Pengaruh Waktu *Tempering* terhadap Karakter Baja s45c Pasca *Quenching* pada 950^{o}c dan *Tempering* 500^{o}c

Ahmad Zayadi[*1)], Sungkono[2)], Masyhudi[3)], Ekky Setyawan T[4)]
[1,3)], Dosen Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik dan Sains
Universitas Nasional Jakarta 12520.
[2)], Badan Tenaga Atom Nasional-BATAN.
[4)], Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik dan Sains
Universitas Nasional Jakarta 12520.
[*] *Corresponding Author:* zayadiahmad43@gmail.com

Abstrak - Baja merupakan salah satu bahan struktur yang berfungsi sebagai wadah secara fisik, memberikan kekuatan mekanik, dan struktur penyangga untuk berbagai komponen industri nuklir, bahan tersebut membutuhkan sifat mekanik yang tinggi. Baja S45C memiliki kekuatan mekanik yang sedang sehingga dapat ditingkatkan sifat mekaniknya dengan perlakuan panas. Penelitian ini mempunyai tujuan untuk mendapatkan karakter mekanik, mikrostruktur, kekerasan, dan komposisi kimia pada Baja S45C. Metode yang digunakan adalah komposisi kimia dengan spark spectrometer, pengujian Tarik menggunakan mesin uji Tarik 50 KN, pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik, dan kekerasan dengan vickers microhardness tester. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi kimia sampel pengujian adalah baja S45C, kekuatan tarik baja S45C yang menggunakan sampel tarik pasca perlakuan panas *austenisasi*, *quenching* media oli dan *tempering* 500 ^{O}C waktu penahanan 60 menit pendinginan suhu tungku lebih tinggi UTS (*Ultimate tensile strength*) dengan nilai UTS 805,12 (N/mm^2), kekuatan luluh (σ_Y)= 619,14 (N/mm^2), dan regangan (e) = 15,00 %. dibandingkan sampel tanpa perlakuan panas dengan nilai (UTS) = 331,9 (N/mm^2), kekuatan luluh (σ_Y) = 267,27 (N/mm^2) , dan regangan (e) = 20,08 %. Regangan baja S45C sampel tarik standar dan silinder pasca perlakuan panas lebih rendah dibandingkan sampel tanpa perlakuan panas. Mikrostruktur baja S45C tanpa perlakuan panas mempunyai fasa ferit dan perlit, sedangkan pasca *quenching* dan *tempering* adalah fasa *martemper* dan ferit. Semakin lama waktu penahanan pada proses *tempering* baja S45C, maka akan semakin rendah nilai kekerasan yang didapat. Proses perlakuan panas yang diterapkan pada sampel tarik baja S45C akan meningkatkan ketangguhan baja S45C yang ditandai dengan kenaikan kekuatan tarik dan keuletannya. Kekerasan logam dasar lebih rendah dibandingkan pada daerah patahan yang disebabkan adanya fenomena pengerasan regangan di daerah patahan selama uji tarik berlangsung.

Kata Kunci : Baja S45C, austenisasi, *quenching*, *tempering*, kekuatan tarik, kekerasan, mikro struktur, komposisi kimia

PENDAHULUAN

Baja adalah paduan besi (Fe) dengan unsur pemadu utama karbon (C), silikon (Si), mangan (Mn), khrom (Cr), dan unsur lain untuk keperluan khusus. Baja dan paduannya secara luas digunakan mulai dari peralatan rumah tangga, komponen otomotif, konstruksi gedung hingga bahan struktur reaktor nuklir. Bahan struktur berfungsi sebagai wadah secara fisik memberikan kekuatan mekanik, dan struktur penyangga untuk berbagai komponen industri nuklir, seperti rantai *incell crane*, *conveyor*, bejana tekan, plat penyangga teras, dan sistem pipa pendingin[1]. Baja harus memiliki struktur yang kuat, karena akan terkena pengaruh gaya luar berupa tegangan gesek, tekan, tarik, puntir sehingga menimbulkan deformasi logam. Sehubungan hal tersebut, maka baja yang digunakan sebagai bahan konstruksi dan struktur harus diperkuat dan dikeraskan agar memiliki ketahanan terhadap beban eksternal yang diterima[2]. Baja diperkuat dan dikeraskan dengan berbagai cara diantaranya dengan proses perlakuan panas. Pada proses perlakuan panas, baja dipanaskan hingga temperatur austenit, ditahan beberapa lama tergantung ketebalannya, selanjutnya didinginkan hingga temperatur kamar. Proses pendinginan secara umum ada 3 (tiga) yaitu pendinginan cepat (*quenching*), pendinginan lambat (di udara) dan pendinginan sangat lambat (di dalam tungku)[3]. Proses penguatan dan pengerasan baja hanya dapat dilakukan pada baja dengan komposisi C minimal 0,45% berat [4]. Proses perlakuan panas yang dilakukan pada baja karbon sedang ini adalah dengan cara *hardening. Hardening* adalah proses perlakuan panas yang diterapkan pada benda kerja untuk menghasilkan benda kerja yang keras[5]. Perlakuan panas terdiri dari beberapa tahapan, yaitu memanaskan baja sampai temperatur austenisasi dan menahan nya pada temperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu, kemudian didinginkan cepat *(quenching)* dalam air agar diperoleh kekerasan baja yang diinginkan. Proses *hardening* mengakibatkan terjadinya tegangan dalam *(internal stresses)* sehingga baja keras dan getas *(brittle)* [3]. Hal ini tidak menguntungkan karena baja tersebut belum cocok untuk segera digunakan. Oleh karena itu, pada baja tersebut perlu dilakukan proses lanjut yaitu *tempering.* Pada proses *tempering* kekerasan dan kegetasan dapat diturunkan sampai memenuhi syarat penggunaan, dampaknya kekuatan tarik menurun sedangkan keuletan dan ketangguhan meningkat. Mendapatkan bahwa nilai kekerasan baja S45C setelah *tempering* lebih rendah dibandingkan setelah *quenching,* sedangkan keuletannya naik[5].

Akhyar dan Sayuti (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh perlakuan panas terhadap kekerasan dan mikrostruktur AISI 1045. Proses perlakuan panas baja S45-C (AISI 1045) dilakukan dalam tungku pemanas dengan variasi temperatur 900 – 1000 °C, ditahan selama waktu tertentu dengan variasi 60, 120 dan 180 menit, kemudian didinginkan cepat. Akhyar mendapatkan bahwa kekerasan baja AISI 1045 meningkat secara signifikan seiring kenaikan temperatur austenisasi kecuali pada 1000 °C, sedangkan mikrostrukturnya berupa ferit dan martensit dengan kandungan martensit menurun seiring dengan bertambahnya temperatur austenisasi dan terjadi retakan saat pendinginan cepat[6].

Hatta dan Tri (2018) melakukan penelitian baja S45C yang dipanaskan pada temperatur masing-masing 700, 800, dan 900ºC kemudian didinginkan cepat (*quenching*) dalam air garam dan oli. Mereka mendapatkan bahwa semakin tinggi temperatur austenisasi maka semakin tinggi kekerasan baja S45C pasca pendinginan cepat, dan kekerasannya lebih tinggi dalam media oli dibandingkan air garam. Nilai kekerasan baja S45C pasca pengerasan terbaik untuk aplikasi poros roda sepeda motor adalah temperatur austenisasi 700 ºC dengan pendinginan cepat dalam media oli yang menghasilkan kekerasan sebesar 30,46 HRC[7].

Sasi Kirono (2011) melakukan penelitian pada baja S45C yang dipanaskan 850 °C, ditahan 45 menit kemudian didinginkan dalam media oli dan air garam, dilanjutkan dengan proses temper pada temperatur 600 ºC. Sasi Kirono mendapatkan bahwa media *quenching* dan proses tempering mempengaruhi struktur mikro, perilaku tarik dan kekerasan baja S45C. Pada temperatur austenisasi 850 ºC perilaku tarik dan kekerasan baja S45 C dalam media air garam lebih tinggi dibandingkan dalam oli ditandai dengan fasa martensit lebih dominan dibandingkan fasa bainit dalam struktur mikronya. Namun, setelah proses

tempering pada 600 °C kedua sampel dengan tipe perlakuan panas berbeda tersebut ternyata memiliki perilaku tarik, kekerasan dan struktur mikro ferit dan sementit halus relatif sama[8].

Basori, Pratiwi dan Dwiyati (2019) melakukan penelitian tentang pengaruh media pendingin terhadap mikrostruktur dan perilaku mekanik baja AISI 1045. Baja dipanaskan pada 850 °C, ditahan 15 dan 30 menit, kemudian didinginkan cepat dalam media air garam dengan konsentrasi 0, 10 dan 23 %. Mereka mendapatkan bahwa proses pendinginan cepat pada baja AISI 1045 akan mempercepat transformasi fasa dari campuran ferit dan perlit menjadi martensit. Kenaikan waktu penahanan austenisasi dan konsentrasi garam akan menghasilkan intensitas martensit dan kekerasan lebih tinggi serta menurunkan ketangguhan baja AISI 1045[10].

Berdasarkan penelitian para peneliti sebelumnya yang telah diuraikan di atas, diketahui untuk menghasilkan perilaku tarik dan kekerasan bertambah tinggi perlu dilakukan proses perlakuan panas yang teridiri dari austenisasi, *quenching* dan *tempering*. Mereka melakukan penelitian dalam rentang temperatur austenisasi 700 – 900 °C, waktu penahanan 15 – 180 menit, dengan temperatur tempering 600 ^{o}C, dalam media oli dan air garam. Sehubungan hal tersebut maka akan dilakukan penelitian yang terkait dengan pengaruh perlakuan panas terhadap mikrostruktur, kekerasan dan kekuatan tarik baja S45C, dengan sampel standar uji tarik serta temperatur pemanasan 950 ^{O}C yang ditahan selama 90 menit, pendinginan cepat menggunakan oli, kemudian dilanjutkan proses tempering pada temperatur 500 $^{\circ}$C dan ditahan dalam rentang waktu 30, 60 dan 90 menit, pendinginan sampel dalam tungku pemanas.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan utama yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah apakah ada perubahan sifat mekanis dan mikrostruktur setelah dilakukan perlakuan panas serta berapa waktu temper terbaik yang menghasilkan ketangguhan terbaik baja S45C. Tujuan Penelitian untuk mendapatkan pengaruh proses perlakuan panas terhadap karakter mekanik dan mikjrostruktur baja S45C. Karakter tersebut dapat diketahui dengan cara melakukan karakterisasi baja S45C setelah perlakuan panas guna mengetahui: Komposisi kimia pada baja S45C. Nilai kekuatan tarik, kekuatan luluh dan regangan material baja S45C pasca perlakuan panas dan tanpa perlakuan panas. Mikrostruktur pasca material S45C perlakuan panas dan tanpa perlakuan panas. Kekerasan mikro pada daerah jauh patahan dan di sekitar patahan baja S45C pasca perlakuan panas dan tanpa perlakuan panas

TINJAUAN LITERATUR

Baja

Baja adalah paduan besi dan karbon sebagai unsur pemadu utamanya. Selain itu baja juga mengandung unsur silikon (Si), khrom (Cr), mangan (Mn) yang ditambahkan untuk meningkatkan perilaku mekanik dan ketahan korosi baja. Sedangkan unsur lainnya seperti fosfor, belerang, dan sebagainya dibatasi dalam presentase yang sangat kecil sehingga dianggap tidak mempengaruhi perilaku baja[1]. Baja dan paduannya digunakan dalam industri penggunaannya dalam berbagai cara, bahkan dalam konstruksi tunggal. Sebuah jembatan, misalnya, mungkin menggunakan baja di tali suspensi besar, lantai pelat baja untuk jalan, balok untuk kolom, dan untuk hambatan keamanan dan kolom pencahayaan. Banyak baja juga digunakan untuk memperkuat beton

Klasifikasi Baja

Menurut kandungan unsur pemadunya, baja dapat dikelompokan menjadi 2 (dua) kelompok besar yaitu baja karbon dan baja paduan.

Baja Karbon

Baja karbon (*carbon steel*), dibagi menjadi 3 (tiga) yaitu:

1. Baja karbon rendah (*low carbon steel*)
   Baja karbon rendah merupakan baja dengan kandungan utama besi dan karbon dengan komposisi karbon < 0,3 % berat. Baja karbon rendah biasa digunakan pada badan mobil, bangunan, pipa, rantai, paku keling, sekrup, paku. [8]
2. Baja karbon menengah (*medium carbon steel*)
   Baja yang memiliki kandungan karbon 0,3 – 0.8% *bera*t. Baja karbon medium dengan C ≥ 0,45 % berat dapat ditingkatkan sifat mekaniknya melalui perlakuan panas yang terdiri dari: *austenitizing*, *quenching*, dan *tempering*. Baja karbon medium banyak digunakan sebagai bahan poros, roda gigi, *crankshaft*. [8]
3. Baja karbon tinggi (*high carbon steel*)
   Baja yang memiliki kandungan karbon 0.8 - 1,4% berat. Baja karbon tinggi memiliki sifat paling keras, paling kuat, paling getas di antara baja karbon lainnya sehingga dapat diaplikasikan pada pegas, pisau potong, alat perkakas, dan dies. [8]

Baja paduan (*alloy steel*)

Baja paduan adalah baja yang mengandung unsur lain selain Fe dan C. Unsur-unsur paduan yang ditambahkan di antarnya Ni, Cr, Mo, Ti, Mn dan lain-lain. Tujuan dilakukan penambahan unsur yaitu:

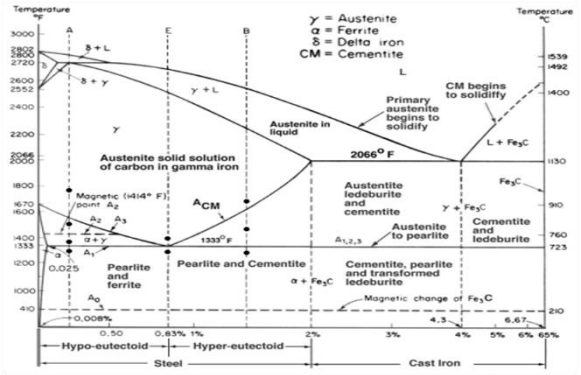
- Menaikkan sifat mekanik baja (kekerasan, keliatan, kekuatan tarik dan sebagainya).
- Menaikkan sifat mekanik pada temperatur rendah.
- Meningkatkan daya tahan terhadap reaksi kimia (oksidasi dan reduksi)
- Membuat sifat-sifat special [8]

Baja paduan diklasifikasikan menurut persentase unsur paduannya dikelompokan menjadi 3 (tiga) yaitu:

a. Baja paduan rendah (*low alloy steel*) jika elemen paduannya ≤ 2,5 % berat
b. Baja paduan sedang (*medium alloy steel*) jika elemen paduannya 2,5 – 10 % berat.
c. Baja paduan tinggi (*high alloy steel*) jika elemen paduannya > 10 %.berat[7]

Diagram Fasa

Diagram fasa atau diagram kesetimbangan fasa adalah suatu diagram ~~grafik~~ yang menunjukan fasa-fasa yang ada di dalam paduan sebagai fungsi persentase unsur pemadu dan temperatur. Fasa memberikan informasi tentang berbagai macam fasa yang terdapat di dalam paduan pada berbagai temperatur, titik leleh, titik kristalisasi, dan fenomena lainnya. Diagram fasa menjadi pedoman utama dalam merekayasa material karena terdapatnya hubungan antara struktur mikro dengan sifat-sifat mekanis material tersebut. Berikut contoh diagram fasa Fe-C, seperti pada Gambar 2.1 berikut[2].



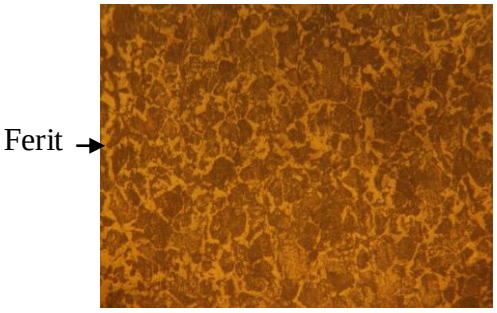
Gambar 1. Diagram Fasa Fe-C[ ]

Pada diagram kesetimbangan besi-karbon, ada beberapa temperatur sangat penting yaitu:

1. temperatur 723 ºC, dimana berlangsung reaksi eutectoid, selanjutnya disebut garis A_1.
2. Garis A_3, pada garis ini terjadi trasformasi dari ferit ke *austenit*. Untuk besi murni terjadi pada temperature 910 ºC, tetapi temperatur turun secara cepat dengan meningkatnya kadar karbon.
3. Garis A_4. Pada garis ini terjadi transformasi dari besi γ menjadi besi δ. Pada besi murni terjadi pada temperature 1395 ºC, dan meningkat dengan bertambahnya kadar karbon.
4. Garis A_2. Garis ini disebut juga garis Currie, dimana terjadi perubahan dari ferromagnetis menjadi paramagnetis, tetapi tidak terjadi perubahan struktur kristal. A_1, A_3 dan A_4 dengan mudah dapat dideteksi dengan analisa panas selama prores perilaku panas

Ferit (α-Fe)

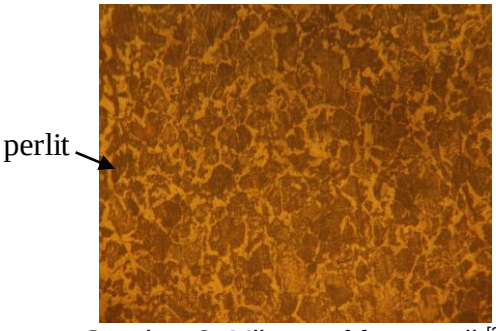
Ferit merupakan suatu larutan padat karbon dalam struktur besi murni yang memiliki struktur BCC dengan sifat lunak dan ulet. Fasa ferit mulai terbentuk pada temperature antara 300 ºC hingga mencapai temperature 727 ºC. Kelarutan karbon pada fasa ini relatif kecil dibandingkan dengan kelarutan pada fasa larutan padat lainnya. Saat fasa ferit terbentuk, kelarutan karbon dalam besi alpha sekitar 0.03% C [3].



Gambar 2. Mikrograf fasa ferit[3]

Perlit

Perlit merupakan campuran antara ferit dan sementit yang terbentuk seperti pellet-pelet yang disusun secara bergantian antara sementit dan ferit. Fasa perlit ini terbentuk pada saat kandungan karbon mencapai 0.76% C. Besi fasa perlit ~~akan~~ memiliki sifat yang keras, ulet dan kuat[ ]

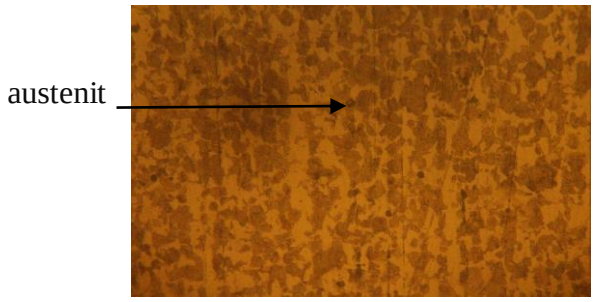


Gambar 3. Mikrograf fasa perlit[3]

***Austenit* (γ-Fe)**

Fasa austenit memiliki struktur atom FCC (*Face Centered Cubic*). Dalam keadaan setimbang fase austenit ditemukan pada temperature tinggi. Fase ini bersifat tidak magnetik dan ulet (*ductile*) pada temperature tinggi. Kelarutan atom karbon di dalam larutan padat austenit lebih besar jika dibandingkan dengan kelarutan atom karbon pada fase *ferit*. Secara

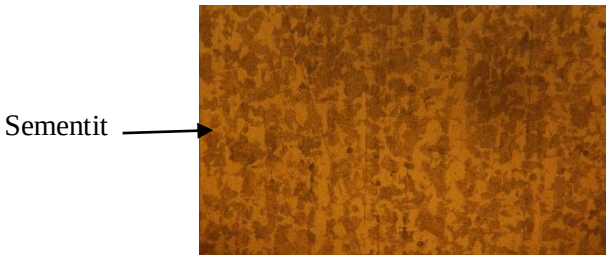
geometri, dapat dihitung perbandingan besarnya ruang intertisi di dalam fase *austenit* (kristal FCC) dan fasa ferit (kristal (BCC). Perbedaan ini dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena *transformasi* fasa pada saat pendinginan austenit yang berlangsung secara cepat.



Gambar 4. Mikrograf fasa austenite[3]

Sementit

Sementit dalam sistem paduan berbasis besi adalah *stoichiometric nter – metallic compound* Fe3C yang keras (*hard*) dan getas (*brittle*). Nama *sementit* berasal dari kata *caementum* yang berarti *stone chip* atau lempengan batu. Sementit dapat terurai menjadi bentuk yang lebih stabil yaitu Fe dan C sehingga sering disebut sebagai fasa stabil. *Sementit* sangat penting perannya di dalam sistem baja dalam berbagai bentuk seperti: bola (*sphere*), lembaran (berselang seling dengan alpha-ferit) atau partikel-partikel *carbide* kecil. Bentuk, ukuran dan distribusi karbon dapat direkayasa melalui siklus pemanasan dan pendinginan.



Gambar 5. Mikrograf fasa sementit[3]

Martensit

Martensit merupakan fasa dimana ferit dan sementit bercampur, tetapi bukan dalam bentuk *lamellar*, melainkan bentuk jarum-jarum sementit. Fasa ini terbentuk dari austenite metastabil yang didinginkan dengan laju pendinginan cepat *Martensit* bilah (*lath martensite*) terbentuk jika kadar C dalam baja sampai 0,6 %, berat, sedangkan di atas 1 % berat ~~C~~ akan terbentuk martensit plat (*plate martensite*). Perubahan martensit dari tipe bilah ke plat terjadi pada interval 0,6% $< C <$ 1,08% . Kekerasan dari *martensit* lebih besar dari 500 HV[3]. .

Bainit

Bainit adalah suatu fasa yang diberi nama sesuai dengan nama penemunya yaitu E.C. Bain. *Bainit* merupakan fasa yang kurang stabil (*mentastabil*) yang diperoleh dari *austenit* pada temperatur yang lebih rendah dari temperatur transformasi ke perlit dan lebih tinggi dari temperatur trasformasi ke *martensit*. Sebagai contoh jika baja eutectoid yang diaustenisasi kemudian didinginkan dengan cepat ke temperatur 250 - 500ºC, dan dibiarkan pada temperatur tersebut, hasil trasformasinya adalah berupa struktur yang terdiri dari ferit dan sementit tetapi bukan perlit. Struktur tersebut dinamai bainit. Kekerasan bainit bervariasi antara 45-55 HRC tergantung pada temperatur trasformasinya. Ditinjau dari temperature trasformasinya, jika terbentuk pada temperatur yang relatif tinggi disebut *upper bainite* sedangkan jika terbentuk pada temperatur yang lebih rendah disebut sebagai *lower bainite*. Struktur *upper bainite* seperti *perlit* yang sangat halus sedangkan *lower bainite* menyerupai *martensit temper*[3].

Karakteristik Baja S45C

Baja S45C merupakan golongan baja karbon sedang yang memiliki kandungan karbon 0,3 – 0,5% C. Komposisi kimia baja S45C ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia baja S45C[3]

C%	Mn%	Si%	S%	P%	FE
0,30 – 0, 50	0,50 – 0,80	0,15-0,35	0,035	0,035	*Balance*

Dengan kadar karbon sedang yang dimiliki baja S45C menjadikan baja ini memiliki sifat-sifat pengerjaan dan kekuatan yang sangat baik. Apabila baja ini diberi perlakuan yang tepat maka akan didapatkan kekerasan dan keuletan sesuai dengan yang diinginkan.

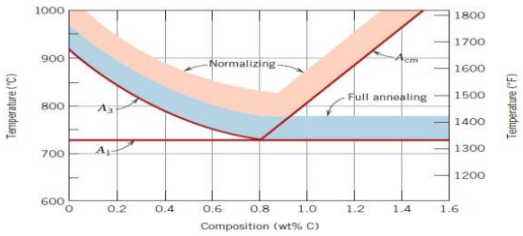
Perlakuan panas

Ada berbagai perlakuan panas yang biasa digunakan pada proses penguatan dan pengerasan (*strengthening and hardening*) baja. Perlakuan panas yang paling sering digunakan adalah *annealing*, *quenching*, dan *tempering*.

Annealing

Anealing adalah perlakuan panas logam atau logam paduan dengan pendinginan yang lambat. *Annealing* berfungsi meminimalkan tegangan sisa atau untuk mengubah struktur kristal (pemanasan di atas temperatur kritis). Logam atau logam paduan dipanaskan sekitar 25 ^{o}C di atas temperatur kritis logam atau logam paduan, ditahan dalam beberapa waktu, kemudian didinginkan lambat di tungku pemanas. *Annealing* terdiri dari 3 (tiga) proses, yaitu :

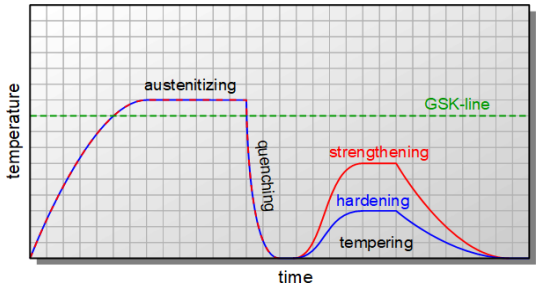
1. Fase *recovery* adalah fase pemulihan logam paduan melalui pelepasan cacat kristal (cacat linear disebut dislokasi) dan tegangan dalam.
2. Fase rekristalisasi adalah fase dimana butir membentuk inti baru dan tumbuh untuk menggantikan cacat- cacat oleh tegangan dalam.
3. Fase *grain growth* (tumbuhnya butir) adalah fase dimana butir-butir dalam mikrostruktur logam paduan mulai menjadi kasar dan menyebabkan logam tidak terlalu memuaskan untuk proses pemesinan.



Gambar 6..Diagram annealing dan normalizing baja karbon

Quenching

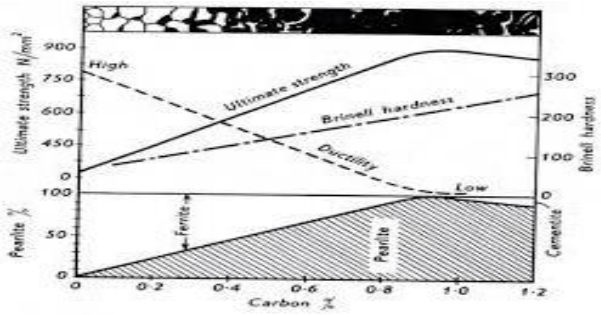
Quenching adalah proses pendinginan cepat baja dari temperatur austenite, ke temperatur kamar dengan cara mencelupkan atau memasukanya ke dalam media air atau oli. Fasa yang diperoleh dari proses *quenching* baja adalah martensit.



Gambar 7. Diagram quenching baja dalam media oli

Hardening

Hardening adalah perlakuan panas terhadap logam dengan tujuan meningkatkan kekerasan baja. *Hardening* adalah proses pemanasan logam pada temperatur austenite, ditahan beberapa lama pada temperatur tersebut kemudian didinginkan cepat dalam media pendingin. Dampak pendinginan cepat dari daerah temperatur pengerasan ini, dicapai suatu keadaan paksaan bagi struktur baja yang merangsang kekerasan. Oleh karena itu maka proses pengerasan ini disebut pengerasan kejut.



Gambar 8. Diagram hardening baja

Tempering

Perlakuan *tempering* dimaksudkan untuk menghilangkan tegangan dalam dan menguatkan baja dari kerapuhan. *Tempering* didefinisikan sebagai proses pemanasan kembali baja setelah *hardening* atau *quenching*, pada temperatur tempering (di bawah temperatur ~~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 ketangguhannya memenuhi persyaratan penggunaan. Kekerasan turun, kekuatan tarik akan turun tetapi keuletan baja bertambah.

Normalizing

Normalizing adalah perlakuan panas logam di sekitar 40^{o}C di atas batas kritis logam, kemudian ditahan pada temperatur tersebut dalam waktu yang cukup dan dilanjutkan dengan pendinginnan 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 mengubah struktur butir dan menciptakan suatu austenite yang lebih homogen ketika baja dipanaskan kembali[ ].

Media pendingin

Pada proses *quenching* dilakukan pendinginan secara cepat baja dengan menggunakan media udara, air, oli, atau garam. Kemampuan suatu jenis media dalam mendinginkan spesimen ~~bisa~~ berbeda, disebabkan oleh temperatur, kekentalan, kadar larutan dan bahan dasar media pendingin[ ]. Semakin cepat logam didinginkan maka akan semakin keras sifat logam itu Media pendingin yang digunakan dalam proses perlakuan panas antara lain:

1. Air

Pendinginan dengan menggunakan air akan memberikan daya pendinginan yang cepat. Biasanya ke dalam air tersebut dilarutkan garam dapur sebagai usaha mempercepat turunnya temperatur benda kerja dan mengakibatkan bahan menjadi keras. Air memiliki karakteristik yang khas yang tidak dimiliki oleh senyawa kimia yang lain. Karakteristik tersebut adalah sebagai berikut. Pada kisaran temperatur ~~suhu~~ yang sesuai bagi kehidupan, yakni 0 ºC (32º F) – 100 ºC, air berwujud cair. Temperatur 0 ºC merupakan titik beku (*freezing point*) dan 100 ºC merupakan titik didih (*boiling point*) air. Perubahan temperatur

air berlangsung lambat sehingga air memiliki sifat sebagai penyimpan panas yang sangat baik. Sifat ini memungkinkan air tidak menjadi panas atau dingin dalam seketika.

2. Minyak atau oli

Minyak digunakan sebagai fluida pendingin dalam perlakuan panas benda kerja. Selain minyak yang khusus digunakan sebagai bahan pendingin pada proses perlakuan panas, dapat juga digunakan oli, minyak bakar atau solar. Derajat kekentalan (*viscosity*) berpengaruh pada *severity of quench*. Minyak mineral banyak dipilih karena kapasitas pendinginannya cukup baik. Pada umumnya minyak memiliki kapasitas pendinginan tertinggi sekitar temperatur 600 ºC.

3. Udara

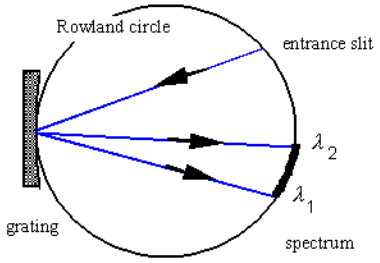
Proses pendinginan dengan udara dilakukan untuk perlakuan panas logam yang membutuhkan pendinginan lambat. Udara disirkulasikan dengan kecepatan rendah ke dalam ruangan benda kerja (logam) yang akan didinginkan. Udara tersebut akan memberikan kesempatan kepada logam untuk atom-atomnya menata diri dan membentuk Kristal.

Metode Pengujian

Komposisi Kimia

Spektroskopi emisi atom atau *Atomic Emission Spectroscopy* (AES) adalah suatu alat yang digunakan untuk analisa komposisi kimia logam secara kualitatif maupun kuantitatif. Analisa tersebut didasarkan pada pemancaran atau emisi sinar dengan panjang gelombang karakteristik untuk unsur yang dianalisa. Sumber pengeksitasi dari *Atomic Emission Spectroscopy* didapat dari nyala api gas atau busur listrik. Prinsip dasar dari analisa *Atomic Emission Spectrometer* (AES) ini yaitu: apabila atom suatu unsur ditempatkan dalam suatu sumber energi kalor (sumber pengeksitasi), maka elektron di orbital paling luar atom tersebut yang tadinya dalam keadaan dasar (*ground state*) akan tereksitasi ke tingkat-tingkat energi elektron yang lebih tinggi. Karena keadaan tereksitasi itu merupakan keadaan yang sangat tidak stabil maka elektron yang tereksitasi itu secepatnya akan kembali ke tingkat energi semula yaitu ke keadaan dasarnya (*ground state*)[3].

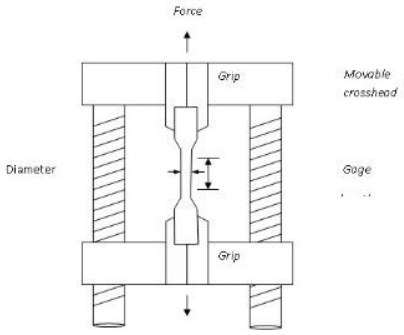
Pada waktu atom yang tereksitasi itu kembali ke tingkat energi lebih rendah yang semula, maka kelebihan energi yang dimilikinya sewaktu masih dalam keadaan tereksitasi akan ‘dibuang’ keluar berupa ‘emisi sinar’ dengan panjang gelombang karakteristik bagi unsur yang bersangkutan. Spektrometer emisi atom menggunakan kisi difraksi yang biasanya berbentuk cekung, kisi difraksi ini biasanya ditempatkan pada suatu sistem susunan yang disebut ‘Lingkaran *Rowland*’ (*Rowland Circle*) yang ditunjukkan Gambar 2.12. Dengan kisi difraksi ini, sinar yang akan didifraksikan oleh kisi difraksi tersebut akan difokuskan tepat pada bagian lain lingkaran tersebut.



Gambar 9. Lingkaran *Rowland*

Pengujian Tarik

Uji tarik adalah suatu metode yang digunakan untuk mengetahui kekuatan suatu material dengan cara memberikan beban gaya yang satu sumbu. Hasil yang didapatkan dari pengujian tarik sangat penting untuk rekayasa teknik dan desain produk karena menghasilkan data kekuatan material. Pengujian ~~uji~~ tarik digunakan untuk mengukur ketahanan suatu material terhadap gaya statis yang diberikan secara lambat, seperti ditunjukan pada Gambar 2.11.



Gambar 10. Mesin uji tarik dengan spesimen standar

Spesimen tarik yang telah distandarisasi, dilakukan pembebanan *uniaxial* sehingga spesimen uji mengalami peregangan dan bertambah panjang hingga akhirnya patah. Hal-hal yang perlu diperhatikan agar penguijian menghasilkan nilai yang valid adalah; bentuk dan dimensi spesimen uji, pemilihan grips dan lain-lain.

1. Bentuk dan Dimensi Spesimen uji

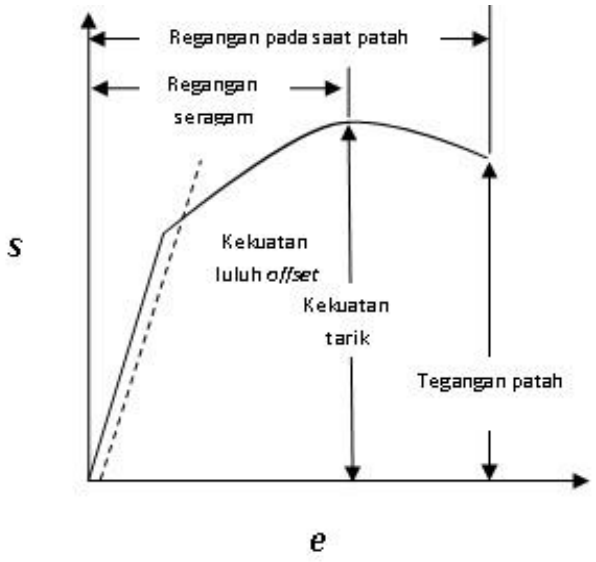
Spesimen uji harus memenuhi standar dan spesifikasi dari ASTM E8 atau ASTM D638. Bentuk dari spesimen penting karena untuk menghindari terjadinya patah atau retak pada daerah grip atau yang lainnya. Jadi standarisasi dari bentuk spesimen uji dimaksudkan agar retak dan patahan terjadi di daerah *gage length*.

2. *Grip and Face Selection*

Face dan *grip* adalah faktor penting. Dengan pemilihan *setting* yang tidak tepat, spesimen uji akan terjadi slip atau bahkan patah pada daerah *grip* (*jaw break*).. *Face* harus selalu tertutupi di seluruh permukaan yang kontak dengan *grip*, agar spesimen tidak bergesekan langsung dengan *face*.

Kurva Tegangan-Regangan Rekayasa

Kurva tegangan-regangan rekayasa dibuat dari hasil pengujian tarik benda uji seperti ditunjukan pada Gambar 11.



Gambar 11. Kurva tegangan-regangan rekayasa

Tegangan rekayasa diperoleh dengan cara membagi beban tarik uniaksial yang diberikan dengan luas awal penampang benda uji.

$$\sigma = P/ A_0 \quad (1)$$

Keterangan ;
σ : besarnya tegangan (N/mm^2 atau MPa)
P : beban yang diberikan (N)
A_0 : luas penampang awal benda uji (mm^2)

Regangan rekayasa dirumuskan sebagai pertambahan panjang yang terjadi selama pengujian tarik dibagi panjang awal benda uji,

$$e = \left({}^{L - Lo}/_{Lo} \right) \quad (2)$$

Keterangan ;
e : regangan
L : panjang akhir benda uji ~~setelah pengujian~~ (mm)
Lo : panjang awal benda uji (mm)

Dari kurva tegangan-regangan rekayasa dapat diketahui beberapa sifat mekanik yang dimiliki oleh benda uji, antara lain: kekuatan tarik, kekuatan luluh, keuletan, modulus elastisitas, kelentingan, dan ketangguhan material..

1. Kekuatan tarik

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

$$UTS = {}^{P_{maks}}/_{A_o} \quad (3)$$

Keterangan ~~di mana~~,
UTS : kekuatan tarik maksimum (N/mm^2 atau MPa)
P_{maks} ; beban maksimum (N)
A_0 : luas penampang awal benda uji (mm^2)

2. Kekuatan luluh (*yield strength*)

Kekuatan luluh (*yield strength*) merupakan titik yang menunjukan perubahan dari deformasi elastis ke deformasi plastis. Besar tegangan luluh dituliskan seperti berikut.

$$\sigma_Y = {}^{P_y}/_{A_o} \quad (4)$$

Keterangan ;
σ_Y : Tegangan luluh (N/mm^2 atau MPa)
P_y : Beban di titik *yield* (N)
A_o : Luas penampang awal benda uji (mm^2)

Tegangan dimana deformasi plastis atau batas luluh mulai teramati tergantung pada kepekaan pengukuran regangan. Sebagian besar bahan mengalami perubahan sifat dari elastik menjadi plastis yang berlangsung sedikit demi sedikit, dan titik di mana deformasi plastis mulai terjadi dan sukar ditentukan secara teliti.

3. Keuletan

Keuletan adalah kemampuan suatu bahan sewaktu menahan beban pada saat diberikan penetrasi dan akan kembali ke bentuk semula. Secara umum pengukuran keuletan dilakukan untuk memenuhi kepentingan tiga buah hal:

1. Menunjukan elongasi dimana suatu logam dapat berdeformasi tanpa terjadi patah dalam suatu proses suatu pembentukan logam, misalnya pengerolan dan ekstrusi.
2. Memberi petunjuk secara umum kepada perancang mengenai kemampuan logam untuk mengalir secara plastis sebelum patah.

3. Sebagai petunjuk adanya perubahan permukaan kemurnian atau kondisi pengolahan

4. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas adalah ukuran kekuatan suatu bahan akan keelastisitasannya. Makin besar modulus elastisitas, makin kecil regangan elastik yang dihasilkan akibat pemberian tegangan. Modulus elastisitas ditentukan oleh gaya ikat antar atom, karena gaya-gaya ini tidak dapat dirubah tanpa terjadi perubahan mendasar pada sifat bahannya. Modulus elastisitas merupakan salah satu sifat mekanik yang tidak dapat diubah. Sifat ini hanya sedikit berubah oleh adanya penambahan paduan, perlakuan panas, atau pengerjaan dingin.
Secara matematis persamaan modulus elastisitas dapat ditulis sebagai berikut.

$$E = {}^{\sigma}/_{\varepsilon} \qquad (5)$$

Keterangan :
E : modulus elastisitas, MPa
σ : tegangan tarik, MPa
ε : regangan

Pemeriksaan Metalografi

Metalografi merupakan salah satu disiplin ilmu logam yang mempelajari keadaan susunan, struktur mikro bahan logam, hubungan antara struktur mikro dan sifat-sifat bahan logam serta paduannya dengan menggunakan peralatan mikroskop. Dalam pelaksanaannya analisa metalografi dibedakan menjadi 2 (dua) hal yaitu analisa makroskopi dan analisa mikroskopi. Analisa makroskopi dapat dilakukan secara visual atau dengan menggunakan normal mikroskop pada perbesaran maksimum 20:1 (20x). Analisa mikroskopi dilakukan dengan perbesaran lebih dari 20x. Tujuan dari analisa mikroskopi untuk mengetahui:

1. Sifat-sifat logam dan paduannya berdasarkan bentuk struktur mikronya.
2. Besar tidaknya bentuk butir material logam yang sebelumnya telah mengalami proses pengelasan dan prosesperlakuan panas (seperti *quenching, normalizing*)
3. Sebab-sebab terjadinya penyimpangan struktur bahan logam atau jenis cacat yang lain.

Langkah- langkah yang dilakuakn pada metalografi sebagai berikut:

1. Pemotongan

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

2. *Mounting*

Proses mounting atau pembingkaian benda uji dilakukan pada benda uji dengan ukuran yang kecil dan tipis, hal ini bertujuan untuk mempermudah pemegangan benda uji ketika dilakukan tahap preparasi selanjutnya seperti pengampelasan dan polishing. Benda uji ini di-mounting dengan alat mounting press dengan penambahan bakelit yang akan menggumpal dan membingkai benda uji.
Adapun jenis-jenis bahan untuk *mounting*

a. *Castable mounting,* jenis bahan *mounting* dimana bahan serbuk diberi pelarut dan serbuk itu diletakkan dalam satu tempat dengan dengan spesimen, kemudian dibalik dan bagian permukaan atasnya datar. Contoh serbuknya adalah polister, *epoxies* (transparan) atau *acrylics*. Kelebihannya adalah spesimen dengan ukuran besar / kecil dapat di*mounting*, cetakannya bias digunakan berulang-ulang.

b. *Compression mold* dimana ukuran diameter tetap, jika berubah maka mesin harus diganti. Jenis material yang digunakan *thermosetting* dan *thermoplastic.*

3. Penggerindaaan halus (pengamplasan)

Pengamplasan adalah proses untuk mereduksi suatu permukaan dengan pergerakan permukaan abrasif yang bergerak relatif lambat sehingga panas yang dihasilkan tidak terlalu signifikan. Pengamplasan bertujuan untuk meratakan dan menghaluskan permukaan sampel yang akan diamati. Pengamplasan ini dilakukan secara berurutan yaitu dengan memakai amplas kasar hingga amplas halus dari grit 180 hingga 2000. Setiap perpindahan ampelas dengan grit lebih besar sampel diputar 90° dengan tujuan untuk mengeliminasi bekas goresan sampel dari ampelas grit sebelumnya. Selama proses pengampelasan, permukaan sampel dialiri air pendingin dengan tujuan untuk menjaga agar tidak terjadi kenaikan temperatur yang dikhawatirkan dapat mempengaruhi perubahan mikrostruktur sampel yang berdampak pada kesalahan analisis. Kenaikan temperatur tersebut akibat gesekan antara permukaan sampel dengan kertas ampelas. Proses pengampelasan sampel dilakukan hingga diperoleh permukaan yang rata, datar.dan tidak teramati adanya goresan-goresan pada permukaan sampel[ ], selanjutnya sampel siap dipoles.

4. Pemolesan

Pemolesan adalah proses untuk menghilangkan bagian-bagian yang terdeformasi karena perlakuan sebelumnya. Pemolesan bertujuan untuk lebih menghaluskan dan melicinkan permukaan sampel yang akan diamati setelah pengamplasan.

Pemolesan dibagi menjadi 2 (dua) yaitu pemolesan kasar dan halus. Pemolesan kasar menggunakan bahan abrasif dengan tingkat kekasaran 30 – 3 µm, sedangkan pemolesan halus menggunakan bahan abrasif dengan tingkat kekasaran ≤ 1µm

Pemolesan terbagi dalam 3 (tiga) cara, yaitu:

a. *Mechanical polishing*

Proses *polishing* biasanya *multistage* karena pada tahapan awal dimulai dengan pemolesan kasar (*rough abrasive*) dan tahapan berikutnya menggunakan pemolesan halus (*finer abrasive*) sampai hasil akhir yang diinginkan. Mesin poles metalografi terdiri dari piringan berputar dan di atasnya diberi kain poles ~~terbaik~~ yaitu kain *"selvyt"* (sejenis kain beludru). Cara pemolesannya yaitu benda uji diletakkan d iatas piringan yang berputar dan kain poles diberi air serta ditambahkan sedikit pasta poles. Pasta poles yang biasa dipakai adalah jenis alumina (Al_2O_3) dan pasta intan (*diamond*).

b. *Chemical-mecanical polishing*

Pemolesan kimiawi mekanikal merupakan kombinasi antara etsa kimia dan pemolesan mekanis yang dilakukan secara bersamaan di atas piringan halus. Partikel pemoles abrasif dicampur dengan larutan pengetsa yang umum digunakan untuk melihat struktur spesimen yang dipreparasi. Metode ini akan memberikan hasil yang baik jika larutan etsa yang diberikan sedikit tetapi bebas dari logam pengotor akibat dari abrasif.

c. *Electropolishing*

Electropolishing disebut juga *electrolytic polishing* banyak digunakan pada baja tahan karat (*stainless* steel), paduan tembaga, *zirconium*, dan logam paduan lainnya yang sulit dipoles dengan metode mekanik~~.~~ Metode *electropolishing* dapat menghilangkan bekas *cutting*, *grinding* dan proses *mechanical polishing* yang digunakan dalam preparasi spesimen. Ketika *electropolishing* digunakan dalam metalografi, biasanya diawali dengan *mechanical polishing* dan diikuti oleh *etching.* Mekanismenya yaitu menggunakan sistem elektrolisis yang terdiri dari anoda (+) dan katoda (-). Spesimen dimasukan ke dalam larutan elektrolit, dimana asam berada di anoda sedangkan di katoda adalah logam yang harus lebih mulia dari spesimenya dan harus tahan terhadap larutan elektrolit~~nya~~ serta tidak boleh larut. Ketika proses berlangsung, spesimen yang di anoda akan larut karena teroksidasi. Dalam proses ini diberi pengaduk agar logam yang terkikis meyebar merata[ ].

5. **Pengetsaan**

Pengetsaan adalah proses pemberian reagen kimia yang disebut dengan *etchant* pada permukaan sampel hasil pemolesan untuk menimbulkan penampakan khusus seperti fasa, batas butir, dislokasi dan mikrostruktur tertentu di bawah mikroskop optik[]. Teknik

pengetsaan dapat dilakukan dengan cara kimia, elektrolitik, katodik vakum. Setiap logam memilik reagent etchant tertentu, seperti baja dan besi cor dapat digunakan reagent nital atau picral yang keduanya menampakan fasa pearlite. Larutan nital 2% biasa digunakan untuk mengamati butir ferit.

6. Pembersihan (*cleaning*)

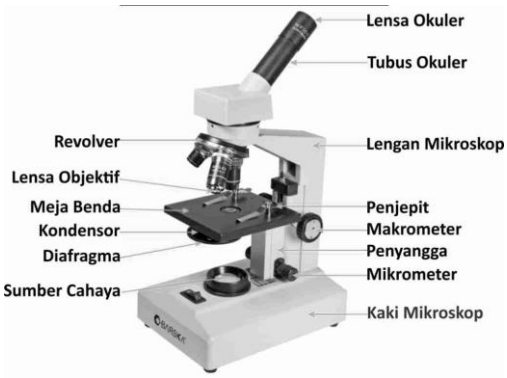
Cleaning adalah pembersihan permukaan logam yang belum dan sesudah dietsa dari kotoran ataupun reagen kimia. Bahkan sangat dianjurkan setiap tahapan selalu dilakukan pencucian permukaan sempel sebelum masuk tahap berikutnya. Pencucian dapat dilakukan dengan menggunakan air mengalir sampai pada tahap *polishing*, dan menggunakan alkohol untuk etsa[ ].

7. Pengeringan (*drying*)

Tahap akhir preparasi metalografi adalah pengeringan sampel sebelum pengamatan mikroskop. Permukaan sampel harus benar-benar kering. Hal ini disebabkan, air yang tersisa pada permukaan sampel akan teruapkan saat pengamatan mikroskopis, sehingga dapat merusak lensa mikroskop. Selain itu, air yang tersisa dapat memberikan interpretasi salah pada mikrostruktur sampel.

8. Pengamatan Mikroskopis

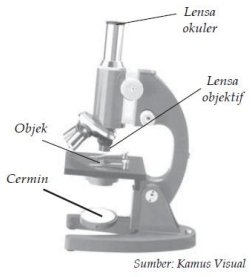
Pengamatan mikroskopik sampel pasca etsa menggunakan mikroskop optik. Mikroskop optik yang digunakan adalah jenis mikroskop cahaya (*compound light microscope*) adalah sebuah mikroskop yang menggunakan cahaya lampu sebagai pengganti cahaya matahari sebagaimana yang digunakan pada mikroskop konvensional.



Gambar 12 Mikroskop Cahaya

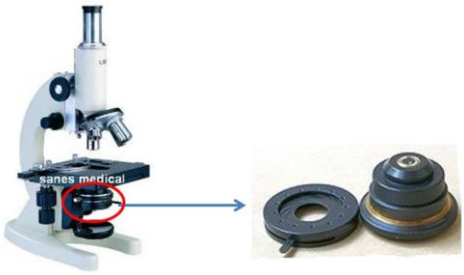
Pada mikroskop cahaya (Gambar 12) terdapat 3 (tiga) buah lensa, yaitu lensa obyektif, lensa okuler dan lensa kondensor.

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



Gambar 13. Lensa Obtyektif dan Lensa Okuler

3. **Lensa kondensor**, berfungsi mendukung terciptanya pencahayaan pada obyek yang akan dilihat sehingga dengan pengaturan yang tepat akan diperoleh daya pisah maksimal. Jika daya pisah kurang maksimal maka dua benda akan terlihat menjadi satu dan pembesarannya pun kurang optimal.



Gambar 14. Lensa Kondensor

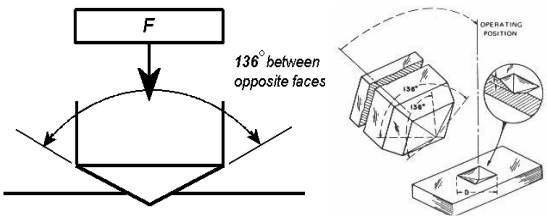
Pengujian Kekerasan

Kekerasan (*hardness*) merupakan sifat mekanik material yang menyatakan ukuran daya tahan material terhadap deformasi plastis (misalnya: lekukan kecil atau goresan).

Metode Vickers

Pengujian kekerasan dengan metode *Vickers* atau *Diamond Pyramid Hardness test* (DPH), merupakan metode yang paling sering digunakan untuk mengukur kekerasan karena mudah dipraktekkan dan tidak membutuhkan keahlian khusus. Pengujian kekerasan dengan metode *Vickers* bertujuan menentukan kekerasan suatu material dalam yaitu daya tahan material terhadap *indentor* intan yang cukup kecil dan mempunyai bentuk geometri berbentuk *pyramid*. Beban yang dikenakan juga jauh lebih kecil dibandingkan dengan pengujian *Rockwell* dan *Brinel* yaitu antara 1 sampai 1000 gram.

Indentor terbuat dari intan yang memiliki bentuk piramida dengan sudut antara dua bidang miringnya sebesar 136˚. Indentor ditekan ke dalam benda untuk mendapatkan bekas penekanan plastis. Diagonal hasil penekananyang tertinggal akan diukur menurut kriteria pengujian yang ditentukan untuk menentukan kekerasan bahan. Nilai kekerasan *Vickers* didapatkan dari perbandingan antara gaya penekanan dengan luas permukaan hasil penekanan. Luas bidang penekanan diperhitungkan sebagai luas permukaan sebuah piramida yang memiliki alas bujur sangkar dan memiliki sudut kemiringan sesuai dengan kemiringan bidang indentor. seperti ditunjukan pada Gambar 15.



Gambar 15. Bentuk *Indentor* dan Hasil Penekanan

Nilai kekerasan *Vickers* dirumuskan sebagai berikut :

$$VHN = \frac{2P\sin(\frac{\theta}{2})}{d^2} = \frac{1{,}854\,.P}{d^2} \qquad (6)$$

Keterangan :

P : beban yang digunakan (kgf)

D : panjang diagonal rata-rata (mm^2)

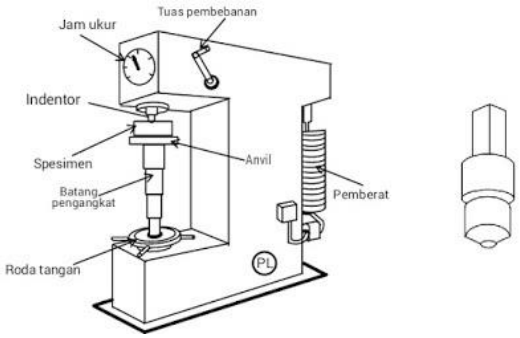
θ : sudut antar permukaan intan yang berhadapan = 136º

Hal-hal yang harus diperhatikan pada pengujian kekerasan dengan menggunakan metode *Vickers*, yaitu : [6]

1. Permukaan benda uji harus dibuat sehalus mungkin (dipoles), agar perngukuran jarak diagonal bekas penekanan mudah.
2. Tebal minimum benda uji harus 1,5× jarak diagonal bekas penekan (d).
3. Jarak penekanan dari tepi benda dan jarak antara tiap titik pengukuran minimum 3× jarak diagonal bekas penekanan (d).
4. Pada waktu pengukuran diagonal bekas penekanan (d), harus menggunakan mekroskop yang pembesarannya sedemikian rupa sehingga jarak sebesar 2 μm dapat diukur dengan jelas.
5. Dapat digunakan untuk mengukur kekerasan material yang sangat keras, bekas penekanan yang dihasilkan sangat kecil dan pengukuran diagonal dalam satuan μm. Jadi untuk mendapatkan hasil yang agak besar beban yang digunakan harus lebih besar dan pemukaannya harus sehalus mungkin.
6. Dapat digunakan untuk mengukur kekerasan yang tipis dank keras. Untuk itu gaya pada penekanan harus dipilih yang lebih kecil, sehingga persyaratan tebal lapisan atau benda uji minimum 1,5× dari panjang diagonal bekas penekanan terpenuhi

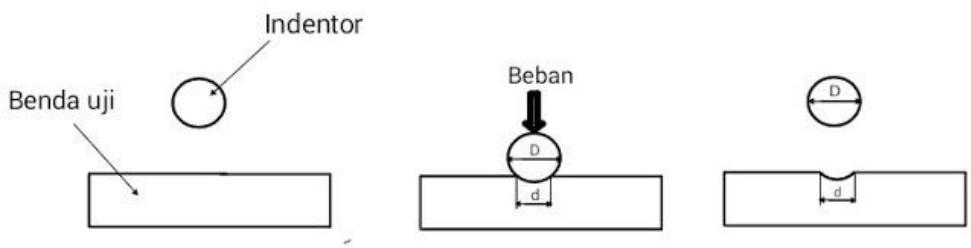
Metode *Brinnel*

Pengujian kekerasan bahan dengan metode *Brinell* merupakan salah satu metode pengujian kekerasan yang banyak dipakai. Uji kekerasan *Brinell* dilakukan dengan cara menekankan sebuah bola baja berdiameter 10 mm pada permukaan benda uji (spesimen) dengan gaya atau beban 3000 kgf untuk besi dan baja, serta dengan periode waktu tertentu (biasanya 10 - 15 detik). Ada beberapa jenis mesin pengujian kekerasan *Brinell*, seperti mesin *Brinell* manual, mesin *Brinell* digital, mesin *Brinell* semi otomatis dan mesin *Brinell* otomatis penuh. Salah satu jenis mesin pengujian kekerasan *Brinell* manual dan *indentor* diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 16. Mesin Pengujian Kekerasan *Brinell* dan *Indentor*

Hasil dari penekanan indentor atau penetrator yang berupa bola baja yang dikeraskan ini adalah jejak atau lekukan berbentuk tembereng bola pada permukaan specimen



Gambar 18. Proses Penekanan Benda Uji Oleh *Indentor*

Selanjutnya untuk mendapatkan nilai kekerasan dari benda uji, diameter jejak tersebut diukur dengan menggunakan sebuah mikroskop.

Pengukuran dilakukan pada dua buah diameter yang saling tegak lurus atau membentuk sudut siku-siku (90°), yang diambil rata-ratanya.

Angka kekerasan *Brinell Hardness Number* (BHN) atau lebih umum HB saja) dapat diperoleh dengan menggunakan rumus berikut :

$$BHN = \frac{P}{\frac{\pi}{2} D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)} \qquad (7)$$

atau

$$BHN = \frac{2P}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)} \qquad (8)$$

Keterangan :

P : Gaya atau beban uji dalam kilogram gaya (kgf).

D : Diameter indentor bola dalam (mm).

d :Diameter jejak dalam (mm).

Metode *Rockwell*

Metode ini sebenarnya merupakan gabungan antara Metode *Brinnell* dan Metode *Vickers*, sehingga hasilnya cukup *presisi* dan tepat. Dalam metode *Rockwell* terdapat 2 (dua) macam indentor yang ukurannya bervariasi, yaitu :

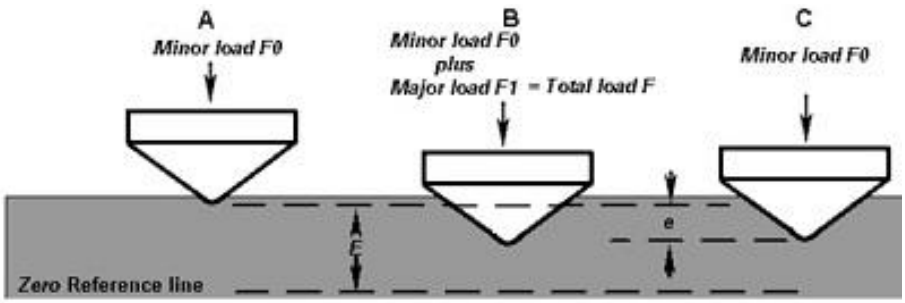
1. Kerucut intan dengan besar sudut 120º dan disebut sebagai *Rockwell Cone.*
2. Bola baja dengan berbagai ukuran dan disebut sebagai *Rockwell Ball*.

Cara *Rockwell* ini berdasarkan pada penekanan sebuah indentor dengan suatu gaya tekan tertentu ke permukaan yang rata dan bersih dari suatu logam yang diuji kekerasannya. Setelah gaya tekan dikembalikan ke gaya minor, maka yang akan dijadikan dasar perhitungan untuk nilai kekerasan *Rockwell* bukanlah hasil pengukuran diameter atau diagonal bekas lekukan, tetapi justru dalamnya bekas lekukan yang terjadi itu. Pengujian *Rockwell* yang umumnya dipakai ada tiga jenis, yaitu HRA, HRB, dan HRC. HR itu sendiri merupakan suatu singkatan kekerasan *Rockwell* atau *Rockwell Hardness Number* dan kadang-kadang disingkat dengan huruf R saja.

Indentor yang dipakai dalam pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell* :

a. Untuk *carbida cementit*, baja tipis dan baja dengan lapisan keras yang tipis digunakan indentor kerucut intan sudut 120° dengan beban 60 kg, dan skala kekerasan 100 HRA,
b. Untuk logam yang lunak seperti paduan tembaga, baja lunak, paduan aluminium, besi tempa; digunakan indentor bola baja berdiameter 1/16” dengan beban 100 kg, dan skala kekerasan 130 HRB,.
c. Untuk baja yang keras dan bahan lain yang lebih keras dari skala B-100 digunakan indentor kerucut intan sudut 120° dengan beban 150 kg, dan skala kekerasan 100 HRC..

Metode *Rockwell* digunakan untuk menguji material dari yang lunak sampai yang keras.



Gambar 17. Pengujian *Rockwell*

Kelebihan menggunakan uji kekerasan *Rockwell.*

a. Material tetap utuh sehingga bisa digunakan kembali untuk proses produksi
b. Metode ini cocok digunakan untuk menguji material dalam jumlah banyak
c. Nilai hasil pengukuran bisa langsung terlihat pada layar monitor atau jam ukur

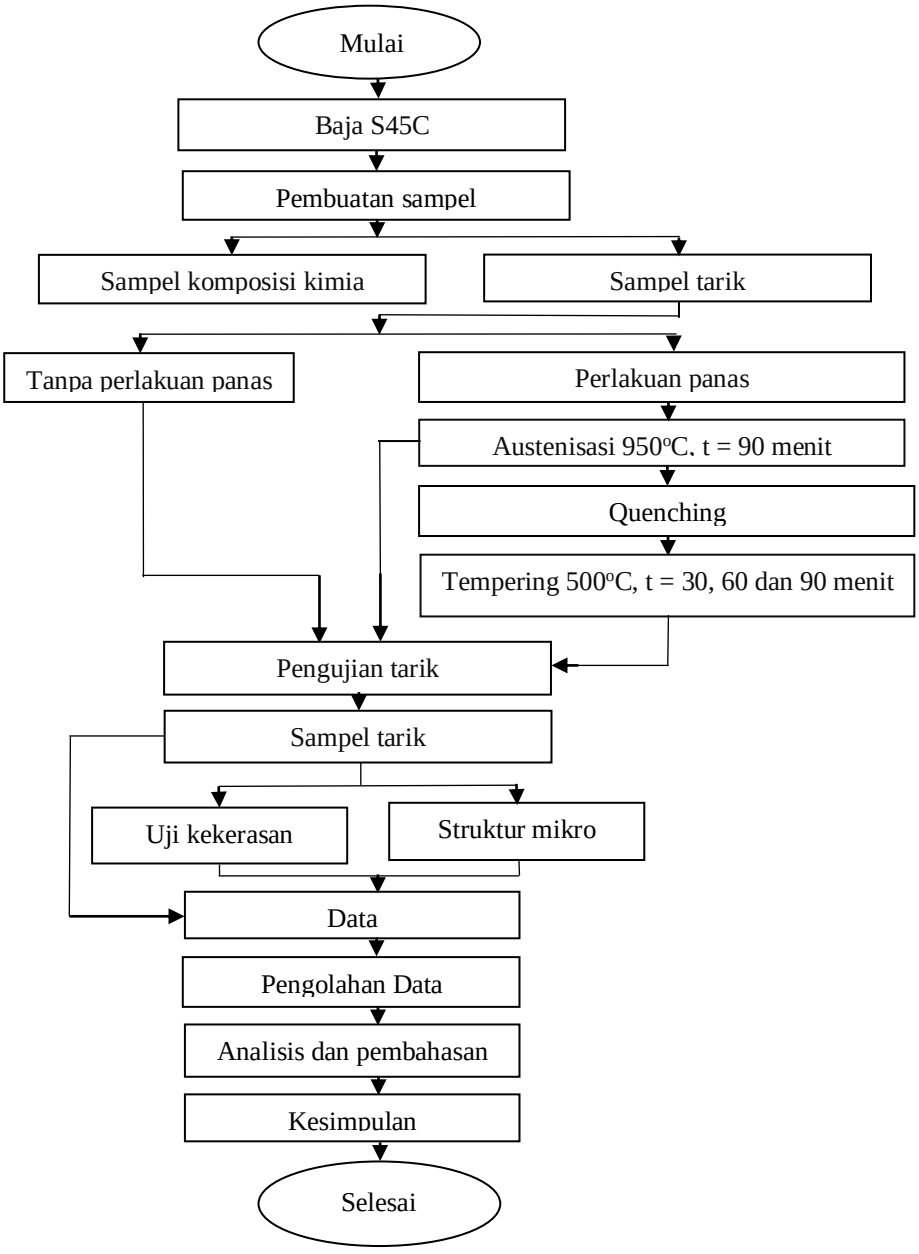
Kekurangan menggunakan uji kekerasan *Rockwell.*

a. Tingkat akurasi pengukuran masih kurang
b. Sangat sensitif terhadap getaran kecil sehingga dapat mempengaruhi hasil pengukuran.

METODOLOGI PENELITIAN

Diagram Alir Penelitian

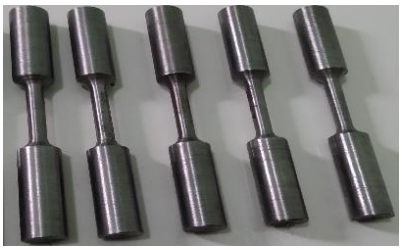
Diagram alir penelitian merupakan tahapan yang dilaksanakan untuk mencapai tujuan penelitian. Diagram penelitian yang terkait dengan pengaruh perlakuan panas terhadap kekuatan tarik, kekerasan dan mikrostruktur material baja S45C ditunjukkan pada Gambar dibawah ini.



Gambar 18. Diagram Alir Proses Karakterisasi Baja S45C Pasca *Austenisasi*, *Quenching* dan *Tempering*

Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah baja S45C. Selanjutnya dibuat sampel uji tarik standar dan sampel silindris. Kedua jenis sampel mempunyai diameter yang sama, seperti pada Gambar di bawah ini.



Gambar 19. Sampel uji tarik baja S45C

Bahan lain yang digunakan dalam penelitian adalah kertas ampelas *grit* 320 sampai 2400, *resin acryfic* untuk membingkai sampel metalografi, alumina sebagai bahan poles sampel, dan larutan nital untuk etsa permukaan sampel.

Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah :

1. Peralatan untuk perlakuan panas yaitu tungku pemanas Gambar 3.3a), wadah air umtuk mendinginkan material secara cepat (Gambar 3.3b).
2. Peralatan untuk pengujian tarik sampel baja S45C yaitu mesin uji tarik kapasitas 50 kN (Gambar 3.3c).
3. Peralatan untuk preparasi metalografi sampel baja S45C yaitu mesin pemotong (*cutting*) (Gambar 3.3d), mesin *grinding* dan mesin *polishing* (Gambar 3.3e)
4. Peralatan untuk mengamati mikrostruktur sampel yaitu mikroskop optik (Gambar 3.3f).
5. Peralatan *microhardness Vickers tester* untuk menentukan kekerasan mikro sampel baja S45C (Gambar 3.3g).
6. Peralatan *spectrometer spark* (Gambar 3.3h), dengan sistem komputerisasi untuk analisis komposisi kimia baja S45C.

Prosedur Pengujian Komposisi Kimia (ASTM A751)

Pengujian komposisi kimia baja S45C dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Pembuatan sampel uji dengan dimensi : 50 mm (p)x 50 mm
2. Permukaan sampel diratakan dengan kertas ampelas grit 600
3. Sampel uji diletakkan pada specimen holder spark spectrometer
4. Spark spectrometer di ON kan
5. Proses *spark* terhadap permukaan sampel baja S45C berlangsung
6. Hasil analisis komposisi kimia sampel baja S45C terlihat di monitor dan dicetak
7. Spark spectrometer di OFF kan

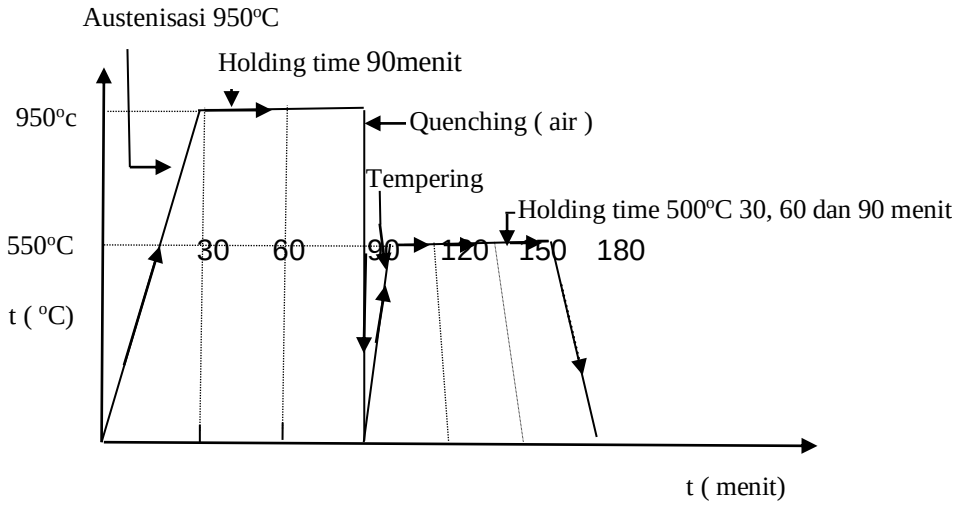
Prosedur Perlakuan Panas

Setelah dilakukan pemberian kode atau tanda pada tiap-tiap spesimen, selanjutnya dilakukan proses perlakuan panas terhadap sampel tarik material baja S45C, dengan tahapan sebagai berikut:

1. Sampel uji tarik sebanyak 4 (empat) buah diletakkan pada tempat sampel (*specimen holder*), kemudian tutup tungku pemanas.
2. *Setting* tungku pemanas pada pada temperatur austenite 950 ºC dengan gradien temperatur 300 °C/jam, waktu penahanan (*holding time*) 90 menit, kemudian tungku pemanas dihidupkan.
3. Setelah 90 menit pada 950ºC, 4 (empat) sampel dikeluarkan dan segera dimasukkan ke dalam media oli (proses *quenching*).
4. Selanjutnya 3 (tiga) sampel dimasukkan kembali ke dalam tungku pemanas untuk proses *tempering* pada suhu 500 ºC dengan waktu 30, 60, dan 90 menit.

5. Setelah 30 menit, satu buah sampel dikeluarkan dan didinginkan di udara, sedangkan 2 (dua) buah sampel tetap di dalam tungku untuk proses tempering.
6. Setelah 60 menit, satu buah sampel dikeluarkan dan didinginkan di udara, sedangkan satu buah sampel tersisa tetap di dalam tungku untuk proses tempering
7. Setelah 60 menit, satu buah sampel dikeluarkan dan didinginkan di udara
8. Setelah 3 (tiga) sampel tersebut dingin ditambah satu sampel setelah quenching, siap diuji tarik.

Diagram skematik proses perlakuan panas sampel tarik baja S45C ditunjukkan dalam Gambar 3.4.



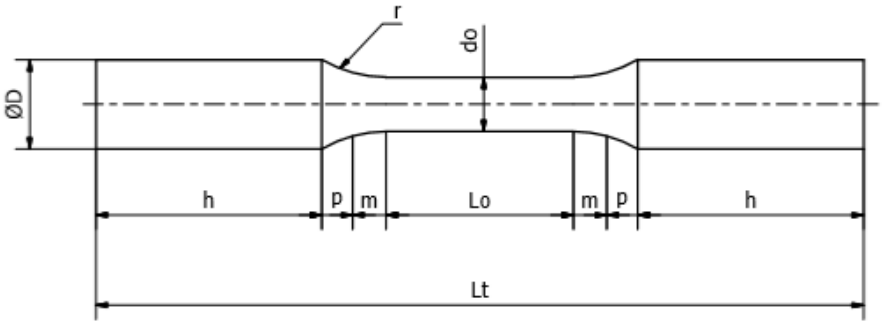
Gambar 3.4 *Heat Treatment Continous* Sampel.

Prosedur Pengujian Tarik (ASTM E8)

Pengujian tarik bertujuan untuk mengetahui tegangan maksimum, tegangan luluh, tegangan patah, regangan (perpanjangan) dan modulus elastisitas sampel tanpa perlakuan panas dan dengan perlakuan panas. Berikut langkah-langkah yang dilakukan pada pengujian tarik sampel adalah :

1. Persiapkan sampel tarik standar dan silindris dari baja S45C.
2. Sebelum pengujian uji tarik maka terlebih dahulu mengukur diameter sampel tarik baja S45C dengan menggunakan jangka sorong.
3. Pemasanagan Pasang sampel pada *specimen holder* dari mesin uji tarik kapasitas 50 kN
4. Sampel baja S45C diuji tarik hingga putus.
5. Perilaku tarik baja S45C seperti kekuatan tarik, kekuatan luluh, regangan, dan modulus elastisitas akan terlihat dari kurva tegangan – regangan yang ditampilkan komputer

Dalam pengujian tarik digunakan sampel standar uji tarik dan sampel uji tarik berbentuk silinder seperti terlihat pada Gambar di bawah ini.



Gambar 3.5. Sampel uji tarik standar ASTM E8M

Keterangan gambar :

r = 4 mm	p = 2 mm
d = 4 mm	m = 2 mm
D = 10 mm	Lo = 20 mm
H = 30 mm	Lt = 87 mm

Prosedur Pengujian Metalografi (ASTM E3)

Langkah-langkah yang dilakukan dalam pengujian metalografi patahan sampel uji tarik adalah :

1. Pemotongan sampel
   Pemotongan material baja S45C ini dilakukan dengan gergaji manual dan gergaji mekanis. Pada poros pemotongan ini menggunakan arah potongan memanjang dan menyilang.
2. Pembentukan dan pencetakan sampel
   Pembentukan dan pencetakan sampel dilakukan dengan cara dingin, pencetakan ini menggunakan bubuk *tekhnovit* atau *acryfix* yang dicampur dengan cairan pengeras dengan perbandingan tertentu, pemadatan campuran cairan pengeras dengan perbandingan tertentu, pemadatan campuran cairan tersebut memerlukan waktu satu jam.
3. Pemberian tanda
   Pemberian tanda sampel menggunakan grafis elektrik, pengerjaan ini dilakukan sebelum preparasi dan bertujuan untuk membedakan sampel satu dengan sampel lainnya.
4. Proses *grinding*
   Proses *grinding* sampel menggunakan mesin *grinding* putar atau *grinding* manual. *Medium grinding* berupa kertas ampelas *silicon* karbida (SiC) dengan tingkat kekerasan 100, 220, 320, 500, 600, 800, 1000, dan 1200. Ketika sampel mengalami *grinding*, diatas kertas ampelas harus selalu dialiri air bersih secara kontinu. Tujuannya untuk menghindari timbulnya panas di permukaan sampel yang kontak langsung dengan kertas ampelas.
5. Pencucian
   Proses pencucian sampel dilakukan pasca *grinding* atau proses *polishing*. Sampel proses pencucian ini menggunakan air bersih, aquades dan alkohol dan selanjutnya dikeringkan dengan alat pengering.
6. *Polishing*
   Dalam proses *polishing* sampel diletakan di mesin *polishing* dalam kondisi berputar. Berikan sedikit tekanan pada sampel yang berlawanan arah jarum jam. Proses *polishing* selesai bila diperoleh sampel dengan permukaan rata, halus dan mengkilap seperti cermin.
7. Etsa
   Proses etsa sampel menggunakan larutan nital dengan metode celup. Setelah proses etsa, spesimen kemudian dicuci dengan air bersih dan alkohol, selanjutnya dikeringkan dan siap untuk dilakukan analisis struktur mikro.
8. Analisis struktur mikro

Dalam proses pengamatan struktur mikro ini, sampel uji pasca etsa diamati menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 256x

Prosedur Pengujian Kekerasan Mikro (ASTM E92)

Tahapan dalam pengujian kekerasan sampel dengan metode *Vickers* adalah :

1. Bersihkan permukaan indentor dan tempat dudukan sampel.
2. Bersihkan sampel dengan pengamplasan, kemudian letakkan sampel pada dudukan uji sampel.
3. Pilih pembebanan yang sesuai dengan bahan uji.
4. Putar poros dudukan sampel hingga menyentuh indentor, jarum kecil pada lingkaran dalam menunjukan pada angka 3 (ditandai dengan titik merah). Lakukan penekanan selama 15 detik hingga berhenti.

5. Jarum pada lingkaran dalam dan luar akan bergerak.
6. Putar poros kembali ketempat dudukan sampel menjauh dari indentor.
7. Proses indentasi yang diperoleh dan hitung nilai kekerasan dengan menggunakan persamaan .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dalam rangka untuk mempelajari pengaruh perlakuan panas terhadap perilaku struktur dan mekanik material baja S45C. Untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas tersebut dilakukan pengujian meliputi komposisi kimia, uji tarik, mikrostruktur, dan kekerasan terhadap baja S45C pra dan pasca perlakuan panas. Kegiatan pengujian tersebut dilakukan di Laboratorium Radiometalurgi, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) BATAN, Kawasan PUSPIPTEK Setu, Tangerang Selatan.

Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia material baja S45C dilakukan dengan menggunakan *spark spectrometer* Hasil uji komposisi kimia baja S45C ditunjukan pada Tabel 2. Pengujian komposisi kimia ini untuk memastikan bahwa baja di pasaran yang digunakan sebagai sampel uji adalah baja S45C

Tabel 2 Data hasil uji komposisi kimia sampel baja S45C

No	Nama Unsur	Simbol	Komposisi (%)	No	Nama Unsur	Simbol	Komposisi (%)
1	Carbon	C	0,494	9	Nikel	Ni	0.0050
2	Iron	Fe	98,00	10	Timbal	Pb	0.0157
3	Silicon	Si	0,208	11	Molybdenum	Mo	0.0040
4	Manganese	Mn	0,794	12	Aluminium	Al	0.0087
5	Phosfor	P	0.0365	13	Titanium	Ti	0.0703
6	Sulfur	S	0.0087	14	Niobium	Nb	0.0043
7	Chromium	Cr	0.0235	15	Vanadium	V	0.0113
8	Copper	Cu	0.0192	16	Zirkonium	Zr	0.0042

Tabel 2. Menunjukkan komposisi kimia sampel baja S45C adalah 98% Fe, 0.494% C, 0.208% Si, 0.794% Mn, dengan unsur pengotor adalah 0.0365% P, 0.0087% S, 0.0235% Cr, 0.0040% Mo, 0.0050% Ni, 0.0087% Al, 0.0020% Co, 0.0192% Cu, 0.0043% Nb, 0.0703% Ti, 0.0113% V, 0.0157% Pb, 0.0042% Zr. Dari Tabel 4.1 tersebut diketahui komposisi unsur pemadu utama sampel adalah Fe = 98%, C = 0,494%; Si= 0,208%; dan Mn = 0,794%; sedangkan unsur lainnya adalah pengotor yang kurang dari 0,05% berat. Menurut standar JIS G4051, komposisi kimia baja S45C adalah C = 0,42 – 0,48%, Si = 0,15 – 0,35%, Mn = 0,6 – 0,9%, S < 0,035%, Cr , 0,2%, Ni < 0,2%, Ni+Cr < 0,35%, P < 0,03%, Cu < 0,3% dan Fe *balance*[ ]. Berdasarkan standar JIS G4051, baja yang digunakan sebagai sampel uji dalam penelitian ini adalah baja S45C.

Kekuatan Tarik Baja S45C

Pengujian tarik material baja S45C menggunakan mesin uji tarik kapasitas 50 kN dengan standar uji ASTM E8. Pengujian tarik dilakukan pada 5 (lima) buah sampel yang terdiri dari 1 (satu) buah sampel tarik standar perlakuan austenisasi (950 ^{o}C, 90 menit) dan ~~serta~~ *quenching* ke dalam media oli (A, Q) diberi kode sampel A, 1 (satu) buah sampel tarik standar perlakuan ~~panas~~ austenisasi (950 ^{o}C, 90 menit), *quenching* dan *tempering* (500 ^{o}C, 30 menit) atau sampel (A, Q, T30) diberi kode sampel B, 1 (satu) buah sampel tarik standar perlakuan austenisasi (950 ^{o}C, 90 menit), *quenching* dan *tempering* (500 ^{o}C, 60 menit) atau sampel (A, Q, T60) diberi kode sampel C, 1 (satu) buah sampel tarik standar perlakuan austenisasi (950 ^{o}C, 90 menit), *quenching* dan *tempering* (500 ^{o}C, 60 menit) atau sampel (A,

Q, T90) diberi kode sampel D, dan 3 (tiga) sampel tanpa perlakuan panas, diberi kode sampel E. Data dimensi sampel tarik standar ditunjukan pada Tabel 3. dan perilaku tarik baja S45C pra dan pasca perlakuan panas ditunjukan pada Tabel 4.

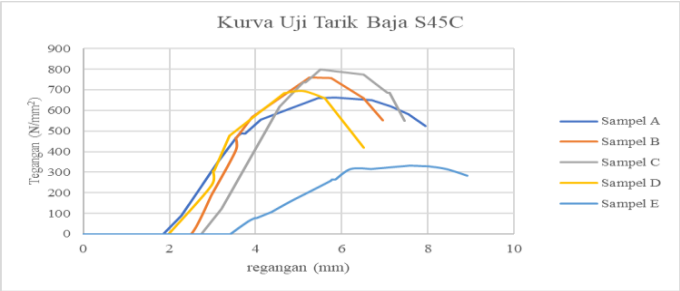
Tabel 3. Dimensi sampel sebelum dan sesudah uji tarik

No	Kode	D_1 (mm)	L_0 (mm)	L_1 (mm)	A mm^2	Δ L (mm)
1	Sampel A	4,14	20	23,64	13,45	3,64
2	Sampel B	4,08	20	23,16	13,07	3,16
3	Sampel C	4,12	20	23,00	13,32	3,00
4	Sampel D	4,12	20	22,74	13,32	2,74
5	Sampel E	4,44	20	24,16	15,48	4,16

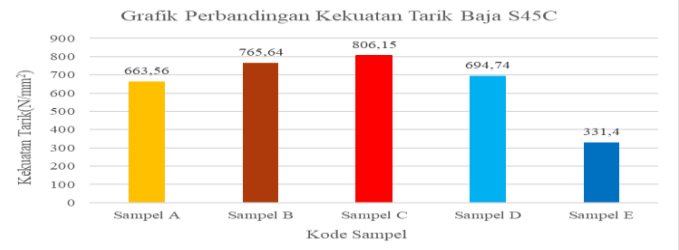
Tabel 4. Perilaku tarik baja S45C

No	Kode	F_{max}, N	Fy, N	UTS, (MPa)	σ_Y, (MPa)	(e), %
1	Sampel A	8.925	7.431	663,56	552,49	18,02
2	Sampel B	10.007	9.127	765,64	698,31	15,08
3	Sampel C	10.738	8.247	806,15	619,14	15,00
4	Sampel D	9.254	6.371	694,74	478,30	13,07
5	Sampel E	5.130	4.091	331,40	264,27	20,08

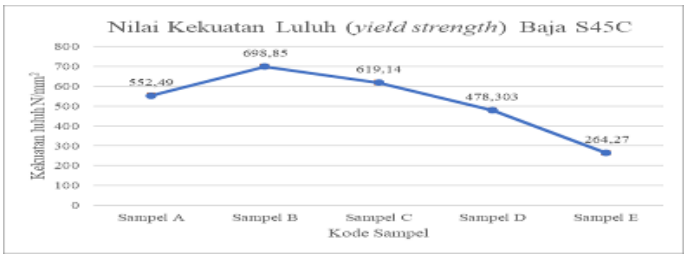
Keterangan :
Sampel A : Sampel tarik standar dengan perlakuan (A, Q)
Sampel B : Sampel tarik standar dengan perlakuan (A, Q, T30)
Sampel C : Sampel tarik standar dengan perlakuan (A, Q, T60)
Sampel D : Sampel tarik standar dengan perlakuan (A, Q, T90)
Sampel E : Sampel tarik standar tanpa perlakuan panas
(UTS) : Kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) sampel standar, N/mm^2 (MPa)
(σ_Y) : Kekuatan luluh (*yield strength*) sampel standar, N/mm^2 (MPa)
(e) : Regangan sampel %



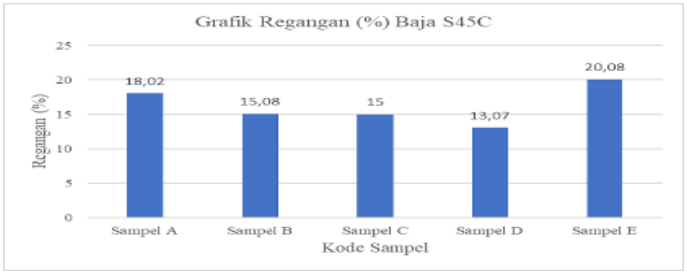
Gambar 4.1. Kurva tegangan – regangan baja S45C pra dan pasca perlakuan panas



Gambar 4.2. Kekuatan tarik sampel baja S45C pra dan pasca perlakuan panas



Gambar 4.3 Nilai kekuatan luluh baja S45C tanpa dan dengan perlakuan panas



Gambar 4.4 Regangan baja S45C tanpa dan dengan perlakuan panas

Dari Tabel.2 serta Gambar 4.1, 4.2 dan 4.3 diketahui bahwa perilaku tarik baja S45C tanpa perlakuan panas adalah UTS = 331,4 MPa, ~~(σ_Y)~~ = 267,27 MPa, dan ~~(e)~~ = 20,08 %. Perilaku tarik baja S45C perlakuan (A, Q) adalah UTS = 663,56 MPa, σ_Y = 552,49 MPa , dan e = 18,02 %. Baja S45C perlakuan (A, Q, T30) , UTS = 765,64 MPa, σ_Y = 698,85 MPa dan e = 15,08 %. Baja S45C perlakuan (A, Q, T60 mempunyai UTS = 806,15 Mpa , σ_Y = 619,14 MPa dan e = 15,00 %, serta baja S45C perlakuan (A, Q, T90) adalah UTS = 694,74 MPa, σ_Y = 563,69 MPa dan e = 13,07 %. Berdasarkan data perilaku tarik baja S45C dapat diketahui bahwa kekuatan tarik dan kekuatan luluh baja S45C pasca perlakuan *quenching* serta *quenching* dan *tempering* dengan waktu penahanan 30, 60 dan 90 menit lebih tinggi dibandingkan sampel tanpa perlakuan panas. Kondisi tersebut diikuti oleh regangan baja S45C pasca *quenching* dan perlakuan panas (*quenching* dan *tempering*) yang lebih rendah dibandingkan sampel tanpa perlakuan panas. Hal ini disebabkan pada proses *quenching* baja dengan kandungan sekitar 0,5% berat, waktu yang dibutuhkan untuk atom-atom karbon terjebak sempurna tidak cukup sehingga masih terdapat austenit sisa sehingga fasa yang terbentuk adalah fasa martensit yang strukturnya berbentuk jarum dan ferit. Oleh karena terdapat dua fasa yang berbeda karakternya maka tegangan sisanya tinggi akibat terjadi efek mekanisme pengerasan regangan (*strain hardening*) pada sampel baja S45C pasca perlakuan (A, Q). Besarnya efek pengerasan regang terhadap kekuatan tarik baja dinyatakan oleh koefisien pengerasan regang (n), sesuai persamaan: $\sigma = K.\varepsilon^n$, dengan σ adalah kekuatan tarik, K adalah konstanta kekuatan tarik pada $\varepsilon = 1$, dan ε adalah regangan sebenarnya. Setelah mengalami penemperan pada 500°C dengan waktu penahanan 30 menit, atom-atom karbon yang terjebak tersebut kemudian menata diri dan proses penataan atom-atom tersebut belum sempurna sehingga pada temperatur kamar fasa yang terbentuk adalah martensit temper (*martemper*), bainit dan ferit. Namun, pada penemperan dengan waktu penahanan 60 menit proses transformasi fasa dari martensit ke martemper lebih sempurna yang ditandai dengan penurunan kekuatan tarik dan kekuatan luluh dengan regangan sedikit menurun sehingga ketangguhan baja S45C (A, Q, T60) lebih baik dibandingkan dengan baja (A, Q, T30). Dengan bertambahnya waktu penemperan menjadi 90 menit, maka terjadi pertumbuhan butir martemper dan terjadi transformasi fasa bainit menjadi perlit yang ditandai dengan penurunan signifikan kekuatan tarik dan kekuatan luluh serta kenaikan regangan dari baja (A, Q, T90) yang lebih tinggi dibandingkan baja S45C dengan perlakuan panas lainnya. Baja S45C tanpa dan dengan perlakuan panas merupakan baja ulet yang ditandai dengan fenomena *necking* sebelum putus pada saat uji tarik.

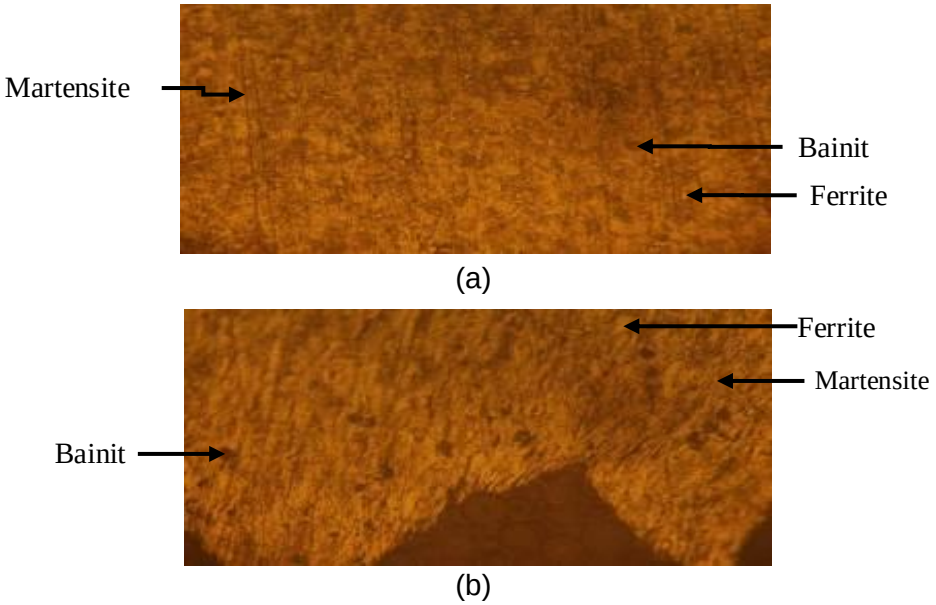
Mikrostruktur

Baja S45C pasca *quenching*

Pengamatan mikrostruktur dilakukan terhadap *base metal* dan daerah patahan dari 5 buah sampel tarik standar ASTM E8, yang masing-masing tanpa dan dengan perlakuan panas yang (Gambar 4.5). Pada Gambar 4.6 diperlihatkan lokasi *base metal* dan daerah patahan sampel baja S45C pasca *ustenisasi* 950 °C dan *quenching* menggunakan media oli yang akan dilakukan pemeriksaan mikrostrukturnya.

Gambar 4.5 Sampel tarik baja S45C pasca perlakuan panas

Gambar 4.6. Lokasi pengambilan sampel *base metal* dan daerah patahan baja S45C pasca *austenisasi* dan *quenching*



Gambar 4.7 Mikrograf baja S45C pasca perlakuan (A, Q) (a) *base metal*, (b) daerah patahan. Perbesaran: 256x

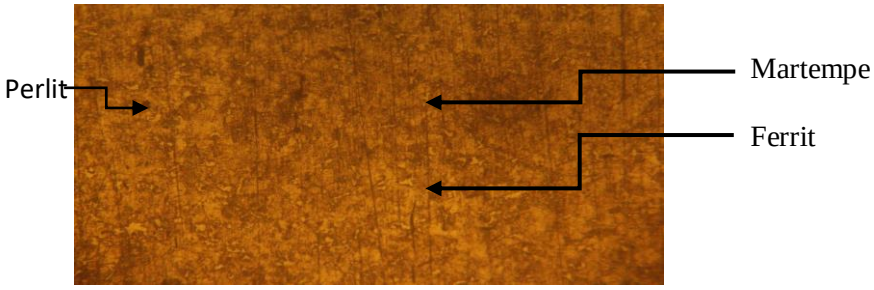
Gambar 4.7 menunjukkan mikrograf sampel tarik standar baja S45C dengan perlakuan (A, Q), dimana mikrostruktur *base metal* mempunyai fasa martensit berupa jarum-jarum kecil, bainit, dan ferit. Pada daerah patahannya fasanya sama yaitu, martensit, bainit dan ferit dengan butir lebih pipih searah dengan penarikan sampel uji. Fasa campuran martensit, bainit dan ferit yang terdapat dalam struktur baja S45C tersebut disebabkan oleh proses austenitisasi sampel belum sempurna dan masih terdapat fasa austenite ditambah lagi waktu yang dibutuhkan proses *quenching* terlalu singkat untuk baja dengan kandungan karbon sekitar 0,5% berat sehingga terbentuk fasa martensit dan bainit serta *austenite* sisa menjadi ferit. Hal ini terlihat dalam mikrostruktur dengan butir berwarna terang yang mencirikan fasa ferit, butir gelap seperti anyaman bambu halus yang merupakan fasa bainit, dan fasa martensit yang butirnya seperti jarum kecil.

Baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T30)

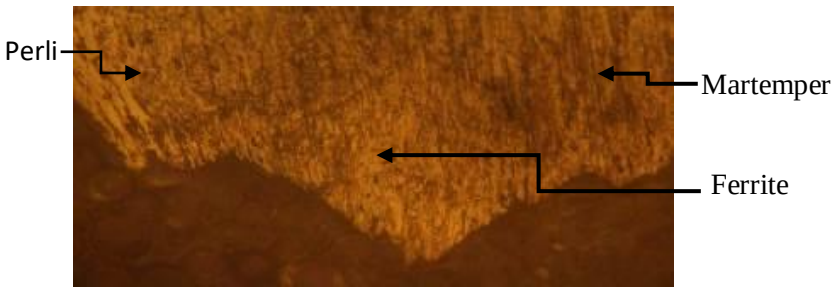
Lokasi pengambilan sampel metalografi untuk base metal dan daerah patahan baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T30) ditunjukan pada Gambar 4.8

Gambar 4.8 Lokasi pengambilan sampel metalografi daerah *base metal* dan patahan baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T30)

Gambar 4.9 memperlihatkan mikrograf base metal dan daerah patahan sampel baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T30). Pada Gambar 4.9 terlihat bahwa mikrostruktur *base metal* baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T30) mempunyai fasa martensit temper (*martemper*) berupa jarum-jarum kecil, perlit, dan ferit seperti diperlihatkan Gambar 4.9a. Pada proses penemperan pada 500 °C yang ditahan selama 30 menit, atom-atom dalam kristal menata diri dan terjadi transformasi fasa martensit menjadi martemper dan bainit menjadi perlit. Sementara itu, mikrostruktur di daerah patahan baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T30) mempunyai fasa martemper, bainit dan ferit dengan butir pipih searah penarikan sampel baja S45C, ~~tarikan~~ seperti diperlihatkan Gambar 4.9b. Pada penarikan sampel baja S45C mengakibatkan terjadinya deformasi plastis dan perubahan bentuk butir menjadi lebih pipih searah uniaksial. Perubahan fasa dan bentuk butir menyebabkan kekuatan dan kekerasan baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T30) sedikit meningkat dengan keuletan sedikit menurun dibandingkan baja S45C (A,Q).



(a)

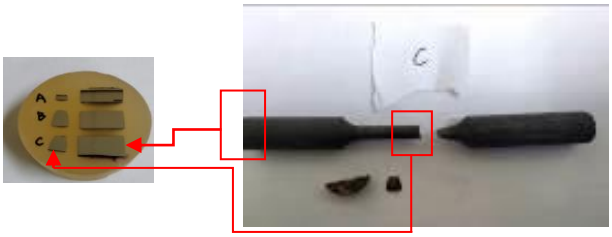


(b)

Gambar 4.9 Mikrograf baja S45C pascaa perlakuan (A, Q, T30) (a) *base metal*, (b)daerah patahan. Perbesaran 256x

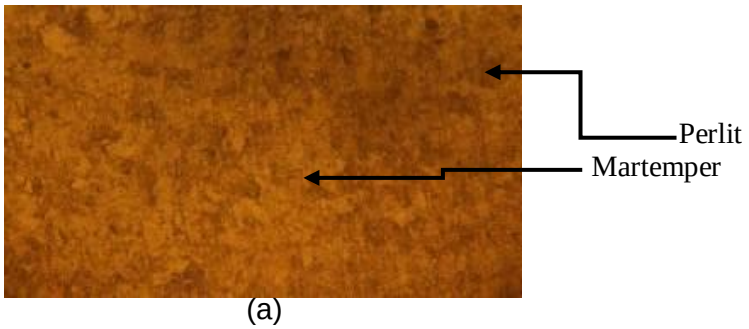
Baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T60)

Lokasi pengambilan sampel metalografi di daerah base metal dan patahan baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T60) ditunjukan pada Gambar 4.10.

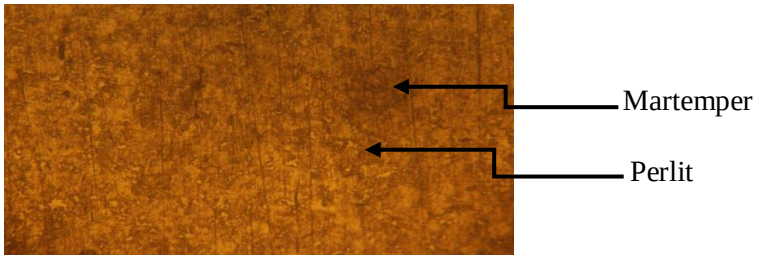


Gambar 4.10. Lokasi pengambilan sampel metalografi di *base metal* dan daerah patahan baja S45C pasca perlakuan (A. Q, T60)

Gambar 4.11 memperlihatkan mikrograf *base metal* dan daerah patahan sampel baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T60). Mikrostruktur *base metal* baja S45C mempunyai fasa martemper, perlit, dan ferit (Gambar 4.11a), dengan fraksi martemper lebih besar dibandingkan baja S45C perlakuan (A, Q, T30). Hal ini disebabkan semakin lama waktu penemperan maka atom-atom menata diri dan kemungkinan transformasi fasa dari martensit menjadi martemper semakin besar, demikian pula dari bainit menjadi perlit.



(a)



(b)

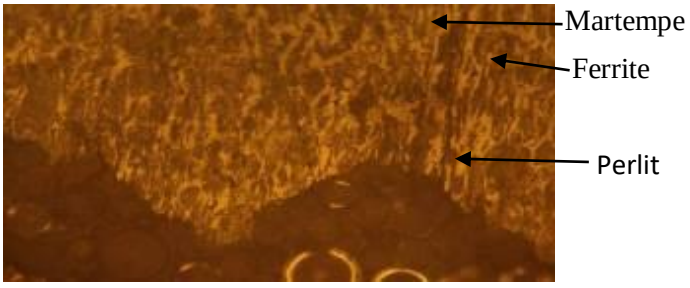
Gambar 4.11 Mikrograf baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T60) (a) *base metal*, (b) daerah patahan. Perbesaran 256x

Sementara itu, mikrostruktur di daerah patahan mempunyai fasa martemper, perlit dan ferit dengan ukuran butir pipih sedikit memanjang. Hal ini disebabkan pada proses penarikan sampel baja S45C perlakuan (A, Q, T60) terjadi deformasi plastis sehingga butir pipih tersebut berubah bentuk menjadi sedikit memanjang. Adanya fasa campuran martemper, perlit dan ferit serta ukuran butir menyebabkan kekuatan baja S45C (A, Q, T60) sedikit lebih tinggi dengan keuletan lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan (A, Q, T30).

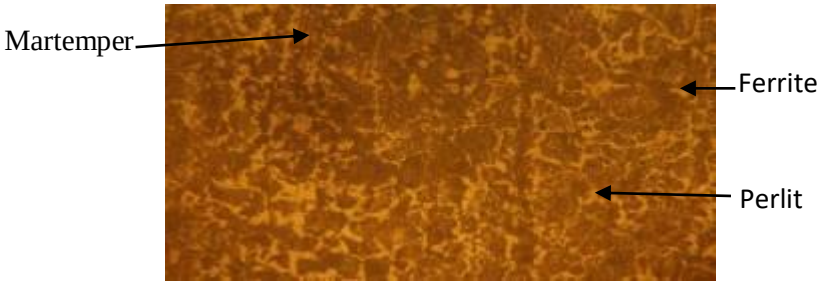
Baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T90)

Lokasi pengambilan sampel metalografi di daerah base metal dan patahan baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T90) ditunjukan pada Gambar 4.10. Pada Gambar 4.11 memperlihatkan mikrograf *base metal* dan daerah patahan sampel baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T90). *base metal* baja S45C mempunyai fasa martemper, perlit dan ferit (Gambar 4.11a), dengan fraksi martemper lebih besar dibandingkan baja S45C perlakuan (A, Q, T60). Hal ini disebabkan semakin lama waktu penemperan maka atom-atom menata diri dan kemungkinan transformasi fasa dari martensit menjadi martemper semakin besar, demikian pula dari bainit menjadi perlit dan terjadi pertumbuhan butir.

Gambar 4.12 Lokasi pengambilan sampel metalografi daerah *base metal* dan patahan baja S45C perlakuan (A, Q, T90)



(a)



(b)

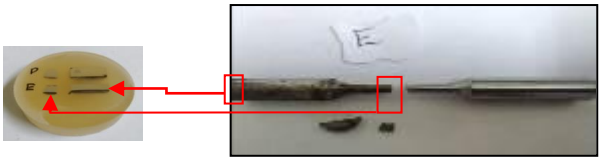
Gambar 4.13 Mikrograf baja S45C S45C perlakuan (A, Q, T90
(a) *base metal*, (b) daerah patahan Perbesaran 256x

Sementara itu, mikrostruktur di daerah patahan mempunyai fasa martemper, perlit dan ferit dengan ukuran butir pipih sedikit lebih besar. Hal ini disebabkan pada proses penarikan sampel baja S45C perlakuan (A, Q, T90) terjadi deformasi plastis sehingga butir pipih tersebut berubah bentuk menjadi sedikit memanjang. Adanya fasa campuran

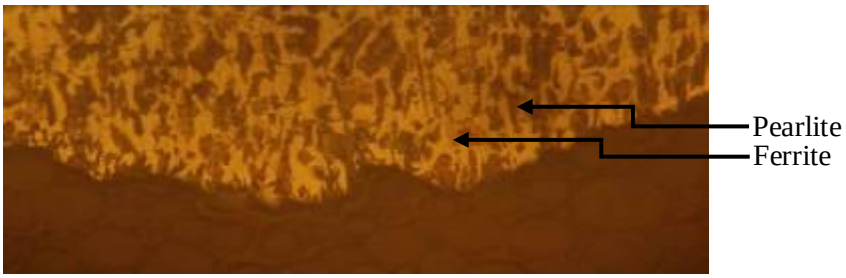
martemper, perlit dan ferit serta ukuran butir yang lebih menyebabkan kekuatan baja S45C (a, Q, T60) sedikit menurun dengan regangan sedikit menurun dibandingkan dengan perlakuan (A, Q, T30) dan (A, Q, T60)

Baja S45C tanpa perlakuan panas

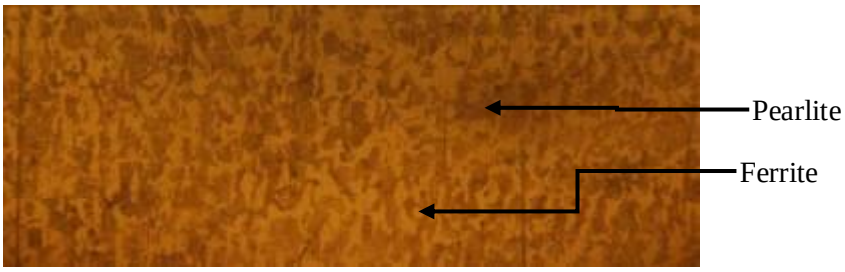
Pada Gambar 4.14 diperlihatkan lokasi pengambilan sampel daerah base metal dan patahan dari baja S45C tanpa perlakuan panas



Gambar 4.14 Lokasi pengambilan sampel metalografi daerah base metal dan patahan baja S45C tanpa perlakuan



(a)



(b)

Gambar 4.15 Mikrograf baja S45C S45C tanpa perlakuan panas
(a) *base metal*, (b) daerah patahan. Perbesaran: 256x

Pada Gambar 4.15 memperlihatkan mikrografi baja S45C tanpa perlakuan panas. Mikrostrukturnya terdiri dari fasa ferit dan perlit dengan arah butir melintang sesuai arah penarikan sampel. Struktur yang berwarna terang adalah fasa ferit sedangkan struktur yang berwarna gelap adalah fasa perlit. Fasa ferit memiliki sifat yang lunak dan memiliki ukuran butir relatif kasar, sedangkan fasa perlit yang lebih keras dibandingkan ferit karena adanya sementit (Fe_3C) juga memiliki butir dengan ukuran relatif kasar. Sehubungan hal tersebut, maka sampel baja S45C tanpa perlakuan panas mempunyai kekuatan dan kekerasan yang relatif rendah. Pada daerah patahan, strukturnya mempunyai bentuk butir sedikit memanjang karena efek penarikan baja S45C sehingga terjadi deformasi plastis yang menyebabkan fenomena penyempitan penampang (*necking*) pada sampel tarik baja.

Kekerasan Mikro

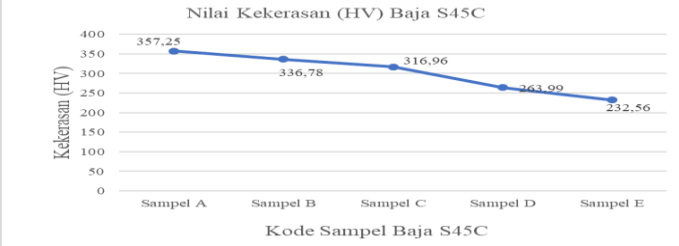
Pengujian kekerasan baja S45C dilakukan pada 5 (lima) sampel, yaitu pada *base metal* dan daerah patahan sampel pasca uji tarik pasca perlakuan panas *austenisasi*, *quenching* dan *tempering.* Pengujian kekerasan masing-masing sampel sebanyak 3 (tiga) titik lalu diambil nilai rata-rata per sampel. Data hasil pengujian kekerasan baja S45C ditunjukkan pada Tabel4.4.

Tabel 4.4 Data kekerasan mikro pada base metal dan daerah patahan baja S45C tanpa dan dengan perlakuan panas

No	Sampel	Kekerasan mikro, VHN	
		Base metal	Daerah patahan
1	Sampel A	275,13	357,25
2	Sampel B	264,45	336,78
3	Sampel C	214,13	316,96
4	Sampel D	213,88	263,99
5	Sampel E	176,94	232,56

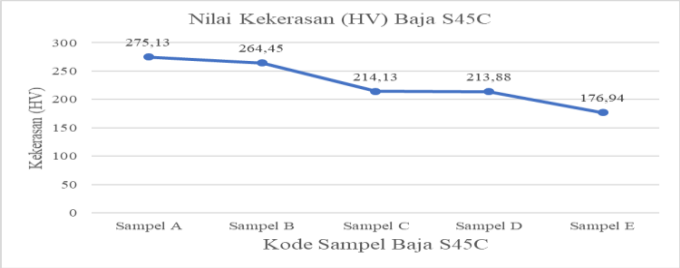
Pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.16 terlihat bahwa kekerasan baja S45C pada *base metal* dan daerah patahan mempunyai kecenderungan yang sama yaitu kekerasan baja pasca perlakuan panas lebih tinggi dibandingkan kekerasan baja tanpa perlakuan panas. Dalam hal ini, kekerasan baja pasca perlakuan (A, Q) tertinggi diikuti kekerasan baja pasca perlakuan (A, Q, T30), kemudian pasca perlakuan (A, Q, T60), pasca perlakuan (A, Q, T90), dan paling rendah baja tanpa perlakuan. Selain itu, kekerasan baja S45C pada daerah patahan tanpa dan dengan perlakuan panas lebih tinggi dibandingkan kekerasan *base metal*nya. Kekerasan pada *base metal* sangat dipengaruhi oleh proses perlakuan panas yang diterapkan pada sampel baja S45C. Proses perlakuan panas tersebut mempengaruhi proses transformasi fasa dan pembentukan butir dalam struktur *base metal* baja S45C. Baja S45C termasuk baja medium sehingga mempunyai fasa ferit dan perlit dengan fraksi relatif sama. Pada sampel A yang mendapat perlakuan austenisasi dan dilanjutkan dengan pendinginan cepat, maka terjadi transformasi fasa dari ferit dan perlit menjadi austenit pada proses austenisasi, selanjutnya pada pendinginan cepat baja dengan C sekitar 0,5% tidak cukup waktu untuk transformasi fasa austenit menjadi martensit 100% sehingga masih asda austenit sisa. Hal ini berakibat pada struktur sampel A yang fasanya terdiri dari martensit, bainit dan ferit. Fasa campuran tersebut menyebabkan tegangan sisa dalam struktur sampel A menjadi tinggi sehingga kerapatan dislokasi tinggi dan kekrasannya paling tinggi dibandingkan sampel B, C, D dan E. Sampel B, C dan D mendapat perlakuan austenisasi dan *quenching* yang sama, penemperan dengan temperatur yang sama 500 °C tetapi waktu penahanannya berbeda yaitu 30, 60 dan 90 menit, selanjutnya

Dari data tabel yang telah didapat di atas, selanjutnya akan ditampilkan dalam bentuk grafik batang dengan menampilkan hasil rata-rata dari masing-masing spesimen seperti berikut ini :



Gambar 4.16 Kekerasan *Vickers* baja S45C perlakuan panas *austenisasi, quenching dan tempering* pasca uji tarik dekat patahan.

Didinginkan lambat di dalam tungku. Pada proses penemperan baja S45C pasca *quenching*, terjadi transformasi fasa dari martensit, bainit dan ferit menjadi martemper, ferit dan perlit. Fraksi dan ukuran butir martemper, ferit dan perlit dipengaruhi oleh waktu penahanan pada temperatur temper. Semakin lama waktu penahanannya maka semakin sempurna transformasi fasa martensit menjadi martemper dan bainit menjadi perlit, namun terjadi pertumbuhan butir sehingga butirnya menjadi lebih besar. Menurut Hall-Petch, semakin besar ukuran butir maka kekuatan dan kekerasan material semakin rendah. Dengan demikian, kekerasan sampel D lebih rendah dibandingkan sampel C dan kekerasan sampel C lebih rendah dibandingkan sampel B.



Gambar 4.17 Kekerasan *Vickers* baja S45C perlakuan panas *austenisasi, quenching dan tempering* pasca uji tarik jauh patahan.

Kekerasan pada daerah patahan sampel uji tarik dipengaruhi oleh fasa-fasa yang ada di dalam struktur *base metal* baja S45C. Selama penarikan logam atau logam paduan terjadi proses deformasi plastis yaitu perubahan dari daerah elastis menjadi plastis yang ditandai adanya fenomena penyempitan penampang *(necking*) pada sampel uji tarik. Besarnya deformasi plastik dikendalikan oleh mekanisme pengerasan regangan (*strain hardening*). Tegangan tarik yang diterapkan pada sampel baja S45C menyebabkan kerapatan dislokasi semakin naik seiring dengan bertambahnya deformasi plastis sehingga jarak rerata antara dislokasi menjadi lebih pendek. Adanya penumpukan dislokasi-dislokasi yang diikuti dengan dislokasi-dislokasi yang terkunci di dalam kristal yang merupakan sumber tegangan dalam (*internal stress*) yang akan melawan atau menahan pergerakan dislokasi lainnya. Dislokasi-dislokasi menjadi sulit bergerak. Pengerasan regang (strain hardening) terjadi sebagai akibat penumpukasn dislokasi pada baja saat deformasi plastis dan mengeras akibat adanya hambatan selama deformasi, seperti perpotongan antar dislokasi, cacat titik, presipitat dan unsur pengotor. Oleh karena selama uji tarik sampel baja S45C terjadi deformasi plastis dan mekanisme pengerasan regang maka kekerasan baja di daerah patahan lebih tinggi dibandingkan *base metal* baik tanpa perlakuan panas maupun dengan perlakuan panas.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan pengkajian data penelitian terkait pengaruh perlakuan panas terhadap perilaku mekanik dan struktur baja S45C, maka dapat diimpulkan sebagai berikut:

1. Baja yang digunakan dalam penelitian adalah baja S45C yang merupakan baja karbon tipe AISI 1045 dan termasuk baja karbon medium.
2. Baja S45C mempunya fasa ferit dan perlit dengan kekuatan tarik = 331,40 MPA, kekuatan luluh = 264,27 MPa, regangan = 20,08% serta kekerasan *base metal* 176,94VHN dan daerah patahan 232,56 VHN.
3. Proses austenisasi dan *quenching* terhadap baja S45C kurang sempurna karena masih ada fasa austenit sisa sehingga tidak diperoleh fasa martensit 100%.
4. Pada proses penemperan baja S45C pasca austenisasi dan *quenching*, pada temperatur sama 500 °C menunjukkan semakin lama waktu penemperan maka transformasi fasa dari martensit ke martemper semakin sempurna, namun terjadi pertumbuhan butir yang dapat menurunkan kekuatan dan kekerasan serta sedikit meningkatkan keuletanya..
5. Perlakuan panas mempengaruhi mikrostruktur baja S45C, yaitu dari fasa martensit yang keras dan getas hasil quenching menjadi martemper yang relatif kuat dan ulet hasil tempering. Selain itu, mikrostruktur pasca perlakuan (A, Q) mempunyai fasa martensit, bainit dan ferit sedangkan mikrostruktur pasca perlakuan (A, Q, T30), (A, Q, T60) dan (A, Q, T90) mempunyai fasa martemper, perlit dan ferit.
6. Baja S45C pasca perlakuan (A, Q, T60) terbaik dalam penelitian ini dilihat dari perilaku tarik, mikrostruktur dan kekerasan dibandingkan baja S45C dengan perlakuan (A, Q), (A, Q, T30) dan (A, Q, T90).

Daftar Pustaka

[1] B. H. Amstead, P. F. Ostwald, and M. L. Begeman (Penerjemah: S. Djaprie). 1992. Teknologi Mekanik Jilid 1, Edisi ketujuh, Erlangga, Jakarta.

[2] Setiawan, Jan, Sungkono. 2017. "Karakteristik Daktilitas SS304 Yang Teroksidasi Pada Temperatur Tinggi" Urania Vol 125. P ISSN 0852-4777.

[3] ASM Handbook, Volume 1, 2016, Properties and Selection.

[4] Anhari. 2017. "Pengaruh Temperatur Proses Pack Carburizing terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Baja Karbon Rendah Dengan Media Pendingin Air" Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya,

[5] Joseph E. Shigley, Larry D. Mitchel, Gandhi Harapan. 1994. Perancangan Teknik Mesin, edisi keempat jilid 1.

[6] Handoyo Yopi. 2015. "Pengaruh Quenching dan Tempering pada baja Jis Grade S45C Terhadap Sifat Mekanis," Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Vol.III Nomor 2 Fakultas Teknik – Universitas Islam 45 Bekasi,

[7] ASM metals, reference book edisi 3, Materials Part ASTM International, Ohio, 2004.

[8] Djoko W., "Analisis Kerusakan Sistematika dan Peranannya Dalam Meningkatkan Kualitas Hasil Industri Produk Baja" Seminar Pada Jurusan Teknik Metalurgi STTIB September 1991.

[9] Jr, William D. Callister, Davit G. Rethwisch. 2004. "Material Science and Engineering An Introduction" Edisi 9

[10] Wicaksono, Bagus Dwi. 2018. Pengaruh Perlakuan Pendinginan Terhadap Kekerasan Dan Mikrostruktur Titanium Ti6al4v Untuk Aplikasi Biomedical. Fakultas Teknik. Universitas Muhammadiyah Malang.

[11] Sulaeman, Maman, Haris Budiman, Engkos Koswara. 2018. "Proses Uji Dimensi, Uji Kekerasan Dengan Metode Rockwell Dan Uji Komposisi Kimia Pada Cangkul Di Balai Besar Logam Dan Mesin (Bblm) Bandung". Jurnal. Universitas Majalengka.

[12] Ibrahim, A and M. Sayuti, 2015. *Effect of Heat Treatment on Hardness and Microstructures of AISI 1045*, Advanced Material Research Vol. 1119, 575-579.

[13] Prasetyo, H. C dan T. H. Ningsih, 2018. Analisa Pengaruh *Heat Treatment* Terhadap Kekerasan Material Baja S45C Untuk Aplikasi Poros Roda Sepeda Motor, JTM, Vol. 6 (2), 29-34.

[14] I. Basori, W. D. Pratiwi, and S. T. Dwiyati, 2019. *Effect of Salt Quenching on The Microstructures and Mechanical Properties of AISI 1045 Steel*, J. of Physics: Conference Series, 1402.