan tarik (N/m²), F adalah Gaya (N), A_0 adalah luas penampang spesimen (m²).

2. Regangan maksimum (ϵ) diukur sebagai penambahan panjang ukur setelah perpatahan terhadap panjang awalnya. Dirumuskan:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

$$\varepsilon = \frac{L_i - L_0}{L_0} \times 100\%$$

Dimana, ε adalah regangan (%), L_i adalah panjang spesimen setelah pengujian (mm), dan L_0 adalah panjang spesimen sebelum pengujian (mm).

3. Modulus elastisitas (E) merupakan ukuran kekakuan suatu material pada grafik tegangan-regangan, modulus kekakuan tersebut dapat dihitung dari slope kemiringan garis elastik yang linier, diberikan oleh:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana, E adalah Modulus Elastisitas (N/m^2), σ adalah tegangan tarik (N/m^2), ε adalah regangan (%).

Pengujian tarik dapat menunjukkan beberapa fenomena perpatahan ulet dan getas, perpatahan ini dapat dilihat dengan mata telanjang. Perpatahan getas memiliki ciri-ciri yang berbeda dengan patah ulet, yaitu tidak ada atau sedikit sekali terjadi deformasi plastis pada material (Dewanto *et al.* 2016).

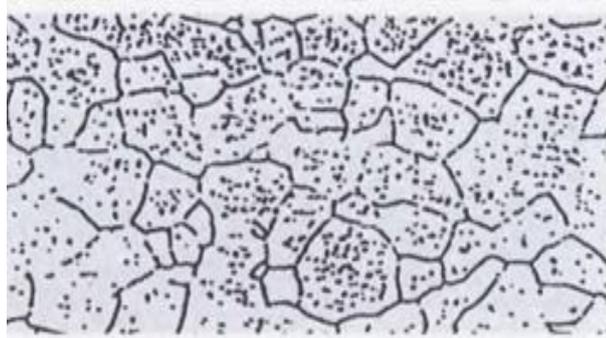
2.9 Pengujian Stuktur Mikro

Perlakuan panas pada logam induk selama proses pengelasan akan mempengaruhi struktur fasa dan sifat logam induk semula. Fasa-fasa yang terjadi pada akibat proses pengelasan berupa :

1. Ferit

Fasa ini disebut Alpha (α) dan merupakan larutan padat *interstisi*. *Ferit* mempunyai sel kristal kubus pemusatan ruang. Ruang antar atomnya kecil dan rapat sehingga kelarutan karbon menjadi kecil pula, pada suhu kamar kadar karbonnya hanya 0.008% sehingga dianggap sebagai besi murni. Kadar maksimum karbon sebesar 0,025% pada suhu 727°C. Ferit bersifat *ferromagnetic*

sampai suhu 768°C bersifat lunak dan liat.



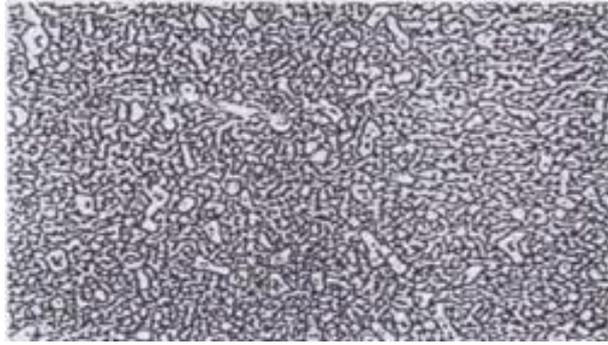
Gambar 2.11 Struktur mikro ferrit

2. Austenit

Fasa ini disebut gamma (γ) dan merupakan larutan padat *interstisi*. *Austenit* mempunyai sel kristal berupa kubus pemusatan sisi. Ruang antar atomnya lebih besar dibandingkan *ferit* dan fasa ini stabil pada suhu tinggi yaitu 910°C sampai dengan 1399°C. *Austenit* mempunyai kadar karbon maksimal sebesar 2,14% pada suhu 1147°C. Karena kadar karbon dalam baja umumnya lebih kecil dari 2% maka pada proses *hardening* seluruh karbon dapat larut sebagai larutan padat didalam γ . *Austenit* merupakan fasa penting sebagai dasar pembentuk fasa-fasa lainnya dalam perlakuan panas termasuk perlakuan panas permukaan baja.

3. Sementit

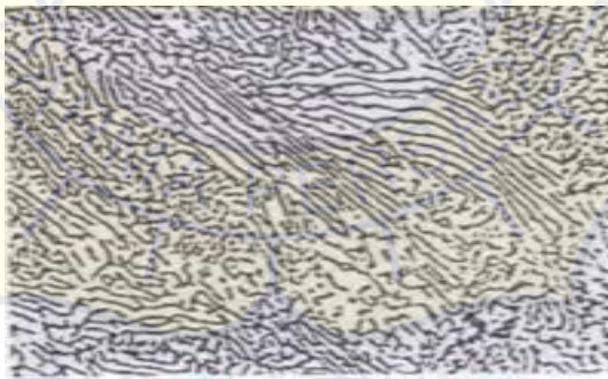
Fasa ini disebut karbid besi (Fe_3C) yang merupakan senyawa kimia dengan rumus kimia Fe_3C . Elemen kristal *sementit* berbentuk *ortorhombik*. Kadar karbon dalam *sementit* adalah 6,67% dan senyawa ini bersifat keras tetapi getas. Pada baja, fasa ini dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan.



Gambar 2.12 Struktur mikro sementit

4. Perlit

Fasa ini merupakan campuran yang terdiri dari dua fasa yaitu *ferit* dengan kadar karbon 0,02% dan *sementit* dalam bentuk *lamellar* dengan kadar karbon 6,67% yang berselang seling rapat terletak bersebelahan. *Perlit* merupakan hasil dari reaksi fasa *eutectoid* pada suhu 727°C. Reaksinya : γ (0,675% C) \rightarrow α (0,02% C) + Fe₃C (6,67). Semakin cepat laju pendinginan, *lamel-lamel perlitnya* akan semakin halus dan kekuatannya akan lebih tinggi dibandingkan *perlit* kasar yang terjadi pada laju pendinginan lebih lambat.



Gambar 2.13 Struktur mikro perlit

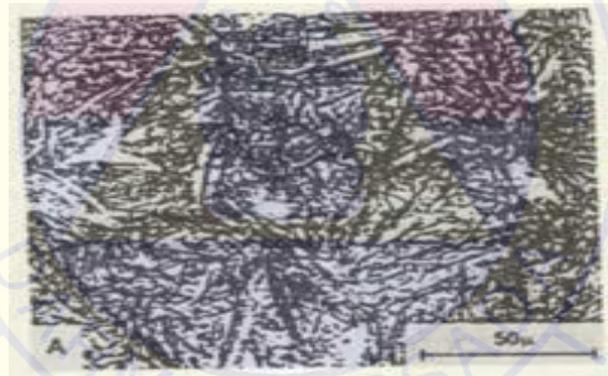
5. Bainit

Fasa ini juga campuran dari dua fasa yaitu *ferit* dan *sementit* tetapi bukan dalam bentuk *lamellar*, melainkan jarum-jarum *sementit* dengan orientasi acak

yang berada dalam bilah-bilah *ferit*. Fasa ini juga terbentuk dari fasa *austenit* tetapi laju pendinginan yang relatif cepat dibanding dengan *perlit*. Kondisi ini menyebabkan fasa *bainit* tidak terdapat pada diagram kesetimbangan baja karbon dan dapat dilihat pada diagram TTT. Fasa ini sifatnya lebih keras dari pada *ferit*, *austenit* dan *perlit*. Untuk memperoleh fasa bainit 100%, harus melalui pendinginan *isothermal* pada suhu tertentu tergantung dari tipe bajanya.

6. Martensit

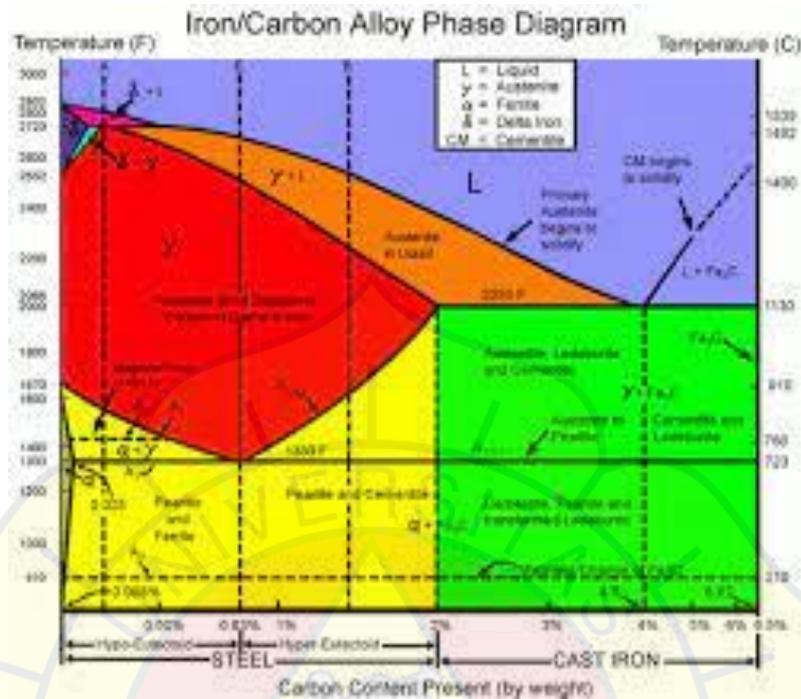
Transformasi martensit terjadi akibat pendinginan yang sangat cepat dari temperatur austenisasi sehingga atom karbon tidak sempat berdifusi keluar. Yang terjadi pada pembentukan *martensit* adalah mekanisme geseran. Sel satuan *martensit* adalah *Body Centered Tetragonal (BCT)*.



Gambar 2.14 Struktur mikro martensit

Atom karbon yang tidak sempat berdifusi keluar tinggal sebagai larutan padat intertisi yang menyebabkan distorsi pada sel satuannya dan yang menyebabkan martensit ini memerlukan tempering maka atom-atom karbon sebagian akan berdifusi keluar sehingga keliatan bertambah tetapi tetragonalitas masih ada pada sel satuannya.

Perubahan struktur fasa baja ini dapat diperkirakan dengan diagram kesetimbangan Fe-Fe₃C. Seperti terlihat pada Gambar 2.15.



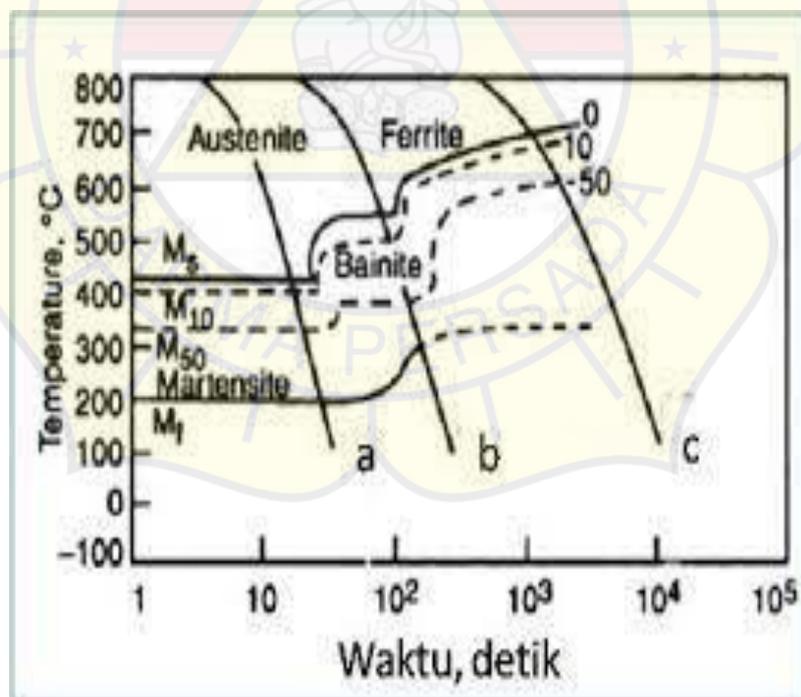
Gambar 2.15 Diagram kesetimbangan fasa Fe-Fe₃C
(Rusjdi, 2016 : 97)

Sifat mekanik dari baja sangat bergantung pada struktur mikronya. Sedangkan struktur mikro sangat mudah dirubah melalui proses perlakuan panas. Baja adalah paduan besi dengan kandungan karbon sampai maksimum sekitar 1,5%. Paduan besi dengan karbon di atas 1,5% disebut dengan besi cor (*cas iron*). Salah satu unsur paduan yang sangat penting yang dapat mengontrol sifat baja adalah karbon (C). Jika besi dipadu dengan karbon, transformasi yang terjadi pada rentang temperatur tertentu erat kaitannya dengan kandungan karbon. Diagram yang menggambarkan hubungan antara temperatur dimana terjadinya perubahan fasa selama proses pendinginan dan pemanasan yang lambat dengan kadar karbon

disebut dengan diagram fasa. Diagram ini merupakan dasar pemahaman untuk semua operasi-operasi perlakuan panas (Rusjdi, 2016 : 97).

2.9.1 Diagram CCT (*Continuous Cooling Transformation*)

Diagram *Continuous Cooling Transformation*, atau biasa disebut CCT diagram, merupakan diagram yang menggambarkan hubungan antara laju pendinginan kontinyu dengan fasa atau struktur yang terbentuk setelah terjadinya transformasi fasa. Pada gambar di bawah ini menunjukkan diagram CCT untuk baja secara skematika. Terlihat bahwa kurva-kurva pendinginan kontinyu dengan laju pendinginan yang berbeda akan menghasilkan fasa atau struktur baja yang berbeda. Setiap kurva pendingin yaitu (a), (b), (c) memperlihatkan permulaan dan akhir dari dekomposisi austenit menjadi fasa atau struktur baja akhir (lihat gambar 2.16).



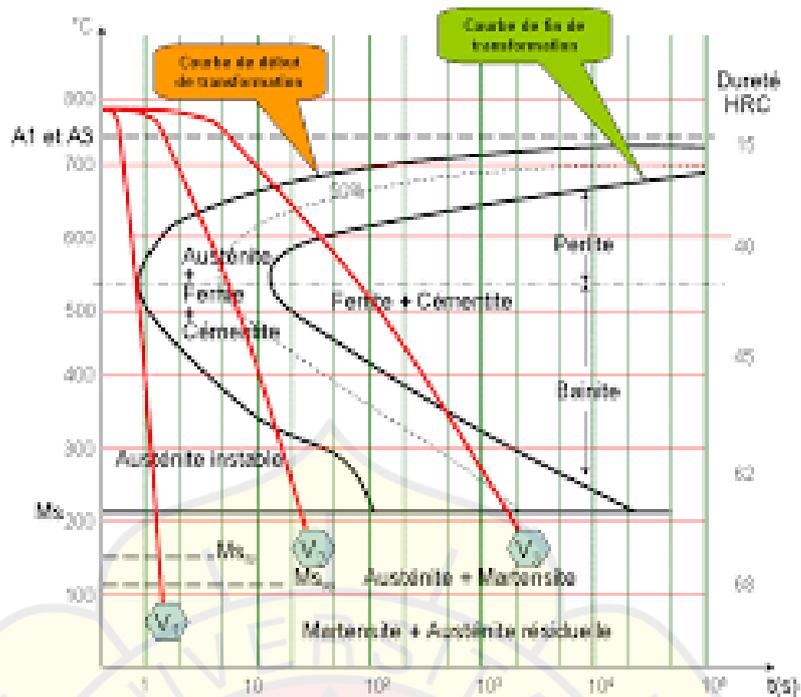
Gambar 2.16 Diagram Pendinginan Kontinyu atau Diagram CCT

(Rusjdi, 2016 : 98)

Sebagai ilustrasi, baja mengandung 0,2% karbon yang telah diautenisasi pada temperatur 920°C, kemudian didinginkan dengan laju yang berbeda sampai temperatur 200°C dan 250°C. Kurva pendingin (a) menunjukkan pendinginan secara kontinyu yang sangat cepat dari temperatur austenit sekitar 920°C ke temperatur 200°C. Laju pendinginan cepat ini menghasilkan dekomposisi fasa austenit menjadi martensit. Fasa austenit akan mulai terdekomposisi menjadi martensit pada temperatur M_s (martensit finish). Kurva pendingin (b) menunjukkan pendinginan kontinyu dengan laju sedang dari temperatur 920°C ke temperatur 250°C. Dengan laju pendinginan kontinyu ini fasa austenit terdekomposisi menjadi struktur bainit. Kurva pendingin (c) menunjukkan kontinyu dengan laju pendinginan lambat dari temperatur 920°C ke 250°C. Pendinginan lambat ini menyebabkan fasa austenit terdekomposisi menjadi fasa ferit dan perlit.

2.9.2 Diagram TTT (*Time Temperatur Transformation*)

Diagram TTT (*time temperatur transformation*) adalah suatu diagram yang menghubungkan transformasi austenit terhadap waktu dan temperatur. Proses perlakuan panas bertujuan untuk memperoleh struktur baja yang diinginkan agar cocok dengan penggunaan yang direncanakan. Struktur yang diperoleh merupakan hasil dari proses transformasi dari kondisi awal. Proses transformasi ini dapat dibaca dengan menggunakan diagram fasa namun untuk kondisi tidak seimbang diagram fasa tidak dapat digunakan, untuk kondisi seperti ini maka digunakan diagram TTT (Gambar 2.17).



Gambar 2.17 Diagram *Time Temperatur Transformation* (TTT)

(Rusjdi, 2016 : 97)

Melalui diagram ini dapat dipelajari sifat baja pada setiap tahap perlakuan panas. Diagram ini juga dapat digunakan untuk memperkirakan struktur dan sifat mekanik dari baja yang diquenching dari temperatur austenisasinya ke suatu temperatur di bawah A1. Diagram ini menunjukkan dekomposisi austenit dan berlaku untuk macam baja tertentu. Bentuk diagram tergantung dengan komposisi kimia terutama kadar karbon dalam baja. Untuk baja dengan kadar karbon kurang dari 0,83% yang ditahan suhunya dititik tertentu, akan menghasilkan stuktur perlit dan ferit. Bila ditahan suhunya pada titik tertentu tapi masih disisi sebelah atas garis horizontal, maka akan mendapatkan struktur mikro bainit (lebih keras dari perlit). Bila ditahan suhunya pada titik tertentu dibawah garis horizontal, maka akan mendapat struktur martensit (sangat keras dan getas). Ukuran butir sangat

dipengaruhi oleh tingginya suhu pemanasan, lamanya pemanasan dan semakin lama pemanasannya akan timbul butiran yang lebih besar. Semakin cepat pendinginan akan menghasilkan ukuran butir yang lebih kecil.

2.9.3 Siklus Termal Daerah Lasan

Sambungan lasan adalah sebuah komposisi yang terdiri dari 3 bagian yaitu logam las (*weld metal*), daerah pengaruh panas (*Heat Affected Zone*) disingkat daerah *HAZ* dan logam induk (*base metal*). Keadaan metalurgi dari daerah-daerah ini sangat tergantung dari material yang dilas, proses pengelasan serta jenis las yang digunakan. Logam las adalah bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Daerah ini merupakan pencampuran antara logam induk dengan *filler* metal (logam pengisi), bila metode pengelasan yang dipakai adalah menggunakan *filler* metal. Untuk mendapatkan kualitas lasan yang bagus tentunya perlu pengupayaan untuk menggunakan *filler* metal yang memiliki komposisi kimia yang sama dengan logam induknya sendiri. *Heat Affected Zone* adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan yang cepat. Logam induk sendiri adalah bagian yang tidak mengalami perubahan-perubahan struktur dan sifat selama proses pengelasan.

Dalam pengelasan cair terdapat kemungkinan untuk terbentuknya berbagai macam cacat, antara lain pemisahan atau segregasi, lubang-lubang halus dan retak lasan. Jumlah dan macam kerusakan atau cacat ini sangat tergantung dari laju pendinginan pada saat pengelasan. Siklus termal daerah lasan adalah proses pemanasan dan pendinginan di daerah lasan. Tetapi dari kedua proses tersebut,

kondisi pendinginan dan pembekuan logam yang mencair saat pengelasan merupakan proses yang paling berpengaruh terhadap kualitas fisis dan mekanis hasil pengelasan. Reaksi metalurgi yang terjadi selama proses tersebut antara lain :

1. Pemisahan (*Segregation*)

Meliputi adanya pemisahan secara makro, pemisahan gelombang dan pemisahan mikro. Pemisahan makro adalah perubahan komponen secara perlahan-lahan yang terjadi mulai dari sekitar sektor garis lebur menuju garis sumbu las. Pemisahan gelombang adalah perubahan komponen karena pembekuan yang terputus yang terjadi pada proses terbentuknya gelombang manik las. Sedangkan pemisahan mikro adalah perubahan komponen yang terjadi dalam satu pilar atau dalam bagian dari satu pilar.

2. Lubang-lubang halus (*Porosity*)

Lubang-lubang halus terjadi disebabkan adanya gas yang tidak larut dalam logam padat. Lubang-lubang ini disebabkan adanya 3 macam pembentukan gas yaitu :

- a. Pelepasan gas karena perbedaan batas kelarutan antara logam cair dan logam padat pada suhu pembentukan.
- b. Terbentuknya gas karena adanya reaksi kimia didalam logam las.
- c. Penyusupan gas kedalam atmosfer busur.

Gas yang terbentuk karena perbedaan batas kelarutan dalam baja adalah gas hidrogen dan nitrogen, sedangkan yang terjadi akibat reaksi kimia adalah terbentuknya gas CO dalam logam cair dan yang menyusup adalah gas-gas

pelindung atau udara yang terkurung dalam akar kampuh las.

3. Deoksidasi

Deoksidasi adalah proses untuk menghilangkan oksida yang terbentuk dalam lasan baja. Dengan menghilangkan oksida tersebut maka oksida yang terdapat dalam larutan baja juga akan berkurang, karena ketangguhan logam las akan turun dengan naiknya kadar oksigen.

2.9.4 Retak Las

Diantara pengaruh-pengaruh yang terdapat sebagai akibat dari proses pengelasan adalah kegagalan kualifikasi hasil lasan dengan adanya cacat las yang berupa retak las. Sebagai baja konstruksi las, baja karbon mempunyai kepekaan las yang rendah bila dibandingkan dengan baja karbon lainnya atau dengan baja karbon paduan, tetapi retak las pada baja ini dapat terjadi dengan mudah pada pengelasan pelat tebal. Retak las dapat dibagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok retak dingin dan kelompok retak panas.

2.9.4.1 Retak dingin

Retak dingin adalah retak yang terjadi di daerah las pada suhu dibawah suhu transformasi *martensit* (*Ms*) yang tingginya kira-kira 300°C. Retak dingin terjadi bukan hanya pada daerah *HAZ*, tetapi juga logam las. Retak dingin pada daerah *HAZ* biasanya berupa retak bawah manik las, retak akar dan retak kaki, sedangkan pada logam las adalah jenis retak memanjang dan retak melintang. Retak dingin disebabkan oleh tiga hal dibawah ini :

a. Struktur dari 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. Karena itu kadar dari unsur paduan yang mempertinggi sifat mampu keras baja harus diusahakan serendah mungkin.

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 masih cair, logam ini menyerap hidrogen dengan jumlah besar yang dilepaskan cara difusi pada suhu rendah kelarutan hidrogen menjadi turun. Sumber dari hidrogen yang diserap adalah air dan zat organik yang terkandung di dalam fluks atau udara. Disamping itu minyak, zat organik dan air yang melekat pada rongga-rongga dan permukaan pelat atau kawat las juga merupakan sumber hidrogen.

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 pelat akan mempertinggi besarnya tegangan sisa dan akan menyebabkan terjadinya retak las.

2.9.4.2 Retak panas

Retak panas adalah retak yang terjadi pada suhu diatas 550°C. Retak panas dibagi dua kelas yaitu retak karena pembebasan tegangan pada daerah pengaruh panas yang terjadi pada suhu antara 550°C - 700°C dan

retak yang terjadi pada suhu diatas 900°C yang terjadi pada peristiwa pembekuan logam las. Retak panas pada logam las karena pembekuan biasanya berbentuk retak kawah dan retak memanjang, sedang retak panas karena pembebasan tegangan umumnya terjadi pada daerah kaki di dalam daerah pengaruh panas. 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 retak ini akan terjadi pada batas butir, karena pada tempat itu biasanya terbentuk senyawa dengan titik cair rendah. Karena itu unsur-unsur Si, Ni, S dan P akan mempertinggi kepekaan baja terhadap retak jenis ini

