

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Karbon

Pada dasarnya baja karbon dikelompokkan menjadi beberapa kelompok, yang sebenarnya ditujukan untuk mempermudah pemilihan jenis baja yang ada. Pengelompokan dapat digolongkan berdasarkan pada kelas atau kualitas, atau juga dapat digolongkan berdasarkan baja kadar karbon.

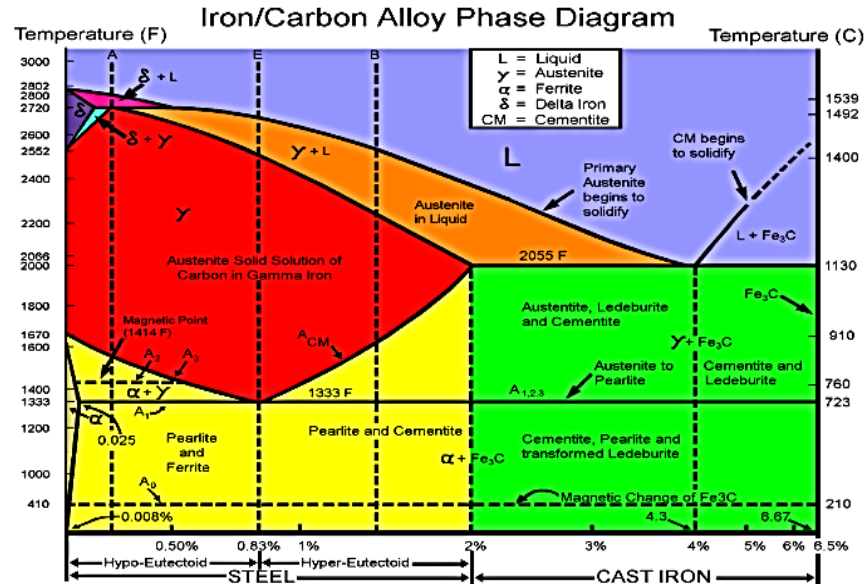
Pengelompokan yang didasarkan pada kelas seperti tersebut di atas adalah berdasarkan pada kekuatan tarik yang dimiliki oleh baja yang bersangkutan, sebagai contoh DIN mengelompokkan baja yang memiliki kekuatan tarik 37 kg/mm dengan symbol st 37, sedangkan baja yang berdasarkan kadar karbon berupa baja *hipoeutectoid* dan baja *hypereutectoid*. AISI (*American Iron Steel Institute*) dan SAE (*Society of Automotive Engineer*) mengelompokkan baja dengan system penomoran empat atau lima angka yang mencerminkan komposisi paduannya seperti seri 10XX, digit pertama menunjukkan baja karbon, digit kedua modifikasi paduan, contohnya 11XX mengandung banyak sulfur, 12XX mengandung banyak fosfor dan lain-lain, sedang dua digit terakhir adalah kadar karbon, dalam besaran dikalikan dengan 0,01 %. Baja karbon rendah mengandung 0-0,25% kadar karbon, sedang baja karbon medium mengandung antara 0,25 0,55% kadar karbon, sedang > 0,55% kadar karbon adalah baja karbon tinggi (Subagiyo dkk, 2018).

2.1.1 Diagram Fasa Fe₃C

Fasa merupakan suatu daerah tertentu yang terdiri dari beberapa atom dan ada permukaan yang mengikatnya. Fasa berhubungan dengan keadaan material yang terpisah dan dapat diamati, istilah ini bisa diterapkan pada material kristalin maupun pada material non kristalin dan konsep fasa merupakan cara yang mudah untuk menyatakan struktur dari suatu materi.

Diagram fasa sangat berguna saat akan menggambarkan skema struktur metalik, keramik dan yang paling utama untuk mengidentifikasi fasa yang ada serta menyajikan data komposisi. Namun pada diagram fasa ini juga memiliki keterbatasan dan keterbatasan yang paling utama adalah diagram fasa tidak memberikan informasi mengenai bentuk struktur dan disrtibusi dari fasa itu sendiri,

karena dari kedua hal tersebut berperan penting dalam menentukan perilaku mekanik dari material. Keterbatasan dari diagram fasa selanjutnya ialah diagram fasa hanya menggambarkan kondisi dalam keadaan setimbang. Gambar diagram fasa Ferrous – Fe₃C.



Gambar 2.1 Diagram Fasa Fe dan Fe₃C (Yurianto, dkk, 2018).

Diagram fasa adalah diagram yang menampilkan hubungan antara temperatur dimana terjadi perubahan fasa selama proses pendinginan dan pemanasan yang lambat dengan kadar karbon. Diagram ini merupakan dasar pemahaman untuk semua operasi-operasi perlakuan panas. Fungsi diagram fasa adalah memudahkan memilih temperatur pemanasan yang sesuai untuk setiap proses perlakuan panas baik proses anil, *normalizing* maupun proses pengerasan. Baja adalah paduan besi dengan karbon maksimal sampai sekitar 1,7%. Paduan besi diatas 1,7% disebut cast iron. Perlakuan panas bertujuan untuk memperoleh struktur mikro dan sifat yang diinginkan. Struktur mikro dan sifat yang diinginkan dapat diperoleh melalui proses pemanasan dan proses pendinginan pada temperatur tertentu.

Pada gambar diagram fasa Ferrous – Fe₃C diatas dapat dilihat bagian dari sistem Fe-C yang menjadi dasar untuk memahami mikrostruktur paduan Fe yang disebut baja dan besi cor. Terlihat baja sangat responsif terhadap perlakuan panas karena adanya perbedaan besar dalam kelarutan padat dalam austenit dan ferit serta eksistensi dari *eutectoid*. Dimana terdapat beberapa garis temperatur perubahan

fasa dan merupakan titik kesetimbangan yang dideteksi selama analisa thermal pada 727°C dan 1147 °C (Callister, 2014).

Dimana pada diagram fasa fe - Fe₃c dapat ditarik kesimpulan bahwa adanya perubahan fasa yang terbentuk dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya ialah komposisi kimia, temperatur transformasi, dan laju dari pendinginan.

2.1.2 Hubungan antara kandungan karbon dan kegunaannya pada baja.

Kegunaan baja tergantung dengan paduan dan heat treatment dan variabel lain. Kadar karbon yang terkandung sangat mempengaruhi sifat yang dimiliki suatu material, sehingga pemilihan jenis bahan harus sesuai dengan kebutuhan sifat yang dibutuhkan. Dapat dilihat dari tabel berikut dapat digunakan untuk pemilihan bahan (Subagiyo dkk, 2018).

Tabel 2.1 Kadar karbon dan kegunaannya

Sumber : (Pollack, 1991)

Carbon Content, %	Usage
0.02–0.10	Nails, stampings, welding materials, wire rivets
0.10–0.20	Free-cutting materials, carburizing materials, structural steels, heavy-duty bolts
0.20–0.30	Cams, camshafts, gears (carburized), structural steels, cranks and levers
0.30–0.40	Heat-treated bolts, screws, nuts, and axles, free-cutting manganese steel, key stock, cold heading, machine parts
0.40–0.50	Heat-treated parts, axles, bolts, cam shafts, carbon steel forgings, studs, gears, adapters
0.50–0.60	Oil hardening gears
0.60–0.70	Lock washers, forging dies, screw drivers, set and socket screws, low-carbon tool steel
0.70–0.80	Wrenches, saws (band), hammers, medium tool steels
0.80–0.90	Agricultural steels, harrow knives, spring steel, punches, cold chisels, rivet sets, shear blades, rock drills, music wire, mower blades
0.90–1.00	Harrow disks, springs, knives, dies
1.00–1.10	Ball bearings, drills, tool bits, cutters, taps
1.10–1.20	Cutting tools, essentially same as 1.00–1.10
1.20–1.30	Files, cutting tools
1.30–1.40	Saws, boring tools, instruments

2.1.3 Jenis – jenis Baja

Baja secara umum dapat dikelompokkan atas 2 jenis yaitu :

1. Baja karbon (*carbon steel*)

1. Baja karbon rendah

Baja karbon rendah (*low carbon steel*) *Machine, machinery dan mild steel* (0,05 % 0,30% C) Sifatnya mudah ditempa dan mudah di mesin.

Penggunaannya:

1) 0,05 % – 0,20 % C: *automobile bodies, buildings, pipes, chains, rivets, screws, nails.*

2) 0,20 % – 0,30 % C: *gears, shafts, bolts, forgings, bridges, buildings.*

2. Baja karbon menengah (*medium carbon steel*)

Kekuatan lebih tinggi daripada baja karbon rendah. Sifatnya sulit untuk dibengkokkan, dilas, dipotong.

Penggunaannya:

0,30 % – 0,40 % C : *connecting rods, crank pins, axles.*

0,40 % – 0,50 % C: *car axles, crankshafts, rails, boilers, auger bits, screwdrivers.*

0,50 % – 0,60 % C: *hammers dan sledges*

3. Baja karbon tinggi (*high carbon steel*) Sifatnya sulit dibengkokkan, dilas dan dipotong. Kandungan 0,60 % – 1,50 % C.

2. Baja paduan (*alloy steel*)

Tujuan dilakukan penambahan unsur yaitu: Untuk menaikkan sifat mekanik baja (kekerasan, ketahanan, kekuatan tarik dan sebagainya), untuk menaikkan sifat mekanik pada temperatur rendah, untuk meningkatkan daya tahan terhadap reaksi kimia (oksidasi dan reduksi).

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 % .

3) *High alloy steel*, jika elemen paduannya > 10 % .

4) Baja paduan juga dibagi menjadi dua golongan yaitu:

Baja campuran khusus (*special alloy steel*)

Baja kecepatan tinggi (*high speed steel*)

Yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis baja karbon rendah (*medium carbon steel*) *machine, machinery, dan mild steel* (0,3 % – 0,5% C) karena sifatnya mudah ditempa dan mudah dimesin.

Macam –macam struktur yang ada pada baja adalah:

1. Ferit

Ferit adalah larutan padat karbon dan unsur paduan lainnya pada besi kubus pusat badan (Fe). Ferit terbentuk akibat proses pendinginan yang lambat dari austenit baja hypotektoid pada saat mencapai A3. ferite bersifat sangat lunak ,ulet dan memiliki kekerasan sekitar 70-100 BHN dan memiliki konduktifitas yang tinggi.

2. Sementit

Sementit adalah senyawa besi dengan karbon yang umum dikenal sebagai karbida besi dengan prosentase karbon 6,67%C. yang bersifat keras sekitar 5-68HRC

3. Perlit

Perlit adalah campuran sementit dan ferit yang memiliki kekerasan sekitar 1030HRC perlit yang terbentuk sedikit dibawah temperatur eutektoid memiliki kekerasan yang lebih rendah dan memerlukan waktu inkubasiyang lebih banyak.

4. Bainit

Bainit merupakan fasa yang kurang stabil yang diperoleh dari austenit pada temperatur yang lebih rendah dari temperatur transformasi ke perlit dan lebih tinggi dari transformasi ke martensit.

5. Martensit

Martensit merupakan larutan padat dari karbon yang lewatjenuh pada besi alfa sehingga latis-latis sel satuannya terdistorsi.

2.1.4 Baja AISI 1045 / S45C

Baja AISI 1045 merupakan salah satu dari jenis baja karbon menengah dengan kandungan karbon sebesar (0,43 – 0,50 % C) yang sering digunakan di pasaran karena banyak memiliki keunggulan dan harganya yang lumayan terjangkau. AISI sendiri merupakan kepanjangan dari (*American Iron and Steel Institute*) angka 10 merupakan kode yang menunjukkan plain carbon dan kode xxx setelahnya merupakan besar dari komposisi karbon (Rachman,dkk. 2020).

Baja AISI 1045 juga memiliki beberapa karakteristik diantaranya sifat mampu mesin yang baik, *wear resistance* baik dan sifat mekaniknya menengah.

1. Struktur Baja AISI 1045

Baja yang mempunyai kandungan karbon sebesar 0,43 – 0,50 % dan termasuk dari golongan dari baja karbon menengah ini sering digunakan dalam dunia industri seperti pada pembuatan baut, kapak, roda gigi pada kendaraan bermotor atau komponen automotif dan lainnya, ini mempunyai komposisi kimia yang dapat dilihat pada tabel.

Tabel 2.2 Komposisi Baja AISI 1045

Komposisi kimia baja AISI 1045						
Kode	C%	Si%	Mn%	Mo%	P%	S%
AISI	0,4	0,1	0,060	0,025	0,004	0,005
1045	0,43	0,3	0,90	-	max	max

Sesuai dengan fungsi pada roda gigi yang harus mampu menahan keausan yang diakibatkan oleh gesekan dengan rantai. Ketahanan aus sendiri didefinisikan sebagai ketahanan terhadap abrasi atau ketahanan terhadap pengurangan dimensi yang diakibatkan oleh suatu gesekan. Pada umumnya ketahanan berbanding lurus dengan kekerasan.

2. Klasifikasi Baja AISI 1045

Baja dengan kandungan karbon menengah ini mempunyai sifat mampu tempa, *cold drawing*, *machining*, *heat treating* termasuk (*flampe hardening*) dan juga memiliki sifat ketahanan terhadap aus yang baik melalui perlakuan *flampe* atau *induction hardening*. Baja jenis ini merupakan salah satu bahan untuk pembuatan baut, poros, *piston rods*, *pump shafts*, *machinery part* dan lainnya ini juga memiliki sifat mekanik yang dapat dilihat pada Tabel.

Tabel 2.3 Sifat Mekanik Baja AISI 1045

Sifat Mekanik Baja AISI 1045	
Kekuatan Tarik (σ_u)	580 kg/mm ²
Kekuatan Luluh (σ_y)	305 kg/mm ²
Perpanjangan (Elongation)	16%

3. Sifat Mekanik Kekuatan Tarik dan Kekerasan Baja AISI 1045

Sifat mekanik kekuatan tarik dan kekerasan baja tergantung dari unsur karbon dan paduan lain yang terkandung didalamnya. Struktur mikro baja AISI 1045 jenis ini sangat tergantung dari perlakuan panas baja yang diterima dan biasanya terdiri dari feritik, inklusi yang tidak terlarut, dan austenit sisa. Fraksi volume dan ukuran karbida yang muncul dalam baja dan jumlah austenit sisa

merupakan peran utama dalam penentuan nilai kekerasan, kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan aus dalam baja (Satrio. 2016).

Proses perlakuan panas baja mikro austenit yang diikuti dengan pendinginan cepat untuk memperoleh struktur martensit. Martensit setelah diquench perlu dilakukan hardening untuk membentuk presipitat karbida dan menghilangkan inklusi pada material tersebut. Efek temperatur austenitisasi terhadap struktur mikro dan sifat mekanik telah dijelaskan di beberapa penelitian. Temperatur austenitisasi mengontrol pemisahan unsur paduan antara austenit dan karbida pada suhu tinggi serta mengakibatkan terjadinya transformasi martensit, ukuran butir, kekerasan, dan austenit sisa pada kondisi quenching. Temperatur austenitisasi yang lebih tinggi akan meningkatkan kelarutan karbida dan berat jenis karbida menurun seiring Dengan peningkatan temperatur austenitisasi. Kelarutan karbida selama austenitisasi memengaruhi ukuran butir austenit. Peningkatan suhu austenitisasi juga akan meningkatkan kehadiran austenit sisa (Rachman, 2020).

Proses perlakuan panas secara teknis untuk melakukan metode hardened dalam proses pembentukan fasa baru sesuai dengan percepatan pemanasan sampai mencapai suhu austenit tidak stabil, menahan sampai waktu tertentu untuk homogenisasi fasa austenit yang terbentuk, dan melakukan pendinginan cepat serta menahan kembali pada variasi suhu temper terhadap sampel material untuk mendapatkan karakterisasi fasa maupun sifat mekanik. Pada penelitian sebelumnya, proses perlakuan panas pada baja laterit akan memengaruhi nilai kekerasan yang meningkat serta perlakuan temper memperlihatkan struktur martensit dan struktur partikel karbida yang bulat dalam matrik martensit (Payana. 2018).

4. Mekanisme Pembentukan Struktur

Perlite merupakan gabungan dari dua fasa yang terbentuk secara bersamaan. Mekanisme pertumbuhan perlit meliputi pertumbuhan ferit dan sementit secara bersamaan, pertumbuhan dimulai dengan terjadinya pengintian sementit pada batas batas austenite. Sementit tumbuh dengan di dahului oleh difusi atom-atom karbon, sehingga di sekitar lapisan sementit merupakan daerah kekurangan karbon, maka pada bagian ini terjadilah ferit yang memiliki sedikit kelarutan

karbon. Pertumbuhan sementit terjadi dimana-mana yang diikuti oleh pertumbuhan ferit, sehingga akhirnya seluruhnya berubah menjadi perlit.

Martensit merupakan salah satu fasa yang dapat terbentuk pada struktur logam. Sifat daristurktur pada fasa martensit adalah keras dan getas, jadi logam yang berada pada fasa ini cepat mengalami perpatahan.

2.2 Pengelasan (*Welding*)

Penelitian tentang las (*welding*) sudah banyak dilakukan. Beberapa penelitian terkait kekuatan tarik, struktur mikro, dan nilai kekerasan hasil las sudah mulai dilakukan oleh beberapa peneliti. Oleh sebab itu pembahasan tentang pengkajian pustaka ini difokuskan pada pengaruh kecepatan putaran pada pengelasan dan besarnya tekanan gesek pada hasil penyambungan metode las gesek (*Friction welding*).

2.2.1 Proses Dasar Pengelasan

Perkembangan penggunaan teknik pengelasan dalam bidang konstruksi sangat luas, meliputi perkapalan, jembatan, rangka baja, bejana tekan, pipa pesat, pipa saluran, kendaraan rel dan lain sebagainya. Las dapat digunakan untuk reparasi misalnya untuk mengisi lubang-lubang pada coran, mempertebal bagian yang aus dan macam-macam lainnya. Pengelasan (*welding*) adalah salah satu proses penyambungan dua buah logam sampai titik rekristalisasi logam baik menggunakan bahan tambahan maupun tidak menggunakan bahan tambahan dan energi panas sebagai pencair bahan yang dilas. (Wiryo Sumarto, 2008).

Berdasarkan kerjanya pengelasan digolongkan menjadi :

1. Pengelasan cair adalah pengelasan dengan cara mencairkan logam yang akan disambung dengan sumber panas dari busur listrik atau sumber api gas terbakar.
2. Pengelasan tekan adalah pengelasan dengan cara sambungan dipanaskan kemudian ditekan hingga menjadi satu.
3. Pematrian adalah pengelasan dengan cara sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah. Dalam hal ini logam induk tidak ikut mencair (Wiryo Sumarto, 2008).

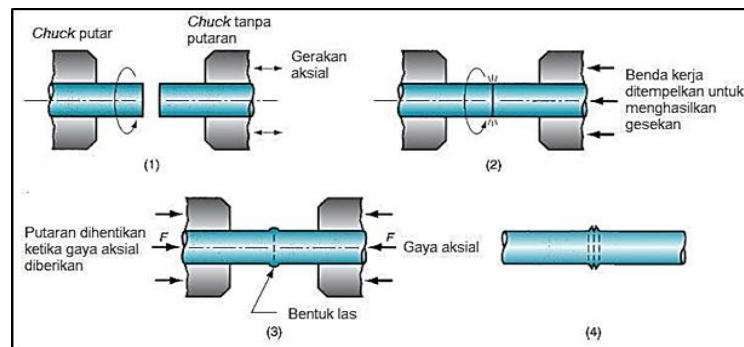
Metalurgi dalam pengelasan, dalam pengertian yang sempit dapat dibatasi hanya pada logam las dan daerah yang terpengaruh panas atau *Heat Affected Zone* (HAZ). Untuk alasan ini secara singkat dan umum, latar belakang prinsip-prinsip metalurgi juga diperlukan sebelum membicarakan sifat-sifat las dan HAZ yang berdekatan. Dengan mengetahui metalurgi las, memungkinkan memprediksi sifat-sifat dari logam las. Pada proses pengelasan perlu diperhatikan faktor keamanan dan umur konstruksi, karena panas pengelasan sangat berpengaruh terhadap sifat material antara lain kekuatan tarik, retak las, kekerasan, ketangguhan, serta perubahan struktur mikro (Yustiasih, 2021). Aspek yang timbul selama dan sesudah pengelasan harus diperhitungkan sebelumnya, karena perencanaan yang tidak sesuai dapat mengakibatkan kualitas hasil las yang kurang baik. Dengan demikian pengetahuan metalurgi las dan ditambah dengan keahlian dalam operasi pengelasan, dapat ditentukan prosedur pengelasan yang baik guna menjamin hasil sambungan las yang baik dan sempurna.

2.2.2 Pengelasan Gesek (*Welding*)

Pengelasan gesek adalah proses pengelasan keadaan padat atau tanpa logam pengisi. Metode ini bergantung pada konversi energi mekanik ke energi termal untuk membentuk pengelasan, tanpa aplikasi dari sumber panas lain. Panas untuk pengelasan dihasilkan oleh gerakan relatif dari dua antarmuka yang tersambung. Penyambungan terjadi antara dua permukaan bahan yang saling bergesekan, salah satu berputar sedang lainnya diam, lalu dikontakkan oleh gaya tekan aksial. Gesekan pada kedua permukaan kontak dilakukan secara kontinyu, sehingga panas yang ditimbulkan oleh gesekan akan terus meningkat sampai mendekati titik lebur logam sehingga terjadi *flash*. Dengan gaya tekan dan panas pada kedua permukaan hingga pertemuan kedua bahan mencapai suhu leleh (*melting temperature*) maka terjadilah proses las (Hochanadel, 2011).

Parameter yang penting saat proses pengelasan gesek adalah tekanan gesek (Pf), waktu gesekan (tf), tekanan tempa (Pu), waktu tempa (tu) dan kecepatan putar (s). Pada proses penyambungan terjadi proses deformasi plastis. Deformasi plastis terjadi akibat tekanan tempa, dan terjadi proses difusi karena adanya panas yang tinggi saat proses pengelasan. Deformasi plastis adalah pembentukan logam dimana

baik ukuran maupun bentuk dari logam tidak dapat kembali pada keadaan semula (Hochanadel, 2011).



Gambar 2.2 Tahap *welding* 1). Tahap pemanasan Dan pemutaran, 2). Tahap pembangkitan panas akibat Gesekan, 3). Tahap akhir penekanan lanjut. 4) Hasil Pengelasan Gesek. (Groover, 2010).

Dalam gambar 2.2 ditunjukkan tahapan proses pengelasan gesek sebagai berikut:

1. Salah satu poros diputar dan logam poros lain dicekam pada *tool post* lalu diberikan tekanan aksial.
2. Kedua poros digesekkan sehingga timbul panas.
3. Panas yang ditimbulkan gesekan sampai mendekati titik lebur logam tersebut sehingga terjadi *flash*.
4. Selanjutnya mesin dimatikan, kemudian secara langsung diberi tekanan aksial. Terbentuklah sambungan las gesek antara dua poros logam.

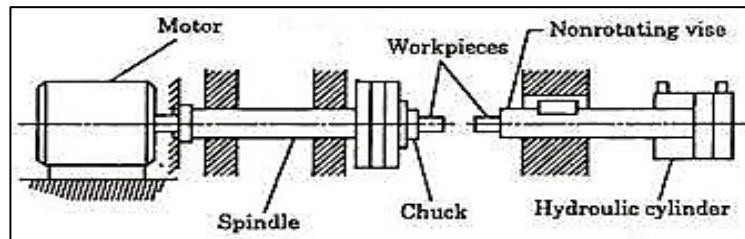
Welding dipengaruhi oleh 5 faktor yaitu: Kecepatan relatif antar permukaan, Tekanan yang dikenakan, Temperatur yang terbentuk pada permukaan, Sifat dari material, Kondisi permukaan. Untuk melakukan welding ada dua cara yaitu direct drive welding dan inertia drive welding (ASM Handbook Vol 6A, 1993).

1. *Direct-Drive Welding*

Skema pengelasan *Direct-drive welding* ditunjukkan pada gambar 2.3 Benda kerja yang diam harus dicekam dengan kaku untuk mencegahnya ikut berputar. Putaran terus dilakukan hingga seluruh permukaan yang disambung mencapai temperatur yang diinginkan. Kemudian putaran dihentikan dan gaya tekan diberikan pada proses akhir pengelasan. Pada kasus ini parameter proses pengelasan gesek ini antara lain kecepatan putar, gaya tekan aksial.

2. *Inertia-Drive Welding*

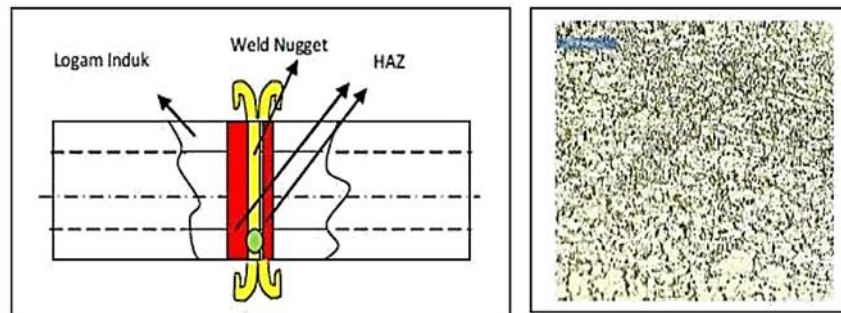
Pengelasan menggunakan *inertia drive welding* hampir sama dengan proses pengelasan *direct drive welding* tetapi pada *spindle* diberi *flywheel* sebagai penyimpan tenaga seperti terlihat pada gambar 2.3. *flywheel* dirancang agar dapat ditambah atau dikurangi masanya. Jumlah energi yang tersimpan dalam *flywheel* dikontrol oleh kecepatan kemudian tekanan aksial diberikan secara konstan selama proses pengelasan dapat pula dilakukan diakhir proses.



Gambar 2.3 Skema *Direct-drive welding*(sumber:ASM HandBook)

2.2.3 Daerah sambungan *Welding*

Daerah pengelasan adalah daerah yang terkena pengaruh panas saat proses pengelasan. Pengaruh panas tersebut menyebabkan sifat material mengalami perubahan karena perubahan struktur mikro pada area sambungan las. Daerah pengelasan terdiri dari tiga bagian yaitu; logam lasan, daerah pengaruh panas (HAZ), dan logam induk. Dalam gambar 2.4 ditunjukkan daerah pengelasan.



Gambar 2.4 Struktur Mikro Logam Hasil *Welding* (Santoyo dkk, 2012).

Daerah sambungan terdiri dari tiga bagian yaitu sebagai berikut :

1. Logam lasan (*weld metal*), adalah daerah endapan las (*weld deposit*) dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Endapan las berasal dari logam pengisi (*filler metal*).

2. Daerah pengaruh panas (HAZ), adalah daerah dimana logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama pengelasan mengalami siklus termal atau pemanasan dan pendinginan dengan cepat.
3. Logam induk (*parent metal*), adalah bagian logam yang tidak terpengaruh oleh pemanasan dan temperatur yang disebabkan selama proses pengelasan, serta tidak menyebabkan terjadinya perubahan struktur dan sifat mekanis dari logam induk. Hal ini disebabkan karena temperatur atau suhu yang terjadi di logam induk belum mencapai temperatur kritis. (Wiryosumarto, 2008).

2.2.4 Kelebihan dan Kekurangan Las Gesek (*Friction Welding*)

Bila dibandingkan dengan proses penyambungan metode las fusi, ada beberapa keuntungan yang dimiliki dari proses las gesek.

Adapun kelebihanannya adalah sebagai berikut:

1. Tidak membutuhkan logam pengisi pada proses pengelasan.
2. Tidak ada *fluks* atau *filler* logam dan gas yang diperlukan dalam las gesek.
3. Kemungkinan terjadinya inklusi terak dan porositas dapat dihindarkan.
4. Cocok untuk jumlah produksi yang banyak.
5. Lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan asap atau gas.
6. Mengurangi tenaga kerja mesin, biaya pemeliharaan, meningkatkan kapasitas dan mengurangi biaya perkakas yang mudah rusak.
7. Memiliki kontrol yang akurat pada toleransi lasan.
8. Dapat menyambungkan dua material berbeda karakteristiknya.

Namun metode las gesek juga memiliki kekurangan yaitu :

1. Benda yang disambung harus simetris.
2. Salah satu material yang disambung harus memiliki sifat mampu deformasi secara plastis.
3. Keterbatasan bentuk yang dapat dilas.

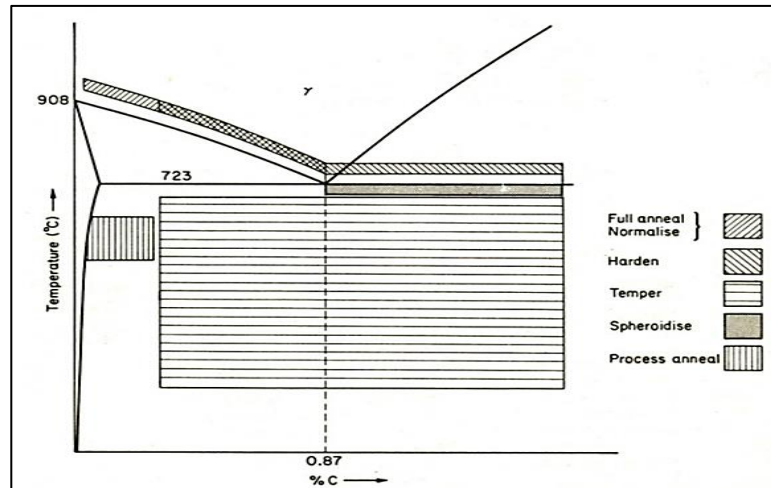
2.3 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Perlakuan panas atau heat treatment adalah kombinasi operasi pemanasan pada logam di bawah temperatur lebur logam tersebut dan pendinginan terhadap logam

atau paduan dalam keadaan padat dengan waktu tertentu (Callister, 2014). Hal ini dimaksudkan untuk memperoleh sifat yang diinginkan dengan merubah struktur mikro. Struktur yang terjadi pada akhir suatu proses perlakuan panas, selain ditentukan oleh komposisi kimia dari material dan proses laku panas yang dialami juga ditentukan oleh struktur awal material.

Paduan dengan komposisi kimia yang sama, dan mengalami proses laku panas yang sama, mungkin akan menghasilkan struktur mikro dan sifat yang berbeda bila struktur awal material berbeda. Struktur awal ini banyak ditentukan oleh pengerjaan dan laku panas yang dialami sebelumnya. Disamping itu dasar-dasar semua proses laku panas melibatkan transformasi dan dekomposisi austenit. Langkah pertama dalam proses laku panas baja adalah memanaskan material sampai temperatur tertentu atau di atas temperatur daerah kritis untuk membentuk fasa austenit. Kemudian diberi waktu penahanan agar austenit dapat lebih homogen baru setelah itu dilakukan proses pendinginan. Proses pendinginan dilakukan dengan cermat agar benda kerja tidak mengalami cacat retak setelah mengalami proses ini. Variasi tipe proses perlakuan panas di atas adalah sama karena seluruh proses perlakuan panas hanya melibatkan proses pemanasan yang membedakannya adalah temperatur pemanasan dan laju pendinginannya. Proses pemanasan dan kecepatan laju pendinginan ini sangat mempengaruhi hasil akhir dari proses perlakuan panas. Di dalam proses perlakuan panas ada tiga tahapan yang paling utama di antaranya tahap pemanasan, tahap penahanan, dan tahap pendinginan (Pramono, 2011).

Dalam praktek terdapat banyak macam proses laku panas yang dilakukan terhadap berbagai jenis paduan. Secara garis besar berbagai macam laku panas ini dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu proses laku panas yang menghasilkan struktur yang ekuilibrium seperti *annealing*, *normalizing*, dan proses laku panas yang lain adalah proses laku panas yang menghasilkan struktur mikro non ekuilibrium, yaitu pengerasan *annealing*, *normalizing*, *hardening* dan *tempering* dan lain-lain (Callister, 2014). Daerah pemanasan proses perlakuan panas dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.5 Diagram Daerah Pemanasan Proses Perlakuan Panas
(Sumber: John, 1983).

2.3.1 *Hardening*

Proses ini berguna untuk memperbaiki kekerasan dari baja tanpa dengan mengubah komposisi kimia secara keseluruhan. Proses ini mencakup proses pemanasan sampai pada austenisasi dan diikuti oleh pendinginan dengan kecepatan tertentu untuk mendapatkan sifat-sifat yang diinginkan. Temperatur yang dipilih tergantung pada jenis baja yang diproses, dimana temperatur pemanasan 50-1000°C di atas garis A3 untuk baja *hypoeutektoid*. Sedangkan proses pendinginannya bermacam-macam tergantung pada kecepatan pendinginan dan media *quenching* yang dikehendaki. Untuk pendinginan yang cepat akan didapatkan sifat logam yang keras dan getas sedangkan untuk pendinginan yang lambat akan didapatkan sifat yang lunak dan ulet. Pada baja *hypoeutektoid* temperatur di atas garis Ac3, struktur baja akan seluruhnya berkomposisikan butir *austenit*, dan pada saat pendinginan cepat akan menghasilkan *martensit*. *Quenching* baja *hypoeutektoid* dari temperatur di atas temperatur optimum akan menyebabkan terjadinya *overheating*. *Overheating* dalam *hardening* akan menghasilkan butir martensit kasar yang mempunyai kerapuhan yang tinggi. Proses ini sangat dipengaruhi oleh parameter tertentu seperti :

- a) Temperatur pemanasan, yaitu temperatur austenisasi yang dikehendaki agar dicapai transformasi yang seragam pada material.
- b) Waktu pemanasan, yaitu lamanya waktu yang diperlukan untuk mencapai temperatur pemanasan tertentu (temperatur austenisasi).

- c) Waktu penahanan, yaitu lamanya waktu yang diperlukan agar didapatkan distribusi temperatur yang seragam pada benda kerja.

Waktu pemanasan ini merupakan fungsi dari dimensi dan daya hantar panas benda kerja. Lamanya waktu penahanan akan menimbulkan pertumbuhan butir yang dapat menurunkan kekuatan material. Martensit adalah mikro konstituen yang terbentuk tanpa melalui proses difusi. Konstituen ini terbentuk saat Austenit didinginkan secara sangat cepat, misalnya melalui proses *quenching* pada media air. Transformasi berlangsung pada kecepatan sangat cepat, mendekati orde kecepatan suara, sehingga tidak memungkinkan terjadi proses difusi karbon. Transformasi martensite diklasifikasikan sebagai proses transformasi tanpa difusi yang tidak tergantung waktu (*diffusionless time-independent transformation*). Martensit yang terbentuk berbentuk seperti jarum yang bersifat sangat keras (*hard*) dan getas (*brittle*). Fasa martensit adalah fasa metastabil yang akan membentuk fasa yang lebih stabil apabila diberikan perlakuan panas. Martensit yang keras dan getas diduga terjadi karena proses transformasi secara mekanik geser akibat adanya atom karbon yang terperangkap pada struktur kristal pada saat terjadi transformasi *polymorfi* dari FCC ke BCC (Callister, 2014).

2.3.2 Tempering

Perlakuan untuk menghilangkan tegangan dalam dan menguatkan baja dari kerapuhan disebut dengan memudakan (*tempering*). Tempering didefinisikan sebagai proses pemanasan logam setelah dikeraskan pada temperatur tempering (di bawah suhu kritis), yang dilanjutkan dengan proses pendinginan. Baja yang telah dikeraskan bersifat rapuh dan tidak cocok untuk digunakan, melalui proses tempering kekerasan dan kerapuhan dapat diturunkan sampai memenuhi persyaratan penggunaan. Kekerasan turun, kekuatan tarik akan turun pula sedang keuletan dan ketangguhan baja akan meningkat. Meskipun proses ini menghasilkan baja yang lebih lunak, proses ini berbeda dengan proses anil (*annealing*) karena sifat-sifat fisis dapat dikendalikan dengan cermat (Callister, 2014).

Pada suhu 200°C sampai 300°C laju difusi lambat hanya sebagian kecil karbon dibebaskan, hasilnya sebagian struktur tetap keras tetapi mulai kehilangan kerapuhannya. Di antara suhu 500°C dan 600°C difusi berlangsung

lebih cepat, dan atom karbon yang berdifusi di antara atom besi dapat membentuk cementit.

- 1 Menurut tujuannya proses tempering dibedakan sebagai berikut :
Tempering pada suhu rendah ($150^{\circ} - 300^{\circ}\text{C}$) Tempering ini hanya untuk mengurangi tegangan-tegangan kerut dan kerapuhan dari baja, biasanya untuk alat-alat potong, mata bor dan sebagainya.
- 2 Tempering pada suhu menengah ($300^{\circ} - 550^{\circ}\text{C}$) Tempering pada suhu sedang bertujuan untuk menambah keuletan dan kekerasannya sedikit berkurang. Proses ini digunakan pada alat-alat kerja yang mengalami beban berat, misalnya palu, pahat, pegas. Suhu yang digunakan dalam penelitian ini adalah 500°C pada proses tempering.
- 3 Tempering pada suhu tinggi ($550^{\circ} - 650^{\circ}\text{C}$) Tempering suhu tinggi bertujuan memberikan daya keuletan yang besar dan sekaligus kekerasannya menjadi agak rendah misalnya pada roda gigi, poros batang penggerak dan sebagainya.

2.3.3 Anealing

Anealing adalah perlakuan panas logam dengan pendinginan yang lambat berfungsi untuk memindahkan tekanan internal atau untuk mengurangi dan menyuling struktur kristal (melibatkan pemanasan di atas temperatur kritis bagian atas). logam dipanaskan sekitar 25°C di atas temperatur kritis bagian atas, ditahan dalam beberapa waktu, kemudian didinginkan pelan-pelan di tungku perapian. Proses ini digunakan untuk memindahkan tekanan internal penuh sebagai hasil proses pendinginan. Berikutnya pendinginan logam diatur kembali di dalam sama benar untuk menurunkan energi bentuk wujud, tegangan yang baru dibebaskan dibentuk dan pertumbuhan butir dukung. Tujuannya untuk menghilangkan internal stress pada logam dan untuk menghaluskan grain (batas butir) dari atom logam, serta mengurangi kekerasan, sehingga menjadi lebih ulet (Callister, 2014). Annealing terdiri dari 3 proses yaitu :

1. *Fase recovery* Fase recovery adalah hasil dari pelunakan logam melalui pelepasan cacat kristal (tipe utama dimana cacat linear disebut dislokasi) dan tegangan dalam.

2. Fase rekristalisasi Fase rekristalisasi adalah fase dimana butir nucleate baru dan tumbuh untuk menggantikan cacat- cacat oleh tegangan dalam.
3. *Fase grain growth* (tumbuhnya butir) *Fase grain growth* (tumbuhnya butir) adalah fase dimana mikrostruktur mulai menjadi kasar dan menyebabkan logam tidak terlalu memuaskan untuk proses pemesinan.

2.3.4 Normalizing

Normalizing adalah perlakuan panas logam di sekitar 40°C di atas batas kritis logam, kemudian di tahan pada temperatur tersebut untuk masa waktu yang cukup dan dilanjutkan dengan pendinginan pada udara terbuka. Pada proses pendinginan ini temperatur logam terjaga untuk sementara waktu sekitar 2 menit per mm dari ketebalan-nya hingga temperatur spesimen sama dengan temperatur ruangan, dan struktur yang diperoleh dalam proses ini diantaranya perlit (eutectoid), perlit *brown ferrite* (*hypoeutectoid*) atau perlit *brown cementite* (*hypereutectoid*). *Normalizing* digunakan untuk menyuling struktur butir dan menciptakan suatu austenite yang lebih homogen ketika baja dipanaskan kembali (Koos, 2009).

2.3.5 Prinsip Pengerjaan Hardening

Proses *hardening* atau pengerasan baja adalah suatu proses pemanasan logam dengan cara dipanaskan kemudian didinginkan secara cepat. Tujuannya adalah untuk mendapatkan struktur martensite, semakin banyak unsur karbon, maka struktur *austenite* yang terbentuk juga akan semakin banyak. Karena martensite terbentuk dari fase austenit yang didinginkan secara cepat. Langkah-langkah proses *hardening* adalah sebagai berikut:

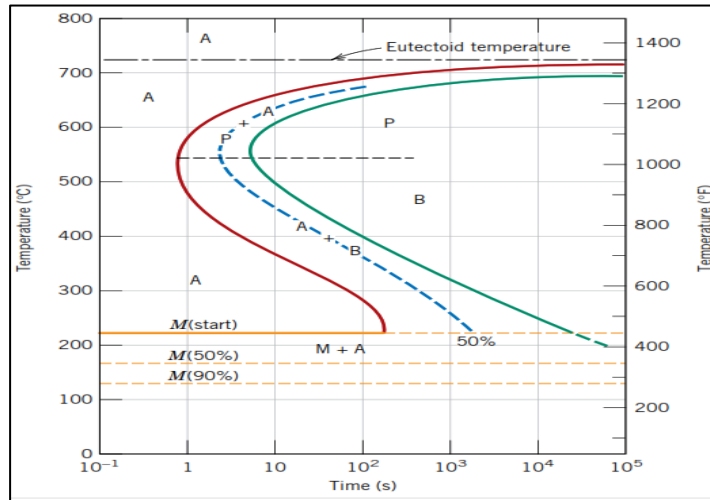
1. Melakukan pemanasan (*heating*)

Lakukan pemanasan diatas Ac-1 pada diagram Fe-Fe₃C, misalnya pemanasan sampai suhu 800, tujuannya adalah untuk mendapatkan struktur *Austenite*, yang salah sifat *Austenite* tidak stabil pada suhu di bawah Ac-1, sehingga dapat ditentukan struktur yang diinginkan. Dibawah ini diagram Fe-Fe₃C.

2. Penahanan suhu (*holding*)

Holding time dilakukan untuk mendapatkan kekerasan *maksimum* dari suatu bahan pada proses *hardening* dengan menahan pada temperatur pengerasan untuk

memperoleh pemanasan yang homogen sehingga struktur austenitnya homogen atau terjadi kelarutan karbida ke dalam austenit dan difusi karbon dan unsur paduannya. Pedoman untuk menentukan *holding time* dari berbagai jenis baja:



Gambar 2.6 Diagram TTT *Time Temperature Transformation*

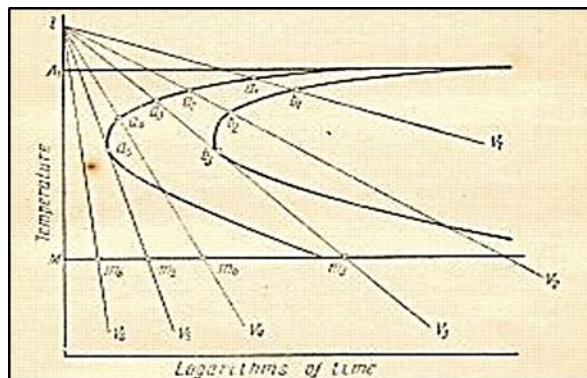
(Sumber: Callister, 2014).

- 1) Baja Konstruksi dari Baja Karbon dan Baja Paduan Rendah Yang mengandung karbida yang mudah larut, diperlukan *holding time* yang singkat, 5 - 15 menit setelah mencapai temperatur pemanasannya dianggap sudah memadai.
- 2) Baja Konstruksi dari Baja Paduan Menengah Dianjurkan menggunakan *holding time* 15-25 menit, tidak tergantung ukuran benda kerja.
- 3) *Low Alloy Tool Steel* Memerlukan *holding time* yang tepat, agar kekerasan yang diinginkan dapat tercapai. Dianjurkan menggunakan 0,5 menit per milimeter tebal benda, atau 10 sampai 30 menit.
- 4) *High Alloy Chrome Steel* Membutuhkan *holding time* yang paling panjang di antara semua baja perkakas, juga tergantung pada temperatur pemanasannya. Juga diperlukan kombinasi temperatur dan *holding time* yang tepat. Biasanya dianjurkan menggunakan 0,5 menit permilimeter tebal benda dengan minimum 10 menit, maksimum 1 jam.
- 5) *Hot-Work Tool Steel* Mengandung karbida yang sulit larut, baru akan larut pada 1000°C. Pada temperatur ini kemungkinan terjadinya pertumbuhan butir sangat besar, karena itu *holding time* harus dibatasi, 15-30 menit. *High Speed Steel* memerlukan temperatur pemanasan yang sangat tinggi, 1200 -

1300°C. Untuk mencegah terjadinya pertumbuhan butir *holding time* diambil hanya beberapa menit saja.

3. Pendinginan.

Untuk proses *Hardening* kita melakukan pendinginan secara cepat dengan menggunakan media air. Tujuannya adalah untuk mendapatkan struktur *martensite*, semakin banyak unsur karbon, maka struktur *martensite* yang terbentuk juga akan semakin banyak. Karena *martensite* terbentuk dari fase *Austenite* yang didinginkan secara cepat. Hal ini disebabkan karena atom karbon tidak sempat berdifusi keluar dan terjebak dalam struktur kristal dan membentuk struktur tetragonal yang ruang kosong antar atomnya kecil, sehingga kekerasannya meningkat.



Gambar 2.7 Diagram Laju pendinginan sesuai media

Beberapa spesimen baja *eutektoid* dipanaskan pada temperatur di atas titik A1. Temperatur ini ditunjukkan oleh diagram CCT di atas sebagai titik t. kemudian baja didinginkan dengan berbagai macam variasi pendinginan. Proses pendinginan diperlihatkan oleh garis miring dimana semakin miring garis yang terbentuk semakin cepat pendinginannya. Pendinginan yang paling lambat (untuk *annealing*) diperlihatkan oleh garis lurus v1, pendinginan yang sedikit lebih cepat diperlihatkan oleh garis v2, yang lebih cepat (untuk *quenching* dengan oli) diperlihatkan oleh garis v3 dan v4 dan yang paling cepat (pendinginan dengan air) ditunjukkan oleh garis v5 dan v6.

2.4 Pengujian Tarik (*Tensile Test*)

Kekuatan tarik adalah salah satu sifat mekanik yang sangat penting dan dominan dalam suatu perancangan konstruksi dan proses manufaktur. Setiap material atau bahan memiliki sifat (kekerasan, kelenturan, dan lain lain) yang berbeda-beda. Untuk dapat mengetahui sifat mekanik dari suatu material maka diperlukan suatu

pengujian, salah satu pengujian yang paling sering dilakukan yaitu uji tarik (*tensile test*). Pengujian ini memiliki fungsi untuk mengetahui tingkat kekuatan suatu material dan untuk mengenali karakteristik pada material tersebut.

Kekuatan material bisa diperoleh dari sebuah pengujian yang dikenal dengan nama uji tarik. Dari pengujian itu selain diperoleh *hardness test* kerja yang putus karena proses penarikan, juga dihasilkan sebuah kurva uji tarik. Kurva ini merupakan gambaran dari proses pembebanan pada *hardness test* kerja mulai dari awal penarikan hingga *hardness test* kerja itu putus.

Nilai kekuatan dan elastisitas dari material uji dapat dilihat dari kurva hasil uji tarik. Selain kekuatan dan elastisitas, sifat lain yang dapat diketahui adalah sebagai berikut:

1. Kekuatan luluh dari material.
2. Keuletan dari material.
3. Kelentingan dari suatu material

Pengujian dilakukan dengan tujuan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu material/bahan dan juga sebagai referensi pendukung untuk spesifikasi material/bahan. Kekuatan ini ada beberapa macam, tergantung pada jenis beban yang bekerja, yaitu kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan tekan kekuatan torsi dan kekuatan lengkung. Sifat Mekanik yang didapat dari uji tarik meliputi:

Rumus Tegangan

-Tegangan tarik *yield* (σ_y)

$$\sigma_y = P_y / A_o$$

-Tegangan tarik maksimum *Ultimate* (σ_u)

$$\sigma_u = P_u / A_o$$

-Regangan (ϵ)

$$\epsilon = \Delta L / L_o \times 100\%$$

Dimana :

σ_y = Tegangan *yield* (kN/mm²) σ_u = Tegangan *Ultimate* (kN/mm²)

P_y = Beban *yield* (kN) P_u = Beban *Ultimate* (kN)

L_o = Panjang awal (mm) ΔL = Pertambahan Panjang (mm)

ϵ = Regangan

Regangan tertinggi menunjukkan nilai keuletan suatu material.

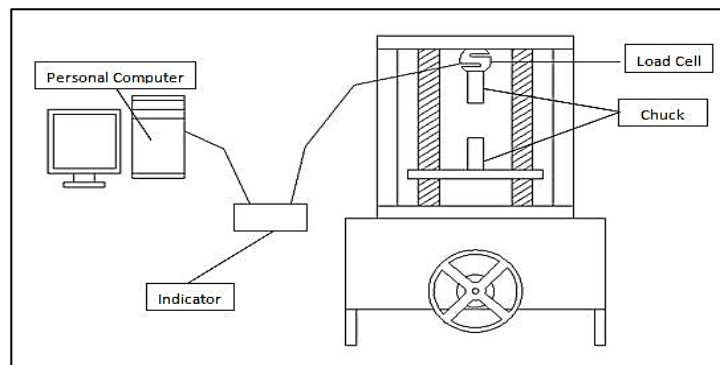
1) Modulus elastisitas (E)

Jika regangan menunjukkan keuletan, maka modulus elastisitas menunjukkan kekakuan suatu material. Apabila nilai E semakin besar, menandakan semakin kaku suatu material. Nilai E ini diturunkan dari persamaan hukum Hooke. Dari persamaan tersebut juga nampak bahwa kekakuan suatu material relatif terhadap yang lain dapat diamati dari sudut kemiringan α pada garis proporsional.

2) Reduksi penampang/*reduction of area* (RA)

$$RA = [(A_0 - A_1) / A_0] 100\%$$

Dimana A_1 = luas penampang setelah patah (mm^2) Reduksi penampang juga dapat digunakan untuk menentukan keuletan material. Semakin tinggi nilai RA, semakin ulet material tersebut.



Gambar 2.8 Skema peralatan yang digunakan dalam uji tarik

Dari gambar 2.8 dapat dilihat beberapa komponen utama yang terdapat pada mesin uji tarik. Komponen utama tersebut terdiri dari alat pencatat gaya (*load cell*), alat pencatat pertambahan panjang spesimen (*extensometer*), batang penarik (*moving crosshead*), dan spesimen. *Load cell* digunakan untuk mencatat besarnya pembebanan (F) yang dialami oleh spesimen, sedangkan *extensometer* digunakan untuk mencatat besarnya pertambahan panjang (ΔL) yang terjadi pada spesimen. Hubungan antara gaya (F) terhadap pertambahan panjang (ΔL) inilah yang nantinya akan dikonversikan ke dalam kurva tegangan (σ) terhadap regangan teknik (ϵ).

2.4.1 Spesimen Uji Tarik

Spesimen uji tarik bentuk dan ukurannya sudah terstandar, dalam kasus-kasus tertentu diizinkan memakai bentuk dan ukuran *hardness test* uji tidak standar. Bentuk dan ukuran *hardness test* uji terstandar disebut juga *hardness test* uji

proporsional, dan yang tidak terstandar disebut juga *hardness test* uji non proporsional. Bentuk penampang *hardness test* uji dapat berbentuk lingkaran atau bentuk segi empat. Ukuran *hardness test* uji yang biasa dipakai standar DP 5 atau DP 10.

2.5 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan ada bermacam-macam tergantung konsep yang dianut. Dalam engineering yang menyangkut logam kekerasan dinyatakan sebagai kemampuan untuk menahan indentasi / penetrasi / abrasi atau dengan definisi lain adalah ketahanan logam terhadap deformasi plastis.

Ada beberapa cara *hardness test* yang standar untuk menguji kekerasan logam yaitu; pengujian *Brinell*, *Rockwell*, *Vickers*, dan lain lain. Pada dasarnya *hardness test* dilakukan dengan menekan sebuah indenter yang lebih keras sifatnya dari bahan uji dengan beban dan jangka waktu tertentu (10-15 detik), bekas tapak tekan pada permukaan benda uji diukur untuk menentukan nilai kekerasan dengan cara gaya tekan dibagi luas tapak tekan (Santosa dkk, 2020).

2.5.1 Dasar-Dasar Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan bahan logam bertujuan mengetahui angka kekerasan logam tersebut. Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengetahui seberapa besar tingkat kekerasan logam tersebut. Metode pengujian kekerasan telah disepakati melalui tiga metode pengujian kekerasan dengan satuan yang baku, yaitu penekanan, goresan, dan dinamik. Pengujian kekerasan dengan cara penekanan banyak digunakan oleh industri permesinan, dikarenakan prosesnya sangat mudah dan cepat dalam memperoleh angka kekerasan logam tersebut apabila dibandingkan dengan metode pengujian lainnya. Pengujian kekerasan dengan cara penekanan terdiri dari tiga jenis, yaitu pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell*, *Brinell*, dan *Vickers*. Ketiga metode tersebut memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing, serta perbedaan dalam menentukan angka kekerasannya. Metode *Brinell* dan *Vickers* memiliki prinsip dasar yang sama dalam menentukan angka kekerasannya, yaitu menitikberatkan pada perhitungan kekuatan bahan terhadap setiap daya luas penampang bidang yang menerima pembebanan tersebut. Sedangkan metode *Rockwell* menitik beratkan pada pengukuran kedalaman hasil

penekanan atau penekan (*indentor*) yang membentuk bekasnya (*indentasi*) pada benda uji dasar-dasar Pengujian Kekerasan (Wicaksono, 2021).

2.5.2 Metode *Hardness Test*

Ada berbagai macam metode pengujian kekerasan yang digunakan untuk menguji kekerasan logam, yaitu :

- 1) Metode *Hardness Brinell*.
- 2) Metode *Hardness Vickers*.
- 3) Metode *Hardness Rockwell*.
- 4) Metode *Hardness Rockwell Superficial*.
- 5) Metode *Hardness Knoop*.
- 6) Metode *Hardness Shore Scleroscope*.
- 7) Metode *Hardness Sonodur*.
- 8) Metode *Hardness Moh*.
- 9) Metode *Hardness File*.

Dari kesembilan metode *hardness test* tersebut, hanya tiga saja yang akan dibahas metode pengujian kekerasan untuk menguji kekerasan logam, yaitu Metode Pengujian *Hardness Vickers*.

2.5.3 Metode Pengujian *Vickers*

Metode *Vickers* ini berdasarkan pada penekanan oleh suatu gaya tekan tertentu oleh sebuah indentor berupa *pyramid diamond* terbalik dengan sudut puncak 136° ke permukaan logam yang akan diuji kekerasannya, dimana permukaan logam yang diuji ini harus rata dan bersih. Angka kekerasan *Vickers* (VHN) didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan lekukan (Dengel, 1996).

Pengujian *Vickers* dapat dilakukan tidak hanya pada benda yang lunak akan tetapi juga dapat dilakukan pada bahan yang keras. Bekas penekanan yang kecil pada pengujian *Vickers* mengakibatkan kerusakan bahan percobaan relatif sedikit. Pada benda kerja yang tipis atau lapisan permukaan yang tipis dapat diukur dengan gaya yang relatif kecil (Payana, 2018).

2.5.4 Pengujian Kekerasan *Vickers*

Uji kekerasan *Vickers* menggunakan penumbuk piramida intan yang dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besarnya sudut antara permukaan *pyramida* yang saling

berhadapan adalah 136° . Sudut ini dipilih karena nilai tersebut mendekati sebagian besar nilai perbandingan yang diinginkan antara diameter lekukan dan diameter bola penumbuk pada uji kekerasan *brinell*. Angka kekerasan piramida intan (DPH), atau angka kekerasan *Vickers* (VHN atau VPH), didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan lekukan, prinsip pengukuran untuk kekerasan mikro *vickers* dapat dilihat pada Gambar 2.10. Pada prakteknya luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak. VHN dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{L^2} = 1.854P/L^2$$

Keterangan:

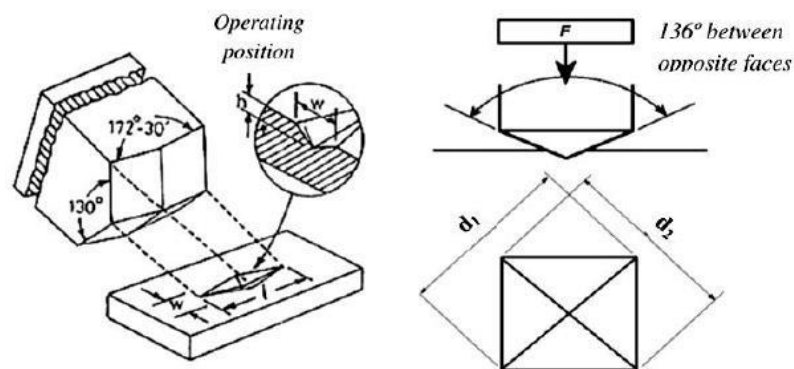
P = Beban yang digunakan (kg)

L = Panjang diagonal rata-rata (mm)

θ = sudut antara permukaan intan yang berlawanan = 136°

Uji kekerasan *Vickers* banyak dilakukan pada pekerjaan penelitian, karena metode tersebut memberikan hasil berupa skala kekerasan yang kontinu, untuk suatu beban tertentu dan digunakan pada logam yang sangat lunak, yakni DPH-nya 5 hingga logam yang sangat keras dengan DPH1500.

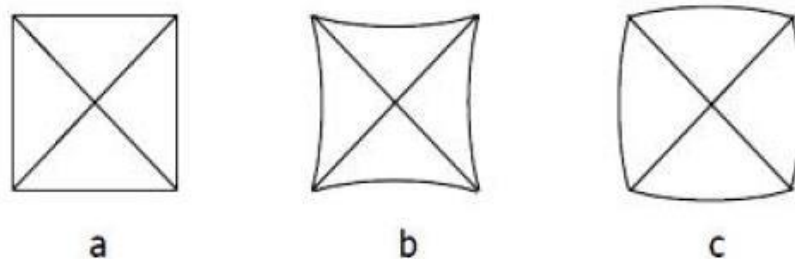
Hal-hal yang menghalangi keuntungan pemakaian metode *Vickers* adalah uji kekerasan *Vickers* tidak dapat digunakan untuk pengujian rutin karena pengujian tersebut lamban, memerlukan persiapan permukaan benda uji yang hati-hati, dan terdapat pengaruh kesalahan manusia yang besar pada penentuan panjang diagonal.



Gambar 2.9. Prinsip Pengukuran Kekerasan *Mickro Vickers*

Lekukan yang benar terbuat dari penumbuk piramida intan harus berbentuk bujur sangkar. Akan tetapi, penyimpangan yang telah dijelaskan untuk uji *brinell*

sering juga terdapat pada penumbuk piramida gambar 2.10.a lekukan bantal jarum pada gambar 2.10.b adalah akibat terjadinya penurunan logam disekitar permukaan piramida yang datar. Keadaan demikian terdapat pada logam-logam yang dilunakan dan mengakibatkan pengukuran panjang diagonal yang berlebihan. Lekukan berbentuk tong pada gambar 2.10.c mengalami proses pengerjaan dingin. Bentuk demikian diakibatkan oleh penimbunan ke atas logam-logam disekitar permukaan penumbuk. Ukuran diagonal pada kondisi demikian akan menghasilkan luas permukaan kontak yang kecil, sehingga menimbulkan kesalahan angka kekerasan yang besar ada koreksi empiris untuk menanggulangi pengaruh hal di atas.



Gambar 2.10. Tipe-Tipe Lekukan Piramida Intan (Dengel,1996).

Keterangan:

- (a) Lekukan yang sempurna
- (b) Lekukan bantal jarum (*pinchusion*) yang disebabkan oleh penurunan
- (c) Lekukan berbentuk tong yang disebabkan oleh penimbunan ke atas.

Pada penelitian ini alat uji yang digunakan adalah alat uji kekerasan *micro Vickers*.

2.5.5 Pengujian Kekerasan Mikro Vickers

Banyak persoalan metalurgi memerlukan data-data mengenai kekerasan pada daerah yang sangat kecil. Pengukuran gradien kekerasan pada permukaan yang dikarburasi, pengukuran kekerasan kandungan tunggal pada struktur mikro, atau penentuan kekerasan roda gigi arloji, merupakan tipe persoalan dari jenis pengujian kekerasan mikro (Dengel, 1996). Uji mikro *Vickers* merupakan pengujian untuk menguji kekerasan daerah yang kecil atau rumit.

2.6 Pengujian Struktur Mikro

Uji Struktur Mikro atau Pengamatan struktur mikro merupakan suatu pengujian untuk mengetahui susunan fasa pada suatu benda uji atau *specimen*. Struktur mikro dan sifat paduannya dapat diamati dengan berbagai cara bergantung pada sifat informasi yang dibutuhkan. Salah satu cara dalam mengamati struktur suatu bahan yaitu dengan teknik metalografi (pengujian mikroskopik). Mikroskop mikro yang digunakan untuk mengamati struktur bahan (Bahaudin, 2017).

2.6.1 Mikro Optik

Struktur mikro adalah suatu bentuk susunan struktur yang terbentuk pada material logam dan ukurannya sangat kecil dan tidak beraturan, bentuknya berbeda-beda tergantung pada unsur dan proses yang dialami pada saat pembentukannya. Gambaran dari kumpulan fasa- fasa yang dapat diamati melalui teknik metalografi. Struktur mikro suatu logam dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop. Dimana perbesaran foto diperoleh dari perkalian lensa obyektif dan okuler. Lensa obyektif yang dipakai 10x, dan lensa okuler 10x sehingga perbesaran 100x. jarak 10 strip pada foto untuk perbesaran 100x adalah 100 (ASM Handbook Vol 3, 1992).

Pada dasarnya pengamatan Metalografi adalah mengamati 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 specimen maka sinar tersebut akan dipantulkan sesuai dengan orientasi sudut permukaan bidang yang terkena sinar.

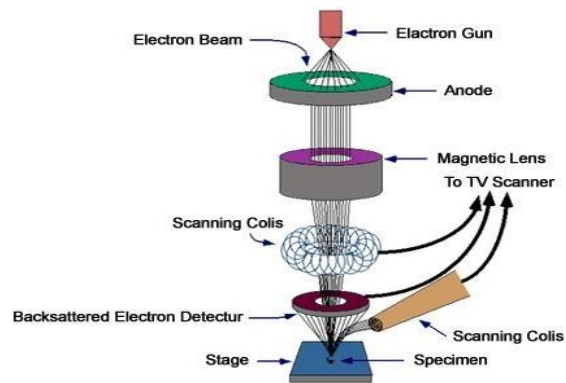
Metalografi adalah ilmu yang berkaitan dengan penyusunan dari mikro struktur logam dan paduan yang dapat dilihat langsung oleh mata maupun dengan bantuan peralatan seperti mikroskop optik, mikroskop elektron SEM (*Scanning Electron Microscope*), dan difraksi sinar X. *Metalografi* tidak hanya berkaitan dengan struktur logam tetapi juga mencakup pengetahuan yang diperlukan untuk 34 preparasi awal permukaan bahan. *Sampel metalografi* harus memenuhi kriteria yaitu mewakili *sampel*, cacat dipermukaan minimum bebas goresan, lubang cairan lengket, inklusi, presipitasi, fasa terlihat jelas, permukaan sampel datar sehingga perbesaran maksimum mampu dicapai, dan permukaan sampel bagian pinggir tidak rusak (ASM Handbook Vol 9, 2004).

2.6.2 SEM (*Scanning Electron Microscope*)

Scanning electron microscope (SEM) adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk menggambarkan bentuk permukaan dari sampel yang dianalisis. SEM memiliki resolusi yang lebih tinggi dari pada *optical microscope* (OM). Hal ini disebabkan panjang gelombang *de Broglie* yang dimiliki elektron lebih pendek daripada gelombang OM. Karena semakin kecil panjang gelombang yang digunakan maka semakin tinggi resolusi mikroskop. SEM memiliki resolusi yang lebih tinggi daripada OM. Resolusi yang mampu dihasilkan OM hanya 200 nm, sedangkan resolusi yang dapat dihasilkan SEM mencapai 0.1 – 0.2 nm.

Prinsip kerja dari SEM adalah dengan menggambarkan permukaan benda atau material dengan berkas elektron yang dipantulkan dengan energi tinggi. Permukaan material yang disinari atau terkena berkas elektron akan memantulkan kembali berkas elektron atau dinamakan berkas elektron sekunder ke segala arah. Tetapi dari semua berkas elektron yang dipantulkan terdapat satu berkas elektron berintensitas tertinggi yang dipantulkan oleh sampel yang akan dianalisis. Pengamatan sampel dilakukan dengan menembakkan berkas elektron yang berintensitas tertinggi ke permukaan sampel, kemudian *scan* keseluruhan permukaan material pengamatan. Karena luasnya daerah pengamatan, dapat dibatasi lokasi yang akan diamati dengan melakukan *zoom-in* atau *zoom-out*. Dengan memanfaatkan berkas pantulan dari benda tersebut maka informasi dapat diketahui dengan menggunakan program pengolahan citra yang terdapat di dalam komputer (Bahaudin, 2017).

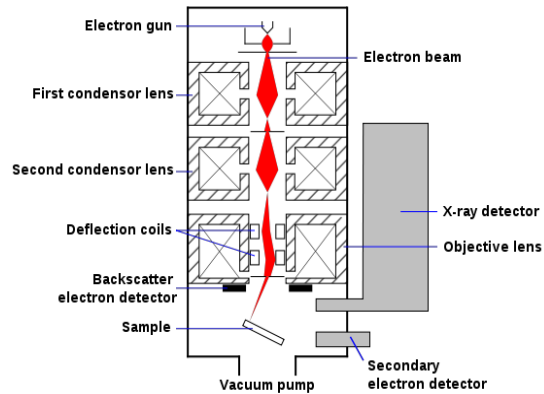
Prinsip kerja dari SEM yang ditunjukkan pada Gambar. 2.11 adalah sebuah pistol elektron memproduksi sinar elektron dan dipercepat dengan anoda. Lensa magnetik memfokuskan elektron menuju ke sampel. Sinar elektron yang terfokus memindai (*scan*) keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai. Ketika elektron mengenai sampel maka sampel akan mengeluarkan elektron baru yang akan diterima oleh detektor dan dikirim ke monitor (CRT).



Gambar 2.11. Prinsip kerja SEM (Schweitzer, 2014).

Ada beberapa sinyal yang penting yang dihasilkan oleh SEM. Dari pantulan *inelastis* didapatkan sinyal elektron sekunder dan karakteristik sinar X, sedangkan dari pantulan elastis didapatkan sinyal *backscattered electron*. Perbedaan gambar dari sinyal elektron sekunder dengan *backscattered* adalah sebagai berikut: elektron sekunder menghasilkan topografi dari benda yang dianalisa, permukaan yang tinggi berwarna lebih cerah dari permukaan rendah. Sedangkan *backscattered elektron* memberikan perbedaan berat molekul dari atom – atom yang menyusun permukaan, atom dengan berat molekul tinggi akan berwarna lebih cerah daripada atom dengan berat molekul rendah. Untuk mengetahui komposisi kimia pada permukaan sampel, sebagian besar alat SEM dilengkapi dengan kemampuan *energy dispersive x-ray* (EDX). EDX dihasilkan dari sinar X, yaitu dengan menembakkan sinar-X pada posisi yang ingin diketahui komposisinya. Setelah ditembakkan pada posisi yang diinginkan maka akan muncul puncak-puncak tertentu yang mewakili suatu unsur yang terkandung. Dengan EDX juga bisa membuat elemental mapping (pemetaan elemen) dengan memberikan warna berbeda-beda dari masing-masing elemen di permukaan sampel. EDX bisa digunakan untuk menganalisa secara kuantitatif dari persentase masing-masing elemen.

SEM-EDX dapat memberikan informasi tentang topografi, morfologi, komposisi dari sampel yang dianalisis (Bahaudin, 2017). Topografi adalah kemampuan untuk menganalisa permukaan dan tekstur. Morfologi adalah kemampuan untuk menganalisa bentuk dan ukuran dari benda sampel. Komposisi adalah kemampuan menganalisa komposisi dari permukaan benda secara kuantitatif dan kualitatif.



Gambar 2.12 Skema SEM

2.6.3 EDX (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*)

Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS atau EDX atau EDAX) adalah salah satu teknik analisis untuk menganalisis unsur atau karakteristik kimia dari *specimen*. Karakterisasi ini bergantung pada penelitian dari interaksi beberapa eksitasi sinar X dengan *specimen*. Kemampuan untuk mengkarakterisasi sejalan dengan sebagian besar prinsip dasar yang menyatakan bahwa setiap elemen memiliki struktur atom yang unik, dan merupakan ciri khas dari struktur atom suatu unsur, sehingga memungkinkan sinar X untuk mengidentifikasinya.

Untuk merangsang emisi karakteristik sinar X dari sebuah spesimen, sinar energi tinggi yang bermuatan partikel seperti elektron atau proton, atau berkas sinar X, difokuskan ke spesimen yang akan diteliti. Selanjutnya sebuah atom dalam spesimen yang mengandung elektron dasar di masing-masing tingkat energi atau kulit elektron terikat pada inti. Sinar yang dihasilkan dapat mengeksitasi elektron di kulit dalam dan mengeluarkannya dari kulit, sehingga terdapat lubang elektron di mana elektron itu berada sebelumnya. Sebuah elektron dari luar kulit yang berenergi lebih tinggi kemudian mengisi lubang, dan perbedaan energi antara kulit yang berenergi lebih tinggi dengan kulit yang berenergi lebih rendah dapat dirilis dalam bentuk sinar X. Jumlah dan energi dari sinar-X yang dipancarkan dari *spesimen* dapat diukur oleh *spektrometer energi-dispersif*. Energi dari sinar X yang dihasilkan merupakan karakteristik dari perbedaan energi antara dua kulit, dan juga karakteristik struktur atom dari unsur yang terpancar, sehingga memungkinkan komposisi unsur dari spesimen dapat diukur. Pengujian EDX ini dilakukan untuk

mengetahui komposisi yang terkandung pada permukaan (ASM Handbook Vol 9, 2004).