

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Perkembangan teknologi di bidang manufaktur yang semakin maju tidak dapat dipisahkan dari pengelasan karena mempunyai peranan penting dalam rekayasa dan reparasi logam. Pembangunan konstruksi menggunakan baja karbon banyak melibatkan unsur pengelasan khususnya pada konstruksi mesin. Dalam proses pengelasan mengalami pemanasan yang menyebabkan terjadinya perubahan siklus termal cepat yang menyebabkan perubahan struktur, deformasi, dan tegangan termal.

Perubahan struktur terjadi karena kecepatan pendinginan dari suhu *austenit* sampai ke suhu kamar. Jika kecepatan pendinginan naik, berarti waktu pendinginan temperatur turun lambat terhadap suhu kamar. Dengan begitu, maka akan membentuk struktur butir yang rapat karena laju pendinginan yang lambat. Laju pendinginan yang lambat akan menghasilkan struktur semakin rapat sehingga kekerasan dan nilai kekuatan tariknya menurun. Kekuatan las yang kurang baik dapat menimbulkan hal-hal yang negatif pada pengaplikasiannya, yaitu dapat mengurangi tingkat keamanan pada konstruksi mesin yang mengakibatkan terjadinya keretakan, patah, dan sobek.

Temperatur media pendingin merupakan substansi yang berfungsi untuk menentukan kecepatan proses pendinginan terhadap material yang telah diberikan perlakuan panas dari hasil pengelasan. Pendinginan menjadi salah satu alternatif

untuk memperbaiki dan meningkatkan sifat mekanik pada material pasca pengelasan. Pemilihan temperatur media pendingin sangatlah penting untuk mendapatkan struktur *martensit*. Hal ini disebabkan karena semakin banyak unsur karbon terperangkap, maka struktur *martensit* yang terbentuk juga semakin banyak. Hal tersebutlah yang menyebabkan peningkatan nilai kekerasan dan nilai kekuatan tarik pada suatu bahan.

Hasil pengelasan yang baik tidak hanya dipengaruhi parameter yang digunakan, tetapi juga dipengaruhi oleh material benda kerja yang digunakan. Salah satu material benda kerja yang memiliki sifat las yang baik adalah baja karbon. Hal ini disebabkan karena baja karbon merupakan bahan yang keras dan kuat. Pada umumnya, bangunan konstruksi mesin yang dilakukan dengan proses pengelasan sering mengalami kerusakan saat menerima beban, seperti patahan, melentur, cacat atau kerusakan yang tidak diinginkan pada daerah bagian sambungan las, terutama pada daerah *heat affected zone*.

Adanya perubahan sifat fisis dan sifat mekanis pada baja karbon setelah proses pengelasan, maka perlu adanya perlakuan pendinginan yang berbeda. Hal ini bertujuan untuk menentukan struktur yang terbentuk sehingga kekuatan tarik dan kekerasan hasil las yang diperoleh dapat maksimal.

## **1.2. Batasan Masalah**

Adanya beberapa faktor yang mempengaruhi sifat mekanis sambungan las yang dihasilkan, maka penelitian ini akan dibatasi pada pengaruh temperatur media pendingin. Adapun batasan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Variasi media pendingin yang digunakan dalam penelitian ini adalah Air, Udara dan Oli.
2. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini Baja *S45C* yang merupakan baja karbon sedang.
3. Pengelasan yang digunakan pada penelitian ini adalah pengelasan *SMAW*.
4. Pengujian untuk mengetahui perubahan struktur material dalam penelitian ini menggunakan foto mikro.
5. Pengujian untuk mengetahui perubahan sifat mekanik dalam penelitian ini menggunakan pengujian tarik.

### **1.3. Rumusan Masalah**

Berdasarkan batasan masalah di atas, rumusan masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh media pendingin air, udara dan oli pada pengelasan *SMAW* terhadap struktur mikro Baja *S45C*.
2. Bagaimana pengaruh media pendingin air, udara dan oli pada pengelasan *SMAW* terhadap kekuatan tarik Baja *S45C*.

### **1.4. Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini berdasarkan rumusan masalah di atas, adalah sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui pengaruh media pendingin air, udara dan oli pada pengelasan *SMAW* terhadap struktur mikro Baja *S45C*.

2. Untuk mengetahui pengaruh media pendingin air, udara dan oli pada pengelasan *SMAW* terhadap kekuatan tarik Baja *S45C*.

### **1.5. Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian adalah sebagai berikut:

1. Untuk menambah ilmu pengetahuan dibidang pengelasan, khususnya bagi penulis.
2. Sebagai bahan referensi bagi penelitian dan sejenisnya dalam rangka untuk mengembangkan ilmu pengetahuan tentang pengaruh media pendingin terhadap struktur mikro dan kekuatan tarik.
3. Mengetahui pengaruh media pendingin terhadap struktur mikro dan kekuatan tarik setelah di lakukan pengelasan.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Pengelasan (Welding)**

Penyambungan logam dua atau lebih menggunakan pengelasan banyak digunakan dalam industri terutama konstruksi. Pembuatan peralatan-peralatan industri, konstruksi pipa, pembuatan bejana, jembatan dan konstruksi perkapalan dan lain sebagainya. Industri yang pesat sangat membutuhkan sambungan pengelasan yang baik untuk dikembangkan guna menutupi teknologi manufaktur. Pengelasan selain untuk pembuatan produk pesanan, juga banyak dipakai untuk perbaikan (Afan et al., 2020). Banyak sekali logam yang dapat disambung dengan metode las diantaranya yaitu baja karbon tinggi, baja karbon rendah, baja anti karat dan baja paduan non ferros, contohnya aluminium, nikel, timah tembaga, titanium dan lain-lain.

Pengerjaan pengelasan juga sangat mementingkan kualitas dan mutu yang harus sesuai dengan standar misalnya *Japanese Industrial Standard (JIS)*, *American System for Testing Material (ASTM)*, *American welding society (AWS)*, dan lain-lain. Didalam pengelasan kita juga harus memilih proses yang tepat, memilih bahan baku logam, proses perancangan, standar prosedur pengelasan dan welder, pengendalian sistem dan standar pengujian pengelasan harus dilakukan untuk memenuhi standar. Agar kualitas pengelasan dapat memenuhi standart. Lebih tepatnya untuk pengelasan logam yang tidak diketahui prosedur standart pengelasan, maka perlu mengkaji atau melakukan percobaan pengelasan dini yang

kemudian diuji sesuai dengan yang diinginkan.

Menurut *Dutche Industrial Normen* (DIN), pengelasan adalah proses penyambungan dua buah logam atau lebih dengan mencairkan logam pengisi atau biasa disebut dengan elektroda. Jika kawat atau logam pengisi mencair disebut *Brazzing* atau *Brazee Welding* sesuai standart AWS (*American welding society*). Berdasarkan definisi diatas dapat disimpulkan bahwa pengelasan material logam memerlukan energi panas yang tinggi untuk mencairkan logam pengisi pada sambungan. Jika sambungan memerlukan material tambahan, maka material tambahan juga harus mengalami pencairan agar logam induk membentuk tumpukan las. Energy panas sangat diperlukan pada saat pencairan sebagian material dasar dan logam tambahan karena dapat mempengaruhi sifat dan struktur mikro pada logam. Daerah sambungan las sifatnya akan berubah karena terpengaruh oleh panas terutama daerah HAZ (Habibi et al., 2012).

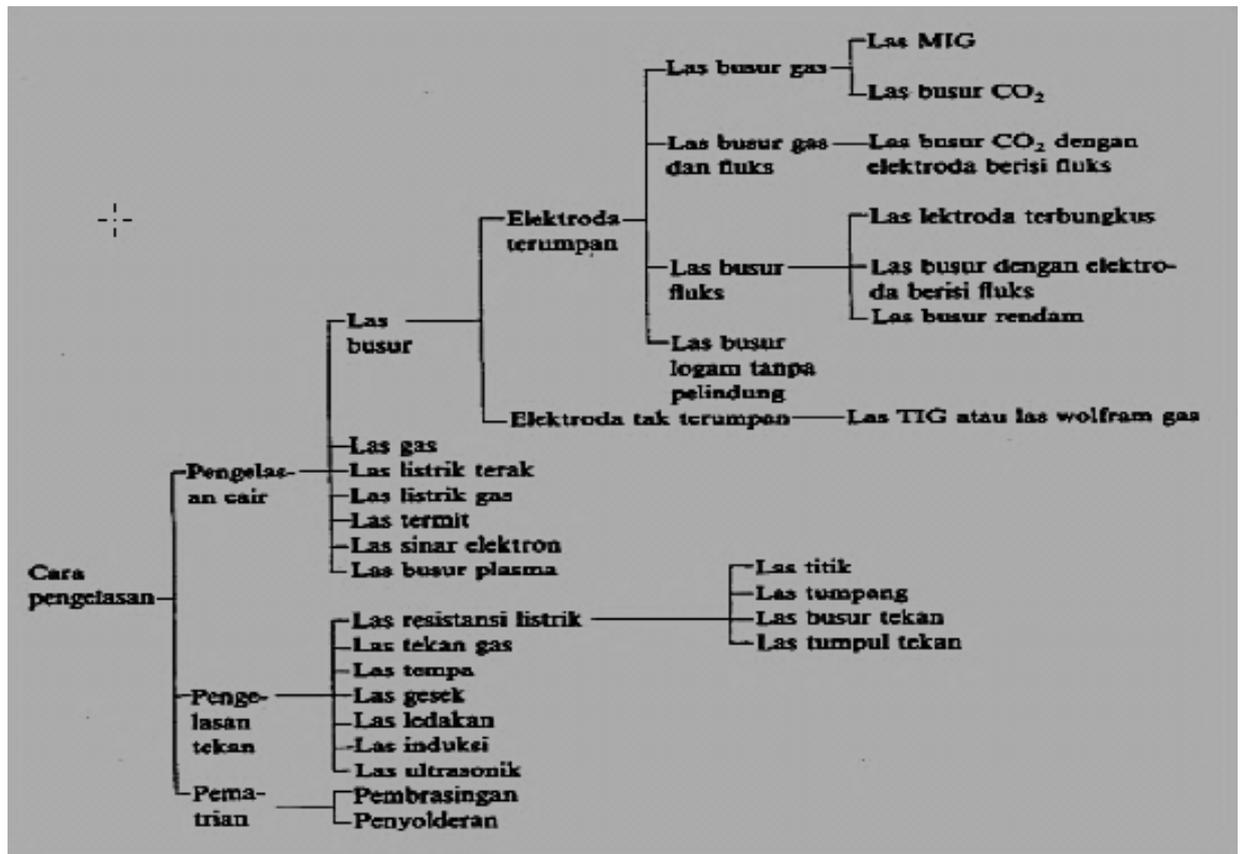
## **2.2. Klasifikasi Cara-cara Pengelasan**

Sampai pada waktu ini banyak sekali cara-cara pengklasifikasian yang digunakan dalam pengelasan, ini disebabkan karena perlu adanya kesepakatan dalam hal-hal tersebut. Secara konvensional cara-cara pengklasifikasi tersebut pada waktu ini dapat dibagi dua golongan, yaitu klasifikasi berdasarkan kerja dan klasifikasi berdasarkan energi yang digunakan. Klasifikasi pertama membagi las dalam kelompok las cair, las tekan, las patri dan lain-lainnya. Sedangkan klasifikasi yang kedua membedakan adanya kelompok-kelompok seperti las listrik, las kimia, las mekanik dan seterusnya.

Bila diadakan pengklasifikasian yang lebih terperinci lagi, maka kedua klasifikasi tersebut diatas dibaur dan akan terbentuk kelompok-kelompok yang banyak sekali. Diantara kedua cara klasifikasi tersebut diatas kelihatannya klasifikasi cara kerja lebih banyak digunakan karena itu pengklasifikasian yang diterangkan dalam bab ini juga berdasarkan cara kerja.

Klasifikasi cara kerja lebih banyak digunakan karena itu pengklasifikasian yang diterangkan adalah berdasarkan cara kerja. Berdasarkan klasifikasi ini pengelasan dapat dibagi dalam tiga kelas utama yaitu pengelasan cair, pengelasan tekan dan pematrian. Mari kita lihat deskripsi klasifikasi tentang pengelasan tersebut:

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



Gambar 2.1 Klasifikasi Cara Pengelasan

Pemotongan yang dimaksud adalah proses memotong material dengan mencairkan logam yang akan dipotong. Proses ini sangat banyak digunakan didalam las potongan dengan menggunakan gas acetylin dan pemotongan menggunakan busur. Jenis pengelasan yang paling sering kita jumpai saat ini adalah pengelasan cair atau las accytelin.

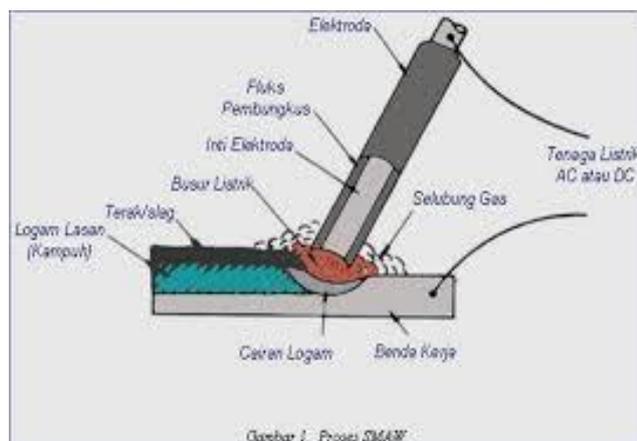
Tabel 2. 1 Klasifikasi Cara Pemotongan

Cara pemotongan	Jenis pemotongan
Pemotongan gas	Pemotongan gas oksigen Pemotongan serbuk Pemotongan sembur api
Pemotongan las busur listrik	Pemotongan busur karbon Pemotongan busur logam Pemotongan busur plasma Pemotongan busur udara

### 2.3. SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

*Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) merupakan suatu teknik pengelasan elektroda berselaput yang membentuk busur las antara elektroda dengan kawat las menggunakan selaput elektroda/fluks sebagai pelindung.

Proses pemindahan logam elektroda terjadi pada saat ujung elektroda mencair dan membentuk butiran yang terbawa arus busur listrik. Bila menggunakan arus listrik besar maka butiran logam cair yang terbawa menjadi halus dan sebaliknya, bila arus kecil maka butirannya menjadi besar. Pola pemindahan logam cair sangat mempengaruhi sifat mampu las dari logam. Logam mempunyai sifat mampu las yang tinggi bila pemindahan terjadi dengan butiran yang halus. Pola pemindahan cairan dipengaruhi oleh besar kecilnya arus dan komposisi dari bahan *fluks* yang digunakan. Bahan *fluks* yang digunakan untuk membungkus elektroda selama pengelasan mencair dan membentuk terak yang menutupi logam cair yang terkumpul ditempat sambungan dan bekerja sebagai penghalang oksidasi (Santoso, 2006).



Gambar 2. 2 Proses Las SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

## 2.4. Elektroda

Bagian terpenting dalam las busur listrik adalah elektroda las. Jenis elektroda yang dipergunakan akan menentukan hasil pengelasan sehingga sangat penting untuk mengetahui sifat dan jenis dari masing-masing elektroda sebagai dasar pemilihan elektroda yang tepat. Macam-macam jenis elektroda sangat banyak. Berdasarkan selaput pelindungnya elektroda dibedakan menjadi dua macam yaitu elektroda polos dan elektroda terbungkus.

Elektroda terbungkus terdiri dari bagian inti dan zat pelindung atau fluks. Selaput yang ada pada elektroda jika terbakar akan menghasilkan  $CO^2$  yang berfungsi untuk melindungi cairan las, busur listrik dan sebagian benda kerja dari udara luar. Ukuran standar diameter kawat inti dari 1,5 – 7 mm, dengan panjang antara 350 sampai 450 mm.

Tipe elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah AWS SFA 5.1 E7018 coating type basic yang memiliki alur las yang ulet dan bebas terjadi keretakan bahkan pada baja yang memiliki kadar karbon hingga 0,2%. Untuk kode yang diberikan pada tipe elektroda tersebut diatas yaitu huruf “E” yang diikuti oleh empat angka dibelakangnya.

Untuk arti masing-masing kode elektroda adalah :

1. Untuk huruf E : Menyatakan elektroda untuk las busur listrik
2. Untuk angka 70 : Menyatakan nilai tegangan tarik minimum hasil pengelasan yaitu 70000 psi.
3. Untuk angka 1 : Menyatakan posisi pengelasan, angka 1 dapat digunakan untuk pengelasan semua posisi.

4. Untuk angka 8 : Menyatakan penetrasi las sedang, daya AC/DC, kandungan selaputnya serbuk besi 25%-40%, hidrogen rendah.

Dinegara-negara industri elektroda terbungkus sudah distandarisasi berdasarkan penggunaannya. Di Jepang misalnya elektroda las terbungkus untuk baja, kekuatannya telah distandarkan berdasarkan standar Jepang (JIS). Untuk standar Amerika Serikat (ASTM) berdasarkan pada standar asosiasi las Amerika (AWS).

Standarisasi elektroda, baik dalam JIS maupun ASTM didasarkan pada jenis fluks, posisi pengelasan dan arus las. Walaupun dalam memberikan symbol agak berbeda antara kedua system standar tersebut tetapi pada dasarnya adalah sama. Sebagai contoh misal huruf D dalam JIS dan huruf E dalam ASTM menunjukkan elektroda yang dipakai adalah elektroda terbungkus, kedua angka pertama menunjukkan kekuatan terendah dari logam las, hanya dalam JIS memakai satuan  $\text{kg/mm}^2$  dan ASTM menggunakan satuan psi. sedangkan dua angka terakhir menunjukkan jenis fluks yang dipakai dan posisi pengelasan.

Macam-macam standar keperluan elektroda yang disusun oleh American Welding Society (AWS) dan American Society for Testing Material (ASTM), misalnya: E6010, E7010, E6013 dan lain-lain dimana masing-masing memiliki arti tertentu yaitu:

1. E menyatakan elektroda/*elektrik welding*.
2. Dua angka setelah E menyatakan kekuatan tarik defosit las dalam ribuan dengan  $1\text{b/in}^2$ .

3. 1 menyatakan posisi pengelasan, yaitu:
  - a. Angka (1) untuk pengelasan segala posisi,
  - b. Angka (2) untuk pengelasan posisi datar dan bawah tangan.
4. Angka ke empat setelah E menyatakan jenis selaput dan jenis arus yang cocok dipakai untuk pengelasan.

## **2.5. Klasifikasi Fluksi Elektroda**

Bahan untuk selaput fluksi elektroda tergantung pada kegunaannya, yaitu antara lain selulosa, kalium karbonat, titanium dioksida, kaolin, kalium oksida mangan, oksida besi, besi silikon, besi mangan dan sebagainya, dengan persentase yang berbeda-beda untuk setiap elektroda.

### **2.5.1 Tebal Selaput**

Tergantung dari jenisnya, tebal selaput elektroda antara 10% sampai 50% dari diameter elektroda. Pada waktu pengelasan selaput elektroda ini akan ikut mencair dan menghasilkan gas CO<sub>2</sub> yang melindungi cairan las, busur listrik, dan sebagian benda kerja terhadap udara luar. Udara luar yang mengandung O<sub>2</sub> dan N akan dapat mempengaruhi sifat mekanik dari logam las. Cairan selaput yang disebut terak akan terapung dan membeku melapisi permukaan las yang masih panas.

### **2.5.2 Besar Arus Listrik**

Besarnya arus listrik untuk pengelasan tergantung pada ukuran diameter dan macam-macam elektroda las.

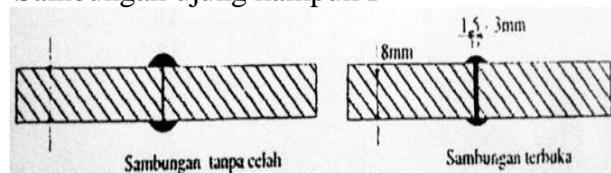
Tabel 2. 2 Besar Arus Dalam Ampere dan Diameter (mm)

Diameter elektroda dalam mm	Tipe elektroda dan besarnya arus dalam ampere					
	E 6010	E 6014	E 7018	E 7024	E 7027	E 7028
2,5		80-125	70-100	100-145		
3,2	80-120	110-160	115-165	140-190	125-185	140-190
4	120-160	150-210	160-220	180-260	180-240	180-250
5	160-200	200-275	200-275	230-305	210-300	230-305
5,5		260-340	260-340	275-285	250-350	275-365
6,3		330-415	315-400	335-430	300-420	335-430
8		390-500	375-470			

## 2.6. Sambungan Las

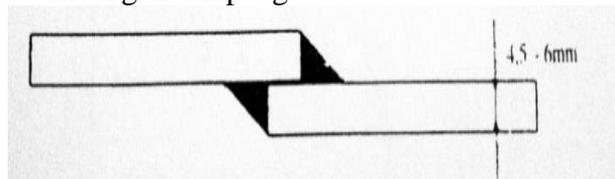
Pengelasan las listrik mempunyai bermacam-macam jenis sambungan, yaitu sambungan I, sambungan V,  $\frac{1}{2}$  V, sambungan X, dan  $\frac{1}{2}$  X, sambungan sudut luar dan sambungan tumpang.

### a. Sambungan ujung kampuh I



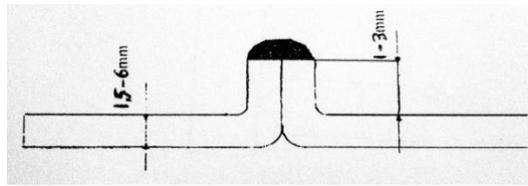
Gambar 2. 3 Sambungan Kampuh

### b. Sambungan tumpang



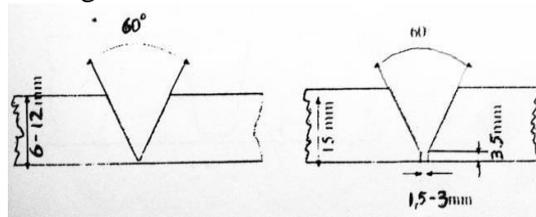
Gambar 2. 4 Sambungan Tumpang

### c. Sambungan tepi

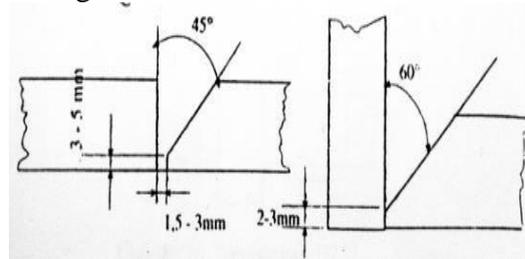


Gambar 2. 5 Sambungan Tepi

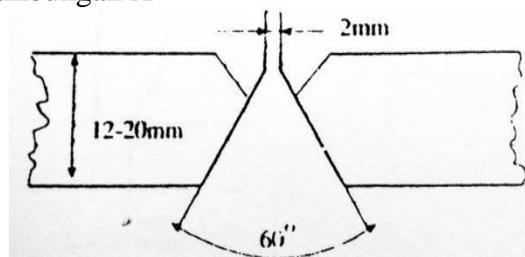
## d. Sambungan V



Gambar 2. 6 Sambungan V

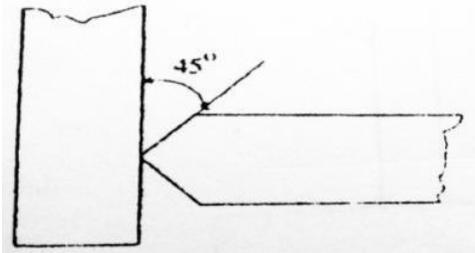
e. Sambungan  $\frac{1}{2}$  VGambar 2. 7 Sambungan  $\frac{1}{2}$  V

## f. Sambungan X



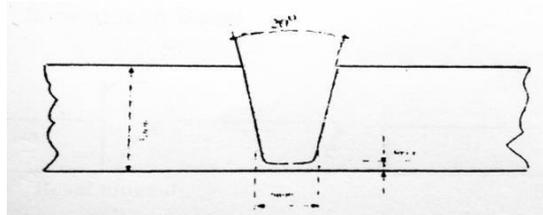
Gambar 2. 8 Sambungan X

g. Sambungan  $\frac{1}{2}$  X



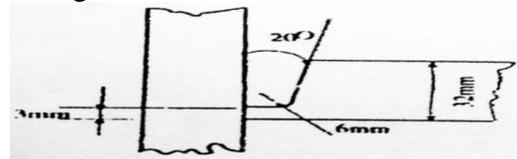
Gambar 2. 9 Sambungan  $\frac{1}{2}$  X

h. Sambungan U



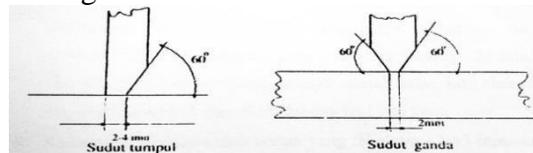
Gambar 2. 10 Sambungan U

i. Sambungan  $\frac{1}{2}$  U



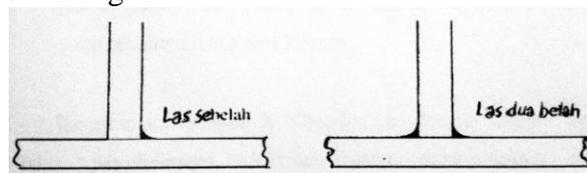
Gambar 2. 11 Sambungan  $\frac{1}{2}$  U

j. Sambungan sudut



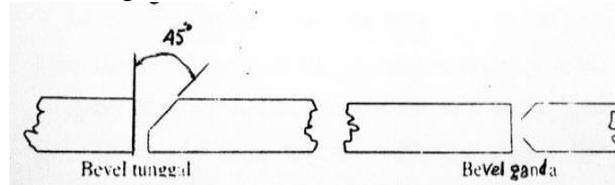
Gambar 2. 12 Sambungan Sudut

k. Sambungan T



Gambar 2. 13 Sambungan T

## 1. Sambungan bevel



Gambar 2. 14 Sambungan Bevel

## m. Tanda dan Simbol Pengerjaan Pengelasan

No	Nama Las	Penunjuk Sebenarnya	Lambang	Proyeksi	
				Metode E	Metode A
1	Las Tumpul		V		
			Y		
			Y		
2	Las Sisi				
3	Las Sudut				
4	Las sudut terputus				

Gambar 2. 15 Simbol-simbol Pengerjaan Pengelasan

Berbagai macam bentuk kampuh sambungan di atas dimaksudkan untuk mengelas bentuk sambungan yang berbeda, dan untuk memperoleh kekuatan sambungan berhubung dengan kondisi bahan serta bentuk benda kerja yang disambung:

1. Sambungan bentuk I dipakai untuk plat tipis yang tebalnya sekitar 3-8 mm.
2. Las V dipergunakan untuk bahan plat yang tebal sekitar 3-28mm.
3. Kampuh  $\frac{1}{2}$  V dibuat jika salah satu bagian yang akan disambung tidak boleh diubah bentuknya. Bilamana las V tertutup maka boleh dipakai pada plat yang tebalnya 28 mm, disini kita perlukan las lawan, artinya setelah salah satu sisinya di las, maka kita balik dan

sebelahnya lagi kita las.

4. Kampuh X dipakai untuk bahan yang tebalnya 12-45 mm, sudut kampuh biasanya  $60^0$ . Pada kampuh X ini ada sudut lancip dan ada sudut tumpul, ini dipakai untuk tebal plat yang 12-20 mm (sudut lancip) dan untuk sudut tumpul digunakan pada bahan yang tebalnya lebih dari 20 mm.

Keuntungan kampuh X dibandingkan dengan kampuh bentuk V adalah penghematan elektroda yang digunakan. Sehingga pemakaian aliran listrik berkurang dan penyusutan yang sama di dalam bentuk sambungan. Dalam pekerjaan pendahuluan kampuh X agak memakan biaya yang mahal sedikit dibanding dengan kampuh V, karena pengelasannya harus bolak balik beberapa kali pada kedua belah sisi permukaan untuk memperoleh penyusutan yang sama.

Tebal plat yang dipakai pada kampuh  $\frac{1}{2}$  V adalah 3 sampai 28 mm dan benda kerja terpaksa tidak dapat dibalikinya. Pada sambungan kampuh  $\frac{1}{2}$  X ternyata mendapat kesukaran untuk memperoleh sambungan yang baik dan kuat disebabkan oleh pembakaran yang kurang baik, juga karena benda kerja yang berlainan ukurannya dimana yang satu runcing dan yang lain tebal. Pada kampuh bentuk U dipakai untuk sambungan yang menerima beban berat dan plat yang tebalnya 32 mm, untuk  $\frac{1}{2}$  U berisi satu dipergunakan bagi plat yang tebalnya 20 mm sampai 40 mm, dan untuk  $\frac{1}{2}$  U berisi dua dipakai untuk tebal plat 40 mm sampai 70 mm.

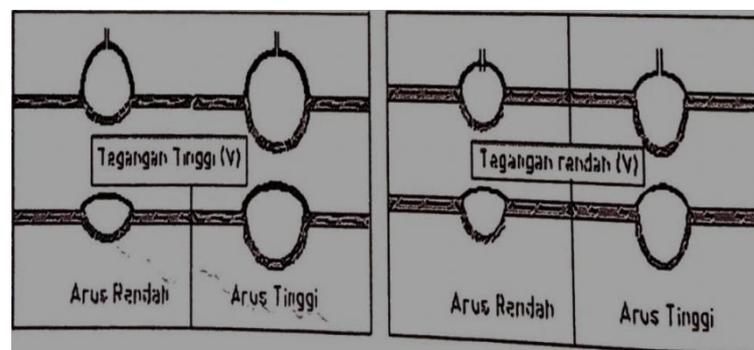
## 2.7. Parameter Pengelasan

Kestabilan dari busur api yang terjadi pada saat pengelasan merupakan masalah yang paling banyak terjadi dalam proses pengelasan las SMAW, oleh karena itu kombinasi dari Arus listrik (I) yang dipergunakan dan Tegangan (V) harus benar-benar sesuai dengan kawat elektroda dan fluksi yang dipakai.

Parameter pengelasan yang harus diperhatikan dalam proses pengelasan adalah sebagai berikut:

### 1. Pengaruh dari Arus Listrik (I)

Setiap kenaikan arus listrik yang dipergunakan pada saat pengelasan akan meningkatkan penetrasi serta memperbesar kuantiti lasnya. Penetrasi akan meningkat 2 mm per 100A dan kuantiti las meningkat juga 1,5 kg/jam per 100A.



Gambar 2. 16 Pengaruh Arus Listrik

### 2. Pengaruh dari Tegangan Listrik (V)

Setiap peningkatan tegangan listrik (V) yang dipergunakan pada proses pengelasan akan semakin memperbesar jarak antara tip elektroda dengan material yang akan dilas, sehingga busur api yang terbentuk akan menyebar dan mengurangi penetrasi pada material las. Konsumsi fluksi

yang dipergunakan akan meningkat sekitar 10% pada setiap kenaikan 1 volt tegangan.

### 3. Pengaruh Kecepatan Pengelasan

Jika kecepatan awal pengelasan dimulai pada kecepatan 40 cm/menit, setiap penambahan kecepatan akan membuat bentuk jalur las yang kecil (Welding Bead), penetrasi, lebar serta kedalaman las pada benda kerja akan berkurang. Tetapi jika kecepatan pengelasannya berkurang dibawah 40 cm/menit cairan las yang terjadi dibawah busur api las akan menyebar serta penetrasi yang dangkal, hal ini dikarenakan over heat.

### 4. Pengaruh Polaritas Arus Listrik (*Alternating Current* atau *Direct Current*)

Pengelasan dengan kawat elektroda tunggal pada umumnya menggunakan tipe arus Direct Current (DC), elektroda positif (EP), jika menggunakan elektroda negatif (EN) penetrasi yang terbentuk akan rendah dan kuantiti las yang tinggi. Pengaruh dari arus Alternating Current (AC) pada bentuk butiran las dan kuantiti pengelasan antara elektroda positif dan negatif adalah sama yaitu cenderung porosity, oleh karena itu dalam proses pengelasan yang menggunakan arus AC harus memakai fluksi yang khusus.

Arus adalah aliran pembawa muatan listrik, simbol yang digunakan adalah huruf besar I dalam satuan ampere. Pengelasan adalah penyambungan dua logam atau logam paduan dengan cara memberikan panas baik diatas atau dibawah titik cair logam tersebut, baik dengan atau tanpa tekanan serta ditambah

atau tanpa logam pengisi yang dimaksud dengan arus paengelasan disini adalah aliran pembawa muatan listrik dari mesin las yang digunakan untuk menyambung dua logam dengan mengalirkan panas ke logam pengisi atau elektroda. Hubungan diameter elektroda dengan arus pengelasan menurut Howard BC,1998 dapat dilihat pada tabel 2.3

Tabel 2. 3 Hubungan Diamter Elektroda dengan Pengelasan

Diameter Elektroda	Arus (Ampere)
2.5	60-90
2.6	60-90
3.2	80-140
4.0	150-190
5.0	180-250

## 2.8. Baja

Baja adalah logam paduan dengan besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan karbon dalam baja berkisar antara 0.2% hingga 2.1% berat sesuai *grade*-nya. Fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur pengeras. Unsur paduan lain yang biasa ditambahkan selain karbon adalah mangan (*manganese*), krom (*chromium*), vanadium, dan nikel. Dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur paduan lainnya, berbagai jenis kualitas baja bisa didapatkan. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tariknya (*tensile strength*), namun di sisi lain membuatnya menjadi getas (*brittle*) serta menurunkan

keuletannya (*ductility*).

Pengaruh utama dari kandungan karbon dalam baja adalah pada kekuatan, kekerasan, dan sifat mudah dibentuk. Kandungan karbon yang besar dalam baja mengakibatkan meningkatnya kekerasan tetapi baja tersebut akan rapuh dan tidak mudah dibentuk (Davis, 1982).

Baja merupakan besi dengan kadar karbon kurang dari 2 %. Baja dapat dibentuk menjadi berbagai macam bentuk sesuai dengan keperluan. Secara garis besar ada 2 jenis baja, yaitu :

a. Baja Karbon

Baja karbon disebut juga plain karbon *steel*, mengandung terutama unsur karbon dan sedikit silicon, belerang dan pospor. Berdasarkan kandungan karbonnya, baja karbon dibagi menjadi :

1. Baja dengan kadar karbon rendah ( $< 0,2 \% C$ )

Baja ini dengan komposisi karbon kurang dari 2%. Fasa dan struktur mikronya adalah ferrit dan perlit. Baja ini tidak bisa dikeraskan dengan cara perlakuan panas (*martensit*) hanya bisa dengan pengerjaan dingin. Sifat mekaniknya lunak, lemah dan memiliki keuletan dan ketangguhan yang baik. Serta mampu mesin (*machinability*) dan mampu las nya (*weldability*) baik cocok untuk bahan bangunan konstruksi gedung, jembatan, rantai, body mobil.

2. Baja dengan kadar karbon sedang ( $0,1\%-0,5 \% C$ )

Baja karbon sedang memiliki komposisi karbon antara 0,2%-0,5% C (berat). Dapat dikeraskan dengan perlakuan panas dengan cara

memanaskan hingga fasa austenit dan setelah ditahan beberapa saat didinginkan dengan cepat kedalam air atau sering disebut *quenching* untuk memperoleh fasa yang keras yaitu martensit. Baja ini terdiri dari baja karbon sedang biasa (*plain*) dan baja mampu keras. Kandungan karbon yang relatif tinggi itu dapat meningkatkan kekerasannya. Namun tidak cocok untuk di las, dengan kata lain mampu las nya rendah. Dengan penambahan unsur lain seperti Cr, Ni, dan Mo lebih meningkatkan mampu kerasnya. Baja ini lebih kuat dari baja karbon rendah dan cocok untuk komponen mesin, roda kereta api, roda gigi (*gear*), poros engkol (*crankshaft*) serta komponen struktur yang memerlukan kekuatan tinggi, ketahanan aus, dan tangguh.

### 3. Baja dengan kadar karbon tinggi ( $>0,5\% \text{ C}$ )

Baja karbon tinggi memiliki komposisi antara 0,6- 1,4% C (berat). Kekerasan dan kekuatannya sangat tinggi, namun keuletannya kurang. baja ini cocok untuk baja perkakas, *dies* (cetakan), pegas, kawat kekuatan tinggi dan alat potong yang dapat dikeraskan dan ditemper dengan baik. Baja ini terdiri dari baja karbon tinggi biasa dan baja perkakas. Khusus untuk baja perkakas biasanya mengandung Cr, V, W, dan Mo. Dalam pemuadannya unsur-unsur tersebut bersenyawa dengan karbon menjadi senyawa yang sangat keras sehingga ketahanan aus sangat baik. Kadar karbon yang terdapat di dalam baja akan mempengaruhi kuat tarik, kekerasan dan keuletan baja. Semakin tinggi kadar karbonnya, maka kuat tarik dan kekerasan baja semakin meningkat tetapi keuletannya

cenderung turun. Penggunaan baja di bidang teknik sipil pada umumnya berupa baja konstruksi atau baja profil, baja tulangan untuk beton dengan kadar karbon 0,10% - 0,50%. Selain itu baja karbon juga digunakan untuk baja/kawat pra tekan dengan kadar karbon s/d 0,90 %. Pada bidang teknik sipil sifat yang paling penting adalah kuat tarik dari baja itu sendiri.

#### b. Baja Paduan

Baja dikatakan di padu jika komposisi unsur-unsur paduannya secara khusus, bukan baja karbon biasa yang terdiri dari unsur fosfor dan mangan. Baja paduan semakin banyak di gunakan. Unsur yang paling banyak di gunakan untuk baja paduan, yaitu : Cr, Mn, Si, Ni, W, Mo, Ti, Al, Cu, Nb, Zr.

##### 1. Baja Paduan Rendah (*Low Alloy Steel*)

Baja paduan rendah merupakan baja paduan yang elemen paduannya kurang dari 2,5% wt, misalnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain- lain. Biasanya digunakan untuk membuat perkakas potong, gergaji, cetakan penarikan, pahat kayu, mata pisau, pemotong kikir, gurdi batu.

##### 2. Baja Paduan Menengah (*Medium Alloy Steel*)

Baja paduan menengah merupakan baja paduan yang elemen paduannya 2,5% - 10% wt, misalnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain-lain. Biasanya digunakan untuk membuat alat pengukur, cetakan penarikan, rol derat, mata gunting untuk plat tebal.

##### 3. Baja Paduan Tinggi (*High Alloy Steel*)

Baja paduan tinggi merupakan baja paduan yang elemen paduannya lebih

dari 10% wt, misalnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain-lain (Amanto, 1999). Banyak digunakan untuk cetakan penarikan kawat, cetakan pengetrim, pengukur, rol derat.

Menurut (Amstead, 1993) secara umumnya, baja paduan memiliki sifat yang unggul daripada baja karbon biasa, diantaranya:

1. Keuletan yang tinggi tanpa pengurangan kekuatan tarik.
2. Tahan terhadap korosi dan keausan yang tergantung dari jenis paduannya.
3. Tahan terhadap perubahan suhu, ini berarti bahwa sifat fisiknya tidak banyak berubah.
4. Memiliki butiran halus dan homogen.

Pengaruh unsur-unsur paduan dalam baja adalah sebagai berikut:

#### 1. Unsur karbon (C)

Karbon merupakan unsur terpenting yang dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja. Kandungan karbon di dalam baja sekitar 0,1%-1,7%, sedangkan unsur lainnya dibatasi sesuai dengan kegunaan baja. Unsur paduan yang bercampur di dalam lapisan baja adalah untuk membuat baja bereaksi terhadap pengerjaan panas dan menghasilkan sifat-sifat yang khusus. Karbon dalam baja dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan tetapi jika berlebihan akan menurunkan ketangguhan.

#### 2. Unsur Mangan (Mn)

Semua baja mengandung mangan karena sangat dibutuhkan dalam proses pembuatan baja. Kandungan mangan kurang lebih 0,6% tidak mempengaruhi sifat baja, dengan kata lain mangan tidak memberikan

pengaruh besar pada struktur baja dalam jumlah yang rendah. Penambahan unsur mangan dalam baja dapat menaikkan kuat tarik tanpa mengurangi atau sedikit mengurangi regangan, sehingga baja dengan penambahan mangan memiliki sifat kuat dan ulet.

### 3. Unsur Silikon (Si)

Silikon merupakan unsur paduan yang ada pada setiap baja dengan kandungan lebih dari 0,4% yang mempunyai pengaruh untuk menaikkan tegangan tarik dan menurunkan laju pendinginan kritis. Silikon dalam baja dapat meningkatkan kekuatan, kekerasan, kekenyalan, ketahanan aus, dan ketahanan terhadap panas dan karat. Unsur silikon menyebabkan sementit tidak stabil, sehingga memisahkan dan membentuk grafit. Unsur silikon juga merupakan pembentuk ferit, tetapi bukan pembentuk karbida, silikon juga cenderung membentuk partikel oksida sehingga memperbanyak pengintian kristal dan mengurangi pertumbuhan akibatnya struktur butir semakin halus.

### 4. Unsur Nikel (Ni)

Nikel mempunyai pengaruh yang sama seperti mangan, yaitu memperbaiki kekuatan tarik dan menaikkan sifat ulet, tahan panas, jika pada baja paduan terdapat unsur nikel sekitar 25% maka baja dapat tahan terhadap korosi. Unsur nikel yang bertindak sebagai tahan karat (korosi) disebabkan nikel bertindak sebagai lapisan penghalang yang melindungi permukaan baja.

## 5. Unsur Kromium (Cr)

Sifat unsur kromium dapat menurunkan laju pendinginan kritis (kromium sejumlah 1,5% cukup meningkatkan kekerasan dalam minyak). Penambahan kromium pada baja menghasilkan struktur yang lebih halus dan membuat sifat baja dikeraskan lebih baik karena kromium dan karbon dapat membentuk karbida. Kromium dapat menambah kekuatan tarik dan keplastisan serta berguna juga dalam membentuk lapisan pasif untuk melindungi baja dari korosi serta tahan terhadap suhu tinggi.

## 2.9. Pengujian Struktur Mikro

Uji struktur mempelajari struktur material logam untuk keperluan pengujian material logam dipotong-potong kemudian potongan diletakkan dibawah dan dikikisdengan material alat penggores yang sesuai. Untuk pemeriksaannya dilakukan dengan alat pembesar ataupun mikroskopelektronik.

### 1. Pengujian dengan larutan ETSA

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memeperjelas batas butir yang ada pada suatu material karena larutan etsa akan memeberi warna tambahan pada batas butir. Namun larutan ini dapat merusak batas butir tersebut, bertujuan juga untuk mengetahui struktur mikro logam serta sifat - sifatnya. Selain itu juga untuk mengetahui pengaruh Heat Treatment terhadap perubahan struktur mikro dan perubahan sifat logam serta membandingkannya dengan sifat mekanik yang diinginkannya.

Merupakan disiplin ilmu yang mempelajari karakteristik mikrostruktur dan makrostruktur suatu logam, paduan logam dan material lainnya serta hubungannya dengan sifat-sifat material, atau biasa juga dikatakan suatu proses untuk mengukur suatu material baik secara kualitatif maupun kuantitatif berdasarkan informasi-informasi yang didapatkan dari material yang diamati. Dalam ilmu metalurgi struktur mikro merupakan hal yang sangat penting untuk dipelajari. Karena struktur mikro sangat berpengaruh pada sifat fisik dan mekanik suatu logam. Struktur mikro yang berbeda sifat logam akan berbeda pula. Struktur mikro yang kecil akan membuat kekerasan logam akan meningkat. Dan juga sebaliknya, struktur mikro yang besar akan membuat logam menjadi ulet atau kekerasannya menurun. Struktur mikro itu sendiri dipengaruhi oleh komposisi kimia dari logam atau paduan logam tersebut serta proses yang dialaminya.

Merupakan disiplin ilmu yang mempelajari karakteristik mikrostruktur dan makrostruktur suatu logam, paduan logam dan material lainnya serta hubungannya dengan sifat-sifat material, atau biasa juga dikatakan suatu proses untuk mengukur suatu material baik secara kualitatif maupun kuantitatif berdasarkan informasi-informasi yang didapatkan dari material yang diamati. Dalam ilmu metalurgi struktur mikro merupakan hal yang sangat penting untuk dipelajari. Karena struktur mikro sangat berpengaruh pada sifat fisik dan mekanik suatu logam. Struktur mikro yang berbeda sifat logam akan berbeda pula. Struktur mikro yang kecil akan membuat kekerasan logam akan meningkat. Dan juga sebaliknya, struktur mikro yang besar akan membuat

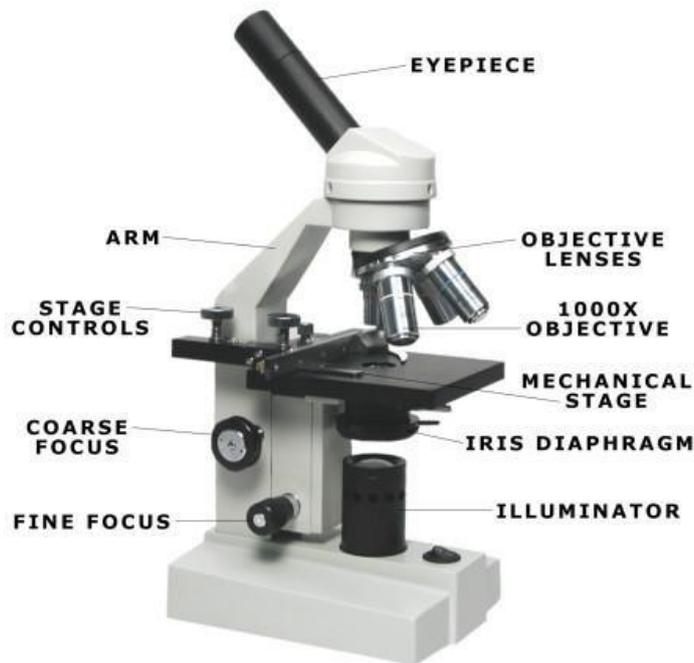
logam menjadi ulet atau kekerasannya menurun. Struktur mikro itu sendiri dipengaruhi oleh komposisi kimia dari logam atau paduan logam tersebut serta proses yang dialaminya.

- a. Metalografi makro, yaitu penyelidikan struktur logam dengan pembesaran  $10 \pm 100$  kali.
- b. Metalografi mikro, yaitu penyelidikan struktur logam dengan pembesaran 1000 kali.

Untuk mengamati struktur mikro yang terbentuk pada logam tersebut biasanya memakai mikroskop optik. Sebelum benda uji diamati pada mikroskop optik, benda uji tersebut harus melewati tahap-tahap preparasi. Tujuannya adalah agar pada saat diamati benda uji terlihat dengan jelas, karena sangatlah penting hasil gambar pada metalografi. Semakin sempurna preparasi benda uji, semakin jelas gambar struktur yang diperoleh. Adapun tahapan preparasinya meliputi pemotongan, mounting, pengampelasan, polishing dan etching (etsa).

#### **a. Mikroskop Cahaya**

Mikroskop cahaya atau dikenal juga dengan nama "*Compound light microscope*" adalah sebuah mikroskop yang menggunakan cahaya lampu sebagai pengganti cahaya matahari sebagaimana yang digunakan pada mikroskop konvensional. Pada mikroskop konvensional, sumber cahaya masih berasal dari sinar matahari yang dipantulkan dengan suatu cermin datar ataupun cekung yang terdapat dibawah kondensor. Cermin ini akan mengarahkan cahaya dari luar kedalam kondensor.



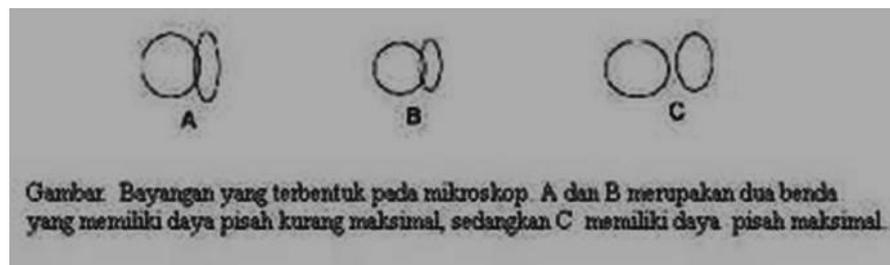
Gambar 2. 17 Gambar Mikroskop Cahaya

Pada mikroskop ini, kita dapat melihat bayangan benda dalam tiga dimensi lensa, yaitu lensa obyektif, lensa okuler dan lensa kondensor.

1. **Lensa obyektif** berfungsi guna pembentukan bayangan pertama dan menentukan struktur serta bagian renik yang akan terlihat pada bayangan akhir serta berkemampuan untuk memperbesar bayangan obyek sehingga dapat memiliki nilai "apertura" yaitu suatu ukuran daya pisah suatu lensa obyektif yang akan menentukan daya pisah spesimen, sehingga mampu menunjukkan struktur renik yang berdekatan sebagai dua benda yang terpisah.
2. **Lensa okuler** adalah lensa mikroskop yang terdapat di bagian ujung atas tabung berdekatan dengan mata pengamat, dan berfungsi untuk memperbesar bayangan yang dihasilkan oleh lensa obyektif berkisar antara 4 hingga 25 kali.

3. **Lensa kondensor** adalah lensa yang berfungsi guna mendukung terciptanya pencahayaan pada obyek yang akan dilihat sehingga dengan pengaturan yang tepat maka akan diperoleh daya pisah maksimal.

Jika daya pisah kurang maksimal maka dua benda akan terlihat menjadi satu dan pembesarannya pun akan kurang optimal.



Gambar 2. 18 Gambar Lensa Kondensor

## b. Langkah-langkah Pemeriksaan Metalografi

### 1. Pemotongan

Pemilihan sampel yang tepat dari suatu benda uji studi mikroskop optik merupakan hal yang sangat penting. Pemilihan sampel tersebut didasarkan pada tujuan pengamatan yang hendak dilakukan. Pada umumnya bahan komersial tidak homogen sehingga satu sampel yang diambil dari suatu volume besar tidak dapat dianggap representatif. Pengambilan sampel harus direncanakan sedemikian sehingga menghasilkan sampel yang sesuai dengan kondisi rata-rata bahan/kondisi ditempat-tempat tertentu (kritis) dengan memperhatikan kemudahan pemotongan pula. Secara garis besar, pengambilan sampel dilakukan pada daerah yang akan diamati mikrostruktur maupun makrostrukturnya. Sebagai contoh untuk pengamatan mikrostruktur material yang mengalami

kegagalan, maka sampel diambil sedekat mungkin pada daerah kegagalan (pada daerah kritis dengan kondisi terparah), untuk kemudian dibandingkan dengan sampel yang diambil dari daerah yang jauh dari daerah gagal. Perlu diperhatikan juga bahwa dalam proses memotong, harus dicegah kemungkinan deformasi dan panas yang berlebihan. Oleh karena itu, setiap proses pemotongan harus diberi pendinginan yang memadai.

Pada saat pemotongan jangan sampai merusak struktur bahan akibat gesekan alat potong dengan benda uji. Untuk menghindari pemanasan setempat atau berlebihan dapat digunakan air sebagai pendingin. Berdasarkan tingkat deformasi yang dihasilkan, teknik pemotongan terbagi menjadi dua yaitu : teknik pemotongan dengan deformasi yang besar menggunakan gerinda, sedangkan teknik pemotongan dengan deformasi yang kecil menggunakan low speed diamond saw.

Teknik pemotongan sampel dapat dilakukan dengan:

1. Pematahan : untuk bahan getas dan keras
2. Pengguntingan : untuk baja karbon rendah yang tipis dan lunak
3. Penggergajian : untuk bahan yang lebih lunak dari 350 HB
4. Pemotongan abrasi
5. *Electric discharge machining* : untuk bahan dengan konduktivitas baik di mana sampel direndam dalam fluida dielektrik lebih dahulu sebelum dipotong dengan memasang catu listrik antara elektroda dan sampel.

## 2. Pengamplasan

Penggerindaan Kasar, yaitu meratakan permukaan sampel dengan cara menggosokkan sampel pada baru gerinda. Bertujuan untuk menghilangkan deformasi pada permukaan akibat pemotongan dan Pemanasan yang berlebih harus dihindari. Sampel yang baru saja dipotong atau sampel yang telah terkorosi memiliki permukaan yang kasar. Permukaan yang kasar tersebut harus diratakan agar pengamatan struktur mudah dilakukan.

Proses mounting atau pembedaan benda uji dilakukan pada benda uji dengan ukuran yang kecil dan tipis, hal ini bertujuan untuk mempermudah pemegangan benda uji ketika dilakukan tahap preparasi selanjutnya seperti pengampelasan dan polishing. Benda uji ini di-mounting dengan alat mounting press dengan penambahan bakelit yang akan menggumpal dan meringkai benda uji. Selain bakelit juga masih banyak bahan yang dapat digunakan untuk mounting. Cetakannya :

- a. Berbentuk bulat
- b. Ukuran 1 inchi  $\pm$  1 ½ inchi  $\emptyset$

Adapun jenis-jenisnya yaitu:

- a. Cairan basa (degesing) untuk menghilangkan garis.
- b. Panas (Lemak dengan menggunakan uap gas)
- c. Dengan menggunakan asam lemah.
- d. Alkohol yang tidak bereaksi dengan udara.
- e. Aseton.

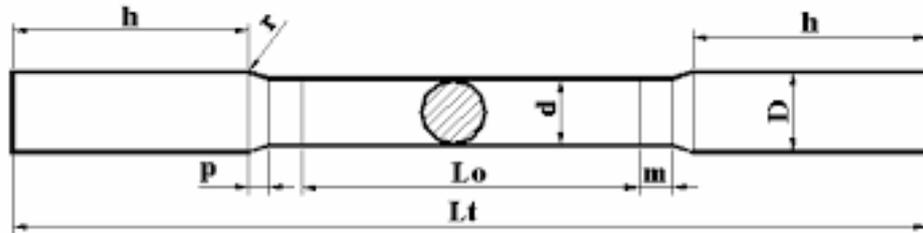
## 2.10. Pengujian Tarik

Proses pengujian tarik bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik benda uji, pengujian tarik untuk kekuatan tarik didaerah las dimaksudkan untuk mengetahui apakah kekuatan las mempunyai nilai yang sama. Lebih rendah atau lebih tinggi dari kelompok raw materials. Pengujian tarik untuk kualitas kekuatan tarik untuk mengetahui berapa nilai kekuatannya dan dimanakah letak putusnya suatusambungan 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 deformasi pada beban uji adalah proses pergeseran butiran kristal logam yang mengakibatkan melemahnya gaya elektromagnetik setiap atom logam sehingga terlepas sambungan las tersebut oleh penarikan gaya maksimum. Pada pengujian tarik beban diberikan secara kontinu dan pelan-pelan bertamabah besar, bersamaan dengan itu dilakukan pengamatan untuk mengetahui panjangnya benda uji dan hasil kurva tegangan regangan.

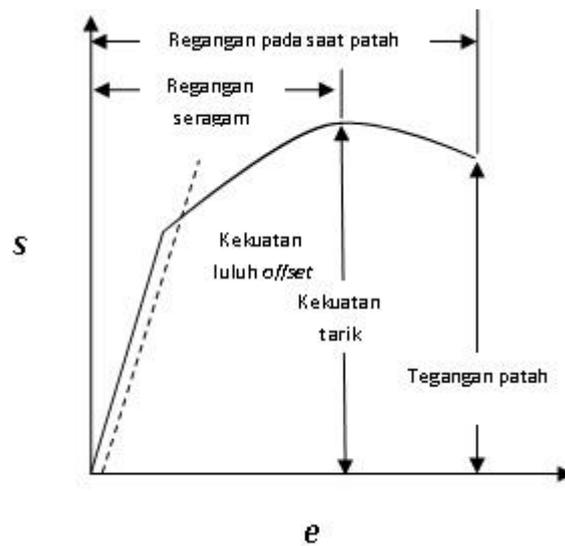
Dalam sambungan las sifat tarik berhubungan dengan sifat dari logam jenis induk, jenis elektroda yang digunakan, sifat dari daerah HAZ, sifat logam las dan sifat dinamik dari sambungan berhubungan erat dengan geometri dan distribusi tegangan dalam sambungan.

**BATANG UJI BULAT**



Gambar 2. 19 Pengujian Uji Tarik

Pengujian batang tersebut dibebani dengan kenaikan beban sedikit demi sedikit hingga batang uji patah. Supaya dapat mengetahui kekuatan tarik dengan bentuk kurva tegangan-regangan teknik, seperti pada gambar dibawah berikut:



Gambar 2. 20 Kurva Tegangan-Regangan

Tegangan pada kurva adalah tegangan membusur rata-rata dari pengujian tarik.

Tarik maksimum dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_t = \frac{P_{maks}}{A_o} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

$P_{maks}$  = Gaya yang bekerja/beban maksimal (kg)

$A_0$  = Luas Penampang ( $\text{cm}^2$ )

$\sigma$  = Tegangan Tarik ( $\text{kg/cm}^2$ )

Regangan yang digunakan untuk kurva tegangan-regangan teknik adalah linear rata-rata, yang diperoleh dengan cara membagi perpanjangan yang dihasilkan setelah pengujian dilakukan dengan panjang awal. Dapat dituliskan sebagai berikut:

$$e = \frac{L_i - L_0}{L_0} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

$e$  = Besar regangan

$L_i$  = Panjang benda uji akhir (mm)

$L_0$  = Panjang benda uji awal (mm)

Pada tegangan dan regangan yang dihasilkan, dapat diketahui nilai modulus elastisitas. Persamaannya dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$E = \frac{\sigma}{e} \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan :

$E$  = Besar modulus elastisitas ( $\text{kg/mm}^2$ )

$e$  = Regangan

$\sigma$  = Tegangan ( $\text{kg/mm}^2$ )

Dari kurva uji tarik yang diperoleh dari hasil pengujian akan didapatkan beberapa sifat mekanik yang dimiliki oleh benda uji, sifat-sifat tersebut antara lain

(Dieter, 1993).

a. Kekuatan Tarik (*Tensile Strenght*)

Kekuatan tarik atau kekuatan maksimum (*Ultimate Tensile Strenght*) adalah beban maksimum dibagi luas penampang lintang awal benda uji.

$$\sigma_u = \frac{P_{maks}}{A_o} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan :

$\sigma_u$  = Kuat Tarik

$P_{maks}$  = Beban Maksmal (kg)

$A_o$  = Luas penampang mula dari penampang batang ( $\text{mm}^2$ )

b. Kekuatan Luluh (*Yield Strenght*)

Kekuatan luluh merupakan titik yang menunjukkan perubahan dari deformasi elastis ke deformasi plastis (Dieter, 1993). Rumus kekuatan luluh dituliskan seperti persamaan sebagai berikut.

$$\gamma_s = \frac{P_y}{A_o} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan :

$\gamma_s$  = Besarnya Tegangan Luluh ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$P_y$  = Besarnya beban titik yield (kg)

$A_o$  = Luas Penampang ( $\text{mm}^2$ )

c. Keuletan

Keuletan adalah kemampuan suatu bahan sewaktu menahan beban pada saat diberikan penetrasii dan akan diberikan kebentuk semula. Secara umum

pengukuran keuletan dilakukan untuk memenuhi kepentingan tiga buah hal (Dieter, 1993).

1. Untuk menunjukkan elongasi dimana suatu logam dapat berdeformasi tanpa terjadi patah dalam suatu proses pembentukan logam, misalnya pengerolan dan ekstrasi.
2. Untuk memberi petunjuk secara umum kepada perancang mengenai kemampuan logam untuk mengalir secara plastis sebelum patah.
3. Sebagai petunjuk adanya perubahan permukaan pemurnian atau kondisi pengelolaan.

#### d. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas adalah ukuran kekuatan suatu bahan akan keelastisitasannya. Modulus elastisitas ditentukan oleh gaya ikat antar atom, karena gaya-gaya ini tidak dapat dirubah tanpa terjadi perubahan dasar pada sifat bahannya. Sifat ini hanya sedikit dapat berubah oleh adanya penambahan paduan, perlakuan panas, atau pengerjaan dingin. Secara matematis persamaan modulus elastisitas dapat ditulis sebagai berikut.

$$Mo = \frac{\sigma}{\epsilon} \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan :

$\sigma$  = Tegangan

$\epsilon$  = Regangan

e. Kelentingan (Resilience)

Kelentingan adalah kemampuan suatu bahan untuk menyerap energi pada deformasi secara elastis dan kembali ke bentuk awal apabila bebannya dihilangkan (Dieter, 1993).

$$\mu_0 = \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \epsilon \dots \dots \dots (2.7)$$

f. Ketangguhan

Ketangguhan adalah meninjau luas keseluruhan daerah dibawah kurva tegangan regangan. Luas ini menunjukkan jumlah energi tiap satuan volume yang dapat dikenakan pada bahan tanpa mengakibatkan pecah. Ketangguhan ( $S_0$ ) adalah perbandingan antara kekuatan dan keuletan. Dapat dituliskan sebagai berikut.

$$U_t = \frac{\sigma_y + \sigma_{tmaks}}{2} \cdot \epsilon \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan :

$U_t$  = Modulus ketangguhan

$\sigma_y$  = Tegangan sebenarnya (kN/mm<sup>2</sup>)

$\epsilon$  = Regangan (%)

$\sigma_{tmaks}$  = Tegangan maksimal (kN/mm<sup>2</sup>)

Tegangan patah sejati adalah beban pada waktu patah, dibagi luas penampang lintang. Tegangan ini harus dikoreksi untuk keadaan tegangan tiga sumbu yang terjadi pada benda uji tarik saat terjadi patah. Karena data yang diperlukan untuk koreksi seringkali tidak diperlukan, maka tegangan patah sejati sering tidak tepat nilai.