

ABSTRAKSI

Baja fase ganda mempunyai kekuatan dan keuletan yang lebih baik dari baja konvensional. Hal ini karena adanya kombinasi struktur mikro martensite yang keras dan ferrit yang lunak.

Pada penelitian ini, proses pembuatan baja fase ganda dilakukan dengan melakukan variasi terhadap temperatur pemanasan antara A_1 dan A_3 (735°C , 760°C dan 785°C) dan waktu penahanan ($1/2$ jam, 1 jam dan $1\ 1/2$ jam) dengan bahan baku baja karbon 0,45% C.

Dari hasil penelitian ternyata bahwa pada temperatur 735°C , perubahan waktu penahanan dari $1/2$ jam, 1 jam dan $1\ 1/2$ jam, terjadi kenaikan kekerasan dari 367,2 HV, 467,4 HV dan 522 HV. Hal ini disebabkan fraksi austenite yang terbentuk sebelum dilakukan quenching semakin besar dengan bertambah lamanya waktu penahanan. Transformasi pearlite menjadi austenite belum mencapai kesetimbangan pada penahanan $1/2$ jam ditandai dengan adanya pearlite seperti yang terlihat pada pengamatan metallography.

Dari hasil uji tarik didapat perpanjangan yang cukup baik pada temperatur 735°C sedangkan pada temperatur 760°C dan 785°C sudah terjadi patah getas.

BAB II

DASAR TEORI

2.1. TRANSFORMASI FASE PADA BAJA KARBON

2.1.1. TRANSFORMASI FASE PADA SAAT PEMANASAN DAN PENDINGINAN

Transformasi fase pada saat pemanasan dan pendinginan dapat diketahui dari diagram kesetimbangan (diagram fase) besi-karbida besi, untuk mempermudah diambil contoh dua macam baja yaitu baja hypoeutektoid dan baja hypereutektoid yang sudah mendapat pendinginan ekuilibrium dan akan dipanaskan secara ekuilibrium.

2.1.2. TRANSFORMASI FASE PADA SAAT PEMANASAN

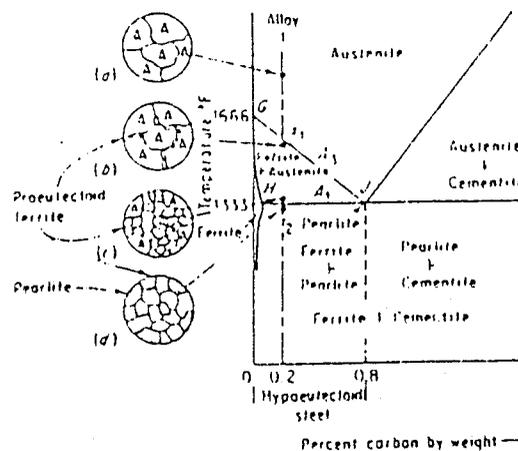
Baja hypoeutektoid yang terdiri dari butir-butir kristal ferrit dan perlit jika dipanaskan sampai dibawah temperatur kritis A_1 masih belum tampak adanya perubahan struktur mikro. Tetapi jika pemanasan dilanjutkan hingga tepat pada temperatur kritis A_1 , seperti terlihat pada gambar 2.1. Perubahan struktur mikro pada pemanasan dan pendinginan baja hypoeutektoid, maka perlit akan mengalami reaksi eutektoid sedangkan lamel-lamel ferrit dan sementit dari perlit akan bereaksi menjadi austenit.

Reaksi eutektoid pada pemanasan :



Reaksi ini berlangsung pada temperatur konstan, temperatur tidak akan naik sebelum reaksi eutektoid selesai serta seluruh ferrit dan sementit didalam perlit habis menjadi austenit.

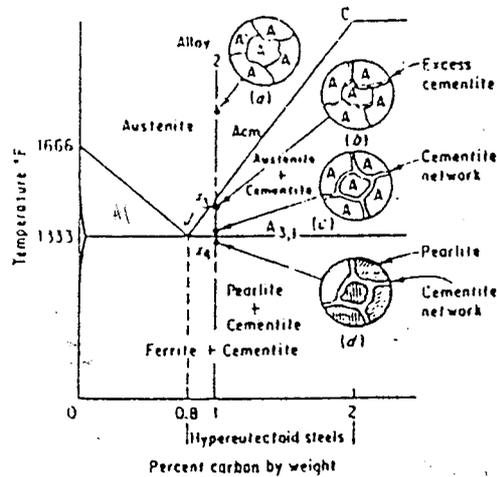
Setelah perlit habis dan mulai terjadi kenaikan temperatur, maka ferrit proeutektoid akan mulai mengalami transformasi allotropik, ferrit yang BCC akan menjadi austenit yang FCC.



Gambar 2.1. Perubahan struktur mikro pada pemanasan dan pendinginan baja Hypoeutektoid

Transformasi ini berlangsung bersamaan dengan naiknya temperatur sampai mencapai temperatur kritis A₃ seluruh ferrit-proeutektoid sudah menjadi austenit.

Baja hypereutektoid pada temperatur kamar struktur mikronya terdiri dari perlit dan jaringan sementit yang membungkus butir-butir kristal perlit. Perubahan struktur mikro yang terjadi dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Perubahan struktur mikro pada pemanasan dan pendinginan baja hypereutektoid

Pada pemanasan hingga mencapai temperatur kritis A_1 , maka akan mulai terjadi reaksi eutektoid dimana ferrit dan sementit pada perlit akan bereaksi menjadi austenit. Pada temperatur kritis A_1 austenit mengandung 0,8 % C, sedang carbon yang lain berada pada sementit. Dengan naiknya temperatur keatas temperatur kritis A_1 maka kemampuan austenit melarutkan carbon juga akan naik, sehingga carbon yang tadinya berada pada sementit sedikit demi sedikit mulai larut kedalam austenit dan jaringan sementit menjadi semakin

berkurang sampai pada temperatur A_{cm} jaringan sementit akan habis dan struktur seluruhnya menjadi austenit.

2.1.3. TRANSFORMASI FASE PADA SAAT PENDINGINAN

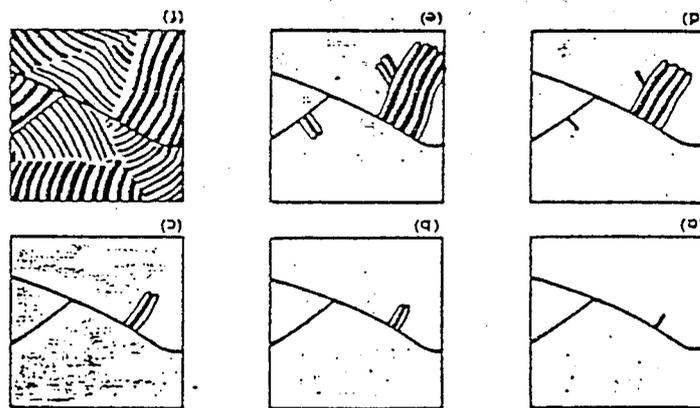
Transformasi austenit pada pendinginan memegang peranan penting terhadap sifat baja pada proses laku panas. austenit dari baja hypoeutektoid bila didinginkan dengan lambat pada temperatur kritis A_3 akan mulai membentuk inti kristal ferrit. Inti ferrit ini tumbuh pada batas-batas butir kristal austenit.

Transformasi ini terjadi karena perubahan allotropik dari besi gamma ke besi alpha, karena besi alpha (ferrit) hanya dapat melarutkan carbon dalam jumlah yang sangat kecil maka kandungan carbon dalam austenit (besi gamma) akan semakin besar bila ferrit yang tumbuh makin besar. ✓

Dengan menurunnya temperatur sampai mencapai temperatur kritis A_1 austenit bertransformasi menjadi perlit. Pertumbuhan perlit ini dimulai dengan tumbuhnya inti sementit pada batas butir austenit. Untuk tumbuhnya sementit yang kaya carbon (6,67 % C) diperlukan sejumlah besar carbon yang diperoleh dari austenit disekitarnya yang mengeluarkan carbon untuk dapat menjadi ferrit.

Carbon ini keluar ke kiri kanannya, sebagian mengumpul pada sementit dan sebagian membentuk sementit baru, sehingga

terjadi struktur yang berlapis-lapis (lamellar) terdiri dari ferrit dan sementit yang disebut dengan perlit. Seperti terlihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Pertumbuhan butir perlit

Jadi perubahan fase yang terjadi pada temperatur kritis A_1 hanya transformasi dari austenit menjadi perlit, sedang ferrit yang sudah terjadi sebelumnya pada penurunan temperatur tidak mengalami perubahan.

Struktur mikro baja hypoeutektoid ini pada temperatur kamar terdiri dari ferrit dan perlit.

Pada baja hypereutektoid austenit mulai mengalami perubahan fase pada temperatur A_{cm} dengan keluarnya sementit

dari larutan padat tersebut. Keluarnya sementit terjadi karena pada temperatur A_{cm} ini austenit mencapai batas kemampuannya melarutkan carbon, dan bila temperatur diturunkan lagi maka austenit akan kelebihan carbon, kelebihan inilah yang akan mengendap keluar dari austenit sebagai sementit. Sementit ini akan keluar menuju batas butir austenit dan mengumpul disana. Dengan makin turunnya temperatur maka makin banyak sementit yang mengumpul pada batas butir austenit, sehingga akan membentuk jaringan yang membungkus austenit.

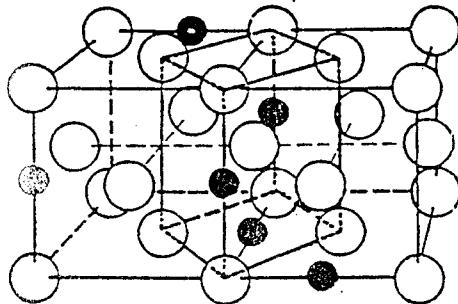
Dengan keluarnya sementit ini austenit akan makin sedikit kandungan carbonnya sehingga pada temperatur kritis A_1 komposisi austenit mencapai komposisi eutektoid dan akan terjadi reaksi eutektoid sehingga terjadi transformasi dari austenit menjadi perlit.

Dibawah temperatur kritis A_1 sudah tidak lagi terjadi perubahan fase. Pada temperatur kamar struktur mikro dari baja hypereutektoid terdiri dari perlit yang dikelilingi jaringan sementit.

2.2. TRANSFORMASI AUSTENITE MENJADI MARTENSITE

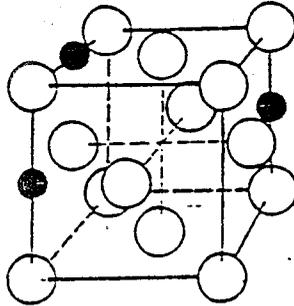
Pada transformasi austenite menjadi pearlite terjadi perubahan komposisi karena proses difusi dari atom-atom karbon. Tetapi pada pembentukan martensite tidak terjadi

perubahan komposisi karbon sehingga kandungan karbon dalam martensite sama dengan kandungan karbon dalam austenite. Hal ini terjadi karena kecepatan pendinginan yang melampaui kecepatan pendinginan kritis, sehingga karbon tidak sempat berdifusi. Selain itu juga terjadi proses pergeseran yang merubah struktur FCC dari austenite menjadi BCT dari martensite. Mekanisme transformasi ini diilustrasikan dalam gambar 2.4.



Gambar 2.4. Mekanisme perubahan struktur FCC austenite menjadi struktur BCT martensite

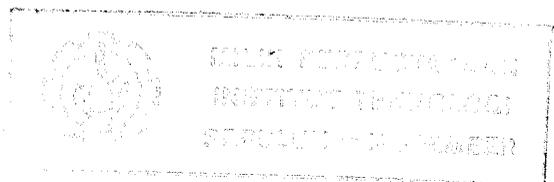
Martensite merupakan sistem fase tunggal dengan lattice BCT dan dengan perbandingan parameter lattice (c/a) sebagai fungsi dari kandungan karbon (gambar 2.5.).



Gambar 2.5. Hubungan kadar karbon terhadap space lattice martensite

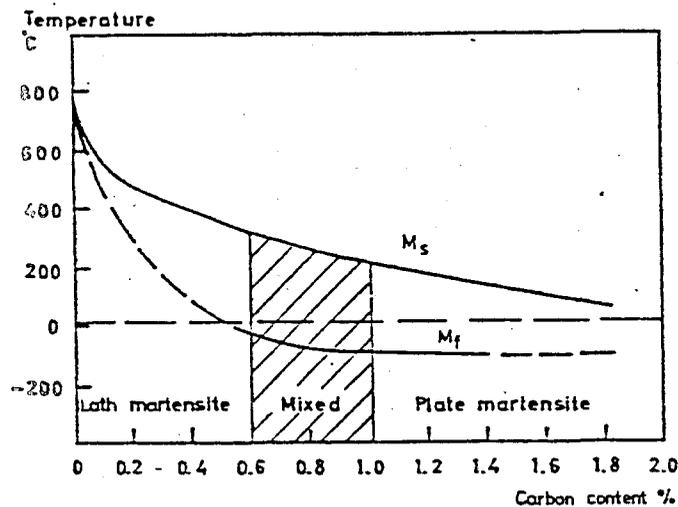
Transformasi martensite terjadi pada daerah temperatur yang tertentu dan jumlah martensite yang terbentuk merupakan fungsi dari temperatur dan bukan fungsi dari waktu. Jadi tidak sama dengan transformasi pearlite. Temperatur dimana martensite mulai terbentuk dinyatakan sebagai M_s (martensite start), dan temperatur berakhirnya terbentuk martensite dinyatakan sebagai M_f (martensite finish).

Daerah temperatur $M_s - M_f$ dipengaruhi oleh kandungan kadar karbon pada baja, dimana makin tinggi kandungan karbon makin rendah temperatur $M_s - M_f$. Dari gambar 2.6 dapat dilihat untuk kandungan karbon lebih besar dari 0,5 % akhir transformasi martensite terjadi pada temperatur dibawah ruang, sehingga jika proses pendinginan (quenching) hanya



dilakukan sampai pada temperatur ruang maka akan terbentuk austenite yang tidak ikut bertransformasi, yaitu sebagai austenite sisa (retained austenite).

Struktur martensite merupakan struktur yang sangat keras dan rapuh (brittle). Hal ini disebabkan karena adanya distorsi pada kisi (lattice) martensite BCT yang lewat jenuh oleh kandungan karbon.



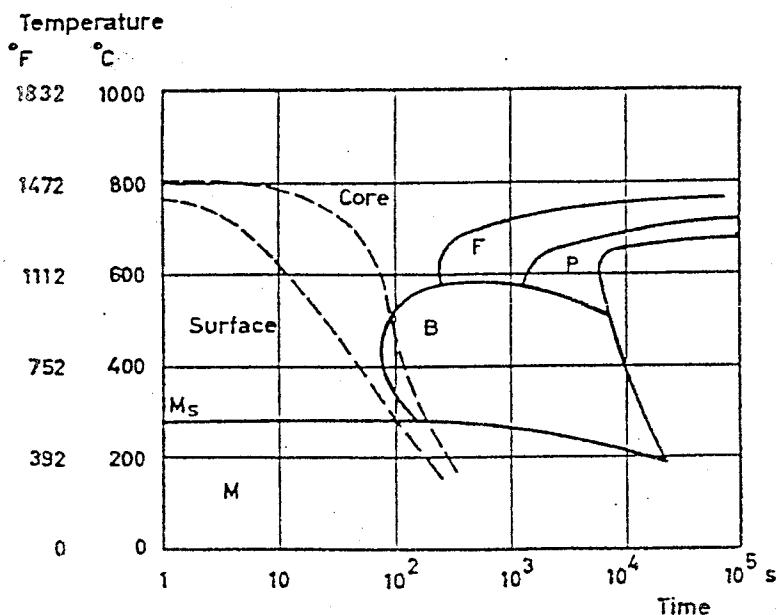
Gambar 2.6. Hubungan kadar karbon terhadap temperatur Ms-Mf

2.2.1. HARDENABILITY

Hardenability adalah kemampuan baja untuk dikeraskan dengan membentuk martensit. Hardenability pada dasarnya tergantung pada dua faktor utama yaitu komposisi kimia (kadar carbon dan unsur paduan) austenit dan ukuran butir (grain size) austenit. Hardenability menggambarkan dalamnya

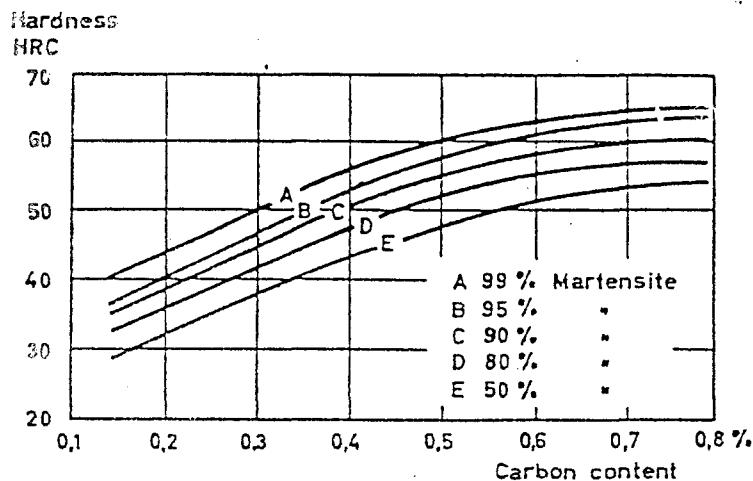
pengerasan yang diperoleh dengan quenching, biasanya dinyatakan dengan jarak suatu titik dibawah permukaan dimana strukturnya terdiri dari 50 % martensit.

Dalam melakukan pengerasan dengan pembentukan martensit, asalkan pada pendinginan tercapai laju pendinginan kritis (CCR) maka kekerasan yang terjadi tergantung pada kadar carbon dari baja tersebut (dari austenit pada saat pemanasan). Bila laju pendinginan yang terjadi pada benda kerja lebih lambat dari laju pendinginan kritis maka jumlah martensit yang terbentuk akan berkurang (kurang dari 100 %) dan tentu kekerasannya juga akan menjadi semakin rendah. hal ini dapat dilihat dalam gambar 2.7.



Gambar 2.7. Laju pendinginan pada permukaan dan inti dengan oil-quenched

Kadar carbon dalam konteks ini adalah yang larut dalam austenit. Carbon yang tetap berupa senyawa atau karbida pada saat temperatur austenizing tidak akan ikut dalam reaksi pembentukan martensit, jadi tidak akan menambah kekerasan martensit dan martensit akan lebih keras jika kadar karbonnya lebih tinggi. Hubungan antara kekerasan baja (sesudah diquench) dengan kadar carbon dan jumlah martensit dilihat pada gambar 2.8.

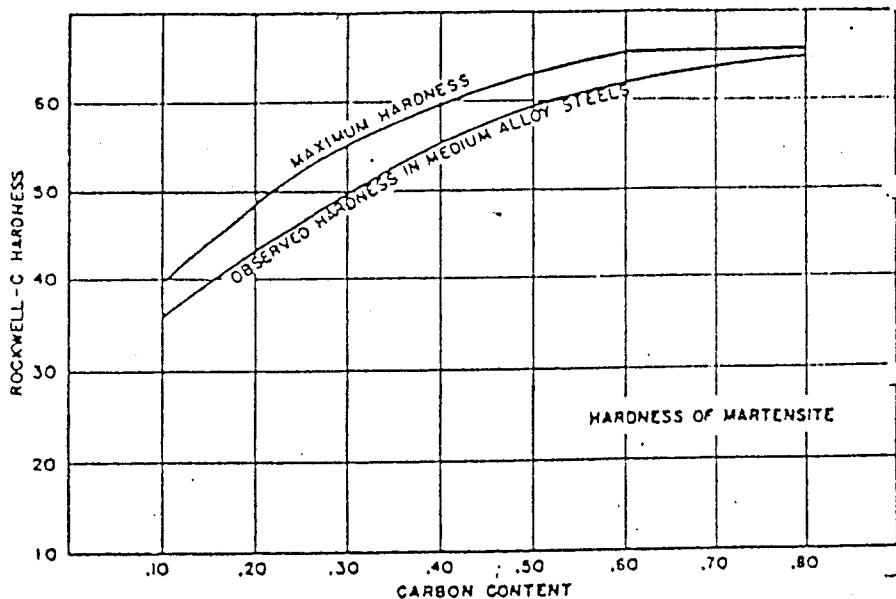


Gambar 2.8. Hubungan antara kekerasan baja dengan kadar carbon dan jumlah martensit

2.2.2. HUBUNGAN HARDENABILITY TERHADAP HARDENING

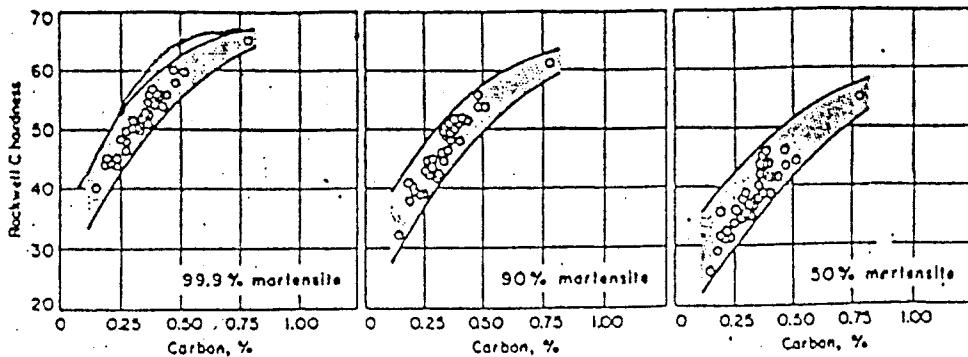
Pengerasan baja dengan menghasilkan struktur martensit adalah dibutuhkan untuk mencapai tingkat spesifikasi kekuatan dan ketangguhan atau menurunkan terjadinya internal stress.

Pengerasan penuh baja berarti bahwa struktur mikro adalah 100 % martensit dan mempunyai kekerasan seperti terlihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Kekerasan martensit sebagai fungsi kandungan carbon

Tetapi ketika laku panas hardening sudah dilakukan terdapat beberapa struktur mikro non-martensit seperti pearlit, bainit, atau austenit sisa dari laku panas hardening yang tidak sebanding. Kadang-kadang dalam prakteknya struktur mikro 50 % martensit, 50 % pearlit atau bainit sudah diterima dari pengerasan pada tingkat yang lebih rendah. Kekerasan kemudian dapat dilihat menjadi seperti pada gambar 2.1.1.



Gambar 2.1.1. Hubungan kadar carbon dan prosentase martensit terhadap Rockwell C hardness

Untuk mencapai sifat optimum dari tempering sesudah hardening laku panas harus dilakukan untuk mencapai hampir 100 % martensit. Kontrol struktur mikro mengakibatkan laku panas hardening menjadi persyaratan proses yang sangat penting. Kemampuan baja merespon hardening oleh pengembangan kebutuhan struktur mikro dipandang sebagai bagian hardenability.

Kekerasan dan hardenability adalah dua sifat baja yang yang perlu dibedakan dengan jelas. Sifat kekerasan umumnya menunjukkan level of localized berlawanan terhadap penetrasi oleh peranjian dibawah kondisi tes kekerasan. kekerasan mempunyai jarak dari minimum sampai maksimum, maksimum dicapai oleh laku panas struktur mikro martensit dan bertambah dengan kandungan carbon baja seperti pada gambar

2.1.1. *hardenability* tidak menunjukkan kekerasan pada tingkat pencapaian sekitar, pengganti dari sejumlah kekerasan dengan reaksi keseluruhan massa terhadap pencapaian kekerasan maksimum sebagai hasil laku panas *hardening*.

Hardenability adalah suatu konsep sifat yang berusaha meliputi bermacam-macam pengukuran metalurgi dalam baja yang menetapkan prilakunya pada laku panas *hardening*.

2.3. UNSUR PADUAN PADA BAJA

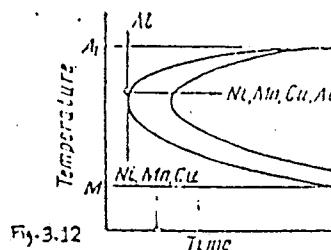
Baja menurut komposisi kimianya dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu baja carbon (*plain carbon steel*) dan baja paduan. Baja carbon selain mengandung besi dan carbon juga mengandung sejumlah unsur lain, namun masih dalam batas-batas tertentu yang tidak banyak berpengaruh terhadap sifat yang dimilikinya. Unsur-unsur ini biasanya merupakan ikutan dari proses pembuatan baja, seperti mangan, silicon dan beberapa unsur pengotoran seperti belerang, fosfor, oksigen.

Baja carbon mempunyai sifat kekuatan dan keuletan yang tidak terlalu tinggi, *hardenability* yang agak rendah dan setelah pengerasan mudah menjadi lunak kembali apabila mengalami pemanasan. Kesulitan ini dapat diatasi dengan menambahkan unsur paduan pada baja yang disebut dengan baja paduan.

Penambahan unsur paduan pada baja antara lain bertujuan untuk menaikkan hardenability, kekuatan, kekerasan, ketangguhan, sifat tahan aus, tahan korosi, sifat kemagnetan dan dapat memperbaiki sifat mekanik lainnya.

2.3.1. PENGARUH UNSUR PADUAN TERHADAP PEMBENTUKAN PERLIT DAN BAINIT

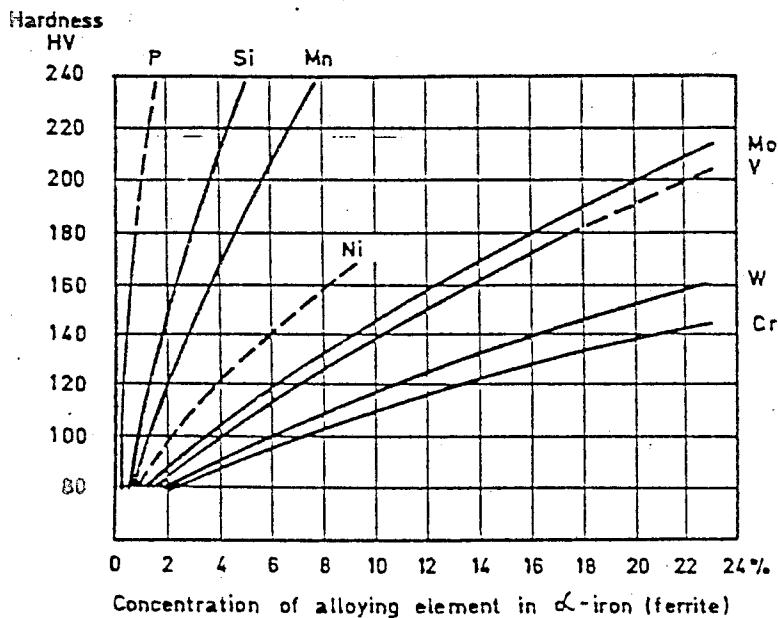
Pada penambahan unsur paduan suatu kurva transformasi yang terdiri dari kurva transformasi bainit, proeutektoid (ferrit atau sementit) dan perlit akan bergeser kekanan, karena semua unsur paduan akan menghambat terjadinya transformasi austenit menjadi ferrit atau sementit. Jadi unsur paduan akan dapat menurunkan laju pendinginan kritis (CCR), dan akhirnya akan dapat menaikkan hardenability, seperti terlihat pada gambar 2.1.2.



Gambar 2.1.2. Kurva transformasi bergeser kekanan

2.3.2. PENGARUH UNSUR PADUAN TERHADAP FERRIT

Semua unsur paduan yang membentuk larutan padat dalam ferrit akan menaikkan kekerasan ferrit. Seperti terlihat pada gambar 2.1.3.



Gambar 2.1.3. Pengaruh penambahan unsur paduan terhadap kekerasan ferrit

Si dan Mn dapat menaikkan kekerasan ferrit cukup tinggi sedangkan Cr terlihat paling sedikit, sehingga dapat disimpulkan bahwa Cr dapat menaikkan hardenability namun hanya sedikit dapat menaikkan kekerasan ferrit.

2.3.3. PENGARUH UNSUR PADUAN TERHADAP DIAGRAM TRANSFORMASI

Telah disebutkan bahwa unsur paduan akan menggeser kurva transformasi kekanan, dan akan menurunkan temperatur

pembentukan martensit Ms dan Mf, sehingga mengakibatkan martensit lebih mudah terbentuk yang akan menaikkan hardenability baja.

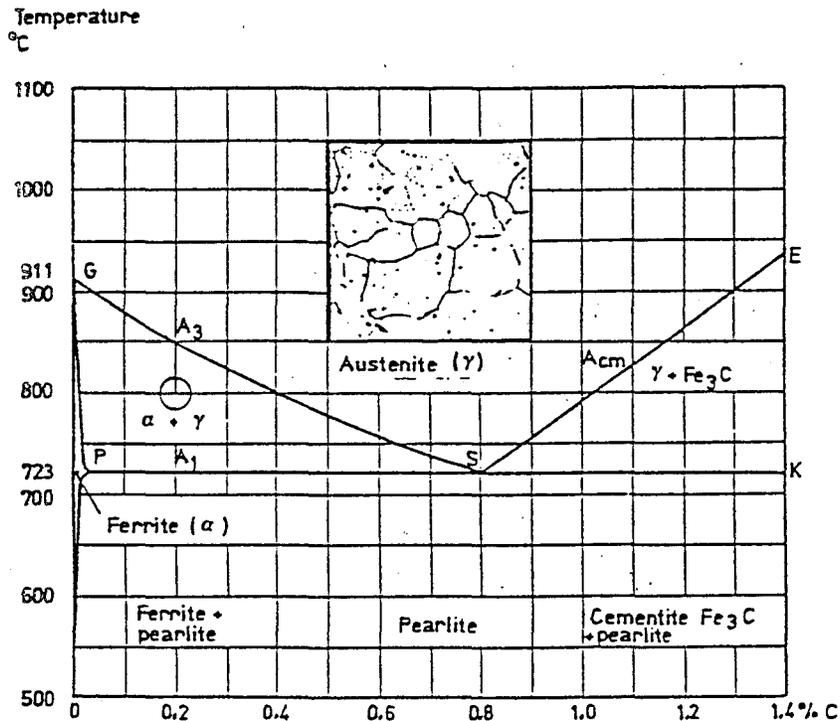
Perlu diperhatikan bahwa Ms dan Mf dijaga agar tidak terlalu rendah (lebih rendah daripada temperatur kamar) agar tidak banyak menimbulkan retained austenit yang dapat menurunkan kekerasan yang diinginkan.

2.4. BAJA FASE GANDA DAN PERLAKUAN PANASNYA

Diagram besi karbon dan kesetimbangan dipergunakan untuk memperoleh informasi berapa suhu austenite yang diperlukan untuk pengerasan atau normalising. Terlihat temperatur austenite 50°C diatas A_3 . Namun jika baja mengandung 0,2 % C dipanaskan pada temperatur 50°C dibawah A_3 yaitu temperatur 800°C , baja itu setelah kesetimbangan akan terdiri dari 50 % α dan 50 % γ yang mengandung 0,45 % C (lihat gambar 2.2). Bila di quench dalam air baja akan mengandung 50 % α dan 50 % martensite.

Baja yang telah dipanaskan dengan metode ini akan mengandung fase ganda (dual phase). Struktur ferrite dan martensite dapat diperoleh jika baja didinginkan cepat dari temperatur tertentu dalam daerah fase ganda ini. Butir ferrite yang terbentuk selama proses fase ganda ini adalah poligonal (memiliki sisi-sisi yang banyak) berbeda dengan

ferrite acicular. Konfigurasi ferrite poligonal memiliki kapasitas deformasi yang lebih besar dari ferrite acicular.



Gambar 2.2 Pada pemanasan equilibrium pada 800°c baja 0,20% c mengandung 50% α dan 50% γ

Rashid, orang pertama yang menguji sifat-sifat baja fase ganda. Dari pengujian didapat baja fase ganda mempunyai perpanjangan yang lebih besar dari baja yang dipanaskan secara konvensional. Secara umum diketahui perpanjangan berkurang sebesar bertambahnya kekuatan tarik. Tapi pada baja fase ganda ini (0,2 % C) dengan struktur 20 % martensite dan 80 % ferrite diperoleh perpanjangan 50 %

lebih besar dari baja ferrite-pearlite dengan kekuatan tarik yang sama dan adanya kenaikan kekerasan secara perlahan sampai sekitar 3 % akibat pengerjaan.

BAB III

BAJA KARBON DAN LAKU PANAS

3.1. BAJA KARBON

Baja adalah paduan yang terdiri dari besi (Fe) dan karbon (C) dengan kadar karbon tidak lebih dari 2 %, bila kadar karbon lebih dari 2 % disebut besi tuang. Baja ini banyak sekali macam maupun kegunaannya karena itu perlu diadakan klasifikasi. Klasifikasi yang biasa dipakai adalah klasifikasi berdasarkan komposisi kimia dimana baja dibedakan menjadi dua bagian yaitu :

- baja karbon
- baja paduan

Baja karbon bukan berarti baja yang tidak sama sekali mengandung unsur-unsur lain selain besi dan karbon, tetapi kandungan unsur-unsur lainnya masih lebih rendah dari pada batas untuk disebut baja paduan dan dapat dianggap sebagai kotoran saja. Batasan kandungan tersebut adalah :

- silikon 0,8 %
- manganese 1,10 %
- sulphur 0,055 %
- phospor 0,050%

Menurut kadar karbonnya, baja karbon dapat dibagi menjadi tiga kelompok yaitu :

- baja karbon rendah $C < 0,3 \%$
- baja karbon sedang $0,3 \% \leq C \leq 0,6 \%$
- baja karbon tinggi $C > 0,6 \%$

Baja karbon rendah pemakaiannya sangat luas, antara lain sebagai baja konstruksi rangka gedung-gedung, rangka kendaraan, mur, baut, dan lain-lain. Baja karbon rendah bersifat lunak, kekuatan rendah, keuletan cukup tinggi sehingga ketangguhannya cukup tinggi juga.

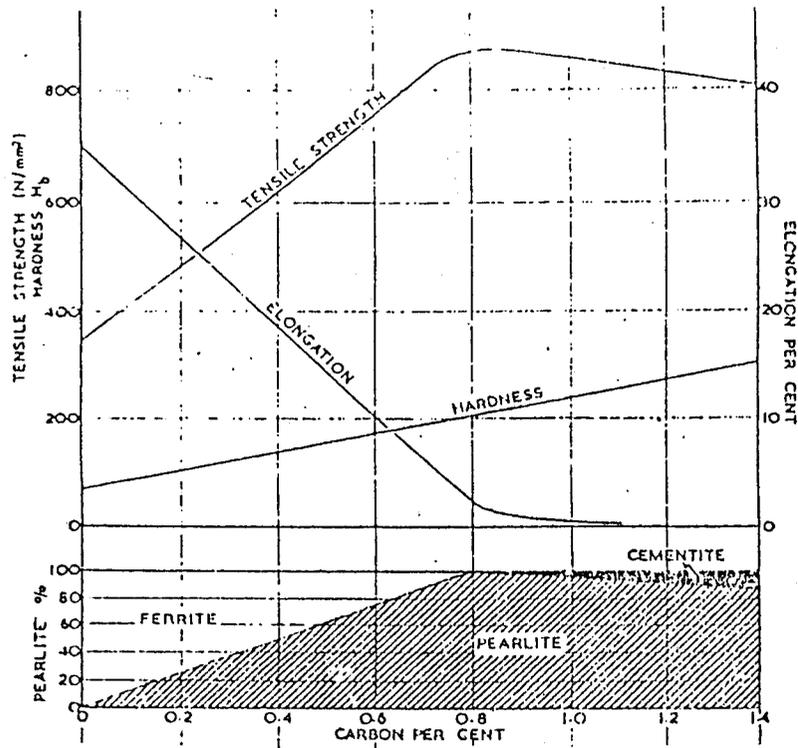
Baja karbon menengah sudah cukup keras dan kuat, pemakaiannya hampir sama seperti baja karbon rendah, tetapi biasanya dipergunakan apabila diperlukan kekuatan dan keuletan yang cukup seimbang seperti poros, roda gigi dan lain-lainnya.

Baja karbon tinggi mempunyai sifat lebih kuat dan lebih keras lagi, tetapi keuletan dan ketangguhannya serta kemampuan untuk dikerjakan dengan mesin adalah rendah. Baja karbon tinggi ini terutama dipakai apabila dibutuhkan sifat tahan aus yang cukup tinggi seperti pada mata bor dan alat perkakas lainnya.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.1. yang menunjukkan hubungan antara kadar karbon dengan sifat-sifat mekanisnya.

Pada gambar 3.1 terlihat semakin tinggi kadar karbon maka :

- kekuatan yield, kekuatan tarik dan kekerasan naik.
- keuletan (ductility) dan ketangguhan turun.



Gambar 3.1. Pengaruh kadar karbon terhadap sifat mekanis

3.2. PROSES LAKU PANAS

Laku panas adalah perpaduan proses pemanasan dan

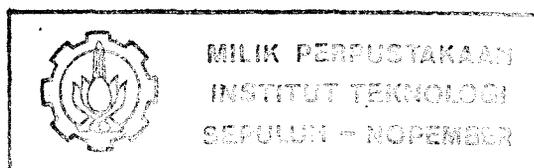
pendinginan pada logam atau paduan untuk memperoleh sifat-sifat tertentu. Pada dasarnya sifat laku panas terdiri dari beberapa tahapan, yaitu : pemanasan sampai temperatur tertentu, lalu diikuti dengan penahanan beberapa saat (holding time) kemudian dilakukan pendinginan dengan kecepatan tertentu.

Selama pemanasan dan pendinginan terjadi perubahan struktur mikro yang dapat menyebabkan perubahan sifat dari logam tersebut. Struktur mikro yang terjadi pada akhir suatu proses laku panas selain ditentukan oleh komposisi kimia dan proses laku panas yang dialami juga oleh struktur atau kondisi awal benda kerja. Logam atau paduan dengan komposisi kimia yang sama, mengalami proses laku panas yang sama, kemungkinan akan menghasilkan struktur mikro dan sifat yang berbeda jika struktur kondisi awalnya berbeda.

Beberapa perlakuan panas yang umum dilakukan adalah annealing, normalising, hardening, dan casehardening.

3.2.1. Pengerasan (Hardening)

Salah satu proses laku panas yang sering dilakukan adalah pengerasan. Pengerasan dilakukan dengan memanaskan baja sampai daerah austenit kemudian temperturnya ditahan beberapa saat dan didinginkan cepat sehingga terbentuk martensit yang keras. Faktor-faktor yang mempengaruhi



pengerasan adalah : kadar carbon, temperatur pemanasan, waktu penahanan (holding time), laju pendinginan dan hardenability baja.

3.2.2. WAKTU PENAHANAN (HOLDING TIME)

Pada pemanasan saat tercapainya temperatur kritis atas, struktur sudah hampir seluruhnya austenit, tetapi pada saat itu austenit masih berbutir halus dan kadar carbon serta unsur paduannya belum homogen.

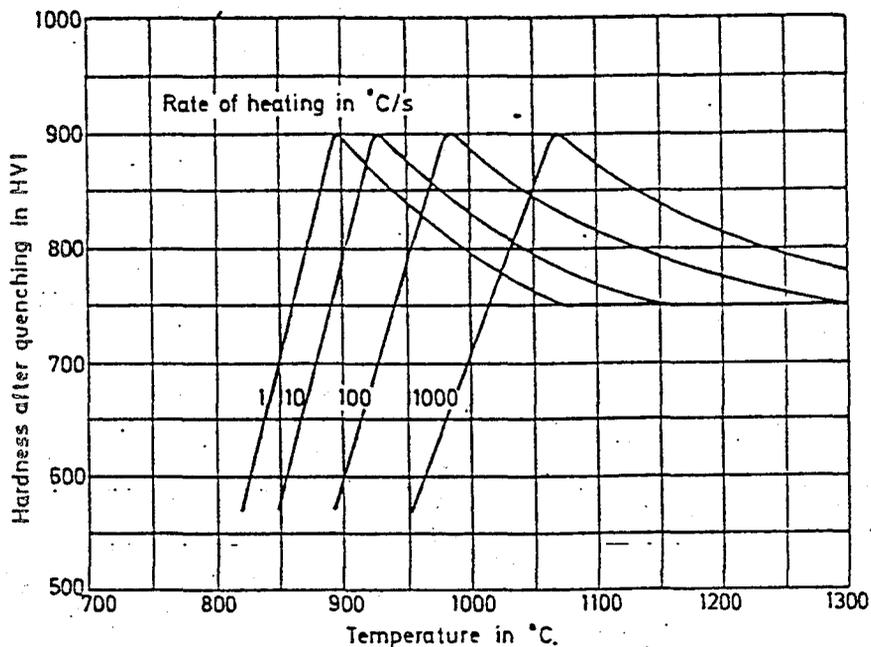
Untuk membuat austenit menjadi lebih homogen maka perlu diberi kesempatan pada atom-atom untuk berdifusi secara sempurna. Jadi pada saat pemanasan perlu diberi holding time yang cukup untuk dapat mencapai austenit yang homogen.

Lamanya holding time tergantung pada tingkat kelarutan karbida, ukuran butir yang diinginkan, jenis baja, temperatur austenitisasi yang dipakai dan laju pemanasan.

Dengan berbagai percobaan quenching dari pemanasan dengan berbagai macam laju pemanasan yang berbeda dan temperatur austenitisasi didapat grafik hubungan kekerasan setelah quenching dengan laju pemanasan dan temperatur austenitisasi, seperti terlihat pada gambar 3.2.

Dari gambar terlihat bahwa kekerasan maksimum dapat dicapai dengan pemanasan sampai kesuatu daerah temperatur yang sangat sempit, bila temperatur pemanasan lebih tinggi

lagi maka kekerasan akan turun. Ini menunjukkan bahwa dengan temperatur yang lebih tinggi terlalu banyak karbida yang larut sehingga terjadi austenit sisa yang cukup banyak.



Gambar 3.2. Hubungan kekerasan setelah quenching dengan laju pemanasan

Beberapa pedoman penentuan holding time pada proses pengerasan dari berbagai jenis baja seperti baja konstruksi dari baja carbon dan baja paduan rendah yang mengandung karbida yang mudah larut diperlukan holding time yang singkat, yaitu sekitar 5 - 15 menit.

Baja konstruksi dari baja paduan menengah dianjurkan menggunakan holding time sekitar 15 - 25 menit.

Baja paduan rendah memerlukan holding time yang tepat agar kekerasan yang diinginkan dapat tercapai dianjurkan menggunakan holding time sekitar 10 - 30 menit.

3.2.3. LAJU PENDINGINAN

Setelah proses pemanasan dan holding time, untuk mencapai struktur martensit maka austenit yang terjadi harus didinginkan cepat, setidaknya dapat mencapai pendinginan laju pendinginan kritis. Untuk ini baja harus didinginkan dalam suatu media pendingin tertentu. Beberapa media pendingin yang sering digunakan antara lain : air, minyak, campuran air dan minyak (emulsi), udara dan garam cair.

Air adalah media pendingin yang mempunyai kemampuan pendinginan yang tinggi sekali, maka dari itu air biasanya digunakan untuk pendinginan dari baja yang hardenabilitynya tidak terlalu tinggi, seperti baja carbon.

Keburukan media pendingin air adalah laju pendinginannya sangat tinggi pada daerah pembentukan martensit sehingga akan menyebabkan terjadinya tegangan akibat transformasi dan selisih temperatur. Ini akan mendorong terjadinya keretakan pada saat quenching. Bahaya terjadinya retak pada saat quenching dapat dihindari dengan cara mengangkat kembali baja yang diquench tadi pada saat mencapai temperatur $200^{\circ} - 400^{\circ}\text{C}$ dan memindahkannya dengan

cepat kedalam minyak.

Laju pendinginan dengan minyak akan lebih lambat daripada dengan air. Minyak biasanya dapat digunakan untuk baja paduan medium dan paduan rendah hanya untuk benda berpenampang kecil.

Baja paduan tinggi dan baja paduan rendah (yang berpenampang kecil) dapat dikeraskan dengan pendinginan udara. Udara mempunyai kemampuan pendinginan rendah, sehingga laju pendinginan yang terjadi juga akan rendah. Hal ini sangat menguntungkan baja paduan karena dengan laju pendinginan yang rendah thermal stress juga akan rendah sehingga benda kerja terbebas dari kemungkinan retak (distorsi). Kekurangannya pada pendinginan udara kemungkinan permukaan benda kerja mengalami oksidasi, sehingga pengerasan menjadi tidak merata.

BAB IV

PERCOBAAN

4.1. PERALATAN PERCOBAAN

Peralatan percobaan yang dipakai dalam penelitian ini adalah :

1. Cutting machine
2. Hand grinder
3. Polisher
4. Etching reagent
5. Mikroskop dan kamera mikrograph
6. Dapur pemanas
7. Alat uji tensile strength dan kekerasan vikers
8. Jangka sorong

4.2. MATERIAL PERCOBAAN

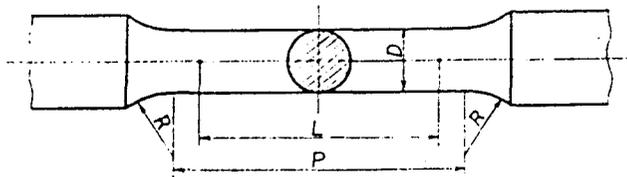
penelitian ini menggunakan material baja karbon AISI 1045 dari P.T.Bohlindo Baja dengan komposisi kimia 0,45% C, 0,3% Si, dan 0,7% Mn.

4.2.1. PERSIAPAN MATERIAL

Material yang akan digunakan sebagai bahan percobaan dipersiapkan terlebih dahulu.

Pemotongan material dilakukan dengan cutting machine dengan ukuran panjang material adalah 1,5 Cm (15 mm) dan diameter 16 mm.

Untuk material yang akan diuji tarik perlu dibubut dengan dimensi sesuai dengan standart JIS Z 2201.



Unit: mm

Diameter	Gauge length	Parallel length	Radius of fillet
D	L	P	R
12.5	50	approx. 60	15 min.

Gambar 4.1. Material uji tarik

Sebelum dilakukan perlakuan panas, material AISI 1045 perlu diberikan identifikasi sebagai berikut :

- Tanda 0 adalah material AISI 1045 yang tidak mengalami perlakuan apapun.
- Tanda A1 adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 735°C dengan holding time 1/2 jam.

- Tanda A2 adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 735°C dengan holding time 1 jam.
- Tanda A3 adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 735°C dengan holding time 1 1/2 jam.
- Tanda B1 adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 760°C dengan holding time 1/2 jam
- Tanda B2 adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 760°C dengan holding time 1 jam.
- Tanda B3 adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 760°C dengan holding time 1 1/2 jam.
- Tanda C1 adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 785°C dengan holding time 1/2 jam.
- Tanda C2 adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 785°C dengan holding time 1 jam.
- Tanda C3 adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 785°C dengan holding time 1 1/2 jam.
- Tanda D1 adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 810°C dengan holding time 1/2 jam.
- Tanda D2 adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 810°C dengan holding time 1 jam.
- Tanda D3 adalah material yang mengalami pemanasan

pada temperatur 810°C dengan holding time 1 1/2 jam.

4.3. PROSES LAKU PANAS

Spesimen yang sudah diberi tanda A1, A2, A3 dimasukkan kedalam dapur pemanas. Pemanasan dimulai dari suhu kamar dan dinaikkan secara perlahan sampai mencapai temperatur 735°C . Setelah di holding selama 1/2 jam material A1 dicelup ke air dengan cepat dengan posisi vertikal. Holding di lanjutkan sampai 1 jam dan material A2 dicelup ke air dengan cepat dengan posisi vertikal. Untuk material A3 holding dilanjutkan sampai 1 1/2 jam dan di celup dengan cepat dengan posisi vertikal.

Untuk spesimen B, C, dan D, diberikan perlakuan panas yang sama seperti diatas, hanya temperatur yang di pergunakan adalah 760°C untuk spesimen B, 785°C untuk spesimen C, dan 810°C untuk spesimen D.

4.4. PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO

Pengamatan struktur mikro material dilakukan sebelum dan sesudah proses laku panas. Langkah-langkah persiapan material sebelum dilakukan pengamatan struktur mikro dengan mikroskop adalah sebagai berikut :

4.4.1. GERINDING DAN POLISHING

Gerinding dilakukan untuk mendapatkan permukaan material yang halus dan rata. Proses ini dilakukan dengan menggosokkan permukaan material pada permukaan kertas gosok dengan tingkat kekasaran yang berbeda dimulai dengan kertas gosok yang paling kasar. Pada saat penggosokkan harus diikuti dengan pendinginan dengan air untuk mencegah berubahnya struktur mikro material karena over heating.

Sesudah gerinding selesai dilakukan dilanjutkan dengan polishing. Polishing dilakukan untuk mendapatkan permukaan material yang lebih halus lagi. Pada proses ini material digosokkan pada polisher yang berputar dan ditaburi dengan bubuk alumina dan dibasahi dengan air sebagai partikel abrasive untuk menghaluskan permukaan material.

4.4.2. ETSA PERMUKAAN MATERIAL

Hasil yang didapatkan dari proses gerinding dan polishing adalah permukaan material yang mengkilap tanpa goresan. Sebelum dilakukan pengamatan metallograpi permukaan material terlebih dahulu di etsa untuk melarutkan struktur mikro yang ada pada permukaan material.

Proses etsa material dilakukan dengan mencelupkan

permukaan material pada suatu larutan etsa (etching reagent). Pada percobaan ini etsa dilakukan dengan etching reagent nital 3%, yaitu larutan antara 97% alkohol dan 3% HNO_3 . Waktu pencelupan yang dilakukan adalah 4 detik.

4.4.3. PENGAMATAN METALLOGRAPHY

Sesudah etsa material, selanjutnya dilakukan pengamatan metallograpi. Pengamatan metallograpi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro material.

Pengamatan ini dilakukan dengan mikroskop. Struktur mikro material yang diamati dengan mikroskop difoto dengan kamera pengambil foto micrograph dengan pembesaran tertentu.

4.5. UJI KEKERASAN

Pengujian kekerasan dilakukan dengan vickers hardness (HV 40). Prosedur pengujian adalah sebagai berikut:

1. Spesimen permukaannya diratakan dan dibersihkan.
2. Mesin uji kekerasan dipersiapkan dengan beban HV 40.
3. Spesimen diletakkan pada tempatnya dan difokuskan sampai permukaannya tampak pada layar mesin, selanjutnya dilakukan pembebanan

4. Setelah pembebanan selesai dilakukan, mesin dikembalikan keposisi semula dan dilayar dibaca besarnya diagonal hasil dari indentasi.
5. Dari besarnya diagonal maka harga kekerasan dapat diketahui dari tabel kekerasan.
6. Setiap spesimen dilakukan pengujian kekerasan sebanyak 5 X.

4.6. UJI TARIK

Uji tarik dilakukan dengan menggunakan standart pengujian JIS Z 2241. Adapun langkah-langkah pengujian uji tarik adalah sebagai berikut :

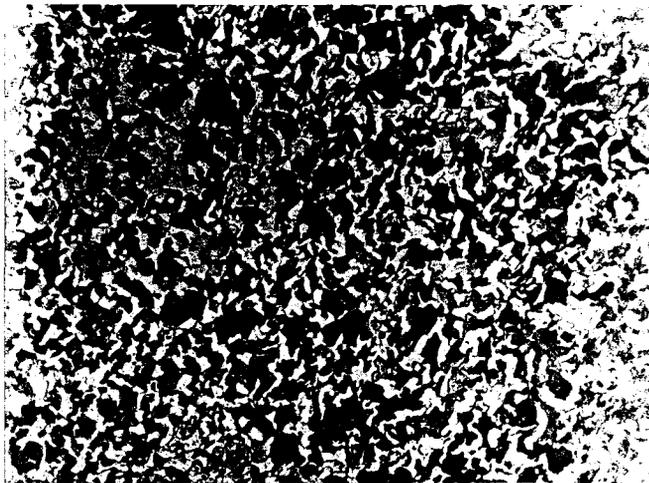
1. Spesimen dibersihkan dengan kertas gosok dari kotoran dan terak akibat laku panas.
1. Ukur dimensi spesimen, untuk setiap dimensi diukur sebanyak 3 X.
2. Spesiman dipasang pada penjepit.
3. Atur skala pembebanan.
4. Kertas dan pena dipasang.
5. Pembebanan diberikan, dan selama pembebanan perhatikan perubahan yang terjadi pada spesimen maupun grafik.

6. Setelah patah, spesimen dilepas dari penjepit.
7. Kedua bagian spesimen yang patah digabung kembali, kemudian panjangnya diukur.
8. Pada skala dapat dibaca kekuatan tarik spesimen.

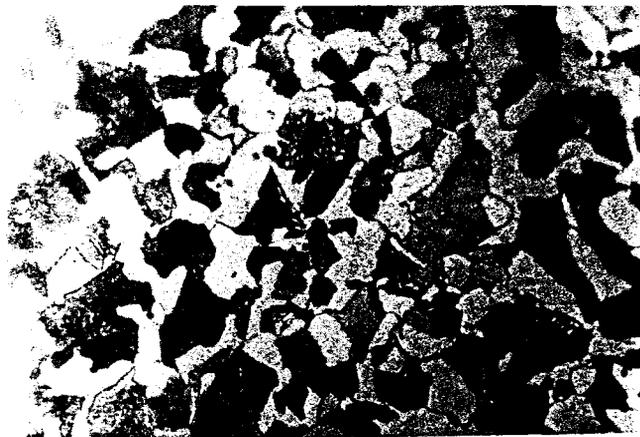
BAB V
DATA PERCOBAAN.

5.1. GAMBAR STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 1045

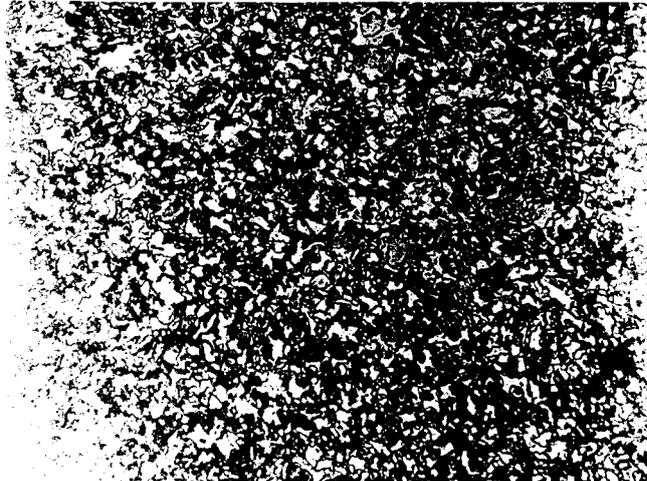
- etsa nital 3 %



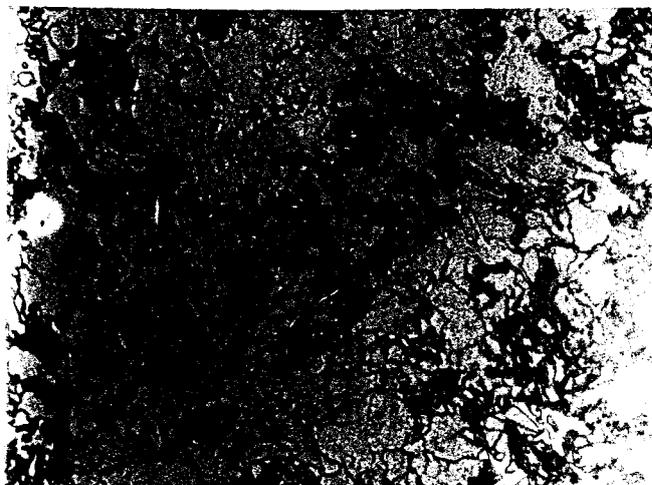
Gambar 5.1. Struktur mikro material awal
pembesaran 150X



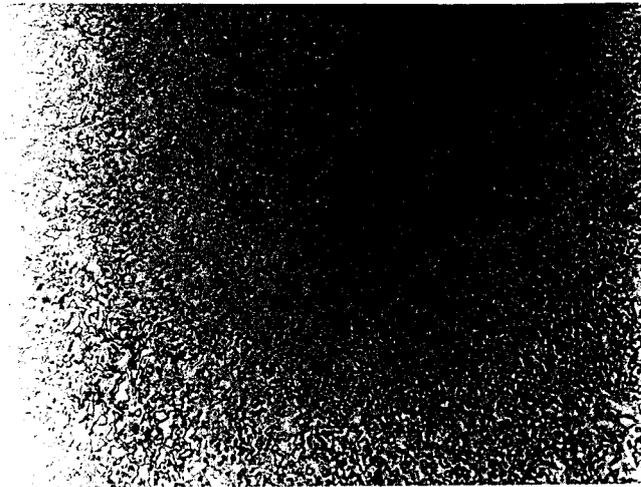
Gambar 5.1.a. Struktur mikro material awal
pembesaran 600X



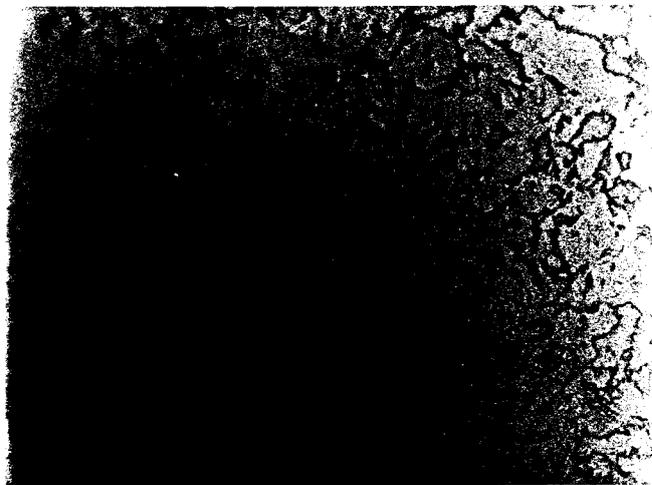
Gambar 5.2. Struktur mikro material A1
pembesaran 150X



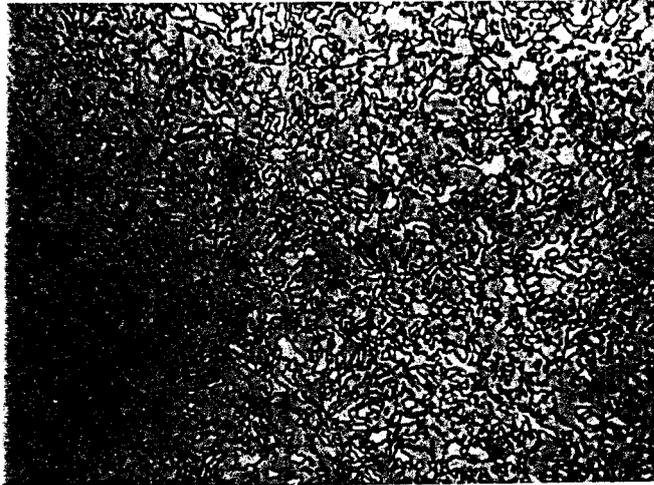
Gambar 5.2. a. Struktur mikro material A1
pembesaran 600X



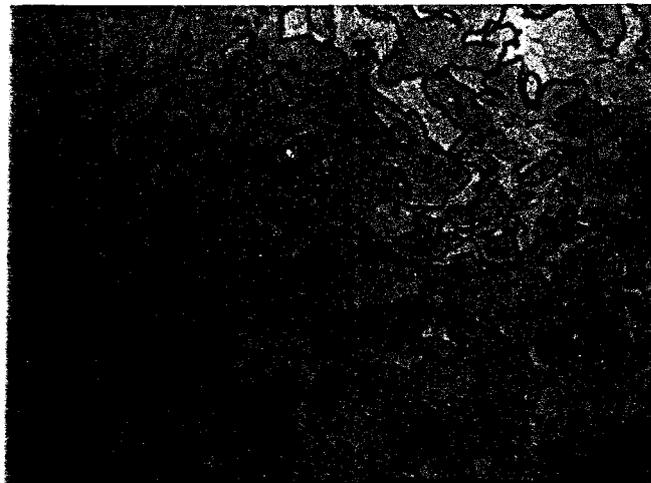
Gambar 5.3. Struktur mikro material A2
pembesaran 150X



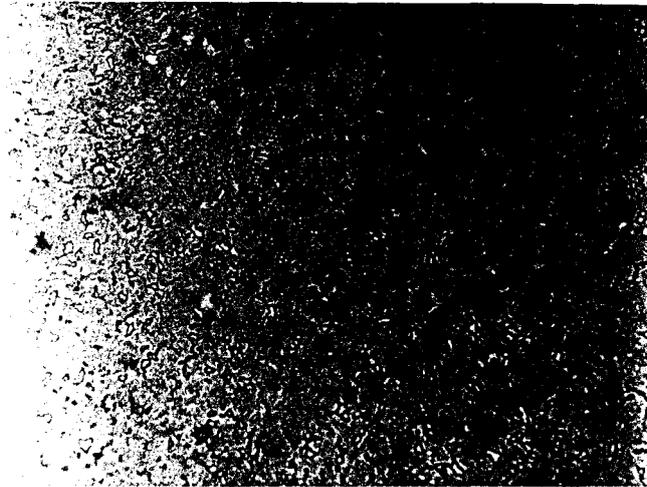
Gambar 5.3.a. Struktur mikro material A2
pembesaran 600X



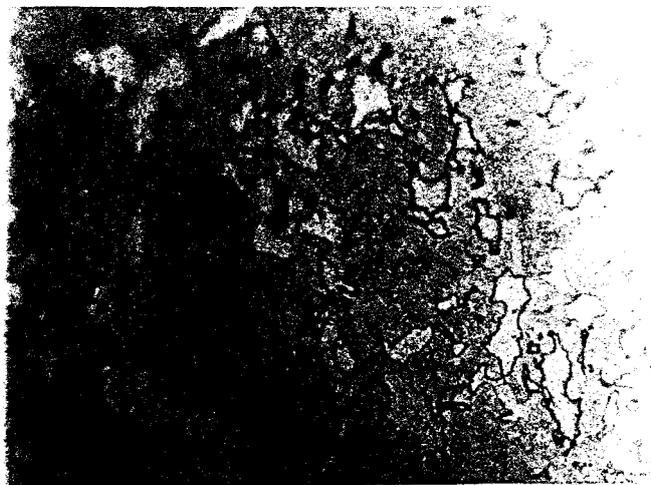
Gambar 5.4. Struktur mikro material A3
pembesaran 150X



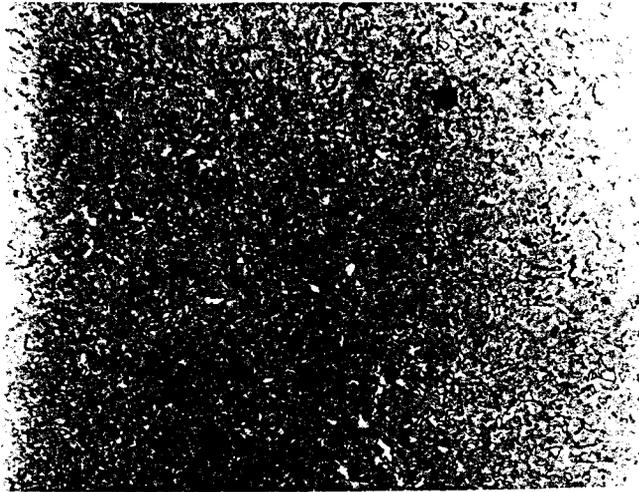
Gambar 5.4.a. Struktur mikro material A3
pembesaran 600X



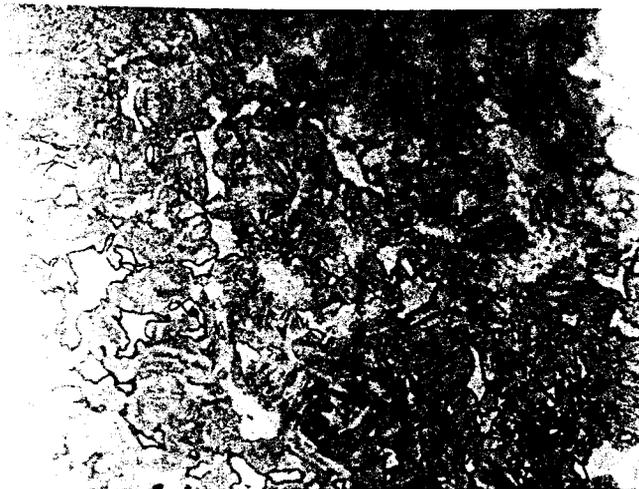
Gambar 5.5. Struktur mikro material B1
pembesaran 150X



Gambar 5.5.a. Struktur mikro material B1
pembesaran 150X



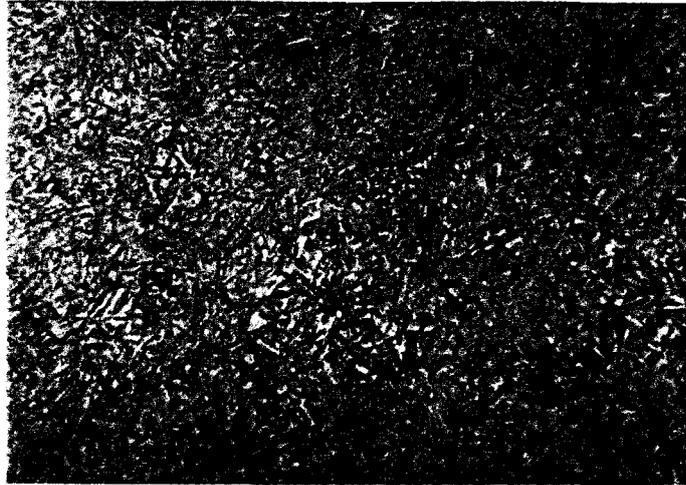
Gambar 5. 6. Struktur mikro material B2
pembesaran 150X



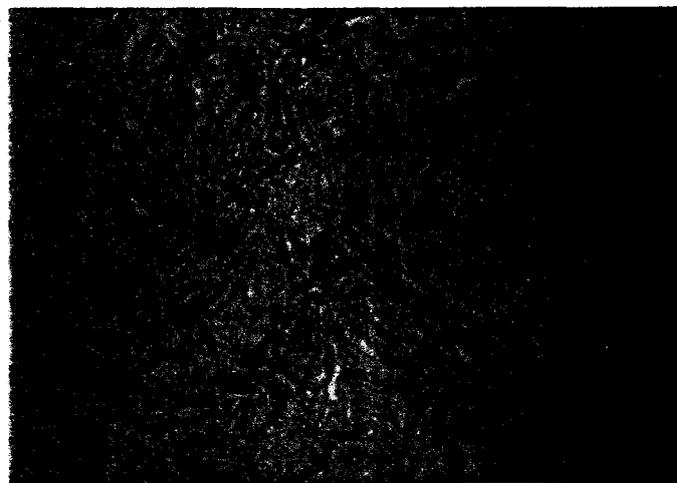
Gambar 5. 6. a. Struktur mikro material B2
pembesaran 150X



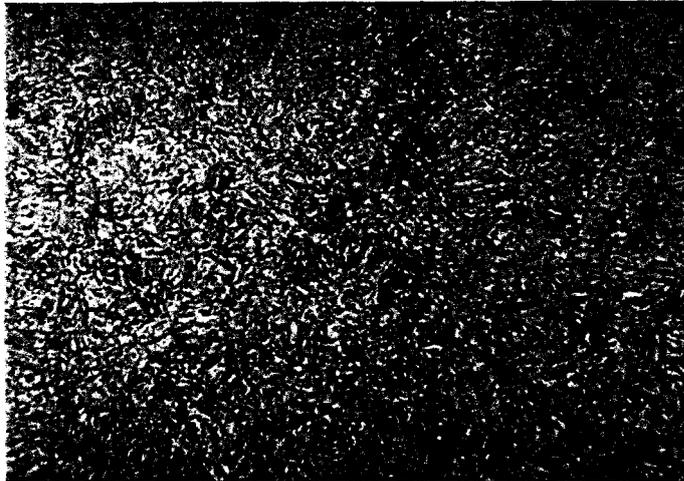
Gambar 5. 7. 1. Struktur mikro material B3
pembesaran 600X



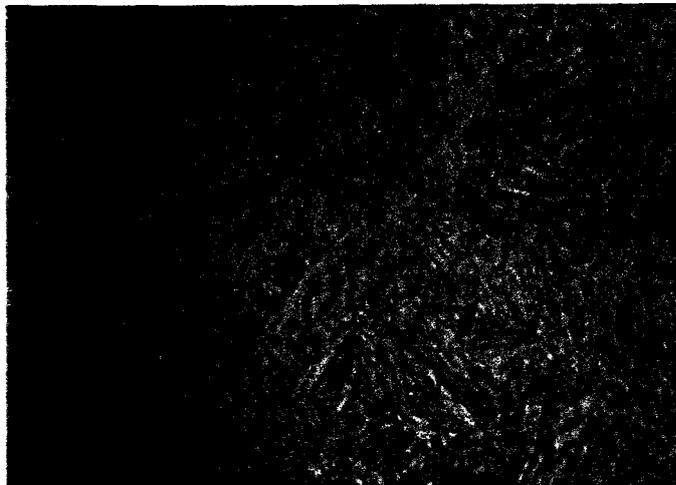
Gambar 5.8. Struktur mikro material C1
pembesaran 150X



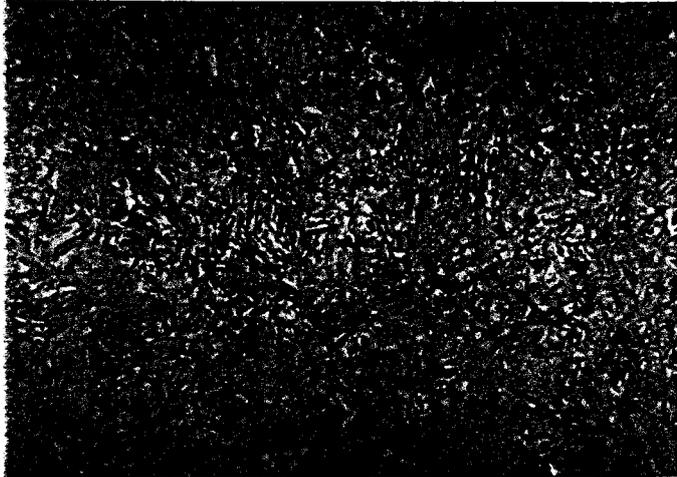
Gambar 5.8.a. Struktur mikro material C1
pembesaran 600X



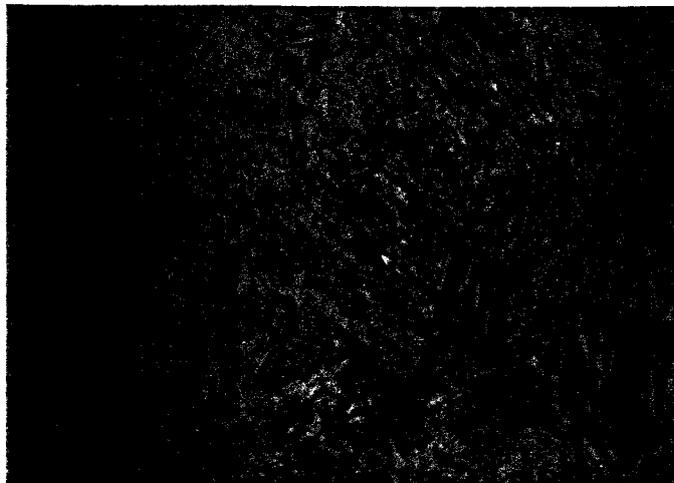
Gambar 5.9. Struktur mikro material C2
pembesaran 150X



Gambar 5.9.a. Struktur mikro material C2
pembesaran 600X



Gambar 5.10. Struktur mikro material C3
pembesaran 150X



Gambar 5.10.a. Struktur mikro material C3
pembesaran 600X

5.2. DATA PENGUJIAN KEKERASAN

Pengujian kekerasan dilakukan sesuai dengan prosedur uji kekerasan point 4.5. dan ditabelkan pada lampiran 1 - 4. Pada tabel I. disajikan rangkuman hasil uji kekerasan.

Tabel I. Rangkuman hasil uji kekerasan.

SPESIMEN	TEMPERATUR (°C)	HOLDING TIME (JAM)	KEKERASAN (HV)
A ₁	735	1/2	367,2
A ₂	735	1	467,4
A ₃	735	1 1/2	522
B ₁	760	1/2	657,2
B ₂	760	1	671,4
B ₃	760	1 1/2	685,6
C ₁	785	1/2	722
C ₂	785	1	715,2
C ₃	785	1 1/2	710,8
D ₁	810	1/2	743
D ₂	810	1	733,2
D ₃	810	1 1/2	724,8
awal			245

5.3. DATA PENGUJIAN KEKUATAN TARIK

Pengujian kekuatan tarik dilakukan sesuai dengan prosedur pengujian kekuatan tarik point 4.6. Hasil pengujian ditabelkan pada lampiran 5 - 7. Dibawah ini disajikan rangkuman hasil pengujian kekuatan tarik masing-masing spesimen.

Spesimen awal

$$\sigma_y = 86,47 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_u = 86,891 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{Elongation} = 16\%$$



Gambar 5.11. kurva P-ΔL spesimen awal

Spesimen A1

$$\sigma_y = 108,99 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_u = 109,82 \text{ Kg/mm}^2$$

Elongation = 9%



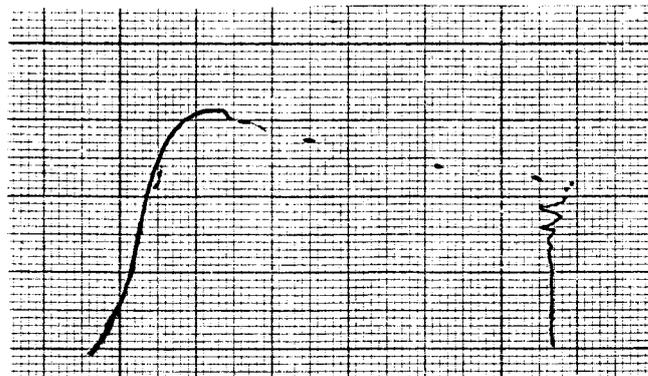
Gambar 5.12. kurva P- Δ L spesimen A1

Spesimen A2

$$\sigma_y = 104,07 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_u = 104,89 \text{ Kg/mm}^2$$

Elongation = 13%



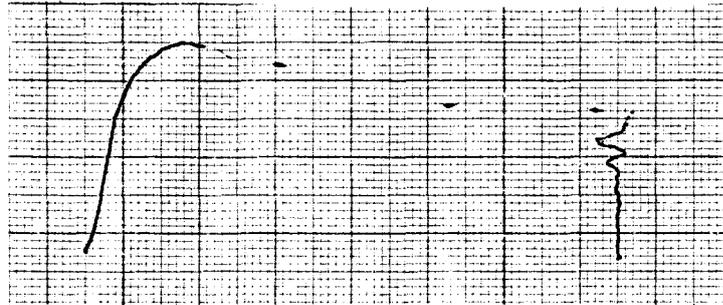
Gambar 5.13. kurva P- Δ L spesimen A2

Spesimen A3

$$\sigma_y = 72,11 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_u = 72,94 \text{ Kg/mm}^2$$

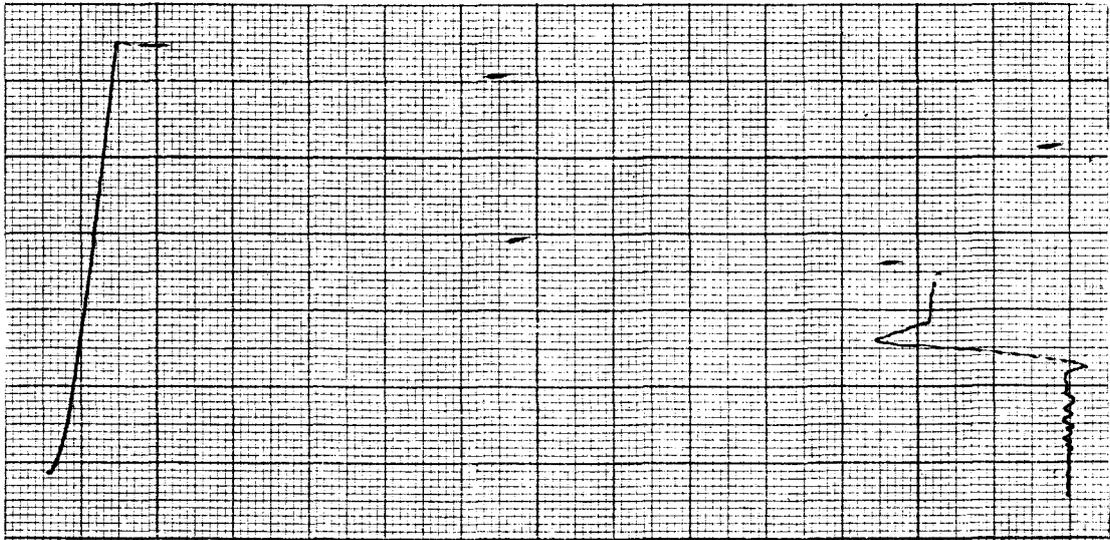
Elongation = 18%



Gambar 5.14. kurva P- Δ L spesimen A3

Spesimen B1

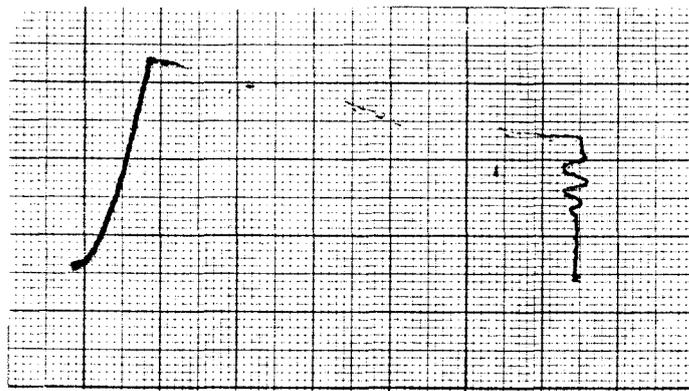
$$\sigma_u = 146,43 \text{ Kg/mm}^2$$



Gambar 5.15. kurva P- Δ L spesimen B1

Spesimen B2

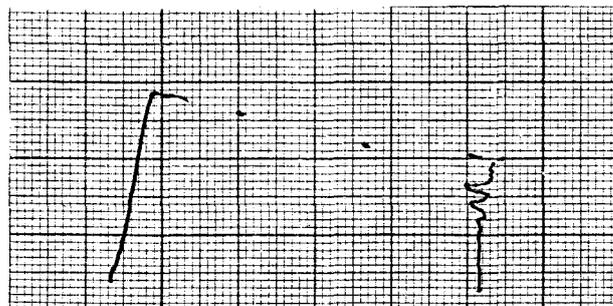
$$\sigma_u = 81,694 \text{ Kg/mm}^2$$



Gambar 5.16. kurva P-ΔL spesimen B2

Spesimen B3

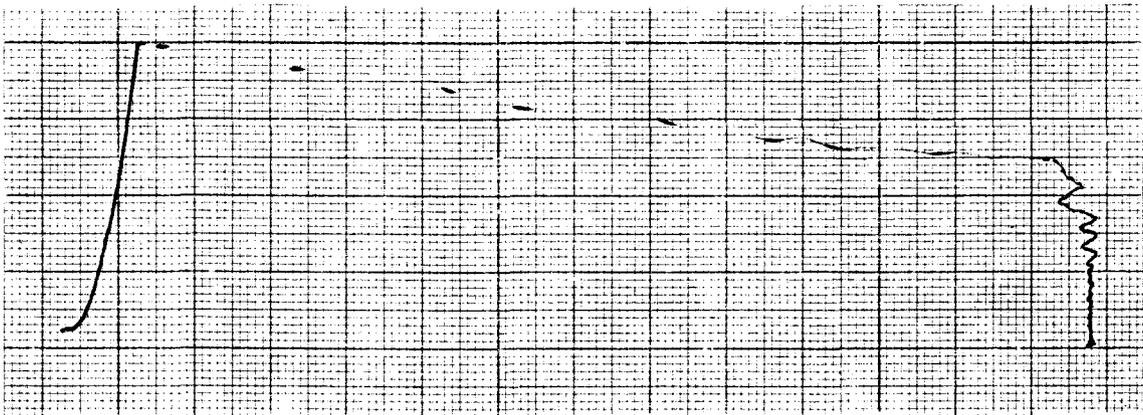
$$\sigma_u = 67,89 \text{ Kg/mm}^2$$



Gambar 5.17. kurva P-ΔL spesimen B3

Spesimen C₁

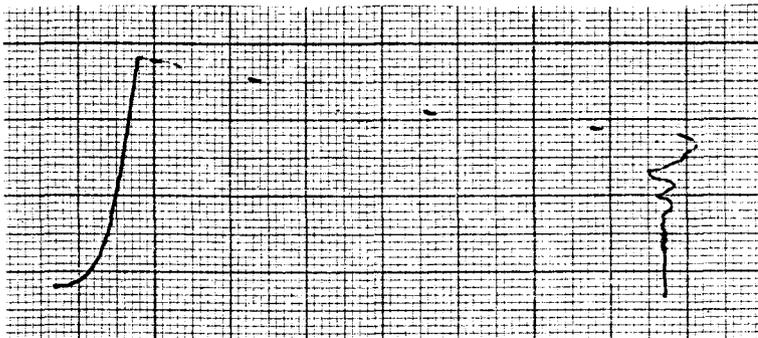
$$\sigma_u = 101,27 \text{ Kg/mm}^2$$



Gambar 5.18. kurva P-ΔL spesimen C1

Spesimen C₂

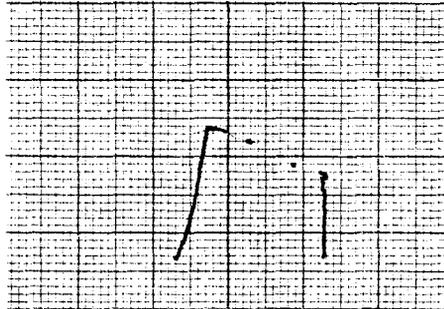
$$\sigma_u = 73,59 \text{ Kg/mm}^2$$



Gambar 5.19. kurva P-ΔL spesimen C2

Spesimen C3

$$\sigma_u = 50,73 \text{ Kg/mm}^2$$



Gambar 5.20. kurva P-ΔL spesimen C3



BAB VI ANALISA DATA

6.1. ANALISA STRUKTUR MIKRO

Struktur mikro awal baja karbon medium dari hasil pengamatan adalah 45% ferrite dan 55% pearlite (gambar 4.1.). Dari perhitungan dengan mempergunakan diagram kesetimbangan Fe - Fe₃C akan didapat kandungan karbon dari material sebesar :

$$\% \text{ Pearlite} = \frac{\%C - 0,008}{0,8 - 0,008} \times 100\%$$

$$\%C = \frac{\% \text{ Pearlite} \times [0,8 - 0,008]}{100\%} + 0,008$$

$$C = \frac{55\% \times [0,8 - 0,008]}{100\%} + 0,008 = 0.4436\%$$

Dari hasil pengamatan dan perhitungan didapat kandungan karbon pada material adalah 0,4436% dan ini sudah sesuai dengan data spesifikasi spesimen yaitu 0,45% karbon

Pada spesimen dengan pemanasan 735°C dan penahanan 1/2 jam (gambar 4.2.) hanya sedikit pearlite yang bertransformasi menjadi austenite dan sisanya belum mengalami transformasi. Hal ini terjadi karena laju pemanasan tidak sesuai dengan kondisi equilibrium sehingga

temperatur A_{c1} bergeser keatas dan penahanan kurang lama sehingga transformasi pearlite belum terjadi dengan sempurna. Untuk waktu penahanan 1 jam (gambar 4.3.), terlihat hampir semua pearlite bertransformasi menjadi austenite. Penahanan dilanjutkan sampai 1 1/2 jam (gambar 4.4.), semua pearlite dan sekitar 10% ferrite bertransformasi menjadi austenite. Bila dicelup air akan terbentuk martensite dengan komposisi kira-kira 65% martensite dan 35% ferrite. Perkiraan ini diambil berdasarkan foto struktur mikronya. Dari perhitungan secara teoritis dengan mempergunakan diagram kesetimbangan Fe - Fe_3C (lampiran 6) bila transformasi sudah terjadi dengan sempurna didapat:

$$\begin{aligned}\text{Ferrite} &= \frac{0,7 - 0,45}{0,7 - 0,02} \times 100\% \\ &= 37\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Austenite} &= \frac{0,45 - 0,02}{0,7 - 0,02} \times 100\% \\ &= 63\%\end{aligned}$$

Pemanasan dilanjutkan sampai temperatur 760°C dan ditahan selama 1/2 jam (gambar 4.5.), semua pearlite habis bertransformasi menjadi austenite dan masih tersisa sekitar 20 % ferrite. Bila penahanan dilanjutkan selama 1/2 jam dan

1 1/2 jam sudah tidak terjadi transformasi lagi.

Dari perhitungan didapat:

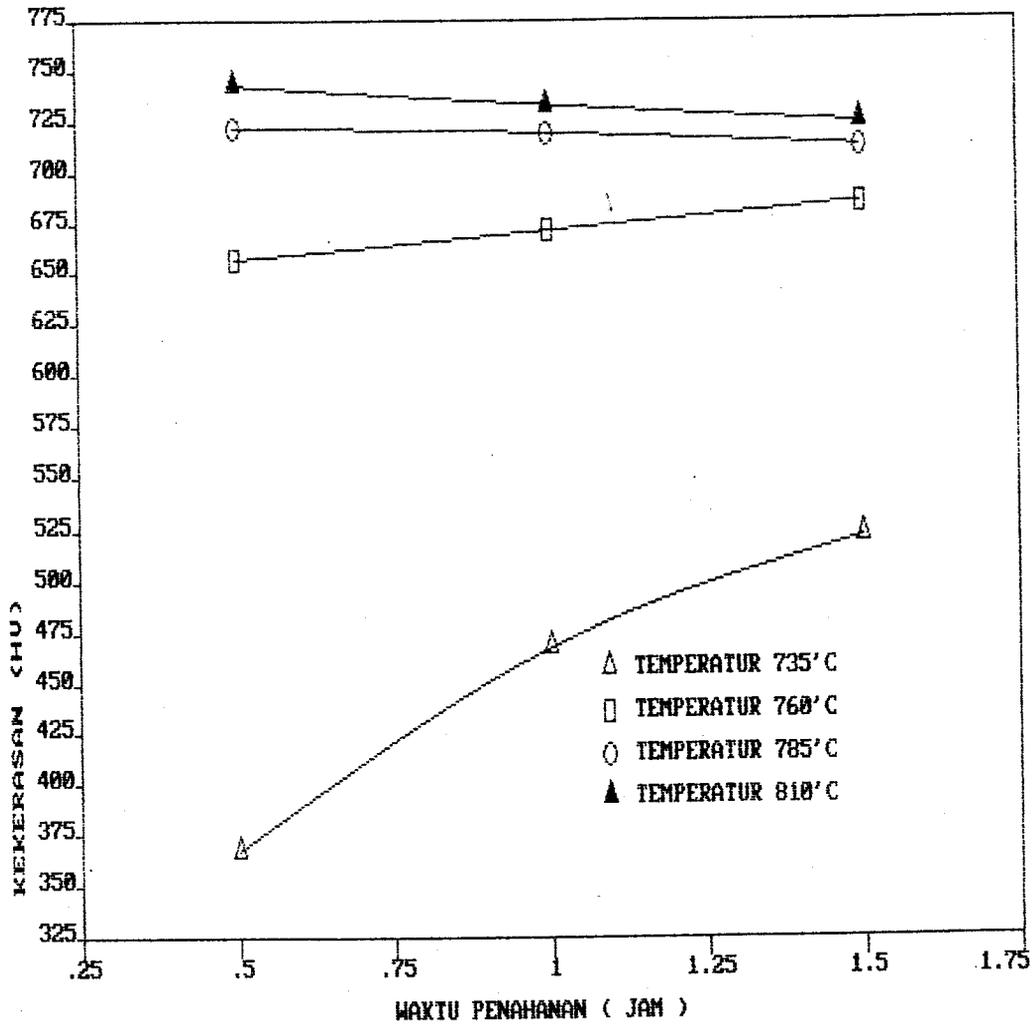
$$\begin{aligned}\text{Ferrite} &= \frac{0,56 - 0,45}{0,56 - 0,015} \times 100\% \\ &= 20\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Austenite} &= \frac{0,45 - 0,015}{0,56 - 0,015} \times 100\% \\ &= 80\%\end{aligned}$$

Pada temperatur 785°C holding time 1/2 jam (gambar 4.8.), seluruh ferrite dan pearlite telah habis bertransformasi menjadi austenite. Bila penahanan dilanjutkan sampai 1 jam (gambar 4.9.) dan 1 1/2 jam (gambar 4.10.) sudah tidak terjadi perubahan.

6.2. ANALISA KEKERASAN

Dari kurva pengaruh temperatur dan holding time terhadap kekerasan (gambar 6.1.) terlihat adanya kenaikan kekerasan dengan adanya kenaikan temperatur. Untuk pemanasan 735°C waktu penahanan yang lebih lama (1 1/2 jam) akan menaikkan kekerasan Hal ini dapat dijelaskan dari pengamatan struktur mikronya, dimana pada penahanan 1/2 jam pearlite belum habis bertransformasi. Dengan adanya penahanan yang cukup lama maka pearlite mempunyai waktu untuk bertransformasi menjadi austenite.



Gambar 6.1. Pengaruh temperatur dan holding time terhadap kekerasan

Untuk pemanasan 760°C dan 785°C penahanan yang melebihi 1/2 jam sudah tidak berpengaruh terhadap kekerasan. Hal ini

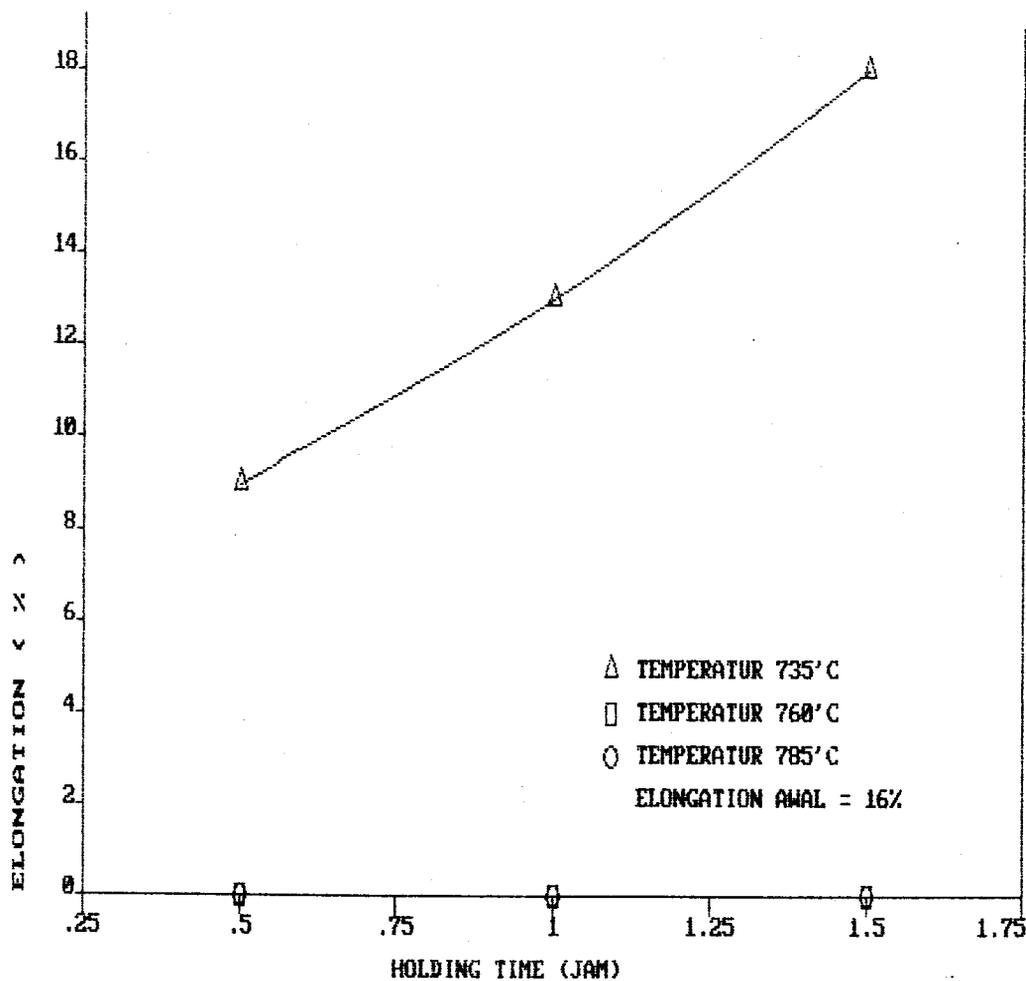
karena pada penahanan 1/2 jam sudah terjadi kesetimbangan sehingga transformasi tidak terjadi lagi .

Kekerasan naik karena kenaikan temperatur pemanasan sebab kenaikan temperatur menyebabkan makin banyaknya ferrite yang berubah menjadi austenite, bila dicelup air akan membentuk martensite yang lebih banyak sehingga kekerasannya bertambah.

6.3. ANALISA UJI TARIK

Dari kurva pengaruh waktu penahanan dan temperatur pemanasan terhadap perpanjangan (gambar 6.2.) untuk spesimen dengan pemanasan pada temperatur 735°C, didapat perpanjangan yang paling baik pada waktu penahanan 1 1/2 jam yaitu sekitar 18%. Jadi lebih baik sekitar 2% dari spesimen awal (16%). Hal ini disebabkan karena ferrite yang terbentuk pada fase ganda ini mempunyai derajat deformasi yang lebih tinggi dari baja konvensional.

Untuk temperatur pemanasan 760°C dan 785°C tidak terjadi perpanjangan dan adanya penurunan kekuatan tarik yang sangat menyolok. Penurunan kekuatan tarik ini terjadi karena retaknya spesimen uji tarik akibat laju pendinginan yang terlalu tinggi, sehingga tidak diperlukan beban yang besar untuk memutuskan spesimen.



Gambar 6.2. pengaruh holding time dan temperatur pemanasan terhadap perpanjangan

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. KESIMPULAN

Pada temperatur penahanan 735°C diperlukan waktu penahanan sekitar 1 1/2 jam untuk tercapainya kesetimbangan. Hal ini karena bergesernya garis A_{c1} keatas akibat laju pemanasan melebihi kondisi equilibrium, sehingga pearlite perlu waktu yang lebih lama untuk bertransformasi menjadi austenite.

Pada temperatur 760°C dan 785°C waktu penahanan yang 1/2 jam sudah memadai untuk transformasi pearlite menjadi austenite. Hal ini ditandai dengan tidak adanya kenaikan kekerasan yang berarti setelah di quenching.

Kenaikan temperatur pada daerah fase ganda ini berpengaruh pada transformasi ferrite menjadi austenite, dimana makin tinggi temperaturnya makin banyak ferrite yang bertransformasi menjadi austenite sehingga martensite yang terbentuk waktu pencelupan semakin banyak.

Pada baja fase ganda karbon medium ini hanya pada temperatur 735°C didapat material dengan sifat yang cukup baik, yaitu naiknya kekerasan yang cukup tinggi dengan keuletan yang tetap dengan melakukan sekali proses laku panas. Sedangkan pada temperatur 760°C dan 785°C material sudah bersifat getas dan adanya keretakan pada spesimen uji.

7.2. SARAN

Untuk menghindari retak waktu pencelupan, sebaiknya menggunakan media pendingin dengan laju pendinginan yang lebih kecil.

Jika diinginkan material dengan keuletan yang lebih tinggi, maka usahakan agar jumlah ferrite lebih banyak dari martensite yang terbentuk.

Agar didapat kombinasi ferrite dan martensite yang lebih bervariasi sebaiknya digunakan baja dengan kandungan karbon yang lebih rendah.

DAFTAR PUSTAKA

1. Fundamental of heat treatment, by Hein, Robert, Wisconsin university, Madison.
2. Steel and its heat treatment, Karl - Erik Thelning, Second edition 1984.
3. Prinsip-prinsip perlakuan panas, Ir. Wahid Suherman, Teknik Mesin ITS, surabaya.
4. The physical metallurgy off steels, William C. Leslie, University of Michigan.
5. Ilmu dan teknologi bahan, edisi kelima, Lawrence H. Van Vlack, Sriati Djaprie, 1991.
6. Metallurgi mekanik, edisi ketiga, George E. Dieter, Sriati Djaprie, 1987.

Tabel II. Data hasil uji kekerasan.

SPEKIMEN	DIAGONAL (μm) ($d_1 - d_2$)	DIAGONAL RATA - RATA	KEKERASAN
A ₁	0,44 - 0,45	0,445	375
	0,45 - 0,455	0,4525	363
	0,45 - 0,45	0,45	366
	0,45 - 0,45	0,45	366
	0,445 - 0,455	0,455	366
A ₂	0,40 - 0,40	0,40	464
	0,405 - 0,405	0,405	452
	0,40 - 0,405	0,40	464
	0,395 - 0,395	0,395	475
	0,395 - 0,39	0,3925	482
A ₃	0,38 - 0,38	0,38	514
	0,37 - 0,38	0,375	527
	0,38 - 0,375	0,3775	521
	0,375 - 0,375	0,375	527
	0,375 - 0,38	0,3775	521

Tabel III. Data hasil uji kekerasan.

SPEKIMEN	DIAGONAL (μm) ($d_1 - d_2$)	DIAGONAL RATA - RATA	KEKERASAN
B ₁	0,335 - 0,33	0,3325	671
	0,335 - 0,34	0,3375	651
	0,335 - 0,335	0,3375	651
	0,33 - 0,33	0,33	681
	0,345 - 0,34	0,3425	632
B ₂	0,325 - 0,325	0,325	702
	0,33 - 0,33	0,335	681
	0,335 - 0,34	0,3375	651
	0,34 - 0,34	0,345	642
	0,33 - 0,33	0,33	681
B _a	0,335 - 0,335	0,335	661
	0,33 - 0,335	0,3375	651
	0,325 - 0,325	0,324	702
	0,325 - 0,325	0,325	702
	0,33 - 0,325	0,3275	692

Tabel IV. Data hasil uji kekerasan.

SPESIMEN	DIAGONAL (μm) ($d_1 - d_2$)	DIAGONAL RATA - RATA	KEKERASAN
C ₁	0,32 - 0,32	0,32	724
	0,32 - 0,325	0,3225	713
	0,32 - 0,32	0,32	724
	0,315 - 0,32	0,3175	736
	0,32 - 0,325	0,3225	713
C ₂	0,32 - 0,325	0,3225	713
	0,325 - 0,325	0,325	702
	0,32 - 0,325	0,3225	713
	0,32 - 0,32	0,32	724
	0,32 - 0,32	0,32	724
C ₃	0,325 - 0,325	0,33	702
	0,325 - 0,32	0,3225	713
	0,32 - 0,325	0,3225	713
	0,325 - 0,325	0,33	702
	0,32 - 0,32	0,32	724

Tabel V. Data hasil uji kekerasan.

SPESIMEN	DIAGONAL (μm) ($d_1 - d_2$)	DIAGONAL RATA - RATA	KEKERASAN
D ₁	0,315 - 0,315	0,315	747
	0,325 - 0,325	0,325	702
	0,31 - 0,31	0,31	772
	0,315 - 0,315	0,315	747
	0,315 - 0,315	0,315	747
D ₂	0,32 - 0,32	0,32	724
	0,315 - 0,315	0,315	747
	0,32 - 0,32	0,32	724
	0,315 - 0,315	0,315	747
	0,32 - 0,32	0,32	724
D ₃	0,32 - 0,32	0,32	724
	0,315 - 0,15	0,15	747
	0,32 - 0,32	0,32	724
	0,325 - 0,325	0,325	702
	0,32 - 0,32	0,32	724

Tabel VI. Data hasil uji kekuatan tarik.

STANDARD PENGUJIAN	JIS Z 2241
STANDARD SPECIMEN	JIS Z 2201
KODE SPESIMEN/BAHAN	AWAL
UKURAN SPECIMEN (\emptyset mm)	12,5
LUAS PENAMPANG (A_0 mm ²)	122,72
GAUGE LENGTH (L_0 mm)	50
PANJANG SPESIMEN (L_t mm)	290
BEBAN LUMER (P_y KN)	104
BEBAN MAXIMUM (P_u KN)	104,5
PANJANG SETELAH PATAH (L_1 mm)	58
L PLASTIS (ΔL mm)	8
YIELD STRENGTH (σ_y Kg/mm)	86,47
TENSILE STRENGTH (σ_u Kg/mm)	86,891
ELONGATION (%)	16

Tabel VII. Data hasil uji kekuatan tarik.

STANDARD PENGUJIAN	JIS Z 2241		
STANDARD SPECIMEN	JIS Z 2201		
KODE SPESIMEN/BAHAN	A ₁	A ₂	A ₃
UKURAN SPECIMEN (Ø mm)	12,52	12,69	12,52
LUAS PENAMPANG (A ₀ mm)	123,11	126,48	123,11
GAUGE LENGTH (L ₀ mm)	50	50	50
PANJANG SPESIMEN (L _t mm)	290	290	290
BEBAN LUMER (P _y KN)	131,5	129	87
BEBAN MAXIMUM (P _u KN)	132,5	130	88
PANJANG SETELAH PATAH (L ₁ mm)	54,5	56,5	59
L PLASTIS (ΔL mm)	4,5	6,5	9
YIELD STRENGTH (σ _y Kg/mm)	108,99	104,07	72,11
TENSILE STRENGTH (σ _u Kg/mm)	109,82	104,89	72,94
ELONGATION (%)	9	13	18

Tabel VIII. Data hasil uji kekuatan tarik.

STANDARD PENGUJIAN	JIS Z 2241		
STANDARD SPECIMEN	JIS Z 2201		
KODE SPESIMEN/BAHAN	B ₁	B ₂	B ₃
UKURAN SPECIMEN (Ø mm)	12,69	12,5	12,45
LUAS PENAMPANG (A ₀ mm)	126,48	122,72	121,74
GAUGE LENGTH (L ₀ mm)	50	50	50
PANJANG SPESIMEN (L _t mm)	290	290	290
BEBAN LUMER (P _y KN)			
BEBAN MAXIMUM (P _u KN)	181,5	98,25	81
PANJANG SETELAH PATAH (L ₁ mm)			
L PLASTIS (ΔL mm)			
YIELD STRENGTH (σ _y Kg/mm)			
TENSILE STRENGTH (σ _u Kg/mm)	146,43	81,694	67,89
ELONGATION (%)			

Tabel IX. Data hasil uji kekuatan tarik.

STANDARD PENGUJIAN		JIS Z 2241		
STANDARD SPECIMEN		JIS Z 2201		
KODE SPESIMEN/BAHAN		C ₁	C ₂	C ₃
UKURAN SPECIMEN	(\emptyset mm)	12,50	12,50	12,55
LUAS PENAMPANG	(A ₀ mm)	122,72	122,72	123,70
GAUGE LENGTH	(L ₀ mm)	50	50	50
PANJANG SPESIMEN	(L _t mm)	290	290	290
BEBAN LUMER	(P _y KN)			
BEBAN MAXIMUM	(P _u KN)	121,5	88,5	61,5
PANJANG SETELAH PATAH	(L ₁ mm)			
L PLASTIS	(Δ L mm)			
YIELD STRENGTH	(σ_y Kg/mm)			
TENSILE STRENGTH	(σ_u Kg/mm)	101,26	73,59	50,73
ELONGATION	(%)			

Tabel X. Tabel konversi kekerasan vickers (HV 40)

Vickers HV 40

F = 392,2 N \pm 40 kp

Diagonale mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,19	2055	2033	2012	1991	1970	1951	1931	1911	1892	1873
0,20	1854	1836	1818	1800	1782	1765	1748	1731	1715	1698
0,21	1682	1666	1650	1635	1620	1605	1590	1575	1561	1547
0,22	1533	1519	1505	1492	1478	1465	1452	1440	1427	1414
0,23	1402	1390	1378	1366	1355	1343	1331	1321	1310	1300
0,24	1288	1277	1267	1256	1246	1236	1226	1216	1206	1196
0,25	1187	1177	1168	1159	1150	1141	1132	1123	1114	1106
0,26	1097	1089	1081	1072	1064	1056	1048	1041	1033	1025
0,27	1018	1010	1003	995	988	981	974	966	960	953
0,28	946	939	933	926	920	913	907	901	894	888
0,29	882	876	870	864	858	852	847	841	835	830
0,30	824	819	813	808	803	797	792	787	782	777
0,31	772	767	762	757	752	747	743	738	734	729
0,32	724	720	715	711	707	702	698	694	690	685
0,33	681	677	673	669	665	661	657	653	649	645
0,34	642	638	634	630	627	623	620	616	613	610
0,35	606	602	599	595	592	589	585	582	579	576
0,36	572	569	566	563	560	557	554	551	548	545
0,37	542	539	536	533	530	527	525	522	519	516
0,38	514	511	508	506	503	500	498	495	493	490
0,39	488	485	483	480	478	475	473	471	468	466
0,40	464	461	459	457	454	452	450	448	446	443
0,41	441	439	437	435	433	431	429	427	425	423
0,42	421	419	417	415	413	411	409	407	405	403
0,43	401	399	397	396	394	392	390	388	387	385
0,44	383	381	380	378	376	375	373	371	370	368
0,45	366	364	363	362	360	358	357	355	354	352
0,46	351	349	348	346	345	343	342	340	339	337
0,47	336	334	333	332	330	329	327	326	325	323
0,48	322	321	319	318	317	315	314	313	312	310
0,49	309	308	306	305	304	303	302	300	299	298
0,50	297	296	294	293	292	291	290	288	287	286
0,51	285	284	283	282	281	280	279	278	276	275
0,52	274	273	272	271	270	269	268	267	266	265
0,53	264	263	262	261	260	259	258	257	256	255
0,54	254	253	253	252	251	250	249	248	247	246
0,55	245	244	243	243	242	241	240	239	238	237
0,56	237	236	235	234	233	232	232	231	230	229
0,57	228	228	227	226	225	224	224	223	222	221
0,58	221	220	219	218	218	217	216	215	214	214
0,59	213	212	212	211	210	209	209	208	207	207
0,60	206	205	205	204	203	203	202	201	201	200
0,61	199	199	198	197	197	196	195	195	194	194
0,62	193	192	192	191	191	190	189	189	188	187
0,63	187	186	186	185	185	184	183	183	182	182
0,64	181	181	180	179	179	179	178	177	177	176
0,65	176	175	174	174	173	173	172	172	171	171
0,66	170	170	169	169	168	168	167	167	166	166

Tabel XI. Tabel konversi kekerasan vickers (HV 50)

Vickers HV 50

F = 490,2 N \cong 50 kp

Diagonale mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,21	2103	2083	2063	2044	2025	2005	1987	1969	1951	1933
0,22	1916	1899	1881	1865	1848	1832	1815	1799	1784	1768
0,23	1753	1738	1723	1708	1693	1679	1665	1651	1637	1624
0,24	1610	1596	1583	1570	1557	1545	1532	1520	1508	1495
0,25	1484	1472	1460	1449	1437	1426	1415	1404	1393	1382
0,26	1372	1361	1351	1341	1330	1320	1310	1301	1291	1281
0,27	1272	1263	1253	1244	1235	1226	1217	1208	1200	1191
0,28	1183	1174	1166	1158	1150	1142	1134	1126	1118	1110
0,29	1103	1095	1087	1080	1073	1065	1058	1051	1044	1037
0,30	1030	1023	1017	1010	1003	997	990	984	977	971
0,31	965	959	953	946	940	934	929	922	917	911
0,32	905	900	894	889	883	878	872	867	862	857
0,33	851	846	841	836	831	826	821	816	812	807
0,34	802	797	793	788	784	779	775	770	766	762
0,35	757	753	748	744	740	736	732	728	724	719
0,36	715	711	708	704	700	696	692	688	685	681
0,37	677	674	670	666	663	659	656	652	649	646
0,38	642	639	635	632	629	626	622	619	616	613
0,39	610	607	603	600	597	594	591	588	585	582
0,40	580	577	574	571	568	565	563	560	557	554
0,41	552	549	546	544	541	538	536	533	531	529
0,42	526	523	521	518	516	513	511	509	506	504
0,43	502	499	497	495	493	490	488	486	483	481
0,44	479	477	475	473	470	468	466	464	462	460
0,45	458	456	454	452	450	448	446	444	442	440
0,46	438	436	434	433	431	429	427	425	423	422
0,47	420	418	416	414	413	411	409	408	406	404
0,48	402	401	399	397	396	394	393	391	389	388
0,49	386	385	384	382	380	378	377	375	374	372
0,50	371	369	368	367	365	364	362	361	360	358
0,51	357	355	354	352	351	350	348	347	346	344
0,52	343	342	340	339	338	336	335	334	333	331
0,53	330	329	328	326	325	324	323	322	320	319
0,54	318	317	316	315	313	312	311	310	309	308
0,55	307	305	304	303	302	301	300	299	298	297
0,56	296	295	294	293	292	290	289	288	287	286
0,57	285	284	283	282	281	280	279	279	278	277
0,58	276	275	274	273	272	271	270	269	268	267
0,59	266	266	265	264	263	262	261	260	259	258
0,60	258	257	256	255	254	253	253	252	251	250
0,61	249	248	248	247	246	245	244	244	243	242
0,62	241	240	240	239	238	237	237	236	235	234
0,63	234	233	232	231	231	230	229	229	228	227
0,64	226	226	225	224	224	223	222	221	221	220
0,65	220	219	218	217	217	216	216	215	214	214
0,66	213	212	212	211	210	210	209	208	208	207
0,67	207	206	205	205	204	204	203	202	202	201
0,68	201	200	199	199	198	198	197	196	196	195
0,69	195	194	194	193	193	192	191	191	190	190