

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Pengelasan

Pengelasan secara umum merupakan proses penyambungan logam yang dilakukan dengan memanfaatkan energi panas untuk mencairkan logam induk dan logam pengisi sehingga terbentuk ikatan metalurgi yang kuat setelah proses pendinginan. Energi panas dalam proses pengelasan umumnya dihasilkan dari sumber listrik yang menciptakan busur listrik antara elektroda dan logam induk (Callister & Rethwisch, 2018; Messler, 2008).

Arus listrik dalam proses pengelasan berfungsi sebagai media penghantar energi panas dari mesin las ke elektroda dan logam induk. Besarnya arus yang digunakan sangat berpengaruh terhadap kestabilan busur listrik, tingkat penetrasi, serta kualitas sambungan las yang dihasilkan. Pengaturan arus yang tidak tepat dapat menyebabkan berbagai cacat las dan penurunan sifat mekanik sambungan (Modenesi et al., 2021).

Kampuh las merupakan celah atau bentuk sambungan pada material yang akan dilas dan berfungsi sebagai ruang pengisian logam cair selama proses pengelasan berlangsung. Bentuk dan ukuran kampuh harus disesuaikan dengan ketebalan material serta posisi pengelasan agar penetrasi dan kekuatan sambungan dapat tercapai secara optimal (Kumar et al., 2021).



Gambar 2. 1 Pengertian Pengelasan
(Fransiska,2022)

2.2 Pengelasan SMAW

Pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), yang dikenal juga sebagai las busur listrik, merupakan proses pengelasan yang menggunakan panas dari busur listrik untuk mencairkan logam induk dan elektroda sebagai bahan pengisi. Busur listrik terbentuk akibat adanya loncatan ion listrik antara ujung elektroda dan permukaan logam induk, sehingga menghasilkan panas yang cukup tinggi untuk mencairkan kedua material tersebut (American Welding Society, 2020).

Suhu panas yang dihasilkan dari busur listrik pada proses pengelasan SMAW dapat mencapai sekitar 4.000°C hingga 4.500°C, sehingga mampu mencairkan berbagai jenis baja struktural. Sumber arus listrik yang digunakan pada proses SMAW dapat berupa arus bolak-balik (*alternating current/AC*) maupun arus searah (*direct current/DC*), tergantung pada jenis elektroda dan kebutuhan pengelasan (AWS, 2020).

Proses pengelasan terjadi ketika ujung elektroda disentuhkan ke permukaan material dasar sehingga terjadi hubungan singkat. Setelah itu elektroda ditarik sedikit untuk membentuk busur listrik yang stabil. Panas dari busur listrik

akan mencairkan elektroda dan logam induk, kemudian cairan logam tersebut menyatu membentuk logam las (*weld metal*) setelah proses pendinginan (Kou, 2021).

Besarnya arus listrik yang digunakan dalam pengelasan SMAW sangat bergantung pada diameter elektroda dan jenis elektroda yang digunakan. Pemilihan arus yang sesuai bertujuan untuk menghasilkan penetrasi yang baik serta meminimalkan cacat las. Rentang arus pengelasan untuk berbagai ukuran elektroda dan tipe elektroda telah ditetapkan dalam standar pengelasan dan rekomendasi pabrikan elektroda (Sharma & Singh, 2022).

2.3 Elektroda

Pada saat pengelasan berlangsung, lasan merupakan logam yang mencair jika bersentuhan dengan udara di sekitarnya maka oksigen maupun nitrogen yang terdapat pada udara akan beraksi dengan logam cair tersebut. Reaksi oksidasi tersebut dapat mengakibatkan kualitas dari lasan menjadi menurun, yaitu terdapatnya rongga-rongga udara pada lasan atau terjadinya sambungan yang keropos (Messler, 2008; Kou, 2021).

Pada las busur listrik, untuk menghindari terjadinya sambungan yang keropos dan untuk penguatkan kualitas sambungan las maka dicari bermacam-macam cara untuk melindungi lasan dari pengaruh udara atau atmosfer tersebut, yaitu dengan menggunakan terak las sebagai pelindung atau menggunakan bahan tambah / elektroda yang berselaput / berbalut terbuat dari bahan yang dapat melindungi las dari pengaruh atmosfer tersebut (Messler, 2008; American Welding Society, 2020).

Elektroda baja lunak dan baja paduan rendah untuk las busur listrik menurut klarifikasi AWS (*American Welding*

Society) dinyatakan dengan tanda Exxxx yang artinya sebagai berikut. E menyatakan elektroda, xx (dua angka) sesudah E menyatakan kekuatan tarik deposit las dalam ribuan lb/in², lihat tabel berikut: (American Welding Society, 2020; Eka Yogaswara et al., 2008).

Tabel 2. 1 Kekuatan tarik menurut AWS

Klarifikasi	Kekuatan Tarik	
	lb/in ²	Kg/mm ²
E 60 XX	60.000	42
E 70 XX	70.000	49
E 80 XX	80.000	56
E 90 XX	90.000	63
E 100 XX	100.000	70
E 110 XX	110.000	77
E 120 XX	120.000	84

X (angka ketiga) menyatakan posisi pengelasan.

- Angka 1 untuk pengelasan segala posisi
- Angka 2 untuk pengelasan posisi datar dan bawah tangan

X (angka keempat) menyatakan jenis selaput dan jenis arus yang cocok dipakai untuk pengelasan, lihat tabel berikut:

Tabel 2. 2 Jenis Selaput dan Pemakaian Arus

Angka ke 4 (1)	Jenis Selaput (2)	Pemakaian Arus (3)
0	Solulosa Sodium	DC (+)

1	Solulosa Kalium	AC,DC (+)
2	Rutil natrium	AC,DC (-)
3	Rutil Kalium	AC,DC (+) atau (-)
4	Rutil serbuk besi	AC,DC (+) atau (-)
5	Natrium hidrogen rendah	AC,DC (+)
6	Natrium hidrogen tinggi	AC,DC (+)
7	Serbuk besi oksida besi	AC,DC (+) atau (-)
8	Serbuk besi hidrogen rendah	AC,DC (+)

(Eka Yogaswara, dkk. 2008 hal.44)

Contoh E6013

Artinya :

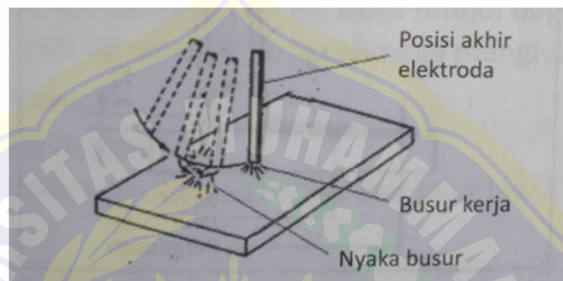
- Kekuatan tarik minimum dari deposit las adalah 60.000 lb/in² atau 42 Kg/mm²
- Dapat dipakai untuk pengelasan segala posisi
- Jenis selaput elektroda rutil kalium dan pengelasan dengan arus AC atau DC+ atau DC-

2.4 Cara Menyalakan Busur

Untuk memulai pengelasan diperlukan busur las listrik yang baik yaitu dengan cara pengaturan arus / ampere yang tepat sesuai dengan tipe dan ukuran elektroda. Menyalakan busur dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu:

2.4.1 Dengan Cara Menggoreskan

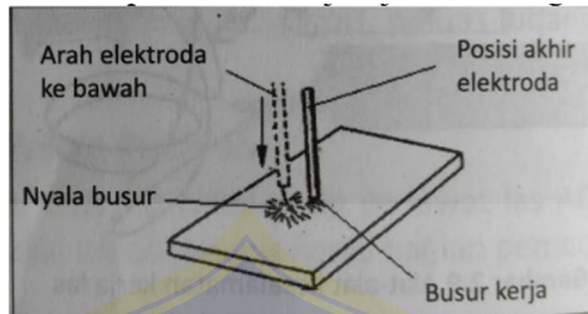
Untuk dapat mendapatkan busur dengan cara menggoreskan elektroda pada benda kerja dilakukan jika pesawat las yang digunakan Adalah pesawat jenis las AC, menyalakan busur dengan menggoreskan elektroda pada benda kerja dijelaskan dengan gambar berikut



Gambar 2. 2 Menyalakan Busur Pada Pesawat Las AC
(Eka Yogaswara, dkk. 2008 hal.53)

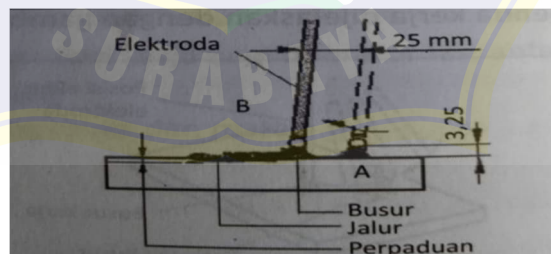
2.4.2 Dengan Cara Menyentuhkan

Untuk mendapatkan busur dengan cara menyentuhkan yaitu sentuhkan elektroda pada benda kerja, kemudian tarik dengan jarak tertentu sehingga terdapat busur api listrik. Cara tersebut dilakukan jika pesawat kerja yang digunakan adalah las jenis DC, menyalakan busur dengan menyentuhkan elektroda pada benda kerja dijelaskan dengan gambar berikut.



Gambar 2. 3 Menyalakan Busur Pada Pesawat LasDC
(Eka Yogaswara, dkk. 2008 hal.54)

Jika elektroda harus diganti sebelum pengelasan selesai. Maka untuk melanjutkan pengelasan busur perlu dinyalakan lagi. Menyalakan busur kembali ini dilakukan pada tempat kurang lebih 25 mm di muka las yang terhenti seperti pada gambar. Jika busur berhenti di B, busur dinyalakan lagi di A dan kembali ke B untuk melanjutkan pengelasan. Bilamana busur sudah terjadi, elektroda diangkat sedikit dari permukaan benda kerja hingga jaraknya \pm sama dengan diameter elektroda. Untuk elektroda berdiameter 3,2 mm, jarak ujung elektroda dengan permukaan bahan dasar \pm 3,2 mm.

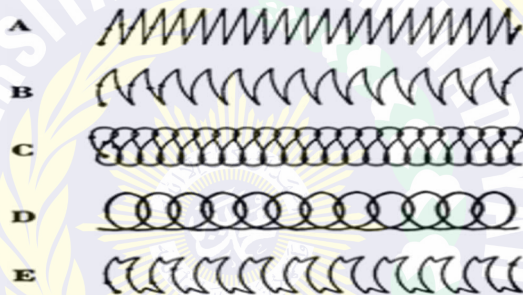


Gambar 2. 4 Mengganti Elektroda
(Eka Yogaswara, dkk. 2008 hal.54)

2.5 Pergerakan Elektroda Pengelasan

Ada berbagai cara didalam menggerakan/mengayunkan elektroda las yaitu :

- Elektroda digerakan dengan melakukan maju dan mundur, metoda ini salah satu bentuk metoda *weaving*.
- Bentuk *weaving* lainnya yaitu dengan melakukan gerakan seperti setengah bulan.
- Gerakan elektroda yang menyerupai bentuk angka 8
- Elektroda dengan melakukan gerakan memutar.
- Gerakan dengan membentuk *heisitation*.

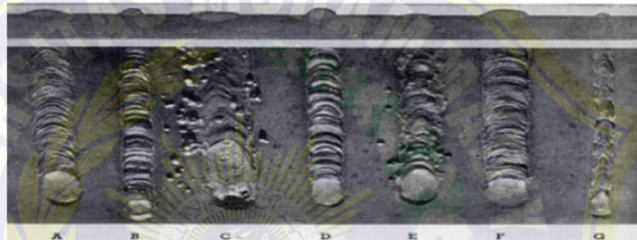


Gambar 2. 5 Gerakan Pengelasan
(Zamil, 1999, hal.7)

Semua gerakan mempunyai tujuan untuk mendapatkan deposit logam las dengan permukaan rata, mulus terhindar dari terjadinya takik-takik dan termasuk terak-terak, yang terpenting dalam gerakan elektroda ini adalah ketepatan sudut dan kestabilan kecepatan. Ayunan elektroda las agar berbentuk anyaman atau lipatan manik las maka lebar las dibatasi sampai 3 (tiga) kali besarnya diameter elektroda.

Kecepatan pengelasan tergantung dari bahan induk, jenis elektroda, diameter inti elektroda, geometri sambungan, ketelitian sambungan agar dapat mengelas lebih cepat

diperlukan arus yang lebih tinggi. Polaritas listrik mempengaruhi hasil dari busur listrik. Sifat busur listrik pada DC akan lebih stabil dari pada AC. Terdapat dua jenis polaritas lurus, dimana benda kerja positif dan *electrode negative* (DCEN). Polaritas balik adalah sebaliknya. Karakteristik dari polaritas balik yaitu pemindahan logam terjadi dengan cara penyemburan, maka polaritas ini mempunyai hasil pengelasan yang lebih dalam dibanding dengan polaritas lurus (DCEN) dari keterangan diatas dapat disimpulkan seperti pada tabel dan gambar dibawah ini:



Gambar 2. 6 Karakteristik Hasil Pengelasan
(Zamil.1999. hal.5)

Tabel 2. 3 Karakteristik Hasil Pengelasan

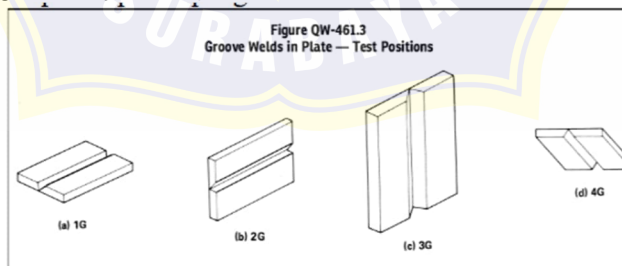
No	Karakteristik Hasil Pengelasan				
	Variabel Operasi (1)	Suara Arc (2)	Penetrasi (3)	Burn Off Electrode (4)	Bentuk Bead (5)
A	Normal Ampere, Normal Volts, Kecp. Normal.	Percikan kecil, Suara gemercak kuat	Baik, dalam dan galengan	Bentuk normal	Fusion sangat baik
B	Amper Rendah, Normal Volts, Kecp. Normal.	Percikan tidak beraturan, suara gemercak kecil	Dangkal	Tidak besar, beda dgn, yang diatas.	Tonjolan tinggi
C	Amper Tinggi, Normal Volts, Kecp. Normal	Suaranya seperti ledakan, jarang beraturan	Dalam dan Panjang	Coating tertinggal dan lebar serta panjang	Luas bead tidak lebar, Fusion baik
D	Normal Amper, Kecepatan Normal, Volts rendah	Percikan kecil dan Tenang	Kecil	Coating membentuk uk kawa	Tonjolan tinggi dan lebih lebar
E	Normal Amps, Kecepatan Normal, Volts Tinggi	Suaranya halus	Lebar dan Dangkal	Rata dan membentuk kawah	Lebar

F	F Normal Amps, Normal Volts, Kec. Rendah	Normal	Kawah Normal	Normal	Bead lebar
G	Normal Amps, Normal Volts, Kec. Tinggi	Normal	Lebar dan Dangkal	Normal	Bead kecil dan Undercut

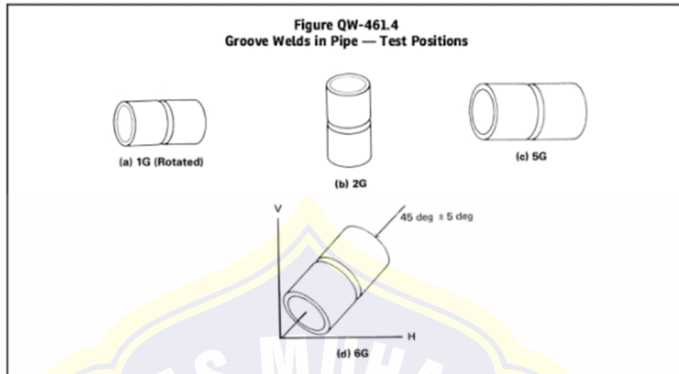
(Zamil.1999.hal.6)

2.6 Teknik Pengelasan Untuk Jenis Sambungan

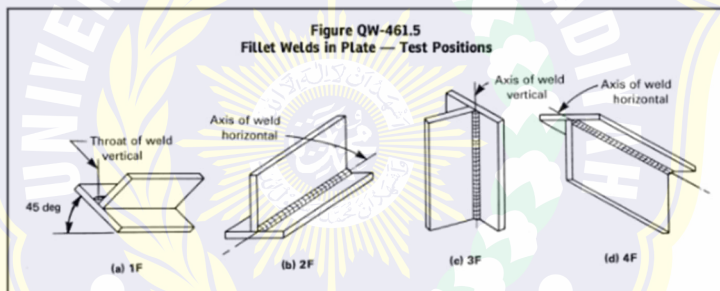
Posisi pengelasan yang diambil oleh operator mesin las biasanya tergantung dari letak kampuh yang akan di las (American Welding Society, 2020). Simbol huruf G berasal dari kata *groove* dimana dua material logam yang akan disambung diletakan dalam posisi sejajar dan diberi kerenggan semacam alur yang biasa disebut kampuh las (Wirjosumarto & Okumura, 2013). Sedangkan untuk simbol F berasal dari kata *fillet* yang artinya suatu bentuk sudut yang berada pada pertemuan dua garis atau bentuk salah satu tepi/sisi dari benda yang berbentuk setengah lingkaran atau membentuk busur (Messler, 2008). Berikut posisi-posisi pengelasan (American Welding Society, 2020).



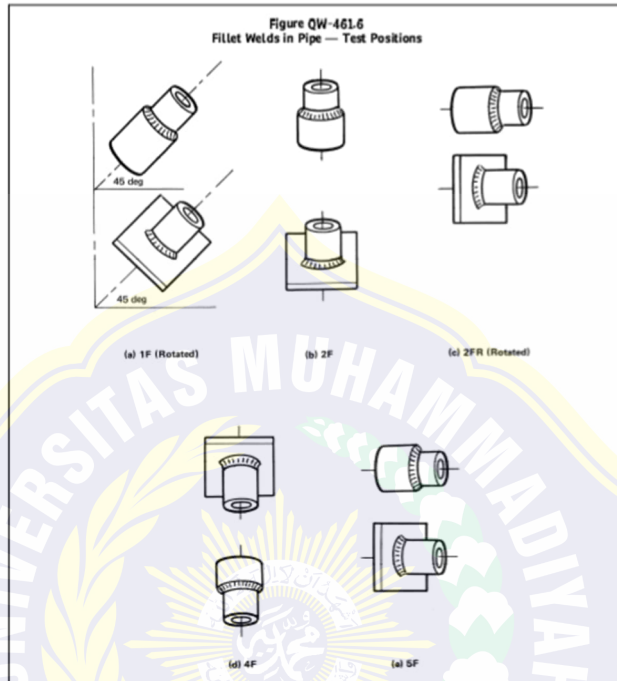
Gambar 2. 7 Groove Welds In Plate
(ASME Section IX.2017.hal 182)



Gambar 2. 8 *Groove Weld In Pipe*
(ASME Section IX.2017.hal 182)



Gambar 2. 9 *Fillet Welds In Plate*
(ASME Section IX.2017.hal 183)



Gambar 2. 10 *Fillet Welds In Pipe*
(ASME Section IX.2017.hal 184)

2.7 Klarifikasi Sambungan Las

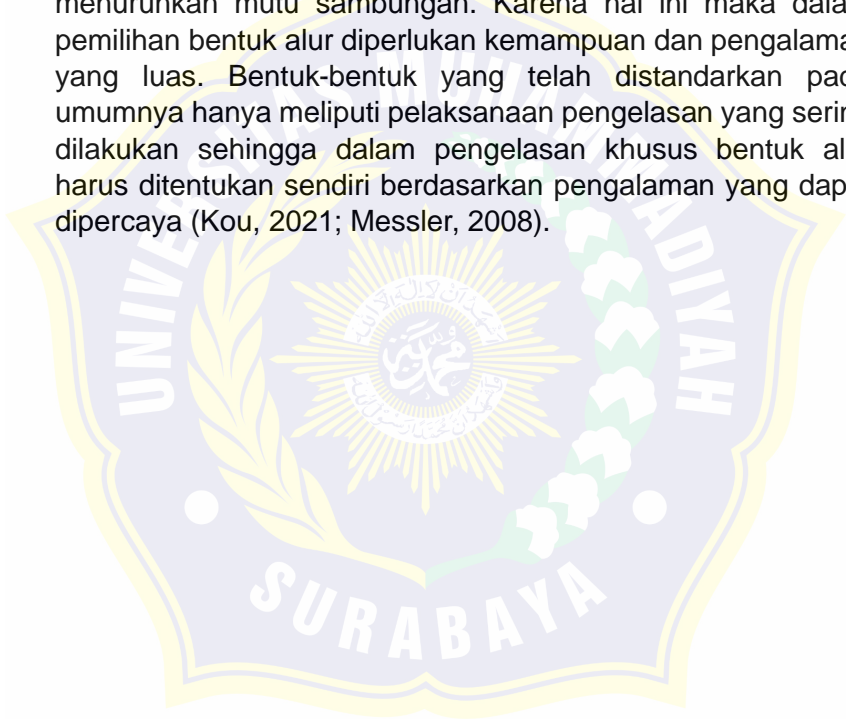
Secara umum sambungan las dalam konstruksi baja pada dasarnya dibagi dalam sambungan tumpul, sambungan T, sambungan sudut (American Welding Society, 2020; Wirjosumarto & Okumura, 2013).

1. Sambungan Tumpul

Sambungan tumpul adalah jenis sambungan yang paling efisien. Sambungan ini dibagi lagi menjadi dua yaitu sambungan penetrasi penuh dan sambungan penetrasi sebagian. Sambungan penetrasi penuh dibagi lebih lanjut

menjadi sambungan tanpa pelat pembantu dan sambungan dengan pelat pembantu (American Welding Society, 2020).

Bentuk alur dalam sambungan tumpul sangat mempengaruhi efisiensi pengerjaan, efisiensi sambungan dan jaminan sambungan. Pada dasarnya dalam memilih bentuk alur harus menuju kepada penurunan masukan panas dan penurunan logam las sampai kepada harga terendah yang tidak menurunkan mutu sambungan. Karena hal ini maka dalam pemilihan bentuk alur diperlukan kemampuan dan pengalaman yang luas. Bentuk-bentuk yang telah distandarkan pada umumnya hanya meliputi pelaksanaan pengelasan yang sering dilakukan sehingga dalam pengelasan khusus bentuk alur harus ditentukan sendiri berdasarkan pengalaman yang dapat dipercaya (Kou, 2021; Messler, 2008).



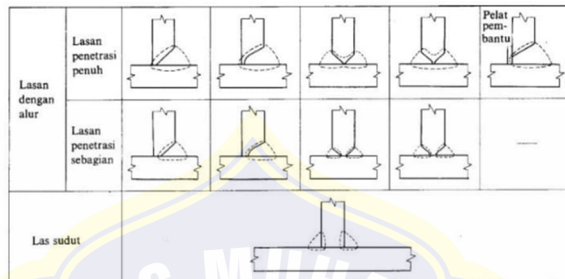
Jenis lasan Jenis alur	Lasan dengan alur		
	Lasan Penetrasi penuh tanpa pelat penahan	Lasan penetrasi penuh dengan pelat penahan	Lasan penetrasi sebagian
Persegi (I)			
V tunggal (V)			
Tirus tunggal (V)			
U tunggal (U)			
V ganda (X)		—	
Tirus ganda (K)		—	
U ganda (H) (DU)		—	
J tunggal (J)		—	
J ganda (DJ)		—	

Gambar 2. 11 Alur Sambungan Las Tumpul
(Harsono & Toshie, 2008 hal.158)

2. Sambungan T

Hal-hal yang dijelaskan untuk sambungan tumpul diatas juga berlaku untuk sambungan jenis ini. Dalam pelaksanaan pengelasan mungkin sekali ada bagian batang yang menghalangi yang dalam hal ini dapat diatasi dengan

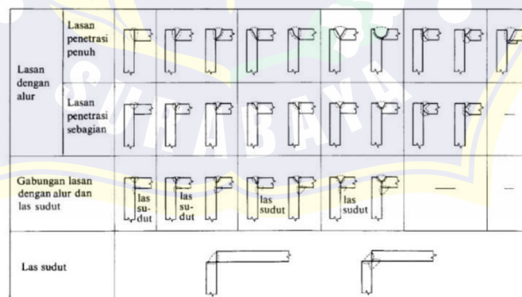
memperbesar sudut alur (American Welding Society, 2020; Wirjosumarto & Okumura, 2013).



Gambar 2. 12 Sambungan T
(Harsono & Toshie, 2008 hal.159)

3. Sambungan Sudut

Dalam sambungan ini dapat terjadi penyusutan dalam arah tebal pelat yang dapat menyebabkan terjadinya retak lamel. Hal ini dapat dihindari dengan membuat alur pelat tegak. Bila pengelasan dalam tidak dapat dilakukan karena sempitnya ruang maka pelaksanaannya dapat dilakukan dengan pengelasan tembus dengan pelat pembantu (Kou, 2003; Messler, 2008; American Welding Society, 2020).




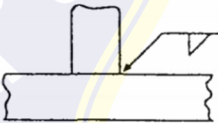

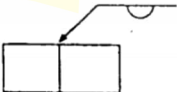
Gambar 2. 13 Sambungan Sudut
(Harsono & Toshie, 2008 hal.160)

2.8 Simbol Las

Seseorang operator menerima *job* (pekerjaan) berupa gambar kerja dengan simbol-simbol lasnya, simbol las berfungsi sebagai alat komunikasi untuk menyampaikan pesan dari perancang kepada operator las. Oleh karena itu, seorang operator las harus memiliki pengetahuan mengenai simbol-simbol las tersebut. Selain operator las, seorang perancang las juga harus mampu menyampaikan pesan bentuk las, macam bentuk las dan apa yang dikehendakinya. Supaya tidak salah persepsi maka simbol las yang digunakan harus memenuhi standar nasional atau standar internasional. Berikut ini adalah macam-macam simbol las secara umum / dasar yang digunakan dalam berbagai konstruksi pengelasan (American Welding Society, 2020; Wirjosumarto & Okumura, 2013).






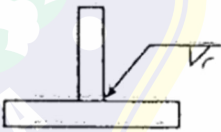
Berikut ini adalah macam-macam simbol las secara umum / dasar yang digunakan dalam berbagai konstruksi pengelasan (American Welding Society, 2020):

Tabel 2. 4 Simbol Las Secara Umum

Bentuk Pengelasan	Gambar	Simbol
Sambungan Sudut (<i>Fillet</i>)		
Jalur Las		


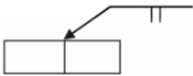

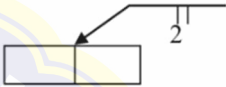
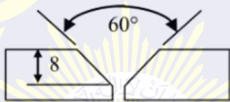

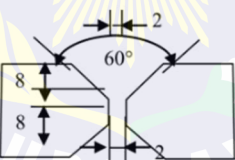
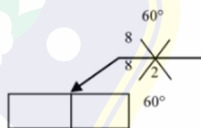
(Sukaina, Tarkina, Fandi, 2013, hlm. 10)

Tabel 2. 5 Bentuk Permukaan Jalur Las

Tipe Pengelasan (1)	Gambar (2)	Simbol (3)
Rata		
Cembung		
Cekung		

(Sukaina, Tarkina, Fandi, 2013, hlm. 10)

Tabel 2. 6 Penerapan Simbol Las Sambungan Tumpul

Bentuk Sambungan	Gambar	Simbol
Kampuh I Tertutup		
Kampuh I Terbuka		
Kampuh V		
Kampuh X		

(Sukaina, Tarkina, Fandi, 2013, hlm. 10)

Tabel 2. 7 Penerapan Simbol Las Sambungan Sudut

Bentuk Sambungan (1)	Gambar (2)	Simbol (3)
Bentuk T dilas <i>continue</i> pada satu sisi		
Bentuk T dilas <i>continue</i> pada dua sisi		

(Sukaina, Tarkina, Fandi, 2013, hlm. 10)

2.9 Posisi Pengelasan

Pada proses penyambungan logam, sering sekali dilakukan dengan posisi tertentu untuk mengikuti perencanaan serta perancangan konstruksi yang akan dilas. Pada pengaplikasiannya dalam kehidupan sehari-hari sering kita menemukan pengelasan yang dilakukan pada lantai, dinding maupun langit-langit konstruksi. Dari beberapa keadaan tersebut, maka dalam pengelasan ada penggolongan posisi dalam pengelasan. Posisi pengelasan tersebut adalah 1F, 1G, 2F, 2G, 3F, 3G, 4F, 4G. Dari penggolongan tersebut pada dasarnya posisi pengelasan secara garis besar digolongkan pada posisi *down hand*, *horizontal*, *vertical*, dan *overhead*. Terlebih lagi pada proses pengelasan berkelanjutan yaitu suatu konstruksi memerlukan pengelasan yang berurutan yang cepat

dengan posisi yang berbeda-beda. Dengan adanya keharusan posisi tersebut, maka akan memberikan hasil yang berbeda terhadap kekuatan dan kekerasan hasil lasan (Cary ,1980). Posisi pengelasan dapat diartikan sebagai posisi seorang juru las terhadap benda yang dilas (Sunaryo, 2008).

2.9.1. Posisi bawah tangan (*down hand*) 1G/1F

Jika benda kerja terletak di atas bidang datar dan proses pengelasan dilakukan di bawah tangan, operator biasanya menggunakan posisi ini karena benda kerja akan lebih mudah dikerjakan.



Gambar 2. 14 Posisi bawah tangan (*down hand*) IF / IG
(Miller,2021)

2.9.2. Posisi mendatar (*horizontal*) 2G/2G

Pada posisi ini, benda kerja berdiri tegak dengan pengelasan sejajar dengan pundak operator dan sedikit menurun dibandingkan dengan posisi *down hand*.



Gambar 2. 15 Posisi mendatar (*horizontal*) 2F / 2G
(Miller,2021)

2.9.3. Posisi Tegak (*Vertical*) 3G/3F

Posisi ini lebih sulit pengerjaannya, karena adanya gaya berat cairan bahan pengisi dan bahan dasar. Pada posisi ini benda kerja berdiri tegak dan pengelasan juga berjalan tegak dengan arah naik turun. Untuk mendapatkan pengelasan yang baik dibutuhkan.



Gambar 2. 16 Posisi Tegak (*vertical*) / 3 F / 3 G (Miller,2021)

2.9.4. Posisi atas kepala (*Over Head*) 4G/4F

Untuk posisi yang sulit ini operator sudah harus berpengalaman dalam soal mengelas. Dan harus memakai pakaian (baju/apron) las lengkap dengan kelengkapan lain yang berhubungan dengan keselamatan kerja. Pada pengelasan posisi *over head* benda kerja terletak diatas operator dan pengelasannya dilakukan.



Gambar 2. 17 Posisi atas kepala (*over head*) /4G /4F (Miller,2021)

2.10 Kuat Arus Pengelasan

Besarnya aliran listrik yang keluar dari mesin las disebut dengan arus pengelasan. Arus las harus disesuaikan dengan jenis bahan dan diameter elektroda yang di gunakan dalam pengelasan, Arus listrik yang mempunyai arus besar ini adalah menimbulkan bunga api pada elektroda las yang berhubungan dengan bagian yang akan disambung (dilas) sehingga terjadilah panas yang tinggi untuk melelehkan logam (Daryanto, 1982: 54). Sumber arus pada mesin las listrik adalah arus bolak-balik (AC), arus searah (DC) atau juga bisa AC-DC. Mesin las AC mesin yang dibutuhkan adalah arus listrik dari PLN. Kelebihan menggunakan mesin las AC adalah perlengkapan yang relatif lebih murah, nyala busur kecil sehingga mengurangi timbulnya keropos pada rigi-rigi las (American Welding Society, 2020; Kou, 2021).

Arus las merupakan parameter las yang langsung mempengaruhi penembusan dan kecepatan pencairan logam induk, makin tinggi arus las maka makin besar penembusan dan kecepatan pencairannya. Besar arus pada pengelasan mempengaruhi hasil pengelasan, bila arus terlalu rendah maka perpindahan cairan dari ujung elektroda yang digunakan sangat sulit dan busur listrik yang terjadi tidak stabil, Arus pengelasan yang diperlukan tergantung pada diameter elektroda yang digunakan, tebal benda kerja, jenis elektroda yang digunakan, geometri sambungan dan posisi pengelasan (Kou, 2021; ASTM E8/E8M, 2022).

Adapun tabel hubungan diameter dan arus pengelasan dapat dilihat pada Tabel 2.8 berikut (American Welding Society, 2020).

Tabel 2. 8 Hubungan Diameter dan Arus Pengelasan

Diameter Kawat Las	Arus Las Parameter (Ampere)
1.6	24-45
2.0	50-75
2.6	75-100
3.3	95-130
4.0	135-180
5.0	155-240

Panas yang terjadi tidak cukup untuk melelehkan logam dasar, sehingga menghasilkan bentuk rigi-rigi las yang kecil dan tidak rata serta penembusan pada logam induk kurang dalam. Jika arus terlalu besar, maka akan menghasilkan manik melebar, butiran percikan kecil, penetrasi dalam serta matrik las tinggi (Arifin, 1997).

Untuk pengelasan pada daerah dengan daya serap panas yang tinggi diperlukan arus listrik yang lebih besar dan dalam beberapa kasus memerlukan tambahan panas. Sedangkan pada pengelasan baja paduan yang daerah *heat affected zone* (HAZ)-nya mudah mengalami pengerasan akibat pendinginan cepat, diperlukan masukan panas yang lebih tinggi melalui pengaturan arus pengelasan yang lebih besar untuk mengendalikan laju pendinginan (Callister & Rethwisch, 2020; Kou, 2021).

Pengaturan besar kecilnya arus dilakukan dengan cara memutar tombol pengatur arus. Besar arus yang digunakan dapat dilihat pada skala yang ditunjukkan oleh amper meter pada mesin las. Pada masing-masing mesin las, arus minimum dan arus maksimum yang dapat dicapai berbeda-beda,

umumnya berkisar antara 100 amper sampai 600 amper (American Welding Society, 2020).

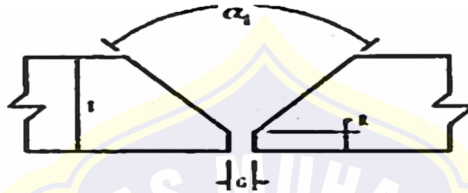
2.11 Kampuh Pengelasan

Kekuatan sambungan yang tinggi membutuhkan penembusan atau penetrasi yang cukup yang dihasilkan dari masukan panas las. Pada dasarnya besar kuat arus yang tinggi akan menyebabkan terjadinya penembusan las yang semakin besar, karena dengan adanya penembusan yang besar mengakibatkan las bagian dalam semakin besar. Apabila las bagian dalam besar maka las bagian luar akan lebih semakin besar, sehingga berpengaruh besar pula terhadap kekuatan hasil pengelasan (Kah et al., 2021; Zhang et al., 2022). Agar sambungan antara dua bagian logam memiliki mutu yang baik diperlukan suatu pengelasan yang tepat dan sambungan serta bentuk kampuh las yang sesuai dengan kegunaan dari hasil lasan tersebut (Chen et al., 2023).

Sambungan tumpul adalah jenis sambungan yang paling efisien (Wiryosumarto, 2000). Bentuk alur sambungan tumpul sangat mempengaruhi efisiensi pengerjaan sambungan dan jaminan sambungan. Pemilihan besar sudut pada alur sangat penting, pada dasarnya pemilihan sudut alur pada bentuk sambungan kampuh V ini harus menuju kepada penurunan masukan panas dan penurunan logam las sampai kepada harga terendah yang tidak menurunkan mutu sambungan. Besar sudut sambungan akan mempengaruhi

masukannya yang selanjutnya berpengaruh pada siklus termal (Li et al., 2021; Kumar & Shahi, 2023).

Adapun gambar dari bentuk dan ukuran sambungan las tumpul dengan alur kampuh V dapat dilihat pada Gambar 2.18 berikut.



Gambar 2. 18 Bentuk dan ukuran sambungan las tumpul dengan alur kampuh V (Singh et al., 2022)

Keterangan :

R	= kaki akar	= 2mm
G	= celah akar	= 6mm
α	= sudut alur	= 60°
t	= tebal	= 6mm

Kampuh las dapat dipersiapkan dengan proses pemecinan atau pemotongan panas lainnya. Metode pemotongan panas yang dapat dipakai meliputi pemotongan gas, pemotongan busur plasma, pemotongan busur udara, pemotongan laser, dan sebagainya (Gao et al., 2021). Pada penelitian ini penulis akan menggunakan jenis sambungan alur berbentuk V tunggal karena pemilihan bentuk alur kampuh tersebut berdasarkan ketentuan dari ketebalan bahan, elektroda, dan pertimbangan teknis lainnya (Chen et al., 2023).

2.12 Pengujian Tidak Merusak (*Non Destructive Test*)

Non Destructive Test (NDT) merupakan serangkaian metode pengujian *modern* yang digunakan secara luas dalam kegiatan manufaktur, pabrikasi, dan inspeksi untuk memverifikasi serta menganalisis integritas, keandalan, sifat

material, komponen, maupun produk tanpa menyebabkan kerusakan pada benda uji. Penerapan metode NDT memungkinkan pengendalian kualitas yang lebih efektif, pengurangan biaya produksi, serta pemeliharaan tingkat kualitas yang konsisten pada komponen yang digunakan baik di sektor industri maupun nonindustri (Hellier, 2021; ASM International, 2022).

Berbagai jenis metode *Non-Destructive Testing* (NDT) telah dikembangkan dan diaplikasikan sesuai dengan tujuan pengujian, jenis material, serta karakteristik cacat yang ingin dideteksi. Metode NDT yang paling umum digunakan dalam industri meliputi *Visual Inspection* (VI), *Liquid Penetrant Test* (LPT), *Magnetic Particle Inspection* (MPI), *Eddy Current Test* (ECT), *Ultrasonic Inspection* (UT), *Radiographic Inspection* (RT), dan *Acoustic Emission Testing* (AE). Setiap metode memiliki prinsip kerja, keunggulan, dan keterbatasan masing-masing, sehingga pemilihannya harus disesuaikan dengan kebutuhan inspeksi dan kondisi komponen yang diuji (Dwivedi & Vishwakarma, 2021; Gao et al., 2023).

2.12.1. Visual Inspection (Inspeksi Visual)

Inspeksi peralatan dan struktur yang memanfaatkan indera manusia seperti penglihatan, pendengaran, sentuhan, dan penciuman dikenal sebagai inspeksi visual (Hellier, 2021; ASM International, 2022). Kaca pembesar berdaya rendah, *borescopes*, serat optik, *borescopes* video digital, sistem kamera, dan *system crawler robot* semuanya digunakan bersama dalam pemeriksaan visual (Dwivedi & Vishwakarma, 2021). Inspeksi ini merupakan inspeksi paling mendasar dari berbagai metode lainnya, akan tetapi tidak kalah pentingnya digunakan dalam industri (Gao et al., 2023).

Kontrol dengan inspeksi visual dilakukan sebagai elemen awal penilaian untuk penerimaan bagian individu atau sebagai kontrol awal untuk kinerja pengujian berikutnya yang diperlukan untuk memverifikasi pengoperasiannya, mulai dari komponen saat (katup, pompa, pipa, bejana, dan lain-lain) dipasang (Hellier, 2021).

Pendekatan Inspeksi Visual memiliki keuntungan karena tidak mahal dan sederhana untuk diterapkan karena tidak memerlukan penggunaan alat yang rumit, kekurangan inspeksi visual adalah hanya dapat mendeteksi masalah pada permukaan bahan uji, dan hanya dapat menemukan cacat yang dapat dilihat dengan mata telanjang atau dengan alat bantu optik (ASM International, 2022). Gambar 2.19 merupakan contoh gambar inspeksi visual.



Gambar 2. 19 *Visual Inspection*
(Achmadi,2025)

2.12.2. Liquid Penetrant Test

Liquid Penetrant Test merupakan salah satu teknik *Non-Destructive Testing* (NDT) yang paling dasar dan banyak digunakan. Metode ini digunakan untuk mendeteksi cacat pada permukaan terbuka dari komponen padat, baik material logam maupun nonlogam, termasuk keramik dan

material berbasis serat plastik. Kecacatan pada material akan terlihat lebih jelas dengan menggunakan prosedur ini (Hellier, 2021; ASM International, 2022).

Prinsip kerja *Liquid Penetrant Test* dilakukan dengan cara mengaplikasikan cairan penetrant berwarna terang pada permukaan material yang diuji. Cairan penetrant harus memiliki daya tembus yang baik dan viskositas yang rendah agar mampu meresap ke dalam cacat permukaan material. Setelah waktu penetrasi tertentu, sisa cairan penetrant pada permukaan material dihilangkan. Indikasi cacat akan tampak jelas apabila terdapat perbedaan warna yang kontras antara cairan penetrant yang tertahan di dalam cacat dengan latar belakang permukaan material. Setelah proses pemeriksaan, sisa penetrant ditarik keluar dari cacat menggunakan cairan *developer* (Dwivedi & Vishwakarma, 2021)



Gambar 2. 20 Cairan *Cleaner*

Cleaner merupakan cairan khusus yang digunakan untuk membersihkan permukaan sebelum dan selesai dilakukannya inspeksi *Liquid Penetrant Test* (ASM International, 2022).



Gambar 2. 21 Cairan *Penetrant*

Penetrant berfungsi untuk mendeteksi dan mengidentifikasi cacat pada benda uji. Cairan penetrant yang dipakai merupakan jenis *red visible dye penetrant* dan menggunakan tipe *solvent removeable* untuk membersihkannya (Hellier, 2021).



Gambar 2. 22 Cairan *Developer*

Cairan *developer* berfungsi untuk mengangkat cairan penetrant yang terjebak pada celah cacat pada benda uji (Gao et al., 2023).

Metode *Liquid Penetrant Test* memiliki beberapa keunggulan, antara lain mampu memeriksa permukaan yang luas dengan biaya yang relatif murah dan waktu yang cepat, dapat digunakan pada komponen dengan geometri yang kompleks, serta memberikan indikasi cacat yang langsung terlihat pada permukaan material secara visual. Selain itu, metode ini hanya memerlukan peralatan yang sederhana dan relatif sedikit. Namun demikian, metode *Liquid Penetrant Test* juga memiliki keterbatasan, yaitu hanya dapat mendeteksi cacat yang terbuka di permukaan, memerlukan persiapan permukaan yang baik untuk menghilangkan kontaminan yang dapat menutupi cacat, membutuhkan permukaan material yang relatif halus dan tidak berpori, serta memerlukan proses pembersihan setelah pengujian. Selain itu, penggunaan bahan kimia berupa cairan penetrant dan *developer* memerlukan kehati-hatian dalam pengoperasiannya (ASM International, 2022; Gao et al., 2023).

2.13 Baja Karbon

Baja merupakan logam paduan yang menggunakan besi sebagai unsur dasar dengan penambahan beberapa unsur paduan lainnya, terutama karbon. Kandungan karbon dalam baja umumnya berkisar antara 0,02% hingga 1,40% berat, tergantung pada jenis dan gradenya. Selain karbon, baja juga mengandung unsur-unsur lain seperti mangan, fosfor, sulfur, silikon, serta sejumlah kecil unsur oksigen, nitrogen, dan aluminium yang berpengaruh terhadap sifat mekanik dan karakteristik baja (Pratama et al., 2021; Nugroho & Santoso, 2022).

Perbedaan persentase kandungan karbon dalam paduan baja karbon menjadi salah satu dasar utama dalam pengelompokan jenis baja. Berdasarkan kandungan karbonnya, baja karbon secara umum dibagi menjadi tiga

macam, yaitu baja karbon rendah, baja karbon sedang, dan baja karbon tinggi (Hidayat et al., 2021).

Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah merupakan jenis baja yang memiliki kandungan karbon relatif rendah, yaitu kurang dari 0,30%. Baja ini memiliki kekuatan dan kekerasan yang relatif rendah, namun memiliki tingkat keuletan dan kemudahan pembentukan yang tinggi. Baja karbon rendah banyak digunakan pada produk yang membutuhkan sifat keuletan yang baik, seperti kawat, kawat pengikat, pelat baja konstruksi, serta komponen struktural yang tidak memerlukan kekerasan tinggi. Selain itu, baja karbon rendah memiliki kemampuan las (*weldability*) yang baik sehingga sering digunakan dalam konstruksi dan fabrikasi (Regina, 2023; Rahman & Putra, 2023).

Baja Karbon Sedang

Baja karbon sedang merupakan baja yang memiliki kandungan karbon berkisar antara 0,30% hingga 0,60%. Baja jenis ini memiliki kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan baja karbon rendah serta memiliki respon yang baik terhadap perlakuan panas. Namun demikian, baja karbon sedang lebih sulit dibentuk dengan proses pemesian dan memiliki tingkat kesulitan yang lebih tinggi dalam proses pengelasan. Baja karbon sedang dapat dikeraskan melalui proses *quenching* sehingga banyak digunakan untuk komponen yang memerlukan kekuatan tinggi, seperti poros, roda gigi, rel kereta api, pegas, baut, dan berbagai komponen mesin (Riadi, 2021; Hidayat et al., 2021).

Baja Karbon Tinggi

Baja karbon tinggi merupakan baja karbon dengan kandungan karbon antara 0,60% hingga 1,40%. Baja jenis ini memiliki tingkat kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi,

namun bersifat lebih getas dan memiliki keuletan yang rendah. Baja karbon tinggi umumnya digunakan untuk pembuatan perkakas potong dan komponen yang memerlukan ketahanan terhadap gesekan dan keausan, seperti pisau, *milling cutter*, *reamer*, *tap*, serta perkakas tangan dan industri lainnya. Proses pengelasan pada baja karbon tinggi relatif sulit karena berpotensi menimbulkan retak akibat pendinginan yang cepat (Prayogi & Suhardiman, 2019; Nugroho & Santoso, 2022).

2.14 Uji Tarik

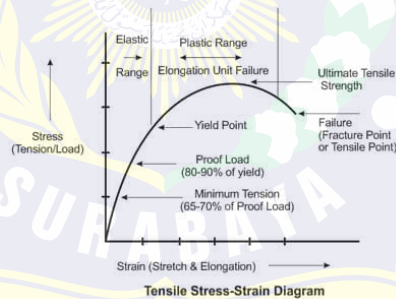
Dalam berbagai macam perlakuan material yang digunakan untuk mengetahui kemampuan mekanik suatu material, salah satu metode yang paling umum adalah *Uji Tarik* (*Tensile Test*). Uji tarik merupakan pengujian mekanik yang dilakukan dengan cara memberikan beban tarik secara bertahap pada suatu spesimen hingga material tersebut mengalami tegangan dan regangan maksimum, kemudian mengalami leheran (*necking*) dan akhirnya patah. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan beban tarik pada tingkat gaya tertentu serta mengevaluasi karakteristik mekanik material tersebut (Callister & Rethwisch, 2022; Zhang et al., 2021).

Sifat-sifat mekanik yang diperoleh dari hasil uji tarik akan berbeda-beda tergantung pada jenis material yang diuji. Secara umum, perilaku material terhadap pembebanan tarik dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori, antara lain elastis, elastis-plastis, plastis, hiperelastis, viskoelastis, dan viskoplastis. Perbedaan perilaku ini dipengaruhi oleh struktur mikro dan komposisi material yang bersangkutan (Kumar et al., 2021; Li et al., 2022).

Uji tarik dapat dilakukan pada spesimen berbentuk silindris maupun lembaran yang telah disesuaikan dengan standar pengujian tertentu, seperti ASTM, JIS, DIN, dan SNI,

baik untuk material logam maupun non-logam. Hasil dari pengujian ini memberikan informasi yang relatif lengkap mengenai perilaku material terhadap pembebanan mekanis. Parameter yang diperoleh dari uji tarik antara lain batas proporsional (*proportional limit*), batas elastis (*elastic limit*), titik luluh (*yield point*) dan kekuatan luluh (*yield strength*), kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), kekuatan putus (*breaking strength*), keuletan (*ductility*), modulus elastisitas atau modulus Young (*E*), modulus kelentingan (*modulus of resilience*), modulus ketangguhan (*modulus of toughness*), serta kurva tegangan–regangan (*stress–strain curve*) yang menggambarkan hubungan antara tegangan dan regangan material selama proses pengujian (ASTM E8/E8M, 2022; Chen et al., 2023).

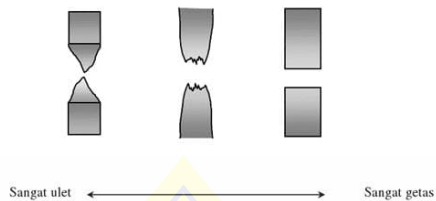
Kurva tegangan–regangan hasil uji tarik secara umum menunjukkan daerah elastis, daerah plastis, titik luluh, hingga terjadinya patah pada material, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23. Tensile Stress-Strain Diagram

(Sumber: ASM International, 2022)

Tampilan dan bentuk patahan *spesimen* (material) dari pengujian tarik ada 3 tipe seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.24 di bawah ini:



Gambar 2.24. Tampilan bentuk patahan perlakuan uji tarik
(sumber: <http://www.faraland.wordpress.com>)

Untuk mendapatkan data pengujian lain dan mengonversinya ke dalam kurva tegangan–regangan (σ – ϵ), dapat digunakan rumus-rumus berikut:

a. Tegangan

Tegangan (*Stress*) adalah perbandingan antara Beban tarik dan Luas

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

Rumus ini digunakan untuk menentukan batas proporsional, batas elastis, kekuatan luluh, dan kekuatan tarik maksimum material (*Callister & Rethwisch*, 2018; ASTM E8/E8M)

Dimana luas penampang (A_0) awal spesimen bisa di hitung dengan menggunakan rumus berikut :

$$A_0 = W \times T = \text{mm}^2 \quad (2.2)$$

Keterangan :

W : *Witdh* / Lebar (mm)

T : *Thickness* / Ketebalan (mm)

b. Regangan

Regangan (*Strain*) adalah perbandingan antara pertambahan panjang L dengan panjang awal.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.3)$$

Rumus regangan digunakan dalam penentuan daerah elastis dan plastis serta pembentukan kurva tegangan–regangan (Dr. Akhmad, 2009).

c. Reduksi Penampang

Reduksi Penampang (*Area Reduction*) adalah pengurangan luas penampang setelah perpatahan.

$$RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \% \quad (2.4)$$

Parameter ini umum digunakan untuk mengevaluasi sifat plastis material hasil uji tarik (Callister & Rethwisch, 2018).

Keterangan :

F = Kekuatan Tarik Mesin (N)

A_0 = Luas penampang awal spesimen (mm^2)

D = Diameter Spesimen (mm)

$$A_0 = \frac{1}{4} \pi D^2 = \text{mm}^2 \quad (2.5)$$

A_f = Luas penampang akhir setelah patah (mm^2)

ΔL = Pertambahan panjang (mm)

$$\Delta L = L_t - L_0 \quad (2.6)$$

L_0 = Panjang awal spesimen (mm)

L_t = Panjang spesimen setelah pengujian (mm)

d. Tegangan Luluh (*Yield Strength*)

Tegangan luluh (*yield strength*) adalah tegangan minimum pada saat material mulai mengalami deformasi plastis permanen, yaitu kondisi di mana material tidak lagi kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan. Nilai tegangan luluh sangat penting dalam perancangan karena menjadi batas aman material terhadap pembebanan (Callister & Rethwisch, 2018).

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \quad (2.7)$$

Keterangan:

- σ_y = Tegangan luluh / yield strength (MPa)
- F_y = Beban pada saat material mulai luluh (N)
- A_0 = Luas penampang awal spesimen (mm²)

Rumus ini digunakan ketika titik luluh dapat diamati secara jelas pada kurva tegangan–regangan (Davis, 2004).

e. Tegangan Tarik Maksimum (*Ultimate Tensile Strength*)

Tegangan tarik maksimum atau *Ultimate Tensile Strength* (UTS) adalah nilai tegangan tertinggi yang dapat ditahan oleh material selama pengujian tarik sebelum terjadi *necking* dan penurunan kemampuan menahan beban. Nilai UTS menunjukkan kemampuan maksimum material dalam menahan beban tarik (Davis, 2004). Tegangan tarik maksimum dihitung dengan membagi gaya tarik maksimum yang tercatat selama pengujian dengan luas penampang awal *specimen*.

$$\sigma_u = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (2.8)$$

Keterangan:

- σ_u = Tegangan tarik maksimum / *Ultimate Tensile Strength* (MPa)
- F_{maks} = Gaya tarik maksimum (N)
- A_0 = Luas penampang awal *spesimen* (mm²)

Rumus ini merupakan perhitungan tegangan nominal (*engineering stress*) yang digunakan secara luas dalam pengujian tarik standar (ASTM E8/E8M).

