

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Penelitian Terkait

Analisis sifat mekanik pada Baja AISI 4140 beberapa telah dilakukan oleh peneliti terdahulu (Fendri, et al., 2018; Yanda & Burmawi, 2021; Sutowo & Susilo, 2013). Beberapa penelitian tersebut melakukan pengujian sifat mekanik Baja AISI 4140 pada perbedaan temperatur terhadap perlakuan panas tempering (Fendri, et al., 2018; Yanda & Burmawi, 2021). Baja AISI 4140 dipilih sebagai material penelitian karena berdasar kandungan elemen pada paduan Baja AISI 4140 memungkinkan untuk diberi perlakuan panas (*heat treatment*) (Fendri, et al., 2018).

Perlakuan panas memiliki peran penting karena dapat merubah struktur mikro dan sifat mekanik dari baja tersebut sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan (Sutowo & Susilo, 2013). Fendri *et al.*, (2018) mengungkapkan bahwa baja memerlukan perlakuan lebih lanjut karena proses hardening yang dilakukan sebelumnya pada baja dapat menyebabkan kekerasan dan kegetasan sehingga belum cocok untuk digunakan. Yanda dan Burmawi (2021) mengungkapkan bahwa melalui perlakuan panas yang tepat dapat menghilangkan tegangan serta dapat memperbesar atau memperkecil ukuran butir.

Variasi perbedaan temperatur dilakukan pada penelitian terdahulu. Pada penelitian Fendri *et al.*, (2018) serta Yanda dan Burmawi (2021) variasi temperatur yang digunakan adalah 200°C, 400°C, dan 600°C. Perbedaan variasi perbedaan temperatur pada penelitian bertujuan untuk mengetahui variasi temperatur mana yang menghasilkan nilai uji yang lebih baik.

Hasil penelitian Ferdi *et al.*, (2018) menunjukkan bahwa perlakuan panas pada Baja AISI 4140 tidak terlalu banyak merubah keadaan dari struktur maupun nilai kekerasan dan kekuatan material. Begitu pula hasil penelitian Yanda dan Burnawi (2021) menyatakan bahwa nilai impak tanpa perlakuan raltif lebih tinggi jika dibandingkan dengan yang dilakukan pemanasan.

2.2. Pengertian Baja

Baja adalah logam *alloy* yang komponen utamanya adalah besi, dengan karbon sebagai material pengalloy utama. Karbon bekerja sebagai agen pengeras, mencegah atom besi, yang secara alami teratur dalam *lattice*, bergeser melalui satu sama lain. Memvariasikan jumlah karbon dan penyebaran *alloy* dapat mengontrol kualitas baja. Baja dengan peningkatan jumlah karbon dapat memperkeras dan memperkuat besi, tetapi juga lebih rapuh. Definisi

klasik, baja adalah besi karbon – *alloy* dengan kadar karbon sampai 5,1%; ironisnya, *alloy* dengan kadar karbon lebih tinggi dari ini dikenal dengan besi.

Baja merupakan logam paduan yang terdiri dari besi, karbon dan unsur lainnya. Baja dapat diklasifikasikan lagi berdasarkan banyaknya kadar karbon dan paduan yang dikandung. Karbon merupakan salah satu unsur yang sangat penting, karena dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja. Berdasarkan unsur paduannya, klasifikasi baja mengikuti aturan yang telah ditetapkan dalam SAE (*Society of Automotive Engineers*) dan AISI (*American Iron and Steel Institute*), misalnya SAE-AISI 1320 - 1340, artinya adalah baja paduan dengan unsur Mangan (Mn) sekira 1,5% - 2,0% (Sardjono, et al., 2009).

2.1.1. Baja Karbon

Baja karbon merupakan paduan antara besi (Fe) dan karbon (C) dengan sedikit unsur tambahan berupa belerang, fosfor, mangan dan silikon. Baja karbon mempunyai kandungan karbon maksimal sebesar 1,7%. Sifat baja karbon tergantung pada besarnya kadar karbon, semakin tinggi kadar karbonnya maka kekuatan dan kekerasannya akan semakin tinggi. Hal tersebut dapat dikelompokkan berdasarkan kadar karbonnya. Berdasarkan kegunaannya ataupun kepentingan pabrikasi dan disesuaikan berdasarkan standar ASTM (*American Society for Testing and Material*) paduan besi (Fe) –karbon (C) merupakan unsur utama pembentuk baja. Disamping itu baja juga bisa mengandung unsur campuran lain yang disebut paduan, misalnya karbon (C), sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si) dan mangan (Mn) yang jumlahnya dibatasi. Berdasarkan kandungan karbonnya baja terbagi menjadi menjadi 2 macam, yaitu:

A. Baja karbon (*carbon steel*)

Baja karbon dibagi menjadi tiga yaitu baja karbon rendah (*low carbon steel*), baja karbon menengah (*medium carbon steel*), dan baja karbon tinggi (*high carbon steel*).

Baja karbon rendah (*low carbon steel*) memiliki persentase karbon baja karbon rendah berkisar antara 0,05% - 0,30% C. Sifat yang dimiliki oleh baja karbon rendah adalah baja mudah ditempa dan mudah dimesin. Penggunaan baja karbon rendah *automobile bodies, buildings, pipes, chains, rivets, screws, nails* (0,05% - 0,20% C) dan *gears, shafts, bolts, forgings, bridges, buildings* (0,20% - 0,30% C).

Baja Karbon menengah (*medium carbon steel*) memiliki kekuatan lebih tinggi daripada baja karbon rendah. Sifatnya sulit untuk dibengkokkan, dilas, maupun dipotong. Penggunaan baja karbon menengah seperti *connecting rods, crank pins, axles* (0,30% -

0,40% C), *car axles, crankshafts, rails, boilers, auger bits, screwdrivers* (0,40% - 0,50% C) serta *hammers dan sledges* (0,50% - 0,60% C).

Baja karbon tinggi (*high carbon steel*) memiliki sifat sulit dibengkokkan, dilas dan dipotong. Baja karbon tinggi memiliki kandungan 0,60% - 1,50% C. Contoh penggunaan baja karbon tinggi yaitu pada *screw drivers, blacksmiths hammers, tables knives, screws, hammers, vise jaws, knives, drills. tools for turning brass and wood, reamers, tools for turning hard metals, saws for cutting steel, wire drawing dies, dan fine cutters.*

B. Baja paduan (*alloy steel*)

Tujuan dilakukan penambahan unsur yaitu:

1. Menaikkan sifat mekanik baja (kekerasan, keliatan, kekuatan tarik dan sebagainya).
2. Menaikkan sifat mekanik pada temperatur rendah.
3. Meningkatkan daya tahan terhadap reaksi kimia (oksidasi dan reduksi) Untuk membuat sifat-sifat special.

Baja paduan yang diklasifikasikan menurut kadar karbonnya dibagi menjadi:

1. *Low alloy steel*, jika elemen paduannya $\leq 2,5\%$.
2. *Medium alloy steel*, jika elemen paduannya 2,5 – 10%.

2.1.2. Baja AISI 4140

		SeAH Besteel Corp. 1-6, SORYONG-DONG, KUNSAN, CHEONGBUK, KOREA(573-7111)		MILL CERTIFICATE		TEL : +82-(0)63-460-8572, 8318(0A) +82-(0)63-460-8114(Repres.)		FAX : +82-(0)63-460-8423		Page(0/0)
Date : 2019-01-11		Cert. No. : 201901-039434				Steel Grade : AISI 4140/SCM 440		Size (mm) : 5 - 100		Length (mm) : 3,000
Customer :		Heat No. : 286991		Shape of Product : PLATE SHEET		Delivery Condition : Plate Bar		Quantity(pcs) : 1		
Inspection Items		Chemical Composition (wt. %)								
		C	SI	MN	P	S	CU	NI	CR	MO
		x 100	x 100	x 100	x 100	x 100	x 100	x 1000	x 1000	x 100
Spec.	Min.	38	15	75	35	20			80	15
	Max.	43	35	100					110	25
Result		41	25	67	16	20	25		103	15
Inspection Items		Product Hardness (HB)								
		SURFACE 255-273 HB 50-52 HRC								

Mechanical Properties AISI 4140/SCM 440

Mechanical Properties	Symbol	Steel
Yield strength (N/mm ²)		≥739
Tensile Strength (N/mm ²)		≥892
Extension ratio (%)		≥18.2
Area reduction (%)		≥63
Impact (V)		87 - 88

Gambar 2.1. Spesifikasi Baja AISI 4140

Sumber: Mill Sertificate Plate Sheet AISI 4140

Baja AISI 4140 merupakan jenis material yang sering digunakan dalam bahan pembuatan berbagai macam *spare part* mesin-mesin industri maupun otomotif. Sifat mekanis yang dimiliki baja AISI sering dipakai dalam perancangan seperti kekerasan, keuletan, dan ketangguhan. Dalam proses perlakuan panas, waktu penahanan panas bergantung pada bentuk dimensi baja. Semakin rumit bentuk dan dimesinya, semakin lama waktu penahannya, hal ini dikarenakan perlunya panas yang akan diterima baja sampai ke inti material. Semakin lama baja mencapai suhu ruang, maka mikro struktur yang terbentuk yakni ferrite + pearlite. Struktur martensit menyebabkan baja cenderung lebih keras dan getas, sedangkan struktur ferrite + pearlite menyebabkan baja cenderung lebih ulet dan lunak.

2.3. Sifat Mekanik Pada Logam

Sifat mekanik logam adalah suatu sifat terpenting karena sifat mekanik logam menyatakan kemampuan suatu logam untuk menerima beban atau gaya dari luar tanpa mengalami kerusakan pada logam tersebut.

2.3.1. Macam - Macam Sifat Mekanik Material

Sifat mekanik material adalah kemampuan suatu bahan untuk menerima beban atau gaya tanpa menimbulkan kerusakan pada material tersebut. Untuk mendapatkan sifat mekanik material biasanya dilakukan pengujian mekanik. Pengujian mekanik ini pada dasarnya bersifat merusak (*destructive test*).

Terdapat beberapa sifat mekanik yang ada pada logam, pada umumnya antara lain sebagai berikut:

1. Kekuatan (*Strength*)

Kekuatan merupakan kemampuan suatu bahan untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan bahan tersebut patah. Kekuatan ada beberapa macam tergantung pada jenis beban yang bekerja (N/mm^2 , kg/mm^2 , lb/in^2). Contohnya: kekuatan tarik, tekan, geser, torsi, dan kekuatan lengkung.

2. Kekerasan (*Hardness*)

Kekerasan adalah kemampuan suatu material untuk menerima penetrasi benda runcing, goresan, kikisan tanpa mengalami deformasi (BHN, VHN, HRC).

3. Kekenyalan (*Elasticity*)

Kekenyalan merupakan kemampuan suatu bahan untuk menerima tegangan atau beban tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi).

4. Plastisitas (*Plasticity*)

Plastisitas merupakan kemampuan bahan untuk mengalami sejumlah deformasi platis (permanen) tanpa mengakibatkan terjadinya kerusakan. Mekanisme yang mempunyai plastisitas yang tinggi dikatakan sebagai material yang ulet (*ductile*), sedangkan material yang mempunyai plastisitas rendah dikatakan sebagai material yang getas (*brittle*).

5. Ketangguhan (*Toughness*)

Ketangguhan merupakan kemampuan bahan untuk menyerap energi tanpa mengakibatkan terjadinya kerusakan (kg/mm).

6. Kekakuan (*Stiffness*)

Kemampuan suatu bahan untuk menerima tegangan atau beban tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi) atau defleksi.

7. Kelelahan (*Fatigue*)

Kelelahan merupakan kecenderungan bahan untuk patah apabila menerima tegangan berulang-ulang yang besarnya jauh di bawah batas kekakuan elastisitas (siklus).

8. Mulur (*Creep*)

Mulur menyatakan kecenderungan logam mengalami deformasi plastis yang besarnya merupakan fungsi waktu saat menerima beban yang besarnya tetap (siklus).

2.3.2. Faktor yang Memengaruhi Sifat Mekanis pada Logam

Terdapat beberapa faktor yang memengaruhi sifat mekanik yang ada pada logam, antara lain sebagai berikut:

1. Kadar karbon

Semakin tinggi kadar karbon maka kekerasan akan semakin tinggi namun akan menjadi rapuh. Kandungan karbon ini juga mempengaruhi keuletan, ketangguhan, maupun sifat mampu mesin.

2. Unsur kimia

Penambahan unsur kimia pada baja dapat memengaruhi sifat mekaniknya. Penambahan karbon pada logam akan membuat logam semakin keras tetapi rapuh. Unsur kimia yang dapat bersenyawa antara lain:

a. Nikel

- Meningkatkan kekuatan dan kekerasan

- Meningkatkan ketahanan terhadap korosi
- Meningkatkan keuletan dan tahan gesek

b. Chromium

- Menambah kekerasan baja
- Membentuk karbida
- Menambah keuletan, sehingga baik untuk pegas

3. Ukuran butir

Ukuran butir pada baja sangat berpengaruh. Ukuran butir yang besar dan homogen membuat baja mempunyai sifat yang ulet. Sedangkan untuk ukuran butir yang kecil dan tidak homogen maka baja tersebut akan bersifat kaku dan keras.

4. Fasa dan struktur

Fasa dapat memengaruhi sifat mekanik logam, karena pada tiap-tiap fasa pada logam memiliki struktur mikro sendiri dengan sifat mekanik, fisik dan kimia yang berbeda-beda, misalnya fasa martensit memiliki sifat-sifat keras, rapuh, magnetik dengan nilai kekerasan 650 – 700 BHN. Jadi dapat dikatakan fasa martensit memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada ferit. Logam yang memiliki struktur yang teratur mempunyai sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan logam yang strukturnya tidak teratur, sebab tegangan dalam yang timbul lebih besar. Tegangan di dalam berbanding terbalik dengan sifat mekanik.

5. Cacat

Cacat terjadi kemungkinan besar selama proses pertumbuhan kristal atau pada proses *heat treatment* (perlakuan panas). Cacat ini dibedakan menjadi cacat titik, cacat garis, cacat bidang dan cacat ruang. Cacat yang terjadi pada logam menyebabkan kerusakan pada struktur logam, misalnya terjadi kekosongan (*vacancy*), sisipan dan slip. Kerusakan ini menyebabkan menurunnya sifat mekanik logam.

6. Endapan

Reaksi pengendapan merupakan kebalikan dari reaksi pelarutan yang terjadi akibat proses pendinginan. Pengendapan terjadi bila logam didinginkan sampai daerah suhu dan fasa setelah larut yang dipengaruhi laju waktu pendinginan. Pada laju waktu pendinginan cepat terjadi endapan serta fasa dan pada laju

pendinginan lambat dapat terjadi endapan dua fasa sehingga pengendapan yang terjadi berpengaruh pada sifat mekanik logam.

2.4. Teori Pengelasan

Pengelasan merupakan proses penyambungan dua buah logam khususnya baja untuk menghasilkan sebuah konstruksi mesin. Sambungan las digunakan untuk menyatukan dua buah baja atau lebih yang bersifat permanen. Penggunaan sambungan las dalam konstruksi mesin misalnya konstruksi casis kendaraan,udukan mesin industri, sambungan pipa dan lain sebagainya. Penggunaan teknologi las biasanya juga dipakai dalam konstruksi industri makanan, bidang konstruksi, otomotif, perkapalan, pesawat terbang, dan bidang lainnya. Pengelasan cara kerjanya dibagi menjadi tiga kelompok yaitu pengelasan penekanan, pematrian dan pengelasan cair. Pengelasan cair yaitu cara pengelasan dimana benda yang disambung dipanaskan sampai mencair dan menambah logam las dengan sumber energi panas dari mesin las (Harsono, et al., 2019).

2.4.1. Terminolgi Hasil Lasan

Berikut merupakan terminologi hasil las yang terbagi menjadi 13 (Sonawan, 2006):

1. Dilusi
Dilusi merupakan perbandingan antara logam induk yang mencair dan logam las, dilusi ini dapat diperoleh dengan membandingkan luas penampang logam induk yang mencair dan luas penampang logam
2. Elektroda
Kutub listrik, terbagi dua yaitu anoda bermuatan positif dan katoda yang bermuatan negatif, istilah ini biasanya ada dalam pengelasan yang melibatkan listrik, misalnya dalam SMAW. Dalam SMAW, elektroda yang berperan sebagai kawat las yang menyuplai logam las.
3. HAZ
HAZ merupakan kepanjangan dari Heat Affected Zone yang memiliki arti daerah terpengaruh panas dan mengalami perubahan struktur mikro dan terletak pada logam induk dikiri-kanan logam las.
4. Kampuh las
Bagian dari logam induk yang nantinya akan diisi oleh deposit las atau logam (*weld metal*). Kampuh las, awalnya adalah berupa kubangan las (*weld pool*) kemudian diisi dengan logam las.
5. Lebihan logam las atau plat (*Face Reinforcement*)

Kelebihan dari logam las dibagian atas pelat yang diukur dari permukaan atas pelat.

6. Logam induk (*Base Metal*)

Logam yang dilas.

7. Logam las (*Weld Metal*)

Campuran dari logam induk dan logam tambahan yang mencair nantinya membeku.

8. Logam pengisi

Logam yang ditambahkan dari luar untuk mengisi kampuh, dalam proses SMAW, logam pengisi juga berfungsi sebagai elektroda.

9. Mekanik las

Bagian dari logam las yang dilihat dari atas pelat.

10. Penetrasi

Kedalaman penembusan logam las dalam logam induk.

11. Polaritas balik

Istilah pengkutuban listrik pada pengelasan busur listrik dimana kutub positif dihubungkan dengan elektroda dan kutub negatif dihubungkan ke logam induk.

12. Polaritas lurus

Istilah pengkutuban listrik pada pengelasan busur listrik yang merupakan kebalikan dari polaritas balik dimana kutub negatif dihubungkan ke elektroda dan kutub positif dihubungkan ke logam induk.

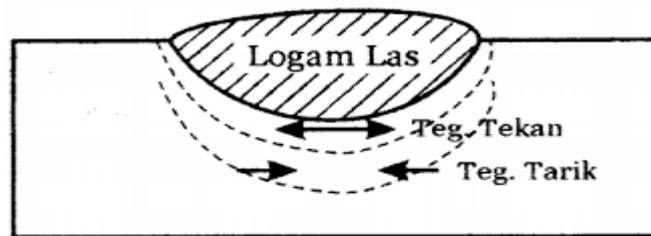
13. Sambungan las

Bagian dari logam induk yang akan disambung. Pada bagian ini nantinya terjadi pencairan logam induk.

2.4.2. Tegangan sisa (*Residual Stress*)

Tegangan sisa adalah gaya elastis yang dapat mengubah jarak antar atom dalam bahan tanpa adanya beban dari luar. Dalam proses pengelasan, bagian yang dilas menerima panas pengelasan setempat dan selama proses berjalan suhunya berubah terus sehingga distribusi suhu tidak merata (Wiryosumarto & Okumura, 1996).

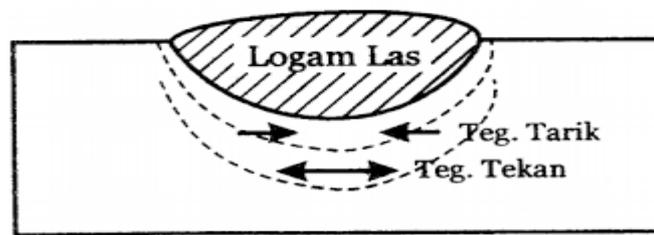
Proses terjadinya tegangan sisa selama pengelasan, daerah dibawah logam las akan mengalami pemuaian, sedangkan daerah dibawahnya mencoba menahannya. Bagian yang memuai akan mengalami tegangan tekan sedangkan daerah di bawahnya melawan dengan tegangan tarik seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Kondisi tegangan selama pengelasan

Sumber: Wiryosumarto, (1988:135)

Sebaliknya selama proses pendinginan, daerah logam las akan mengalami tegangan tarik dan daerah bawahnya melawan dengan tekanan seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Kondisi Tegangan Selama Pengelasan

Sumber: Hery Sonawan (2003:75-76)

Tegangan-tegangan yang terjadi pada pelat yang dilas ini akan terus ada hingga temperatur kamar. Tegangan yang demikian disebut dengan tegangan sisa (*Residual stress*). Jika tegangan yang tersisa itu berupa tegangan tarik maka hal ini akan membahayakan konstruksi las, karena tegangan tarik ini jika melebihi kekuatan tarik daerah itu, maka mengakibatkan retak (*Crack*). Tegangan tarik yang terjadi pada gambar 2.3 mungkin saja sampai ke permukaan logam las.

Penyebab terjadinya tegangan sisa yaitu akibat dari tegangan termal seperti pada pengelasan dan perlakuan panas, disebabkan karena transformasi fasa seperti pada baja carbon, terjadi karena deformasi plastis yang tidak merata disebabkan gaya-gaya mekanis seperti pada pengerjaan dingin selain pengerolan, penempaan, pembentukan, logam atau pengejaan lain yang dilakukan dengan mesin.

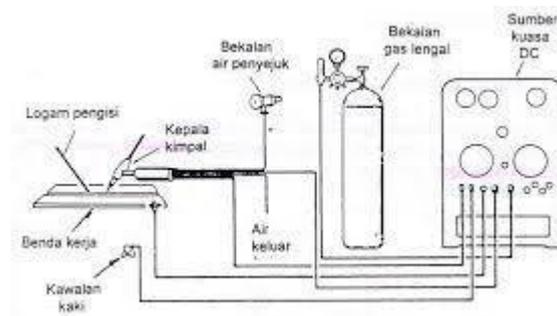
2.4.3. Pengertian Las Tungsten Inert Gas

Las TIG (*Tungsten Inert Gas*) adalah proses pengelasan yang mana busur nyala listrik ditimbulkan oleh elektroda tungsten (elektroda tidak terumpan) dengan benda kerja logam (Budiyanto, et al., 2017). *Tungsten Inert Gas* (TIG) merupakan salah satu dari bentuk las busur listrik (*Arc Welding*) yang menggunakan *inert gas* sebagai pelindung dengan tungsten

atau wolfram sebagai elektroda (Prasetyo & Suwito, 2014). Elektroda wolfram yang digunakan dalam las TIG bukan merupakan bahan tambah. Busur listrik yang terjadi antara ujung elektroda wolfram dan bahan dasar merupakan sumber panas untuk pengelasan (Budiyanto, et al., 2017). Titik cair elektroda wolfram sedemikian tingginya sampai mencapai 3410°C , sehingga tidak ikut mencair pada saat terjadi busur listrik (Budiyanto, et al., 2017). Daerah pengelasan dilindungi oleh gas lindung (gas tidak aktif) agar tidak terkontaminasi dengan udara luar. Kawat las dapat ditambahkan atau tidak tergantung dari bentuk sambungan dan ketebalan benda kerja yang akan dilas.

Adapun perangkat yang dipakai dalam pengelasan las gas tungsten adalah sebagai berikut:

1. Mesin las AC atau DC
2. Regulator gas lindung
3. Selang gas dan perlengkapannya
4. Elektroda tungsten
5. Gas pelindung
6. Kabel elektroda
7. Stang las (welding torch)



Gambar 2.4. Pengelasan TIG

Sumber: Budiyanto et al., 2017

2.4.4. Definisi Masukan Panas (*Heat Input*)

Pencairan logam induk dan logam pengisi memerlukan energi yang cukup. Energi yang dihasilkan dalam operasi pengelasan dihasilkan dari bermacam-macam sumber tergantung pada proses pengelasannya. Pada pengelasan busur listrik, sumber energi berasal dari listrik yang diubah menjadi energi panas. Kualitas hasil pengelasan dipengaruhi oleh energi panas yang berarti dipengaruhi tiga parameter yaitu arus las, tegangan las dan kecepatan pengelasan. Hubungan antara ketiga parameter itu menghasilkan energi

pengelasan yang sering disebut *heat input*. Persamaan dari heat input hasil dari penggabungan ketiga parameter dapat dituliskan sebagai berikut (Moustahid, et al., 2019).

$$\text{Heat Input (HI)} = \frac{\text{Tegangan Pengelasan (E)} \times \text{Arus pengelasan (I)}}{\text{Kecepatan Pengelasan (v)}}$$

2.4.5. Struktur Mikro Daerah Las

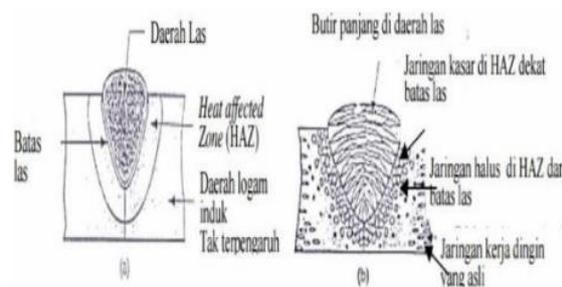
Daerah las-lasan terdiri dari tiga bagian yaitu: daerah logam las, daerah pengaruh panas atau *heat affected zone* disingkat menjadi HAZ dan logam induk yang tidak terpengaruhi oleh panas (Moustahid, et al., 2019; Helanianto, et al., 2020).

1. Daerah logam las

Daerah logam las adalah bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Komposisi logam las terdiri dari komponen logam induk dan bahan tambah dari elektroda. Logam las dalam proses pengelasan ini mencair kemudian membeku, maka kemungkinan besar terjadi pemisahan komponen yang menyebabkan terjadinya struktur yang tidak homogen, ketidakhomogenan struktur akan menimbulkan struktur ferit kasar dan bainit atas yang menurunkan ketangguhan logam las.

2. Daerah pengaruh panas atau *Heat Affected Zone* (HAZ). Daerah pengaruh panas atau *Heat Affected Zone* (HAZ) adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat sehingga daerah ini yang paling kritis dari sambungan las.

3. Daerah logam induk. Logam induk adalah bagian logam dasar di mana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan struktur dan sifat.



Gambar 2.5. Pembagian Daerah Lasan

Sumber: Helanianto (2020)

2.5. Pemilihan Elektroda

Pemilihan elektroda juga harus diperhatikan, pemilihan didasarkan pada jenis fluks, posisi pengelasan dan arus las. Pengelasan listrik dengan busur langsung, seperti yang kita pakai dan sedang kita pelajari, menggunakan kawat las. Kawat las berfungsi sebagai pembakar yang menimbulkan busur api, sekaligus sebagai bahan penambah logam, karena ia sendiri melebur bersama logam yang dilas dan berpadu satu sama lain



Gambar 2.6. Elektroda

Elektroda yang digunakan berupa kawat yang dibungkus pelindung berupa fluks. Elektroda ini selama pengelasan akan mengalami pencairan bersama dengan logam induk dan membeku bersama menjadi bagian kumpuh las. Proses pemindahan logam elektroda terjadi pada saat ujung elektroda mencair dan membentuk butir-butir yang terbawa arus busur listrik yang terjadi. Besar kecilnya arus listrik sangat berpengaruh, jika arus listrik besar maka butiran logam cair yang terbawa menjadi halus dan sebaliknya bila arus kecil maka butirannya menjadi besar.

2.6. Dapur Furnance

Furnance adalah dapur sebagai penerima panas bahan bakar untuk pembakaran, yang terdapat *fire gate* di bagian bawah sebagai alas bahan bakar dan yang sekelilingnya adalah pipa-pipa air ketel yang menempel pada dinding tembok ruang pembakaran yang menerima panas dari bahan bakar secara radiasi, konduksi, dan konveksi.

Tungku adalah sebuah peralatan yang digunakan untuk melelehkan logam untuk pembuatan bagian mesin (*casting*) atau untuk memanaskan bahan serta mengubah bentuknya (misalnya *rolling*/penggulungan, penempaan) atau mengubah sifat-sifatnya (perlakuan panas). Hal ini dikarenakan oleh gas buang dari bahan bakar berkontak langsung dengan bahan baku, maka jenis bahan bakar yang dipilih menjadi penting. Sebagai contoh, beberapa bahan tidak akan mentolelir sulfur dalam bahan bakar. Bahan bakar padat akan

menghasilkan bahan partikulat yang akan mengganggu bahan baku yang ditempatkan di dalam tungku. Alasannya sebagai berikut:



Gambar 2.7. Dapur Furnace

1. Hampir seluruh tungku menggunakan bahan bakar cair, bahan bakar gas atau listrik sebagai masukan energinya.
2. Tungku induksi dan busur/arc menggunakan listrik untuk melelehkan baja dan besi tuang.
3. Tungku pelelehan untuk bahan baku bukan besi menggunakan bahan bakar minyak.
4. Tungku yang dibakar dengan minyak bakar hampir seluruhnya menggunakan minyak tungku, terutama untuk pemanasan kembali dan perlakuan panas bahan.
5. Minyak diesel ringan (LDO) digunakan dalam tungku bila tidak dikehendaki adanya sulfur.

Idealnya tungku harus memanaskan bahan sebanyak mungkin sampai mencapai suhu yang seragam dengan bahan bakar dan buruh sesedikit mungkin. Kunci dari operasi tungku yang efisien terletak pada pembakaran bahan bakar yang sempurna dengan udara berlebih yang minim. Tungku beroperasi dengan efisiensi yang relatif rendah (serendah 7%) dibandingkan dengan peralatan pembakaran lainnya seperti boiler (dengan efisiensi lebih dari 90%). Hal ini disebabkan oleh suhu operasi yang tinggi dalam tungku. Sebagai contoh, sebuah tungku yang memanaskan bahan sampai suhu 1200°C akan mengemisikan gas buang pada suhu 1200 °C atau lebih yang mengakibatkan kehilangan panas yang cukup signifikan melalui cerobong.

Seluruh tungku memiliki komponen-komponen:

1. Ruang refraktori dibangun dari bahan isolasi untuk menahan panas pada suhu operasi yang tinggi.
2. Perapian untuk menyangga atau membawa baja, yang terdiri dari bahan refraktori yang didukung oleh sebuah bangunan baja, sebagian darinya didinginkan oleh air.
3. Burners yang menggunakan bahan bakar cair atau gas digunakan untuk menaikkan dan menjaga suhu dalam ruangan. Batubara atau listrik dapat digunakan dalam pemanasan ulang/*reheating* tungku.
4. Cerobong digunakan untuk membuang gas buang pembakaran dari ruangan
5. Pintu pengisian dan pengeluaran digunakan untuk pemuatan dan pengeluaran muatan. Peralatan bongkar muat termasuk *roller tables*, *conveyor*, mesin pemuat dan pendorong tungku.

2.7. PWHT (*Post Weld Heat Treatment*)

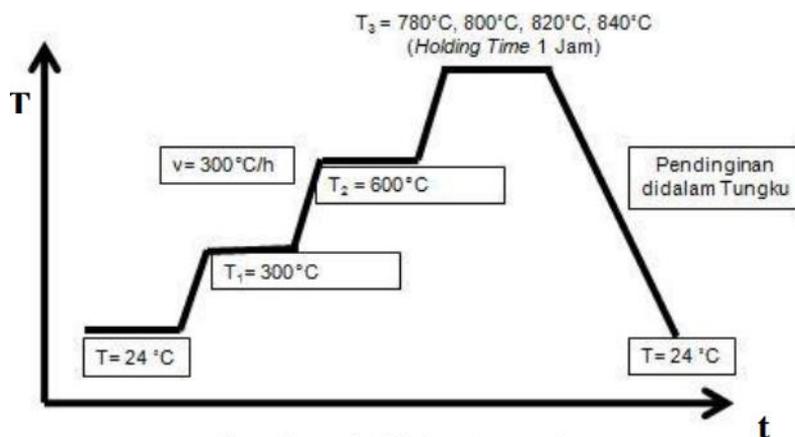
Proses PWHT adalah perlakuan panas yang dapat didifenisikan sebagai suatu kombinasi proses pemanasan dan pendinginan logam/ paduan dalam keadaan padat terkontrol. PWHT dapat dilakukan dengan memasukkan material pada furnace lalu menaikkan suhu pada temperatur tertentu, dibawah temperatur kritis, dan menahannya dengan memberi waktu tunggu (*holding time*), atau dengan cara menutup bagian yang dilas setelah proses las selesai dengan kain atau asbes atau sejenisnya untuk menjaga pendinginan agar tidak terlalu cepat. PWHT sering dilakukan sebagai usaha untuk membebaskan tegangan sisa, yaitu pada pengelasan pelat-pelat tebal. Namun dampak dari PWHT yaitu dapat menurunkan ketangguhan sambungan, peristiwa ini disebut penggetasan bebas tegang. Proses pembebasan tegangan ini sebenarnya adalah proses penempaan baja yang menyebabkan terjadinya perubahan struktur logam dan pengendapan karbida. Tujuan dari PWHT adalah mempersiapkan material logam yang akan jadi pertimbangan dengan keadaan produk setengah jadi agar proses selanjutnya meningkatkan umur pakai material logam sebagai produk jadi, dengan biaya perlakuan panas yang relatif rendah, umur pemakaian komponen akan lebih lama. Langkah-langkah PWHT sebagai berikut:

1. Memanaskan logam/ paduan sampai suhu tertentu dengan kecepatan tertentu (*heating temperature*)
2. Mempertahankan pada temperatur pemanasan tersebut dalam waktu/tempo tertentu (*holding time*)
3. Mendinginkan dengan media pendingin dan laju tertentu

2.7.1. Annealing

Annealing merupakan suatu proses melibatkan pemanasan khusus, untuk mendapatkan sifat bahan yang kita inginkan terhadap logam atau paduan. Prinsip kerja annealing adalah memanaskan baja hingga temperature kritis, selanjutnya dilakukan holding time, dan proses pendinginan di dalam tungku dilakukan dengan lambat hingga temperature seperti ditunjukkan gambar. Jenis annealing itu beraneka ragam, tergantung pada kondisi benda kerja, temperature pemanasan, lamanya waktu penahanan, laju pendinginan (*cooling rate*) dan lain sebagainya. (Rohman, et al., 2014) Tujuan dari *heat treatment annealing* adalah untuk:

1. Memperhalus ukuran butir.
2. Memperbaiki keuletan dan *machinability*
3. Mengurangi tegangan sisa
4. Menurunkan ketidak homogenan struktur



Gambar 2.8. Siklus Annealing

2.7.2. Quenching

Quenching adalah salah satu perlakuan panas dengan laju pendinginan cepat yang dilakukan dalam suatu media pendingin misal air atau oli. Hal ini bertujuan untuk memperoleh sifat mekanik yang lebih keras. Baja karbon rendah dan baja karbon sedang lazim dilakukan pencelupan dengan air. Baja karbon tinggi dan baja paduan biasanya digunakan minyak (oli) sebagai media pencelupan, pendinginannya tidak secepat air. Tersedia berbagai jenis minyak, seperti minyak mineral dengan kecepatan pendinginan yang berlainan sehingga dapat diperoleh baja dengan berbagai tingkat kekerasan. Untuk pendinginan yang cepat dapat digunakan air garam atau air yang disemprotkan. Beberapa jenis logam dapat dikeraskan melalui pendinginan udara terlalu lambat. Benda yang agak

besar biasanya dicelup dalam minyak. Suhu media celup harus merata agar dapat dicapai pendinginan yang merata pula.

2.8. Destructive Test (DT)

Pengujian kerusakan (*destructive test*) adalah salah satu metode untuk mengetahui kelayakan dan mutu suatu material sesuai dengan standar yang ditentukan. Pengujian ini harus merusak material seperti uji kekerasan (*hardness test*), uji takik (*impact test*), uji tarik (*tensile test*), dan uji tekuk (*bending test*).

2.8.1. Uji Kekerasan (*Hardness Test*)

Kekerasan didefinisikan sebagai kekerasan benda terhadap penetrasi dari bahan lain lebih keras. Kekerasan suatu sifat yang sebagian dari besarnya pengaruh oleh unsur-unsur paduannya dan kekerasan suatu bahan tersebut dapat berubah nilainya apabila dikerjakan dengan *cold worked* seperti pengerolan, penarikan, pemakanan, dan lain-lain serta kekerasan dapat dicapai sesuai kebutuhan dengan perlakuan keras. Faktor yang mempengaruhi hasil kekerasan dalam perlakuan panas antara lain komposisi kimia, langkah perlakuan panas, aliran pendinginan, temperature pemanasan, dan lain-lain (Nazwa, et al., 2014).

Kekerasan suatu bahan baja dapat diketahui dengan melakukan pengujian mesin uji kekerasan (*hardness tester*) menggunakan tiga metode atau teknik yaitu metode Brinell, Rockwell dan Vickers (William D. Callister, 2000).

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	Diamond cone; 1/16-1/8 in. diameter steel spheres			60 kg } Rockwell 100 kg } 150 kg } 15 kg } Superficial Rockwell 30 kg } 45 kg }	

Gambar 2.9. Teknik Pengujian Kekerasan

Sumber: William D. Callister, 2000

2.8.2. Pengujian Kekerasan Metode Rockwell

Pengujian Rockwell merupakan proses pembentukan lekukan pada permukaan logam dengan memakai indenter atau penetrator yang ditekan bagian beban tertentu. Pada pengujian Rockwell angka kekerasan yang ditunjukkan merupakan kombinasi antara beban

dan indenter yang akan dipakai, sehingga diperlukan awalan huruf pada angka kekerasan yang menunjukkan kombinasi beban dan penumbuk tertentu untuk skala beban yang digunakan adalah A dengan beban 60 kgf, B beban 100 kgf, dan C beban 150 kgf. Pada pengujian kekerasan Rockwell, kedalaman penetrasi permanen dimana penyerapan dan pelepasan beban utama tentu dapat dipakai untuk menentukan angka kekerasan Rockwell (Sulaeman, et al., 2019).

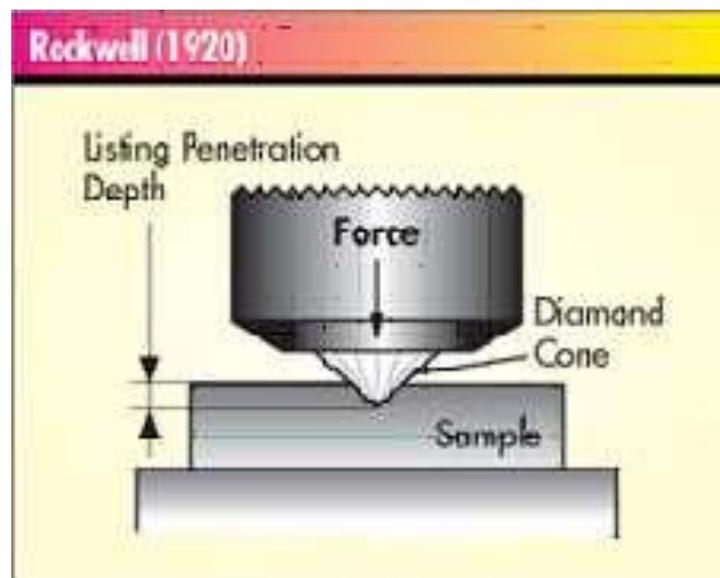
Perhitungan Kekerasan metode Rockwell:

$$HR = E - e$$

Keterangan:

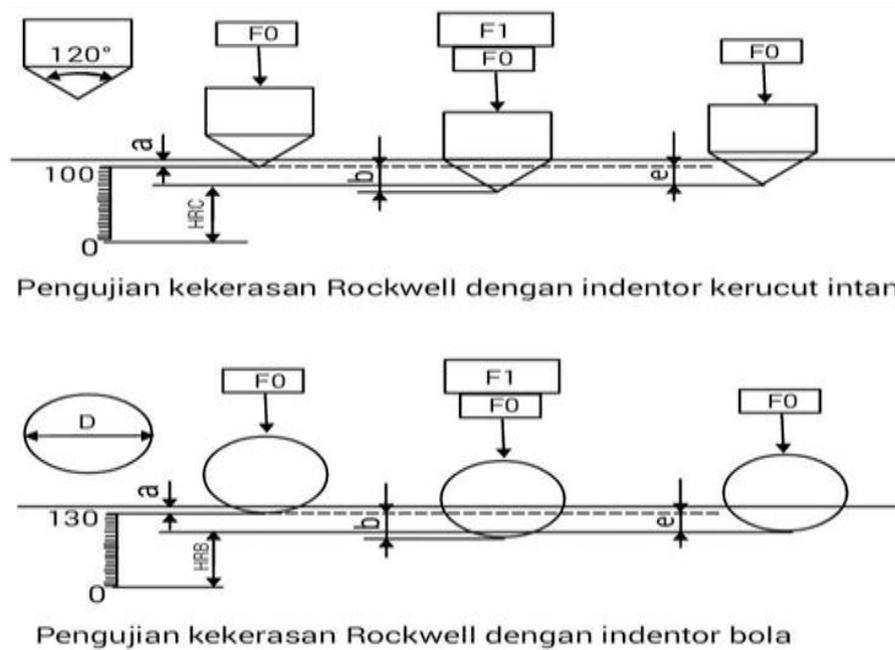
E = konstanta dengan nilai 100 untuk indenter intan dan 130 untuk indenter bola.

e = kedalaman penetrasi permanen karena beban utama (F1) diukur dengan satuan 0,002 mm. jadi, $e = h/0,002$ (William D. Callister, 2000)



Gambar 2.10. Skema Uji Kekerasan Rockwell

Sumber: William D. Callister, 2000



Gambar 2.11. Cara Kerja Alat Uji Rockwell

Keterangan:

- F_0 = beban pendahuluan (beban minor)
- F_1 = beban utama (beban mayor)
- A = kedalaman penetrasi oleh beban minor
- B = kedalaman penetrasi oleh beban total ($F_0 + F_1$)
- E = kedalaman penetrasi setelah beban utama dilepaskan

Pengujian rockwell yang umumnya biasa dipakai ada tiga jenis yaitu HRA, HRB, dan HRC. HR itu sendiri merupakan suatu singkatan dari kekerasan rockwell (*Hardness Rockwell Number*) dan kadang-kadang disingkat dengan huruf R saja. Pengujian kekerasan dengan metode rockwell ini diatur berdasarkan standar DIN 50103. Tingkat skala kekerasan menurut metode rockwell adalah berdasarkan pada jenis indenter yang digunakan pada masing-masing skala.

Dalam metode rockwell ini terdapat dua macam indenter yang digunakan pada pengujian kekerasan yaitu intan berbentuk kerucut yang memiliki sudut puncak 120° , dimana bagian ujungnya sedikit dibulatkan dengan jari-jari 0,2 mm dan indenter bola yang terbuat dari baja yang dikeraskan atau dari tungsten karbida yang memiliki diameter $1/16''$, $1/8''$, $1/4''$, dan diameter $1/2''$. Indenter kerucut intan sering disebut juga sebagai 'Brale'.



Gambar 2.12. Indentor Tipe Ball Dan Diamond

Pada pengujian kekerasan material dengan metode rockwell dikenal ada beberapa skala, misalnya skala B yang biasanya diaplikasikan pada material yang lunak, seperti paduan-paduan tembaga, paduan aluminium dan baja lunak, dengan menggunakan indentor bola baja berdiameter 1/16" dan beban total sebesar 100 kgf. Sedangkan skala C diaplikasikan untuk material-material yang lebih keras, seperti besi tuang, dan banyak paduan-paduan baja yang memakai kerucut intan sebagai indentornya dengan beban total sampai 150 kgf.

Selain skala B dan skala C yang sering disebut sebagai skala umum, ada beberapa skala lainnya seperti skala A, D, E, F, G dan lain-lain. Tabel 2.13 di bawah ini memperlihatkan berbagai skala pada pengujian kekerasan rockwell.

Tabel 2.1 Klasifikasi Indentor pada Uji Kekerasan Rockwell

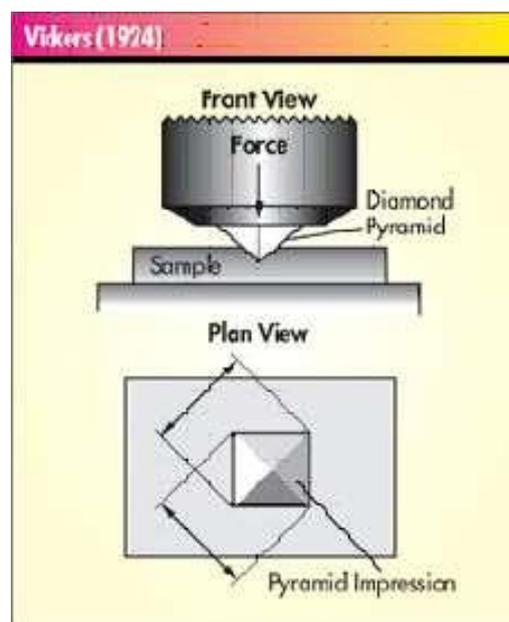
Skala	Indentor	Beban Minor F0 (kgf)	Beban Mayor F1 (kgf)	Beban Total F (kgf)
A	Kerucut Intan	10	50	60
B	Bola Baja 1/16"	10	90	100
C	Kerucut Intan	10	140	150
D	Kerucut Intan	10	90	100
E	Bola Baja 1/8"	10	90	100
F	Bola Baja 1/16"	10	50	60
G	Bola Baja 1/16"	10	140	150
H	Bola Baja 1/8"	10	50	60
K	Bola Baja 1/8"	10	140	150
L	Bola Baja 1/4"	10	50	60
M	Bola Baja 1/4"	10	90	100

Skala	Indentor	Beban Minor F0 (kgf)	Beban Mayor F1 (kgf)	Beban Total F (kgf)
P	Bola Baja 1/4"	10	140	150
R	Bola Baja 1/2"	10	50	60
S	Bola Baja 1/2"	10	90	100
V	Bola Baja 1/2"	10	140	100

Berbeda dengan pengujian kekerasan brinell dan vickers yang mengukur luas dari jejak, pada pengujian kekerasan rockwell yang diukur adalah kedalaman jejak hasil penetrasi indentor. Dalam hal ini, seberapa jauh indentor bergerak turun secara vertikal ketika melakukan penetrasi

2.8.3. Pengujian Kekerasan Metode Vickers

Uji kekerasan ini adalah pengujian dengan menggunakan indentor berupa intan yang berbentuk piramid dengan beralas bujur sanggar dan sudut puncak berhadapan 136° . Prinsip kerjanya dengan menekan indentor sampai 100 kgf. Beban akan ditekan dengan waktu 10 sampai 15 detik. Bekas penekan dari diagonal akan diukur dengan mikroskop dan diambil rata-ratanya. Luas tapak tekan akan dapat dihitung dengan cara membagi beban yang digunakan dengan luasan tapak tekan dalam mm. Angka kekerasan vickers dalam satuan HV (*Hardness Vickers*).



Gambar 2.13. Skema Uji Kekerasan Vickers

Sumber: Ilham (2019)

Keterangan:

F = Beban (kgf)

D = Rata-rata diameter tapak tekan (mm)

HV = *Hardness Vickers*

Uji kekerasan vickers ini memiliki kelebihan, diantaranya adalah nilai akurasi yang tinggi dan hanya membutuhkan ujung indentor yang sama untuk setiap jenis logam. Namun di sisi lain, uji vickers membutuhkan biaya yang tinggi untuk melakukan satu kali uji.

2.9. Pengujian Takik (*Impact Test*)

Pengujian impact merupakan suatu pengujian yang mengukur tahanan bahan terhadap beban kejut (Yuwono, 2009). Dasar pengujian impact adalah penyerapan energi potensial dari pendulum beban yang berayun dari suatu ketinggian tertentu dan menumbuk benda uji sehingga benda mengalami deformasi. Gambar 2.14 memberikan ilustrasi suatu pengujian impact dengan metode charpy.

Pada perhitungan pengujian impact untuk mencari energi dan harga impact dengan menggunakan rumus:

$$E = W \times R [\cos(\beta) - \cos(\alpha)]$$

Keterangan:

E = Energi (joule)

W = Weight of hammer

R = Panjang lengan bandul

B = Sudut akhir bandul

α = Sudut awal bandul

Harga impact dapat dihitung dengan rumus:

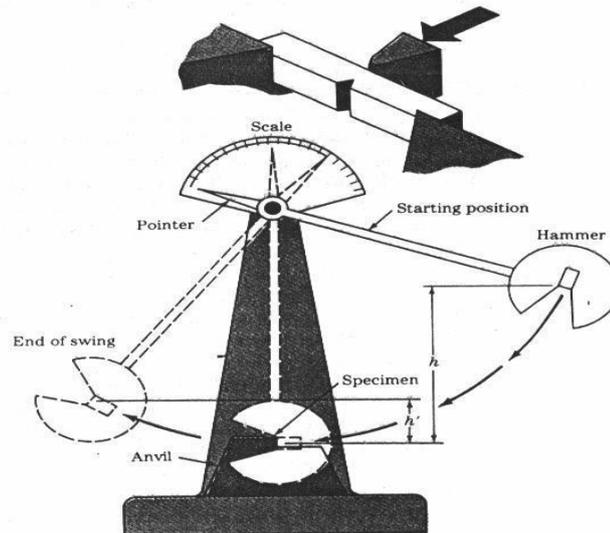
$$HI = \frac{E}{A_0}$$

Keterangan:

HI = Harga impact (joule)

E = Energi untuk mematahkan material

A₀ = Luas penampang terkecil takik (cm²)



Gambar 2.14. Ilustrasi Skematis Pengujian dengan Benda Uji Charpy

Pada saat beban dinaikkan dengan ketinggian tertentu, beban memiliki potensial maksimum, kemudian saat akan menumbuk spesimen, energi kinetik mencapai maksimum tersebut. Energi kinetik maksimum tersebut mulai diserap sebagian oleh spesimen tersebut patah (univ Bandar Lampung) (Wahyudi, 2019). Nilai harga impact pada suatu spesimen adalah energi yang diserap oleh satuan luas penampang lintang spesimen uji. Persamaannya sebagai berikut:

$$HI = \frac{E}{A} \dots(2)$$

Keterangan:

HI = Harga Impact (J/mm^2)

E = Energi Impact yang diserap oleh spesimen (joule)

A = Luas penampang spesimen (mm)

Cara kerja alat uji impact adalah dengan memukul benda yang akan diuji kekuatannya dengan pendulum yang berayun. Pendulum tersebut ditarik hingga ketinggian tertentu lalu dilepas, sehingga pendulum tersebut memukul benda uji hingga patah. Berikut adalah bagian dari alat uji impact charpy:

1. Badan Alat Uji Impact

Badan alat uji impact terbuat dari baja profil U 70×40 mm dengan tebal baja 5 mm. Sedangkan dimensi dari badan alat uji impact ini adalah $750 \times 400 \times 1000$ mm. Proses pengerjaan yang dilakukan dalam pembuatan badan alat uji impact

ini adalah proses penyambungan atau proses pengelasan. Badan alat uji dampak berfungsi sebagai tempat dudukan dari *bearing* dan tempat benda uji.

2. Pendulum

Pendulum berfungsi sebagai beban yang akan diayunkan ke benda uji dan juga terdapat pisau pemukul untuk mematahkan benda uji. Pendulum terbuat dari baja pelat dan silinder dengan berat 8 kg. Pada bagian atas pendulum dihubungkan ke bagian lengan pengayun dengan cara dilas.

3. Lengan Pengayun

Lengan pengayun berfungsi untuk menentukan gerakan ayunan dari poros ke pendulum. Lengan pengayun ini terbuat dari baja silinder dengan ukuran $\text{Ø}20 \times 600$ mm yang pada bagian atas dihubungkan ke poros. Lengan pengayun berfungsi untuk menentukan gerakan ayunan dari poros ke pendulum. Lengan pengayun ini terbuat dari baja silinder dengan ukuran $\text{Ø}20 \times 600$ mm yang pada bagian atas dihubungkan ke poros.

4. *Bearing*

Bearing berfungsi sebagai pengayun poros dan *bearing* yang digunakan adalah berukuran diameter dalam atau diameter poros 25 mm. *Bearing* ditempatkan pada bagian kanan atas dan kiri atas pada badan alat uji dampak dengan cara dibaut.

5. Tempat Benda Uji

Tempat benda uji berfungsi sebagai tempat diletakkannya benda uji yang akan dilakukan pengujian. Tempat benda uji ini terbuat dari baja profil yang dilas menyatu dengan badan alat uji dampak.

6. Busur Derajat Dan Jarum Penunjuk

Tempat benda uji berfungsi sebagai tempat diletakkannya benda uji yang akan dilakukan pengujian. Tempat benda uji ini terbuat dari baja profil yang dilas menyatu dengan badan alat uji dampak.

7. Pisau Pemukul

Pisau pemukul berfungsi untuk memukul benda uji yang telah dibuat takikan. Posisi pisau pada saat akan memukul adalah di belakang takikan benda uji. Bahan pisau pemukul ini harus lebih keras dari benda yang akan diuji dan sudut pisau pemukul adalah 30° .

2.9.1. Jenis Patahan

Takik (*notch*) dalam benda uji standar ditunjukkan sebagai suatu konsentrasi tegangan sehingga diharapkan terjadi di bagian tersebut. Selain bentuk V dengan sudut, takik dapat pula berbentuk lubang kunci (*key hole*). Secara umum perpatahan dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Perpatahan Berserat (*Fibrous Fracture*)

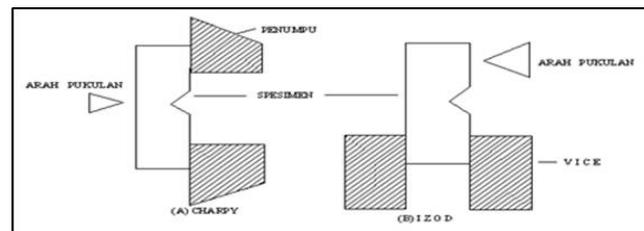
Melibatkan mekanisme pergeseran bidang-bidang kristal di dalam bahan logam yang ulet (*ductile*). Ditandai dengan permukaan patahan berserat yang berbentuk dimpel yang menyerap cahaya dan berpenampilan buram.

2. Perpatahan Granular/Kristalin

Dihasilkan oleh mekanisme pembelahan (*cleavage*) pada butir-butir dari bahan logam yang rapuh (*brittle*). Ditandai dengan permukaan patahan yang datar yang mampu memberikan daya pantul cahaya yang tinggi (mengkilat).

3. Perpatahan Campuran (Berserat dan Granular).

Perpatahan campuran merupakan kombinasi dua jenis perpatahan di atas.



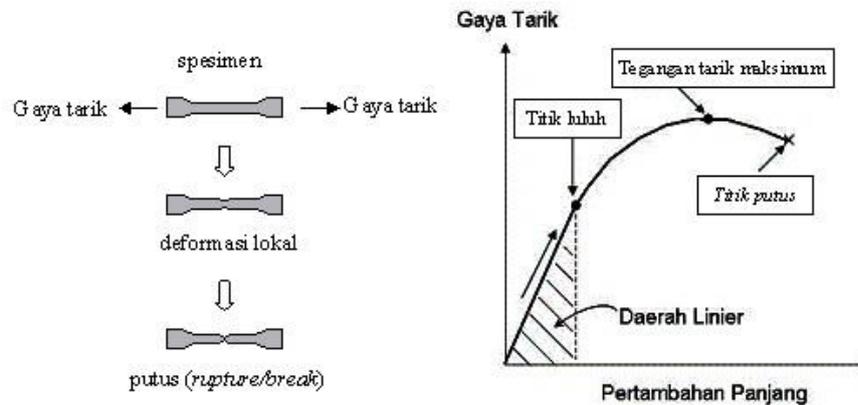
Gambar 2.15. Jenis Takik

2.10. Pengujian Tarik (*Tensile Test*)

Uji tarik adalah pengujian material yang paling dasar dimana material yang sudah dipotong-potong diuji dengan cara ditarik searah gaya aksial agar mengetahui bagaimana bahan tersebut bereaksi terhadap tenaga tarikan dan mengetahui sejauh mana material itu bertambah panjang. Pembuatan spesimen uji harus sesuai dengan standar yang diinginkan. Hasil dari pengujian ini akan mendapatkan profil tarikan berupa diagram tegangan-regangan (*stress-strain diagram*).

Spesimen uji tarik bentuk dan ukurannya sudah terstandar, dalam kasus-kasus tertentu diijinkan memakai bentuk dan ukuran spesimen uji tidak standar. Bentuk dan ukuran spesimen uji terstandar disebut juga spesimen uji proporsional, dan yang tidak terstandar disebut juga spesimen uji non proporsional. Bentuk penampang spesimen uji dapat berbentuk lingkaran atau bentuk segi empat. Ukuran spesimen uji yang biasa dipakai standar

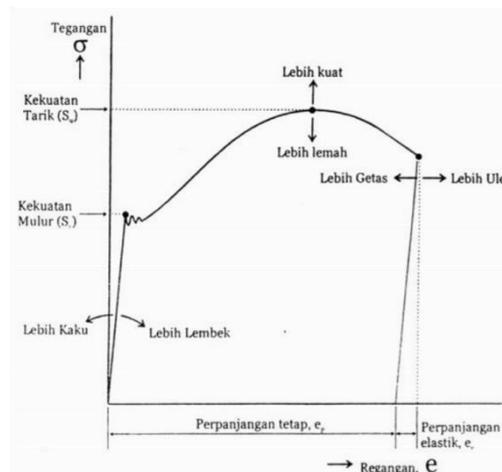
DP 5 atau DP 10. Setiap logam yang diuji tarik akan memperlihatkan perilaku yang berbeda dalam arti mempunyai empat besaran/parameter yang berbeda.



(a) Hasil Spesimen Sebelum Dan Sesudah Uji (b) Grafik hasil Pengujian

Gambar 2.16. Skema Uji Tarik

Kurva uji tarik dapat diperoleh beberapa sifat mekanik material. Beberapa sifat mekanik material yang dimaksud yaitu Dari kekuatan tarik, keuletan, dan elastisitas.



Gambar 2.17. Contoh Kurva Hasil Uji Tarik

$$\sigma_{Ultimate} = \frac{F_{Ultimate}}{A} \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{Field} = \frac{F_{yield}}{A} \frac{N}{mm^2}$$

Keterangan

A = Initial cross section area (mm^2)

F Ultimate = Maximum load (Newton)

F Yield = Yield load (Newton)

2.10.1. Tegangan dan Regangan

Tegangan Merupakan perilaku material saat diberi gaya atau beban, Ketika material diberikan beban yang sama dan serarah nanti akan menimbulkan tegangan material tersebut. Semua bahan berubah bentuk dipengaruhi gaya. Semua bahan berubah bentuk karena pengaruh gaya. Semua bahan berubah bentuk karena pengaruh gaya. Ada yang kembali ke bentuk aslinya bila gaya dihilangkan, ada pula yang tetap berubah bentuk sedikit atau banyak (Weston, 1944). Stress diartikan tegangan secara matematis dituliskan pada persamaan dibawah.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ = tegangan (Pa),

F = gaya (N),

A = luas penampang (mm²).

Regangan adalah perubahan pada ukuran benda karena gaya atau kopel dalam kesetimbangan dibandingkan dengan ukuran semula disebut regangan. Regangan juga disebut sebagai derajat deformasi (Sarojo, 2002). Persamaan dari regangan adalah sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

ε = regangan,

ΔL = pertambahan panjang (mm)

L = panjang mula-mula (mm)

Regangan dapat banyak berubah panjang dari suatu material, Jika tegangan adalah pembebanan pada material dari arah luar, maka regangan respon material dari pembebanan tersebut. Hubungan antara tegangan dan regangan mengikuti hukum Hooke untuk elastisitas, dalam batas (limit) elastis suatu benda, dan hal ini menunjukkan bahwa tegangan berbanding lurus dengan regangan :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$E = \frac{F L}{A \Delta L}$$

Dapat dilihat dari kurva untuk pertambahan panjang material pada karbon rendah sebanding dengan beban yang dikenakan. Jika dilakukan penambahan beban pada material yang sama maka akan mengakibatkan deformasi elastis, yang berarti material akan kembali ke panjang semula setelah tegangan dihilangkan, dan apabila ditambah dengan beban yang lebih besar lagi maka material akan mengalami deformasi plastis. Yang berarti material akan mengalami deformasi atau perubahan bentuk secara permanen meskipun beban yang diberikan sudah dihilangkan.

Pada saat kurva menunjukkan perubahan dari garis lurus ke perubahan bentuk garis kurva dengan tanpa adanya pertambahan beban yang berarti, maka posisi ini dinamakan dengan *yield point* atau saat luluh. Penentuan titik luluh untuk logam masih belum jelas, karena masih sangat bergantung pada alat ukur yang digunakan. Maka dari itu dibuat kesepakatan untuk menyamakan interpretasi, yaitu luluh terjadi pada saat deformasi permanen mencapai titik tertentu. Adapun batas deformasi permanen/plastis yang biasa digunakan adalah 0,1% dan 0,2%. Dan untuk menentukan tegangan yang bersesuaian dengan deformasi permanen maka ditarik garis lurus dari titik regangan sebesar 0,1% atau 0,2%. Sejajar dengan linier dari kurva tegangan–regangan.

Beban maksimum yang dapat diterima oleh spesimen tanpa patah dinamakan dengan tegangan maksimum. Tegangan maksimum dinyatakan dengan:

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \quad (\text{kg/mm}^2)$$

Sampai dengan tegangan maksimum, deformasi terjadi secara homogen sepanjang spesimen. Setelah terjadi tegangan maksimum maka akan terjadi pengecilan luas penampang (*necking*) pada logam yang ulet, dimana terjadi penambahan panjang diikuti dengan penurunan beban/tegangan. Dan setelah itu spesimen akan patah di bawah posisi maksimum. Logam getas akan patah dan titik F menunjukkan patah pada saat beban maksimum.

Peristiwa yang dialami oleh benda uji adalah perubahan bentuk, dalam aliran memanjang yang berbanding lurus dengan pertambahan gaya. Deformasi pada tingkat ini disebut deformasi elastis. Dilepaskan ($P = 0$ ton) maka benda uji akan kembali ke bentuk semula dengan ukuran semula seperti sebelum mengalami pembebanan yaitu L_0 . Pada daerah akan berlaku hukum Hook, yang menyatakan:

A. Modulus Elastisitas

$$E = \frac{\delta}{\varepsilon} \quad (\text{N/mm}^2)$$

B. Tegangan

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{kg/mm}^2)$$

C. Regangan

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

Keterangan:

E = modulus elastisitas (N/mm^2)

σ = tegangan (kg/mm^2)

ε = regangan

F = beban yang diberikan pada spesimen uji (kg)

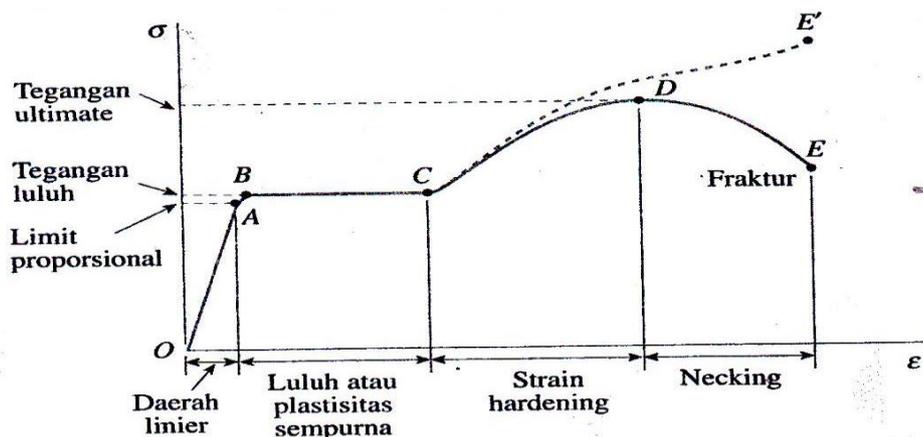
A_0 = luas mula dari batang penampang uji (mm^2)

L_0 = panjang mula-mula

L = panjang setelah pembebanan

2.10.2. Kurva Regangan Dan Tegangan

Hubungan antara gaya tarikan dan pertambahan panjang menjadi hubungan antara tegangan dan regangan (*stress vs strain*). Selanjutnya didapatkan kurva seperti Gambar 2.78 yang merupakan kurva standar ketika dilakukan eksperimen uji tarik. E adalah gradien kurva dalam daerah linier, dimana perbandingan tegangan (σ) dan regangan (ε) selalu tetap. E dinamakan “Modulus Elastisitas” atau “*Young Modulus*”. Kurva yang menyatakan hubungan *strain* dan *stress* seperti ini sering disingkat dengan kurva SS. Diagram tegangan–regangan berfungsi menunjukkan karakteristik tentang besar mekanis dan jenis perilaku dari material.



Gambar 2.18. Kurva Regangan Dan Tegangan

Sifat tarik sambungan las sangat dipengaruhi oleh sifat dari logam induk, sifat daerah HAZ, sifat logam las dan sifat-sifat dinamik dari sambungan berhubungan erat dengan geometri dan distribusi tegangan dalam sambungan. Setelah material patah maka akan bisa ditentukan sifat material tersebut. Terdapat tiga sifat material yang berpengaruh pada bentuk patahan, antara lain adalah:

1. Material *Ductile*

Material *ductile* memiliki ciri sebagai berikut:

- Deformasi pada bidang patahan.
- Pada bidang patahan akan membentuk sudut kurang lebih 45° terhadap permukaan.
- Bidang patahan membentuk patahan geser (*shear function*) atau berserat-serat.
- Bentuk bidang patahan disebut juga *cup and cone*.

2. Material *Brittle*

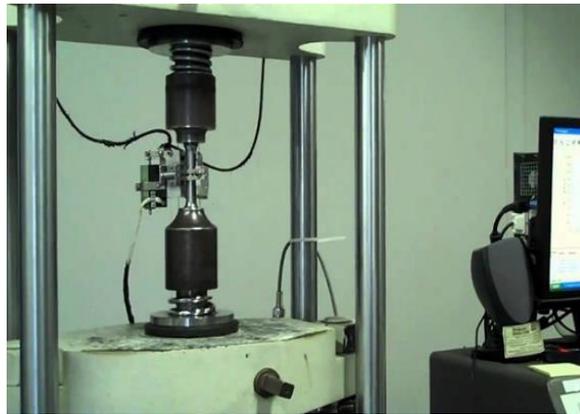
Material *brittle* atau getas memiliki ciri sebagai berikut:

- Tidak mengalami deformasi atau bidang patahannya sedikit.
- Sudut bidang patahan membentuk sudut kurang lebih 90° terhadap permukaan.
- Permukaan bidang patahan tampak mengkilap (*granular*) atau biasa disebut dengan patahan belah (*cleave fracture*).
- Bentuk patahan disebut juga *flat cleavage*.

3. Material *Semi Ductile/Semi Brittle*

Material ini memiliki sifat *semi ductile* atau *semi brittle*, dimana jika ditarik hingga patah maka akan memiliki ciri sebagai berikut:

- Bidang patahan hanya sedikit mengalami deformasi.
- Permukaan bidang patahan tampak seperti bintang (*star fracture*).
- Bentuk bidang patahan disebut juga *partial cup and cone*.



Gambar 2.19 Pengujian Tarik

2.11. Metallography Test

Metalografi adalah suatu metode untuk mengetahui struktur logam dengan menggunakan alat mikroskop optis dan elektron. Untuk melihat struktur logam dibutuhkan alat mikroskop disebut mikroskop struktur. Setelah melakukan pengamatan terhadap spesimen yang sudah diproses sehingga dapat dilakukan pengamatan dengan mikroskop.

2.11.1. Uji Mikro Test (*Micro Test*)

Sebelum melakukan uji mikro, spesimen harus dilakukan tahapan yaitu *grinding*, *mounting*, *polishing* dan *etching*, setelah melakukan tahapan 4 tersebut, mulai pengujian mikrostruktur logam untuk mengetahui bentuk dan ukuran Kristal logam, proses perlakuan panas, dan perubahan komposisi. Agar permukaan logam dapat diamati secara metalografi, maka terlebih dahulu dilakukan persiapan sebagai berikut:

1. Pematangan spesimen

Pada tahap ini, diharapkan spesimen dalam keadaan datar, sehingga memudahkan dalam pengamatan.

2. *Mounting* spesimen (bila diperlukan)

Tahap *mounting* ini, spesimen hanya dilakukan untuk material yang kecil atau tipis saja. Sedangkan untuk material yang tebal tidak memerlukan proses *mounting*.

3. *Grinding* dan *polishing*

Tahap *grinding* dan *polishing* ini bertujuan untuk membentuk permukaan spesimen agar benar-benar rata. *Grinding* dilakukan dengan cara menggosok spesimen pada mesin *hand grinding* yang diberi kertas gosok dengan ukuran *grid* yang paling kasar (*grid* 80) sampai yang paling halus. Sedangkan *polishing* sendiri dilakukan dengan menggosokkan spesimen diatas mesin *polishing machine* yang dilengkapi dengan kain wol yang diberi serbuk alumina dengan kehalusan 1-0,05 mikron. Panambahan serbuk alumina ini bertujuan untuk lebih menghaluskan permukaan spesimen sehingga akan lebih mudah melakukan metalografi.

4. Etsa (*etching*)

Proses etsa ini pada dasarnya adalah proses korosi atau mengkorosikan permukaan spesimen yang telah rata karena proses *grinding* dan *polishing* menjadi tidak rata lagi. Ketidakrataan permukaan spesimen ini dikarenakan mikrostruktur yang berbeda akan dilarutkan dengan kecepatan yang berbeda, sehingga meninggalkan bekas permukaan dengan orientasi sudut yang berbeda pula. Pada pelaksanaannya, proses etsa ini dilakukan dengan cara mencelupkan spesimen pada cairan etsa dimana tiap jenis logam mempunyai cairan etsa (*etching reagent*) sendiri-sendiri. Setelah permukaan spesimen dietsa, maka spesimen tersebut siap untuk diamati di bawah mikroskop dan pengambilan foto metalografi. Pengamatan metalografi pada dasarnya adalah melihat perbedaan intensitas sinar pantul permukaan logam yang dimasukkan ke dalam mikroskop sehingga terjadi gambar yang berbeda (gelap, agak terang, terang). Dengan demikian apabila seberkas sinar dikenakan pada permukaan spesimen maka sinar tersebut akan dipantulkan sesuai dengan orientasi sudut permukaan bidang yang terkena sinar. Semakin tidak rata permukaan, maka semakin sedikit intensitas sinar yang terpantul ke dalam mikroskop. Akibatnya, warna yang tampak pada mikroskop adalah warna hitam. Sedangkan permukaan yang sedikit terkorosi akan tampak berwarna terang/putih

2.11.2. Uji Makro (*Macro Test*)

Uji makro adalah pengujian bahan dengan mata kita langsung atau memakai kaca pembesar dengan pembesaran rendah. Kegunaannya untuk memeriksa permukaan yang terdapat celah-celah, lubang-lubang pada struktur logam yang sifatnya rapuh, bentuk-bentuk

patahan benda uji bekas pengujian mekanis yang selanjutnya dibandingkan dengan beberapa logam menurut bentuk dan strukturnya antara satu dengan yang lain menurut kebutuhannya. Angka pembesaran pemeriksaan makro antara 50 kali sampai 100 kali. Pemeriksaan secara makro biasanya untuk bahan-bahan yang memiliki struktur kristal yang tergolong besar dan kasar, seperti misal logam hasil coran atau tuangan, serta bahan-bahan yang termasuk non metal. Pengujian *Macro test* bertujuan untuk melihat bentuk makro material pada daerah pengelasan yaitu *fusion line*, *heat affected zone*, dan *weld metal* agar bentuk dari lasan dapat terlihat maka permukaan harus halus dengan dilakukan proses machining, gerindin, dan polishing kemudian pada daerah lasan di etsa dengan cairan kimia diantaranya Acid nitrid, Asam HCl dan air, agar bentuk dari lasan antara weld metal, HAZ, dan fusion terlihat jelas. Dari hasil test makro ini dapat diketahui visual kualitas lasan dan bentuk lasan.

2.11.3. Struktur Mikro

Struktur mikro adalah struktur yang dapat diamati menggunakan mikroskop optik. Struktur mikro dapat memberikan informasi mengenai sifat-sifat atau perilaku dari logam. Suatu logam paduan akan mengalami sifat mekanik berubah-ubah apabila strukturnya dirubah. Struktur mikro dapat diubah apabila terjadi proses perlakuan panas (*heat treatment*). Dalam pemeriksaan metalografi ini, dilakukan perlakuan panas selanjutnya pemeriksaan struktur mikro pada beberapa sampel (Wahyudi, 2019).

1. Ferit

Fasa ferit disebut besi alpha (α) dan merupakan larutan padat interstisi dengan sel kristal berupa BCC (Body Centered Cubic). Ruang antara atomnya kecil dan rapat sehingga kelarutan karbon sangat kecil. Pada suhu ruang kadar karbonnya hanya 0,008% sehingga dapat dianggap besi murni. Kadar maksimum besi alpha sebesar 0,02% pada suhu A1 atau 727°C. Ferit bersifat feromagnetik sampai pada suhu 768°C dan bersifat ulet.

2. Austenit

Austenit merupakan salah satu modifikasi fase dari besi dengan struktur FCC Fase ini stabil pada suhu 912 – 1349°C dengan kemampuan melarutkan karbon maksimum 2,11%.

3. Sementit

Fasa ini disebut besi karbida yang merupakan senyawa interstisi dengan rumus kimia Fe₃C. Perbandingan atom-atom Fe dan C dalam kristal adalah 3 : 1. Sel kristal berisi 12 atom Fe dan 4 atom C, per unit sel. Kadar karbon dalam sementit sebesar 6,67%

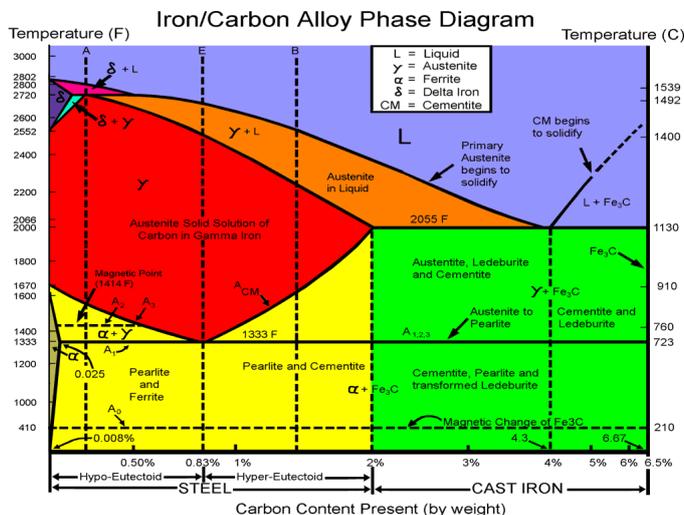
dan senyawa ini bersifat keras tetapi rapuh. Pada baja, fasa ini dapat meningkatkan kekuatan, kekerasan dan ketahanan aus.

4. Pearlit

Fasa ini merupakan campuran yang terdiri dari dua fasa ferit dan sementit dalam bentuk lamellar yang berseling-seling. Perlit merupakan hasil 15 dari reaksi eutektoid pada pendinginan dibawah suhu 727°C . Reaksi kimianya sebagai berikut: $(0,8\%C) \rightarrow \alpha(0,002\%C) + Fe_3C(6,7\%C)$ Semakin cepat laju pendinginan, butirannya akan semakin halus dan sifat mekanis baja menjadi lebih baik dibandingkan perlit kasar.

5. Bainit

Fasa ini merupakan campuran dari dua fasa yaitu ferit dan sementit dalam bentuk jarum-jarum sementit dengan orientasi acak yang berada dalam celah ferit. Fasa ini juga terbentuk dari fasa austenit tetapi dengan laju pendinginan yang relatif lebih cepat dibandingkan dengan perlit. Kondisi ini menyebabkan fasa bainit tidak terdapat pada diagram kesetimbangan. Fasa ini sifatnya lebih keras daripada ferit, austenit, dan perlit. Untuk memperoleh fasa bainit 100% harus melalui pendinginan isothermal pada suhu tertentu tergantung dari tipe bajanya (Kirono, et al., 2014).



Gambar 2.20. Diagram Fase Karbon

Sumber: <http://contohmakalah4.blogspot.com/2013/04/diagram-fe-fe3c.html>