



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH TEMPERATUR AUSTENISASI DAN
WAKTU TAHAN TERHADAP PERUBAHAN UKURAN
BUTIR DAN KEKERASAN PADA BAJA HSLA A 572 GRADE**

50

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ISWANTO

0706268612

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun diujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Iswanto

NPM : 0706268612

Tanda Tangan : 

Tanggal : 30 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Iswanto

NPM : 0706268612

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul Skripsi : Pengaruh Temperatur Austenisasi dan Waktu Tahan Terhadap
Perubahan Ukuran Butir dan Kekerasan Pada Baja HSLA A572
Grade 50

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir Dedi Priadi, DEA



Penguji 1 : Ir Rini Riastuti, M.Sc

()

Penguji 2 : Dr. Ir Myrna Ariati, M.S

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis sampaikan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulisan skripsi ini dapat diselesaikan sesuai dengan waktu yang telah direncanakan. Adapun tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk memenuhi persyaratan dalam mencapai gelar Sarjana Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak akan dapat diselesaikan dengan baik tanpa adanya bantuan, bimbingan dan dorongan baik moral maupun materiil dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Dedi Priadi DEA, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, dorongan, serta motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Seluruh dosen dan staf pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.
3. Bapak Richard A.M Napitupulu yang telah memberikan topik, bantuan serta saran yang membantu selama penelitian ini.
4. Ibu dan kedua kakak terima kasih atas do'a, cinta, kasih sayang, motivasi, serta dukungan moril yang telah diberikan kepada penulis.
5. Rekan satu Tim Penelitian dan Tugas Akhir yaitu Riyan N dan Diwang K
6. Teman-teman metal 07 yang tidak cukup untuk disebutkan namanya satu per satu, terima kasih atas kebersamaannya selama 4 tahun dan semoga dapat terus berlanjut.
7. Serta semua pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung yang telah membantu penulis namun tidak bisa penulis disebutkan satu persatu

Depok, Juni 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Iswanto
NPM : 0706268612
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Nonexclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pengaruh Temperatur Austenisasi Terhadap Perubahan Ukuran Butir dan Kkerasan Baja HSLA A572 Grade 50

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 30 Juni 2010

Yang menyatakan



(Iswanto)

ABSTRAK

Nama : Iswanto
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Temperatur Austenisasi dan Waktu Tahan Terhadap Perubahan Ukuran Butir dan Kekerasan pada Baja HSLA A 572 Grade 50

Material yang digunakan sebagai bahan struktural haruslah memiliki kekuatan luluh yang tinggi, kemampuan las yang baik dan kekuatan yang tinggi. Sehingga selama pemakaian dan perlakuan lainnya mampu berjalan maksimal. Penelitian ini dilakukan agar kita dapat mengetahui sifat-sifat baja HSLA setelah perlakuan panas, seperti perubahan sifat mekanik dari material baja dan perubahan mikrostrukturnya. Baja HSLA direheating pada temperatur, waktu tahan dan media pendingin yang berbeda, yaitu 900⁰C dan 1000⁰C, dengan tanpa waktu tahan dan waktu tahan 5, 20 dan 40 menit dengan menggunakan media pendingin air dan udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama waktu tahan maka austenit prior yang terbentuk akan semakin besar, dimana presentase bertambahnya ukuran butir austenit berada pada kisaran 9 sampai 11%. Sedangkan temperatur dan waktu tahan yang berbeda tidaklah berpengaruh terhadap ukuran butir ferit. Namun terjadi perbedaan atau perubahan pada baja sebelum dan sesudah reheating, namun hanya pada reheating 1000⁰C saja, dimana ukuran butir ferit mengalami perbesaran sampai 25-35%. Sedangkan untuk kekerasan, proses reheating yang dilakukan tidaklah berpengaruh terhadap perubahan kekerasannya.

Kata kunci: Baja HSLA, Reheating, Besar Butir Ferit dan Austenit

ABSTRACT

Name : Iswanto
Major : Metallurgy and Material Engineering
Title : The Effect of Austenitization Temperature and Holding Time of Change of Grain Size and Hardness on the HSLA Steel A 572 grade 50

Material used in structural application should exhibit high yield strength, good weld ability and high strength, thus it can show good performance during its applications. The aim of this research is to understand the properties of HSLA steels after heat treatment, such as changes in mechanical properties and microstructure. HSLA steel was reheated on different temperature, holding time and cooling medium, which were at 900°C and 1000°C, with no holding time and holding time 5, 20 and 40 minutes, and with water cooled and air cooled condition. The results showed that the longer the holding time, the bigger the size of prior austenite formed where the percentage of increasing of austenite grain size is in range 9 to 11%. While different on temperature and holding time showed less effect in change of ferrite grain size. But there is such a difference or change in the HSLA steel before and after reheating, particularly when reheated at 1000°C, where the grain size of ferrite having a magnification up to 25-35%. Further, reheating process applied did not affect hardness of HSLA materials

Key words: HSLA Steel, reheating, ferrite and austenite grains size

DAFTAR ISI

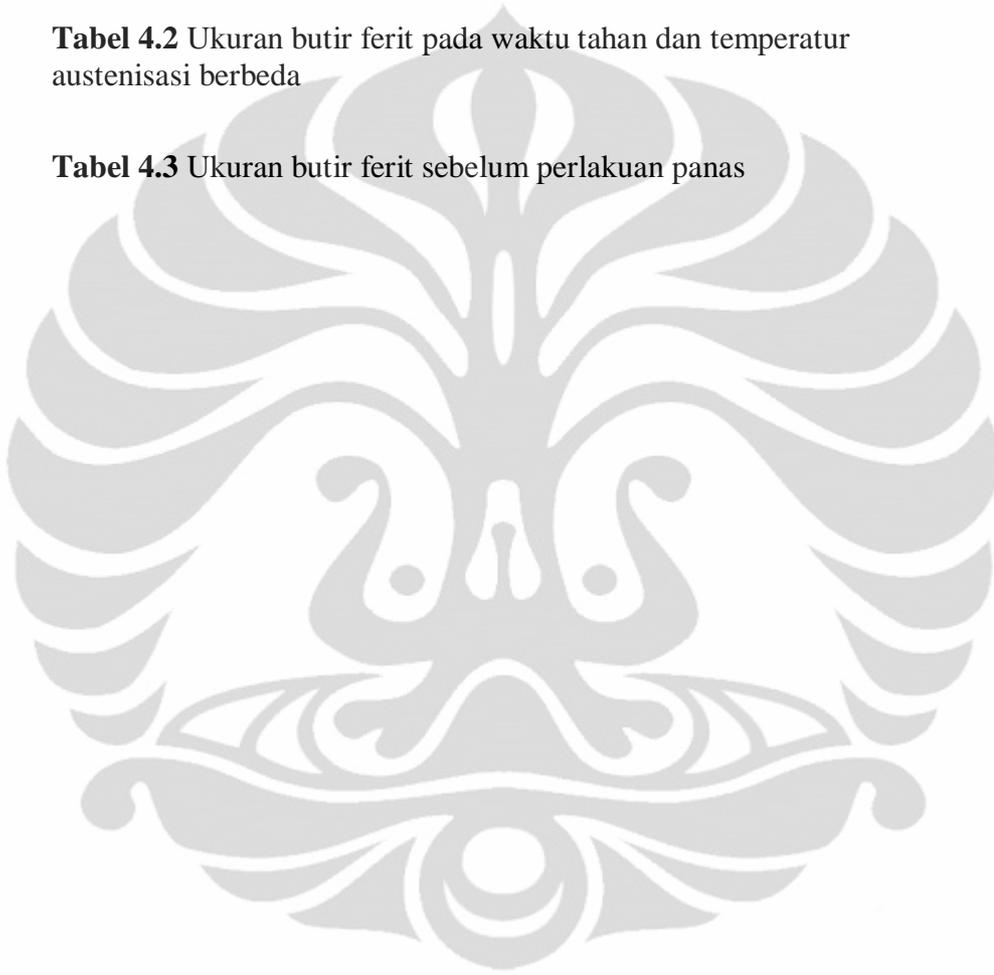
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	2
1.4 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Baja <i>High Strength Low Alloy Steel</i> (HSLA)	5
2.2 Mekanisme Penguatan Pada Baja HSLA	6
2.2.1 Penghalusan Butir Ferit	7
2.2.2 Penguatan Presipitat	10
2.2.3 Baja HSLA Nb	11
2.3 Pengaruh Unsur Paduan	12
2.4 Transformasi Fasa	17
2.4.1 Transformasi Transformasi fasa ferit + perlit ke fasa austenite setelah <i>reheating</i>	17
2.4.2 Transformasi Austenit – Ferit	17
2.5 Pertumbuhan Butir	18
2.5.1 Pertumbuhan Butir Austenit	18
2.5.2 Nukleasi dan Pertumbuhan Butir Ferit	21
2.6 Pengaruh Waktu Terhadap Butir Austenit dan Ferit	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian	25
3.2 Bahan Penelitian	25
3.2.1 Alat	26
3.2.1 Bahan	26
3.3 Prosedur Penelitian	
3.3.1 Proses Pemanasan Ulang (<i>Re-heating</i>) dan Pendinginan	26
3.3.2 Pengamatan Mikrostruktur	27
3.3.2.1 Pengamatan Butir Ferit	27
3.3.2.2 Pengamatan Butir Austenit	27
3.3.3 Pengujian Kekerasan	28

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Pengamatan Mikrostruktur	29
4.1.1 Pengamatan Butir Austenit	29
4.1.2 Pengamatan Butir Ferit	31
4.2 Uji Kekerasan	
4.2.1 Pengaruh Temperatur Austenisasi dan Waktu Tahan terhadap Kekerasan	36
BAB 5 KESIMPULAN	38
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN	41



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Komposisi kimia baja HSLA ASTM <i>grade</i> 50 (% berat)	25
Tabel 4.1 Ukuran butir austenit waktu tahan dan temperatur austenisasi berbeda	29
Tabel 4.2 Ukuran butir ferit pada waktu tahan dan temperatur austenisasi berbeda	32
Tabel 4.3 Ukuran butir ferit sebelum perlakuan panas	34



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 mekanisme penguatan pada logam	7
Gambar 2.2 Efek dari ukuran butir ferit terhadap kekuatan luluh dan temperatur impak	8
Gambar 2.3 Batas butir sebagai <i>barrier</i> dalam menghalangi pergerakan dislokasi (searah <i>slip plane</i>)	9
Gambar 2.4 Ilustrasi perubahan ukuran butir selama proses termomekanik	10
Gambar 2.5 Pengaruh ukuran partikel <i>Niobium carbide</i> terhadap <i>yield strength</i>	14
Gambar 2.6 Pengaruh unsur paduan mikro terhadap ukuran butir ferit	16
Gambar 2.7 Pengaruh temperatur terhadap jumlah presipitat	15
Gambar 2.8 . Pengaruh Proses Reheating pada perubahan struktur mikro baja	18
Gambar 2.9 Kinetika pelarutan endapan	19
Gambar 2.10 Pengaruh temperatur <i>reheating</i> terhadap besar butir austenit pada baja C dan baja HSLA	20
Gambar 2.11 Hubungan antara besar butir Ferit yang meningkat, dengan semakin meningkatnya besar butir Austenit	23
Gambar 2.12 Diagram CCT	23
Gambar 2.13 pengaruh waktu tahan terhadap besar butir austenit	24
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 4.1 Mikrostruktur Austenit setelah reheating 1000 ⁰ C	29
Gambar 4.2 Hubungan waktu tahan dan temperatur austenisasi dengan ukuran butir austenit	30
Gambar 4.3 Mikrostruktur ferit setelah <i>reheating</i> 900 ⁰ C	31
Gambar 4.4 Mikrostruktur ferit setelah <i>reheating</i> 1000 ⁰ C	32

Gambar 4.5 Mikrostruktur ferit sebelum perlakuan panas	34
Gambar 4.6. Pengaruh waktu tahan dan temperatur austenisasi terhadap kekerasan	36
Gambar 4.7 Pengaruh waktu tahan terhadap kekerasan	37



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	41
Lampiran 2	44
Lampiran 3	48
Lampiran 4	54
Lampiran 5	60



BAB I PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG PENELITIAN

Material yang digunakan sebagai bahan struktural haruslah memiliki kekuatan luluh yang tinggi, kemampuan las yang baik dan kekuatan yang tinggi. Sehingga selama pemakaian dan perlakuan lainnya mampu berjalan maksimal. penelitian ini dilakukan agar kita dapat mengetahui sifat-sifat baja HSLA setelah perlakuan panas, seperti perubahan sifat mekanik dari material baja dan perubahan mikrostrukturnya. Dari banyaknya jenis material yang ada terutama material kelas baja, HSLA adalah jenis baja yang mencukupi syarat-syarat untuk material struktural. Baja paduan rendah kekuatan tinggi atau yang biasa dikenal dengan baja HSLA merupakan baja yang karena sifatnya yang mudah dibentuk dan mampu lasnya yang baik sehingga sering digunakan sebagai material konstruksi seperti dalam konstruksi gedung, jembatan, struktur perpipaan dan bejana tekan.

Menurut *american society for metals* ^[1], baja HSLA merupakan baja yang memiliki kandungan karbon rendah serta unsur paduan yang sangat rendah umumnya kurang dari 1,5% dimana paduan ini menghasilkan kekuatan luluh (*yield strength*) diatas 275 MPa pada kondisi *as rolled* atau normalisasi. Kelebihan dari baja HSLA diantaranya harga produksinya yang relatif rendah, karena hanya mengandung sedikit paduan yang mahal seperti Nb,V atau Ti. Karena memiliki persentase karbon dan paduan dalam jumlah yang amat kecil (paduan mikro) dan terbentuknya endapan karbida paduan yang memperkuat baja, maka baja ini memiliki perbandingan antara kekuatan terhadap berat yang tinggi. Selain itu baja HSLA juga memiliki kelebihan sifat mekanik seperti keuletan serta kekuatan yang tinggi, dengan minimum kekuatan tarik sebesar 350 MPa ^[2]

Mekanisme utama penguatan pada baja HSLA adalah dengan penghalusan butir ferit dan penguatan presipitasi dengan penambahan sejumlah kecil paduan Nb. Dan bisa juga dengan pengerasan pengerjaan dengan proses canai. Penghalusan butir ferit dapat dilakukan dengan proses canai panas terkontrol dengan kondisi proses yang utama adalah pemanasan ulang (*reheating*), proses canai panas dan kemudian dilakukan pendinginan. Penghalusan butir dapat

dilakukan dengan penambahan unsur Nb^[3]. Baja HSLA Nb termasuk dalam kelas *micro alloyed ferrite-pearlite*, dimana unsur niobium akan meningkatkan kekuatan luluh dengan cara penguatan presipitat, yang besarnya peningkatan kekuatan tersebut bergantung pada ukuran serta jumlah dari presipitat *niobium carbide*. Penguatan unsur paduan niobium dalam jumlah yang sangat kecil lebih menguntungkan daripada penambahan dengan vanadium, karena unsur paduan niobium bisa memberikan efek penguatan presipitat sekaligus penghalusan butir.

Penguatan presipitasi terjadi karena adanya karbida, nitrida, atau karbo nitrida halus yang tersebar selama pemanasan dan pendinginan yang menyangkut kadar elemen paduan seperti niobium, vanadium dan titanium^[4]. Kita ketahui bahwa kekuatan mekanik dari baja HSLA dapat ditingkatkan dengan proses pengerolan panas, dan dibutuhkan suatu proses terkendali yang dapat mengontrol mikrostruktur akhir baja, yang dikenal sebagai *Thermo Mechanical Control Process* (TMCP)^[4]. Salah satu langkah utama dalam peningkatan kekuatan dari baja selama proses pengerolan panas adalah dengan mengontrol besar butir austenit hal ini dilakukan agar didapatkan butir ferit yang halus. Sehingga percobaan ini kiranya perlu dilakukan agar kita mengetahui pada kondisi apa material baja HSLA memiliki butir austenit yang halus.

1.2 TUJUAN PENELITIAN

1. Membandingkan dan menganalisa hubungan antara temperatur austenisasi dan waktu tahan terhadap ukuran butir ferit yang terbentuk.
2. Mengamati perilaku butir austenit pada temperatur 1000°C pada waktu tahan berbeda.
3. Mengetahui pengaruh ukuran butir ferit yang terbentuk terhadap nilai kekerasan baja HSLA.

1.3 RUANG LINGKUP PENELITIAN

Ruang lingkup penelitian ini meliputi :

1. Material yang digunakan adalah baja HSLA A572 *Grade 50*
2. Proses *reheating* pada baja HSLA

a) Temperatur *reheating* : 900⁰C dan 1000⁰C dengan waktu tahan 0 menit, 5 menit, 20 menit dan 40 menit dengan pendinginan udara.

3. Pengamatan Mikrostruktur

Pengamatan mikrostruktur hanya meliputi perhitungan ukuran butir austenit dan ferit pada temperatur dan waktu tahan austenisasi yang berbeda. Untuk pengamatan butir austenit, hanya dilakukan untuk temperatur austenisasi 1000⁰C, dengan waktu tahan 0, 5, 20 dan 40 menit.

4. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui hubungan antara perlakuan panas yang dilakukan dengan sifat mekanis baja HSLA, yang dalam hal ini dengan nilai kekerasan.

1.4 Sistematika Penulisan

Penelitian ini akan ditulis dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

Bab 1 Pendahuluan

Bab ini terdiri atas latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan yang dilakukan.

Bab 2 Tinjauan Pustaka

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai literatur yang berkaitan dan mendukung penelitian.

Bab 3 Metodologi Penelitian

Bab ini memberikan penjelasan mengenai langkah kerja, prosedur penelitian, prinsip pengujian, serta daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini terdiri atas seluruh data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil penelitian tersebut untuk dibandingkan dengan studi literatur.

Bab 5 Kesimpulan

Secara umum bab ini mencakup rangkuman dari hasil penelitian yang telah dilakukan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja *High Strength Low Alloy Steel* (HSLA)

Baja High Strength Low Alloy Steel (HSLA) merupakan baja paduan rendah dengan kekuatan tinggi, dan dengan penambahan sejumlah kecil Nb, V atau Ti, baja ini mempunyai sifat yang sangat dibutuhkan di industri manufaktur seperti mudah dibentuk, dilas, sangat ulet serta mempunyai kekuatan yang tinggi, dengan minimum kekuatan tarik sebesar 350 Mpa^[1,5]. Komposisi kimia dari spesifik baja HSLA mungkin bervariasi pada ketebalan produk yang berbeda untuk didapatkan sifat mekanik yang dibutuhkan. Baja HSLA memiliki kandungan unsur karbon yang rendah yaitu 0.50 sampai ~0.25% C, hal ini dimaksudkan agar menghasilkan sifat mampu bentuk dan mampu las yang cukup disyaratkan dan baja HSLA juga mengandung unsur mangan sampai 2,0%. Dan seperti telah disebutkan di atas, baja HSLA juga mengandung unsur paduan dalam kuantitas kecil seperti chromium, nickel, molybdenum, copper, nitrogen, vanadium, niobium, titanium, dan zirconium yang digunakan dalam kombinasi yang bervariasi. Jenis- jenis baja HSLA yang biasanya digunakan termasuk diantaranya^[7]:

1. *Weathering Steel*, merupakan baja HSLA yang didesain untuk menunjukkan ketahanan korosi atmosfer yang lebih baik
2. *Control-rolled steels*, merupakan baja HSLA yang dilakukan proses hot rolled menurut urutan proses rolling sebelumnya, yang didesain untuk mengembangkan struktur austenit yang terdeformasi yang akan bertransformasi ke struktur ferrite halus yang exuiaxed pada proses pendinginan.
3. *Pearlite-reduced steels*, merupakan baja HSLA yang diperkuat dengan butir ferrite yang sangat halus dan pengerasan endapan (presipitation hardening) tapi dengan kandungan karbon rendah dan sedikit pearlite atau bahkan tanpa pearlite dalam struktur mikronya.
4. *Microalloyed steels*, merupakan baja HSLA dengan sedikit sekali penambahan unsur paduan (umumnya <0,10%) seperti unsur paduan

niobium, vanadium, dan atau titanium untuk penghalusan ukuran butir dan pengerasan presipitat.

5. *Acicular ferrite steel*, merupakan baja HSLA karbon rendah dengan mampu keras yang cukup untuk bertransformasi pada saat pendinginan untuk mencapai *fine high-strength acicular ferrite (low-carbon bainite)* dibanding dengan struktur *polygonal ferrite*
6. *Dual-phase steels*, diproses pada mikro struktur ferrite yang mengandung high-carbon martensite yang terdistribusi, yang menghasilkan produk dengan kekuatan luluh yang rendah and dan laju pengerjaan dingin yang tinggi, sehingga menghasilkan baja kekuatan tinggi yang sangat baik mampu bentuknya

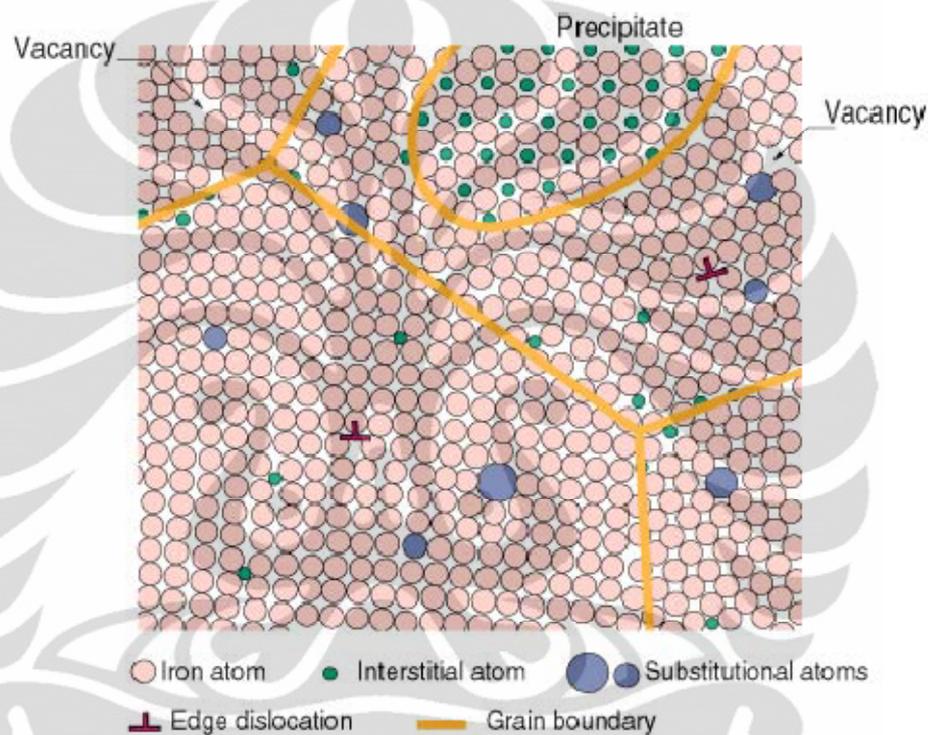
Jenis – jenis baja HSLA diatas mungkin juga memiliki penambahan kecil unsur kalsium, elemen – elemen atau unsur yang jarang di bumi, atau zirconium untuk kontrol bentuk pengotor sulfida. Pada baja HSLA terdapat dua kategori kelompok komposisi

1. Baja Vanadium dan atau Niobium, dengan kandungan mangan maksimum umumnya tidak lebih dari 1,35% dan dengan penambahan minimum 0,2% tembaga (Cu) ketika baja merupakan baja spesifik.
2. High-strength intermediate-manganese steels, dengan kandungan mangan dalam kisaran 1,10 sampai 1,65% dan dengan penambahan minimum 0,2% tembaga (Cu) ketika dispesifikkan ^[7]

2.2 Mekanisme Penguatan Pada Baja HSLA

Kekuatan adalah salah satu sifat utama dari baja, dimana salah satu keuntungan utama dengan dihasilkannya baja dengan kekuatan yang tinggi adalah dapat mengurangi resiko kerusakan atau kegagalan selama penggunaan dan juga dapat mengurangi biaya per unit kekuatan dari penggunaan suatu material. Mekanisme penguatan pada material logam merupakan hubungan antara pergerakan dislokasi dan sifat mekanik dari logam. Kemampuan suatu material logam untuk diubah secara plastis tergantung pada kemampuan dislokasi untuk dapat bergerak. Dengan mengurangi pergerakan dislokasi, kekuatan mekanik dapat ditingkatkan, dimana disebabkan energi mekanik yang dibutuhkan untuk

membuat deformasi plastis akan semakin besar. Sebaliknya apabila pergerakan dislokasi tidak ada yang menahan, logam akan lebih mudah untuk terdeformasi. Berbagai mekanisme penguatan dapat dilihat pada gambar 2.1. Secara umum mekanisme penguatan yang digunakan pada material logam adalah melalui pengerasan regang, penguatan larutan padat, penguatan presipitasi, dan penguatan batas butir. Dan mekanisme penguatan yang ada pada baja HSLA yaitu, penghalusan butir ferit dan penguatan presipitat atau dengan TMCP.



Gambar 2.1 Mekanisme penguatan pada logam dalam skala mikroskopik, seperti adanya presipitat, atom interstisi dan substitusi (larutan padat), serta penguatan batas butir^[19]

2.2.1 Penghalusan Butir Ferit

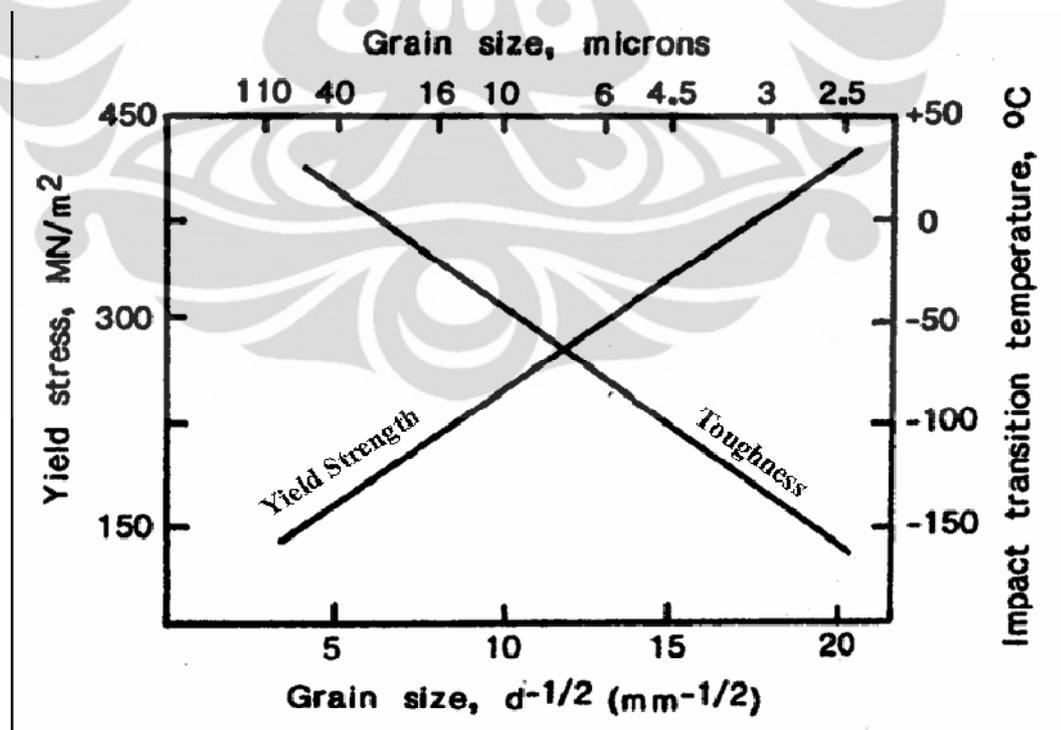
Kekuatan butir ferit pada baja HSLA umumnya diperoleh melalui mekanisme penguatan *grain refinement*, pengerasan presipitat, serta penguatan larutan padat. Penghalusan butir merupakan mekanisme penguatan yang paling sering digunakan karena dapat menghasilkan kombinasi yang baik antara kekuatan dan ketangguhan, hubungan besar butir dengan sifat mekanik baja dapat dilihat pada Gambar 2.2 . Penguatan dengan *grain refinement* dipengaruhi oleh disain paduan serta metode proses^[9]. Penghalusan butir juga merupakan salah satu

cara yang efektif bagi penguatan yang dihasilkan dengan menghalangi pergerakan dislokasi di sekitar batas butir.

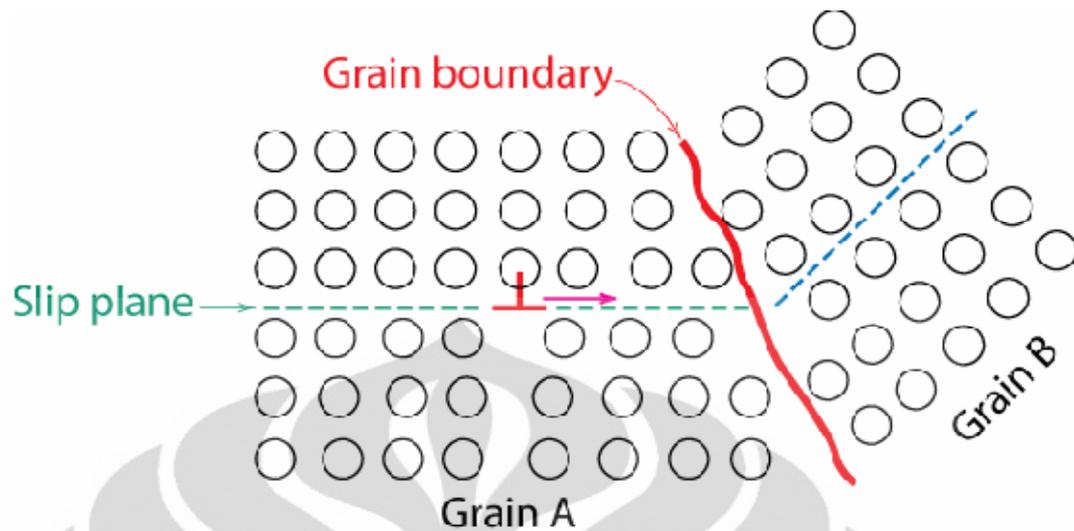
Sebagai contoh, berbagai metode penghalusan butir digunakan pada tiga tahapan yang berbeda dalam proses perlakuan termomekanik, yaitu :

1. Penambahan Titanium atau Alumunium untuk menghambat pertumbuhan austenit ketika baja dipanaskan (*reheating process*) untuk deformasi panas
2. Canai terkontrol pada baja paduan mikro untuk mengkondisikan agar austenit dapat bertransformasi menjadi butir ferit yang halus
3. Penggunaan paduan yang dapat mempercepat laju pendinginan untuk menurunkan temperatur transformasi austenit-ferit.

Dengan mengecilnya ukuran dari butir akan meningkatkan batas butir per unit volume dan mengurangi garis edar bebas dari slip yang berkelanjutan. Pergerakan selanjutnya membutuhkan tegangan yang tinggi untuk membuka atau menghasilkan suatu dislokasi baru pada butir berikutnya. Hal ini dapat dijelaskan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.2 Efek dari ukuran butir ferit terhadap kekuatan luluh dan temperatur impact^[19]



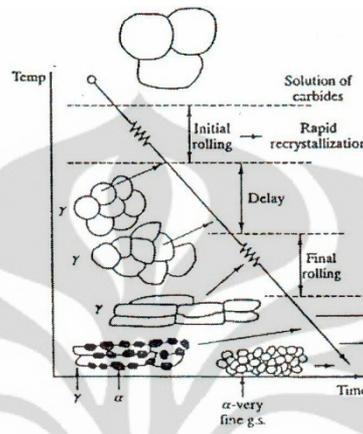
Gambar 2.3 Batas butir sebagai *barrier* dalam menghalangi pergerakan dislokasi (searah *slip plane*)^[10]

Seperti ditunjukkan pada gambar 2.3, pada logam polikristalin seperti pada baja, ukuran butir memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap sifat-sifat mekanis. Material logam dengan butir yang halus memiliki kemampuan menahan pergerakan dislokasi lebih baik dibandingkan butir kasar (besar), dikarenakan butir halus memiliki area batas butir total yang lebih luas. Untuk sebagian besar material logam, kekuatan tarik (σ_y) didefinisikan sebagai fungsi dari ukuran butir (d) dalam persamaan Hall Petch^[10]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-x} \dots\dots\dots(2.1)$$

Untuk mendapatkan butir yang halus, maka perlu dilakukan adanya kontrol austenit. Karena dengan semakin kecilnya austenit maka ferit yang terbentuk juga akan kecil, untuk mengontrol besarnya butir austenit, maka perlu dilakukannya proses TMCP. Proses TMCP merupakan suatu proses untuk memperoleh mikrostruktur austenite awal suatu material yang akan bertransformasi menjadi suatu mikrostruktur akhir ferit selama proses pembentukannya melalui pengontrolan proses rekristalisasi dan pertumbuhan butirnya, untuk menghasilkan sifat mekanis yang lebih baik. Secara umum proses termomekanik ini terdiri dari proses pemanasan awal (*reheating*), pengerjaan panas (*hot worked*), serta pendinginan (*cooling*). Ilustrasi perubahan mikrostruktur dan ukuran butir selama proses termomekanik dapat dilihat pada Gambar 2.4. penghalusan butir juga dapat dilakukan dengan *normalizing*, yaitu suatu proses

pemanasan awal yang digunakan untuk mendapatkan butir yang lebih seragam, kecil dan terdistribusi. Normalizing biasanya dilakukan dengan pemanasan sampai kira-kira 550 sampai 195⁰C diatas temperatur kritis atau $A_3^{[10]}$.



Gambar 2.4. Ilustrasi perubahan ukuran butir selama proses termomekanik^[19]

2.2.2 Penguatan Presipitat

Penguatan presipitat (*precipitation hardening*) pada dasarnya terjadi pada unsur yang memiliki kelarutan yang tinggi pada temperatur tinggi dan unsur tersebut harus dapat membentuk endapan yang dapat menghalangi dislokasi, sehingga akan terjadi mekanisme penguatan^[9]. Penguatan presipitat dapat dipengaruhi oleh berbagai elemen, seperti Nb, V dan Ti. Elemen tersebut memiliki afinitas yang tinggi terhadap C dan N, sehingga kelarutan padatnya dalam baja menjadi terbatas. Pada saat pemanasan dengan temperatur 1250⁰C, Nb pada baja HSLA-Nb akan bersifat larut. Pada saat pendinginan, akan terbentuk presipitat Nb(CN) pada bagian muka austenit-ferit selama transformasi yang menyebabkan terjadinya penguatan. Namun pada temperatur 920⁰C, presipitat tersebut akan larut dalam jumlah sedikit dan karenanya tidak terjadi penguatan presipitat. Partikel yang tidak larut akan membatasi pertumbuhan austenit dan menghasilkan butir ferit yang lebih halus. Maka temperatur pemanasan untuk mengontrol penguatan presipitat adalah antara 920⁰C sampai 1250⁰C^[9]. Irvine dkk^[6] telah menemukan temperatur kelarutan presipitat Nb(CN) melalui persamaan :

$$\text{Log [Nb] [C + 12/14N]} = 2,26 - 6770/T \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

[Nb] dan [C + 12 / 14 N] = Konsentrasi keseimbangan dari Nb, C dan N dalam larutan matriks (% berat) pada temperatur absolute

Ts = Temperatur Kelarutan Nb(CN) ($^{\circ}$ K)

Niobium dapat membentuk karbida (Nb_4C_3) dan nitrida (NbN) yang bersifat larut dan dapat ditemukan sebagai endapan dalam baja. NbC memiliki kelarutan yang lebih rendah dibandingkan TiC ataupun VC. Sedangkan kelarutan NbN lebih tinggi dibandingkan TiN, AlN, dan VN. Karena kelarutan NbC yang rendah itulah maka Nb menjadi pengendali ukuran butir yang efektif. Sedangkan Al, V dan Ti efektif untuk baja dengan kadar nitrogen yang cukup tinggi.

Penguatan presipitat dipengaruhi oleh jenis karbonitrida, ukuran presipitat serta jumlah presipitat. Pembentukan karbida logam merupakan penguat presipitat yang paling efektif digunakan pada baja paduan mikro Niobium, Vanadium, dan/atau Titanium. Jumlah partikel presipitat yang terbentuk selama proses pemanasan dan pendinginan bergantung pada kelarutan karbida dalam austenit dan pada laju pendinginan^[11,12].

2.2.3 Baja HSLA Nb

Baja High Strength Low Alloy (HSLA) merupakan baja yang memiliki sifat mekanis yang lebih baik dari baja karbon biasa. Selain itu mampu las dan mampu bentuk baja HSLA lebih baik karena kandungan karbon yang lebih rendah dibandingkan baja karbon biasa. Baja HSLA memiliki kandungan karbon (C) dan mangan (Mn) serta unsur paduan mikro (umumnya kurang dari 0,15%) seperti niobium (Nb), vanadium (V), titanium (Ti) atau kombinasi unsur-unsur tersebut. Kandungan niobium dalam baja HSLA dapat meningkatkan kekuatan luluh dan juga kekuatan tarik dari hasil canai panas baja tersebut. Niobium meningkatkan kekuatan baja HSLA melalui mekanisme pengaturan presipitat dan juga penguatan dengan penghalusan butir ferit^[2].

2.2.4 Pengaruh Unsur Paduan

Komposisi kimia baja HSLA dispesifikasikan sesuai dengan standar ASTM. Selain untuk meningkatkan ketahanan korosi, fungsi utama elemen paduan pada baja HSLA juga adalah sebagai penguat ferit melalui mekanisme penguatan presipitat, penghalus butir dan penguatan larutan padat (*solid-solution strengthening*). Penguatan larutan padat dipengaruhi oleh komposisi paduan, sementara penghalusan butir dan penguatan presipitat dipengaruhi oleh disain paduan serta perlakuan termo-mekanik.

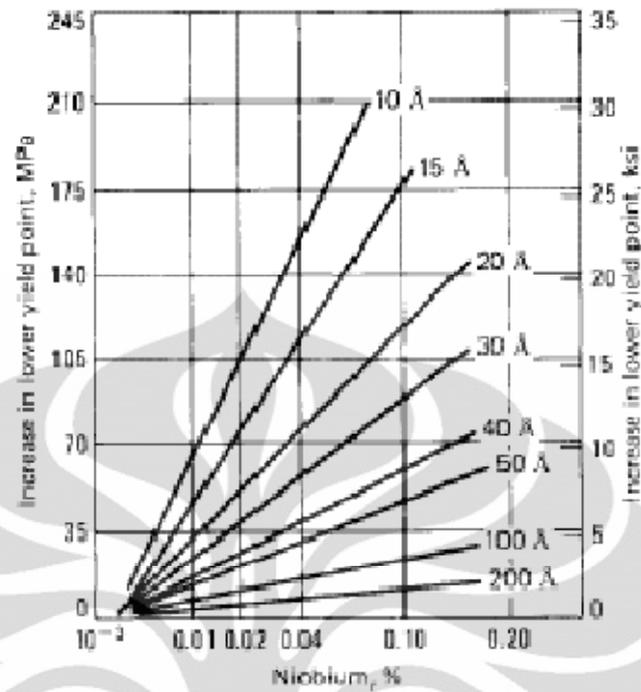
Pemilihan elemen paduan juga didasarkan atas pengaruhnya terhadap temperatur transformasi, dimana transformasi dari autenit menjadi ferit terjadi pada temperatur yang rendah selama pendinginan^[14]. Rendahnya temperatur transformasi akan menghasilkan produk butir yang lebih halus, yang merupakan pengaruh utama dalam menghasilkan efek penguatan. Pada baja HSLA dengan kadar karbon rendah, paduan-paduan seperti Silikon, Tembaga, Nikel, dan Fosfor dapat membantu dalam menghasilkan butir halus. Paduan seperti Mangan dan Kromium, menguatkan ferit dengan penguatan larutan padat.

Berikut merupakan pengaruh unsur Nb dan unsur paduan pada baja HSLA :

1. Niobium (Nb)

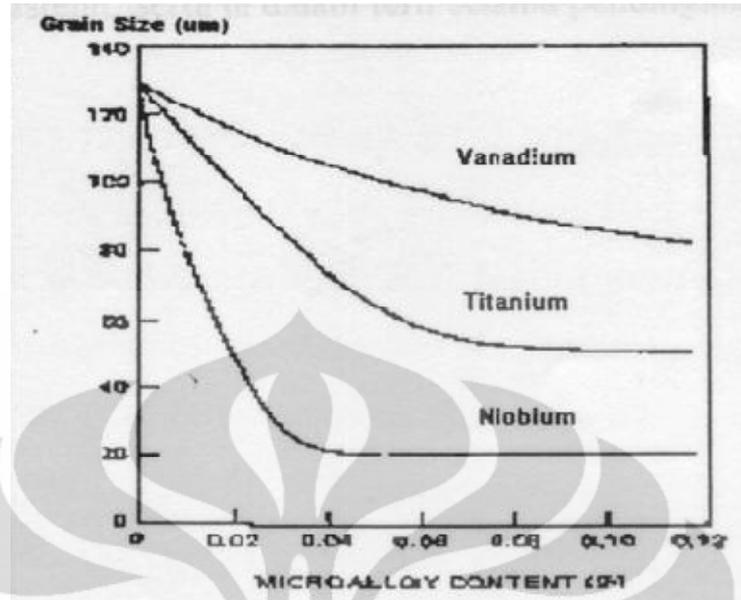
Penguatan unsur paduan niobium (Nb) dalam jumlah yang sangat kecil lebih baik dibandingkan dengan vanadium sebab niobium dapat memberikan efek penguatan presipitat sekaligus penghalusan butir. Tiap penambahan 0,01% Nb akan meningkatkan kekuatan sebesar 35-40 Mpa. Peningkatan kekuatan akan diikuti dengan peningkatan ketangguhan. Temperatur akhir yang tinggi harus dihindari dari baja jenis ini, sebab akan menghasilkan struktur *widmansttaten* ferit, yang akan mengurangi ketangguhan^[1].

Seperti kita ketahui sebelumnya, unsur Niobium (Nb) berfungsi untuk meningkatkan *yield strength* melalui penguatan presipitat. Niobium dapat membentuk karbida atau nitrida dimana karbida Niobium memiliki kelarutan yang rendah pada baja dan ditemukan dalam bentuk endapan atau presipitat. Partikel yang tidak larut akan membatasi pertumbuhan austenit sehingga dapat menghasilkan butir ferit yang lebih halus^[16]. Besarnya peningkatan kekuatan tergantung pada ukuran dan jumlah presipitat yang terbentuk.



Gambar 2.5 Pengaruh ukuran partikel *Niobium carbide* terhadap *yield strength* ^[14]

Selain itu Niobium juga bersifat sebagai penghalus butir. Jika dibandingkan dengan Vanadium, Niobium lebih efektif dalam memperkecil butir. Gambar 2.4 menunjukkan bahwa Niobium sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik dari baja HSLA. Kombinasi penguatan presipitat dan penghalus butir ferit membuat Niobium sangat efektif digunakan sebagai agen penguat



Gambar 2.6 Pengaruh unsur paduan mikro terhadap ukuran butir ferit^[14]

Umumnya unsur Niobium ditambahkan sekitar 0.02 hingga 0.04%. Setiap penambahan 0.01% Nb akan meningkatkan kekuatan sekitar 35-40 Mpa (5-6 Ksi)^[14]. Baja Niobium dihasilkan melalui pengerolan yang terkendali (*controlled rolling*), yang disertai dengan rekristalisasi, kontrol laju pendinginan, serta *direct quenching*.

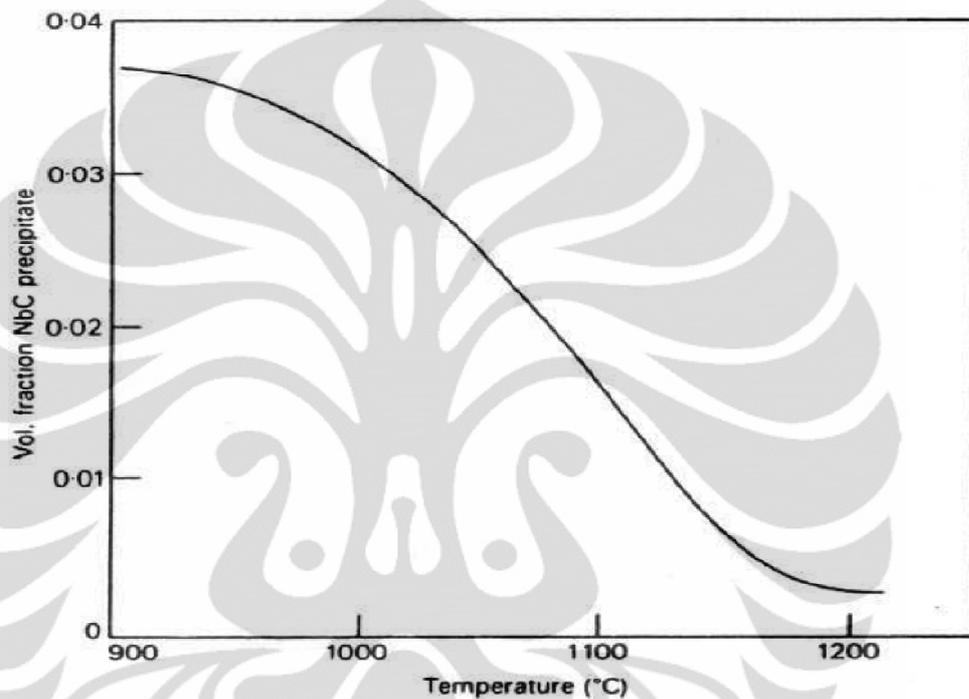
2. Karbon

Karbon, merupakan elemen paduan yang sangat penting pada berbagai jenis baja. Penambahan kadar karbon dapat meningkatkan penguatan larutan padat serta kekerasan. Peningkatan kadar karbon dapat menurunkan *weldability* dan ketangguhan impak pada baja. Dan juga akan tinggi kadar karbon akan menurunkan mampu las dan ketangguhan. Kandungan karbon maksimal pada baja HSLA *as rolled* adalah 0,2%. Semakin tinggi kadar karbon, maka cenderung akan terbentuk martensit serta bainit pada struktur mikro hasil pengerolan.

3. Nitrogen

Nitrogen, ditambahkan pada baja HSLA yang mengandung Vanadium. Penambahan Nitrogen dibatasi hingga 0.005%. Paduan ini sangat penting karena dapat meningkatkan kekerasan melalui pengerasan presipitat. Presipitat Vanadium-Nitrida (VN) dapat memberikan efek penghalusan butir karena mempunyai kelarutan yang rendah dalam austenit. Penambahan nitrogen pada

baja yang mengandung Vanadium dapat meningkatkan penguatan presipitat dimana dengan adanya presipitat akan menghalangi dislokasi batas butir sehingga dihasilkan butir ferit yang halus. Makin tinggi temperatur, kelarutan presipitat akan semakin meningkat sehingga jumlah presipitat menurun. Gambar 2.6 menunjukkan pengaruh temperatur terhadap fraksi volume presipitat.



Gambar 2.7 Pengaruh temperatur terhadap jumlah presipitat ^[13]

4. Mangan

Mangan merupakan elemen penguat yang cukup penting dalam *plain carbon high-strength structural steels*. Fungsi utamanya adalah sebagai penguat larutan padat dalam ferit serta menurunkan temperatur transformasi austenit-ferit. Mangan dapat meningkatkan efek penguatan presipitat pada baja Vanadium dan baja Niobium.

5. Silikon

Silikon merupakan unsur yang digunakan sebagai *deoxidizer* dalam baja cair ^[14]. Silikon mempunyai efek penguatan pada *low-alloy structural steels*. Silikon mempunyai pengaruh yang cukup penting dalam peningkatan *yield strength* melalui penguatan larutan padat dan banyak digunakan pada baja HSLA untuk aplikasi pembuatan paku atau baut.

6. Tembaga

Tembaga merupakan unsur yang dapat meningkatkan kekuatan pada baja karbon rendah maupun sedang dengan sifatnya sebagai penguat ferit. Ketahanan korosi atmosferik dapat ditingkatkan dengan penambahan Fosfor, namun ketika sejumlah kecil Tembaga ditambahkan dalam baja, ketahanan terhadap korosi menjadi lebih besar. Dengan adanya Fosfor dan Tembaga, memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap ketahanan korosi dibandingkan jika hanya memiliki salah satu dari elemen paduan tersebut.

7. Kromium

Kromium, sering ditambahkan bersamaan dengan Tembaga untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi atmosferik.

8. Nikel

Nikel, dapat ditambahkan hingga sekitar 1% pada beberapa jenis HSLA. Pada baja HSLA, paduan ini dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi atmosferik^[15]. Ketika paduan ini dikombinasikan dengan Tembaga dan/atau Fosfor, dapat meningkatkan ketahanan baja terhadap korosi air laut.

9. Aluminium

*Aluminium merupakan unsur paduan yang sering digunakan sebagai *deoxidizer* dan merupakan unsur yang pertama kali digunakan untuk mengontrol pertumbuhan butir austenit selama *reheating*. Selama *controlled rolling*, Niobium dan Titanium lebih efektif digunakan sebagai *grain refiner* dibandingkan dengan Aluminium.*

10. Vanadium

Vanadium, menguatkan baja HSLA dengan mekanisme penguatan presipitat serta penghalusan butir ferit.

11. Titanium

*Titanium merupakan unsur yang selain dapat memberikan penguatan presipitat, paduan ini juga dapat mengontrol bentuk sulfida. Sejumlah kecil Titanium (<0.025%) juga berguna dalam membatasi pertumbuhan butir austenit^[19]. Penambahan Titanium meningkatkan *impact toughness* dengan penghalusan butir ferit.*

12. Sulfur

Sulfur, umumnya merupakan pengotor pada baja. Penambahan pada baja dapat meningkatkan *machinability*.

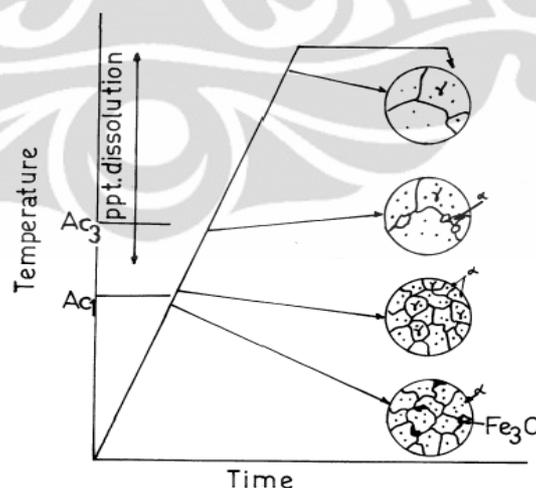
13. Fosfor

Fosfor merupakan unsur yang berperan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada baja karbon rendah, meningkatkan ketahanan korosi, serta meningkatkan *machinability* pada *free-cutting steel* ^[16].

2.2.5 Transformasi Fasa

2.2.5.1 Transformasi Transformasi fasa ferit + perlit ke fasa austenite setelah reheating

Selama proses *reheating* untuk baja karbon rendah pada temperatur di bawah A_{c1} , strukturnya adalah ferit dan perlit. Semakin tinggi temperatur melewati A_{c1} , dibawah A_{c3} terjadi transformasi perlit menjadi austenit. Sehingga pada daerah tersebut fasa yang ada adalah austenit dan ferit. Pada temperatur di atas A_{c3} , seluruh struktur mikro baja bertransformasi menjadi austenit. Hal ini dapat dilihat pada Gambar di bawah ini.



Gambar 2.8. Pengaruh Proses Reheating pada perubahan struktur mikro baja ^[17]

2.2.6 Transformasi Austenit – Ferit

Proses nukleasi ferit terjadi pada proses transformasi austenit selama pendinginan. Tempat-tempat potensial untuk nuklasi pada butir diantaranya pada

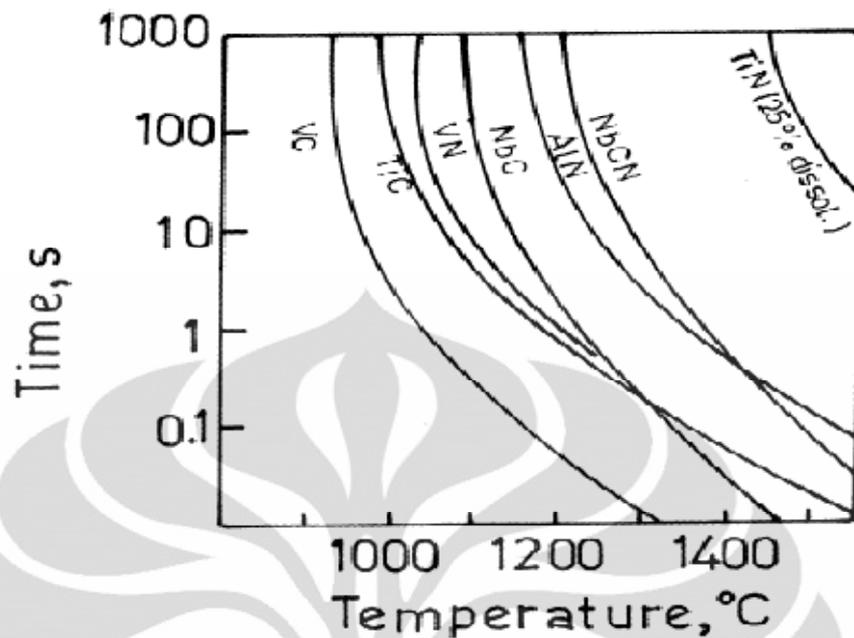
batas butir dan juga partikel endapan yang terdapat di dalam butir. Butir yang mengalami deformasi akan meningkatkan kerapatan potensial nukleasi selama transformasi. Pengaruh dari fenomena rekristalisasi austenit yang terjadi dalam proses pengerjaan panas akan menghasilkan karakteristik fasa ferit yang bervariasi.

2.2.6 Pertumbuhan Butir

Gaya pendorong untuk pertumbuhan kristal ialah energi yang dilepaskan sewaktu atom bergerak melintasi batas butir dari arah butir dengan permukaan butir cembung ke butir dengan permukaan cekung. Hal ini disebabkan oleh lebih rendahnya energi bebas yang dimiliki oleh butir yang lebih besar. Laju pertumbuhan butir tergantung sekali pada suhu. Kenaikkan suhu mengakibatkan naiknya energi getaran thermal yang kemudian mempercepat difusi atom melalui batas butir, dari butiran yang kecil menuju butiran yang lebih besar. Selain itu pertumbuhan butir juga dipengaruhi oleh waktu nukleasi. Waktu yang lama membiarkan proses nukleasi butir terjadi.

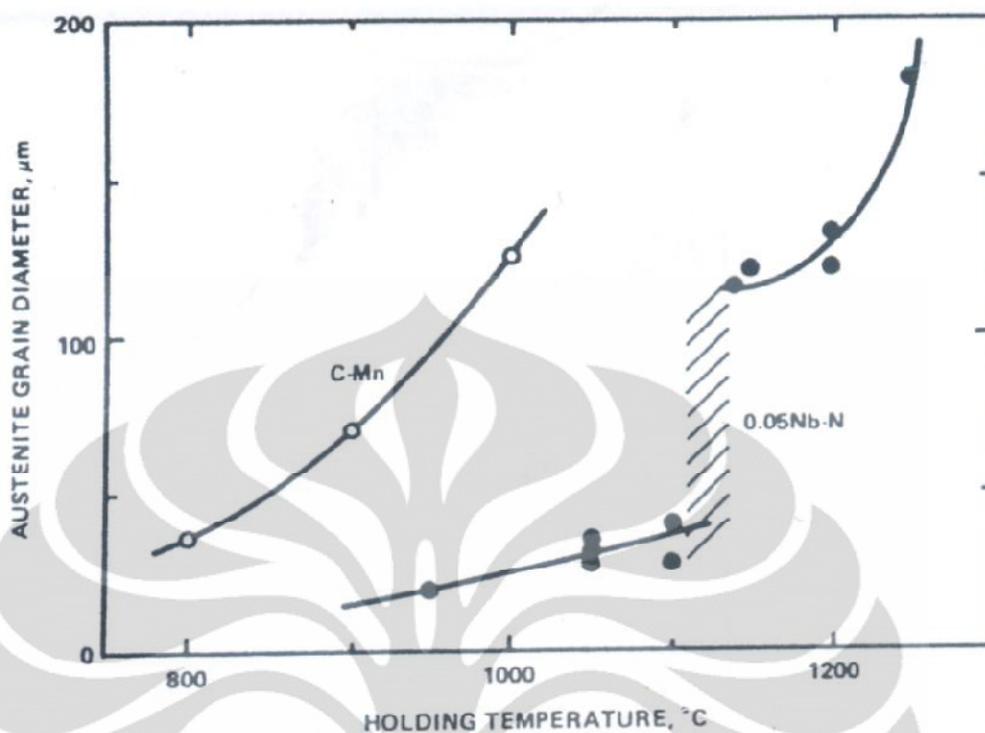
2.2.6.1 Pertumbuhan Butir Austenit

Pada Pemanasan awal (*reheating*), pertumbuhan butir tidak terjadi pada suhu rendah karena pergerakan batas butir tertahan oleh partikel karbida atau nitrida yang belum larut. Partikel Karbida, Nitrida dan Karbonitrida kelarutannya tergantung pada temperatur dan waktu. Seperti terlihat pada gambar 2.4. Seperti endapan VC, pada temperatur 1000°C membutuhkan waktu sekitar 2 detik untuk dapat larut dalam Austenit. Sedangkan pada endapan TiC, memerlukan waktu sekitar 100 detik untuk larut pada temperatur yang sama.



Gambar 2.9. Kinetika pelarutan endapan^[19]

C.M Sellars^[19] menunjukkan bahwa baja karbon menunjukkan peningkatan ukuran butir austenit dengan meningkatnya temperatur, sedangkan pada baja Nb, adanya Nb partikel karbonitrida akan menunda pengkasaran butir austenit ke temperatur yang lebih tinggi, seperti tampak pada Gambar 2.7 dan 2.19 . Dari gambar 2.7 dan 2.19 juga tampak bahwa pertumbuhan butir austenit pada baja karbon berbeda dengan baja HSLA, dimana baja C-Mn mengalami pertumbuhan butir kontinyu, sedangkan baja- HSLA atau paduan, pada temperatur atau waktu pemanasan tertentu mengalami pertumbuhan butir abnormal.



Gambar 2.10. Pengaruh temperatur *reheating* terhadap besar butir austenit pada baja C dan baja HSLA ^[19]

Pada baja paduan, pertumbuhan butir austenit dapat di bagi menjadi 3 tahap yaitu; pertumbuhan butir normal, pertumbuhan butir abnormal. Pertumbuhan Butir normal, pada pertumbuhan butir normal, endapan yang belum larut akan menghambat pergerakan batas butir austenit (*Solute drag*). Karbida atau Nitrida yang tidak larut selama reheating dapat menghambat pertumbuhan butir jika fraksi volume dan ukuran partikel sesuai kondisi kritis untuk mengunci pergerakan batas butir. Tetapi, pada *reheating* temperatur pertumbuhan butir normal tercapai, jika terjadi pengkasaran dan pengendapan partikel, berarti kondisi kritis untuk pertumbuhan butir abnormal telah tercapai, sehingga terbentuk struktur butir campuran, yang pada pemanasan selanjutnya berjalan pertumbuhan yang normal.

Pada pertumbuhan butir abnormal, sebagian endapan sudah mulai larut, sehingga sebagian butir akan tumbuh membesar dan sebagian lagi tetap tertahan. Setelah itu terjadi pertumbuhan normal kembali, diakibatkan pertumbuhan butir austenit tumbuh tanpa adanya partikel yang menahan pergerakan batas butir (*pinning effect*). Temperatur pengkasaran butir terdapat

lebih rendah dari temperatur kelarutan partikel karena batas butir terbebaskan dengan larutnya partikel dan butir tumbuh.

2.2.6.2 Nukleasi dan Pertumbuhan Butir Ferit

Pertumbuhan ferit diawali dengan proses nukleasi dimana proses difusi karbon sangat menentukan bentuk morfologi dari struktur ferit. Pada proses transformasi austenit menjadi ferit, ferit akan terbentuk selama pendinginan. Pembentukan ferit diawali dengan nukleasi ferit. Tempat - tempat potensial untuk nukleasi ferit diantaranya:

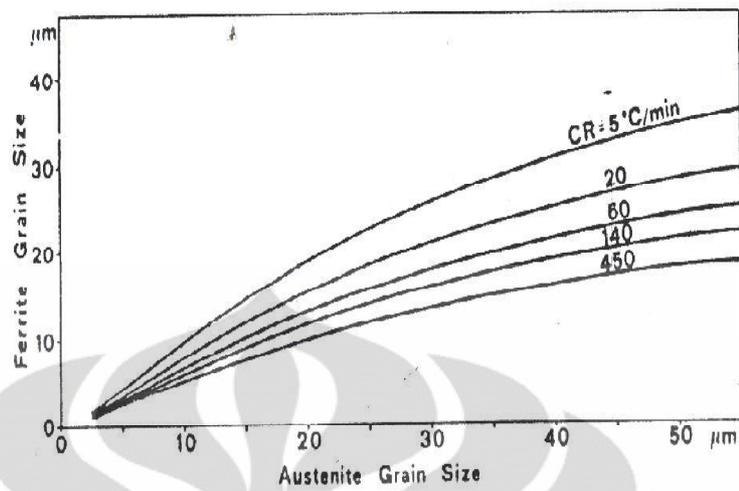
- a. Batas butir austenite, yang merupakan tempat nukleasi ferit terutama pada sisi-sisi butir. Nukleasi ferit terjadi secara teratur sepanjang batas butir austenite, dimungkinkan karena merupakan tempat yang mempunyai energi yang lebih tinggi karena merupakan cacat kristal. Nukleasi yang lebih sering akan terjadi pada austenite yang terdeformasi.
- b. Pita-pita deformasi, yang merupakan tempat nukleasi ferit intragranular. Pita-pita deformasi merupakan tempat untuk nukleasi ferit. Namun tidak semua pita-pita deformasi potensial dan efektif sebagai tempat nukleasi.
- c. Partikel fasa kedua. Partikel fase kedua yaitu karbida/nitrida yang tidak larut merupakan tempat nukleasi.
- d. Sub batas butir, nukleasi yang terjadi pada sub batas butir ini hanya terjadi jika deformasi struktur tanpa *recovery*. *Recovery* yang minimal menyebabkan ferit akan potensial untuk ternukleasi. Jadi dengan deformasi yang kecil, sub struktur akan terecovery dan terbentuk struktur butir ferit karena adanya nukleasi intragranular. Waktu penahanan pada temperatur tertentu yang lebih singkat menghasilkan nukleasi intragranular yang lebih banyak sehingga terbentuk ferit yang lebih seragam, hal ini dipengaruhi oleh partikel presipitat fasa kedua yang mampu menghambat *recovery* dan menghasilkan potensial nukleasi sub batas butir yang tinggi.
- e. Batas butir kembaran, yang terjadi karena energi yang rendah, maka batas butir kembaran yang koheren bertindak sebagai tempat nukleasi ferit.

Laju nukleasi selama transformasi dipengaruhi oleh *driving force* yang diperlukan. Semakin kecil *driving force* maka laju nukleasi makin besar.

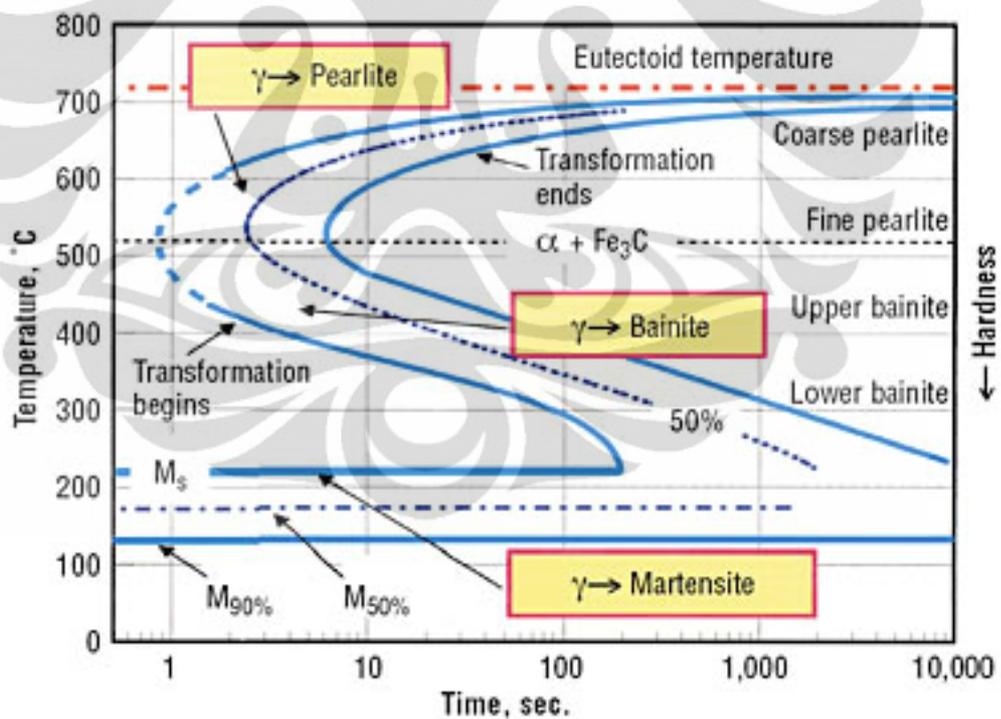
Pengurangan *driving force* untuk nukleasi dapat dilakukan melalui nukleasi *homogen* seperti pada batas butir, dislokasi dan inklusi. Sehingga laju nukleasi *heterogen* lebih tinggi dibandingkan laju nukleasi homogen yang hanya tergantung pada setiap atom untuk tempat nukleasi potensial.

Ukuran butir ferit yang halus akan didapat dengan terbentuknya awal butir austenit yang kecil sebelum transformasi. Jika luas daerah batas butir austenit yang terbentuk akibat proses pemanasan semakin meningkat, maka akan memberikan kemudahan bagi tempat terbentuknya nukleasi fase ferit. Akibat adanya deformasi akan mengakibatkan ukuran awal butir austenit semakin kecil sehingga setelah transformasi butir ferit yang terbentuk menjadi lebih halus. Hal tersebut dapat ditunjukkan pada gambar 2.6. Untuk melihat ferit, sampel didinginkan dengan lambat misalnya dengan udara. Pada Gambar 2.7 dijelaskan bagaimana suatu material yang didinginkan dari temperatur austenit ke temperatur ruang dengan kecepatan pendinginan yang berbeda – beda.

Laju untuk nukleasi ferit di dalam matriks lebih kecil dibandingkan pada batas butir. Sehingga ukuran dari intragranular ferrit bergantung dari ukuran butir austenit. Pada ukuran butir austenit yang halus, ferit yang terbentuk pada batas butir akan meningkatkan konsentrasi karbon dalam matriks, dan mengurangi laju pendinginan sehingga proses nukleasi menjadi lebih sulit. Sedangkan pada butir besar dibutuhkan waktu lebih lama untuk proses difusi karbon menuju bagian tengah matriks sehingga ada banyak waktu untuk nukleasi terjadi dari dalam matriks (intragranular)^[20].



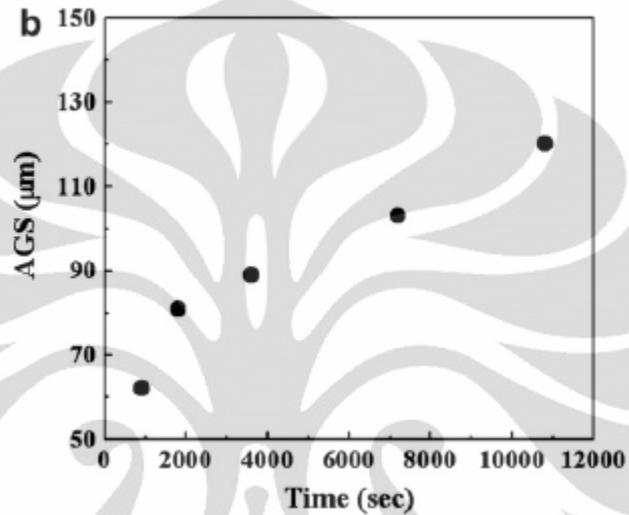
Gambar.2.11 Hubungan antara besar butir Ferit yang meningkat, dengan semakin meningkatnya besar butir Austenit ^[21]



Gambar 2.12 Diagram CCT^[9]

2.2.7 Pengaruh Waktu Terhadap Butir Austenit dan Ferit

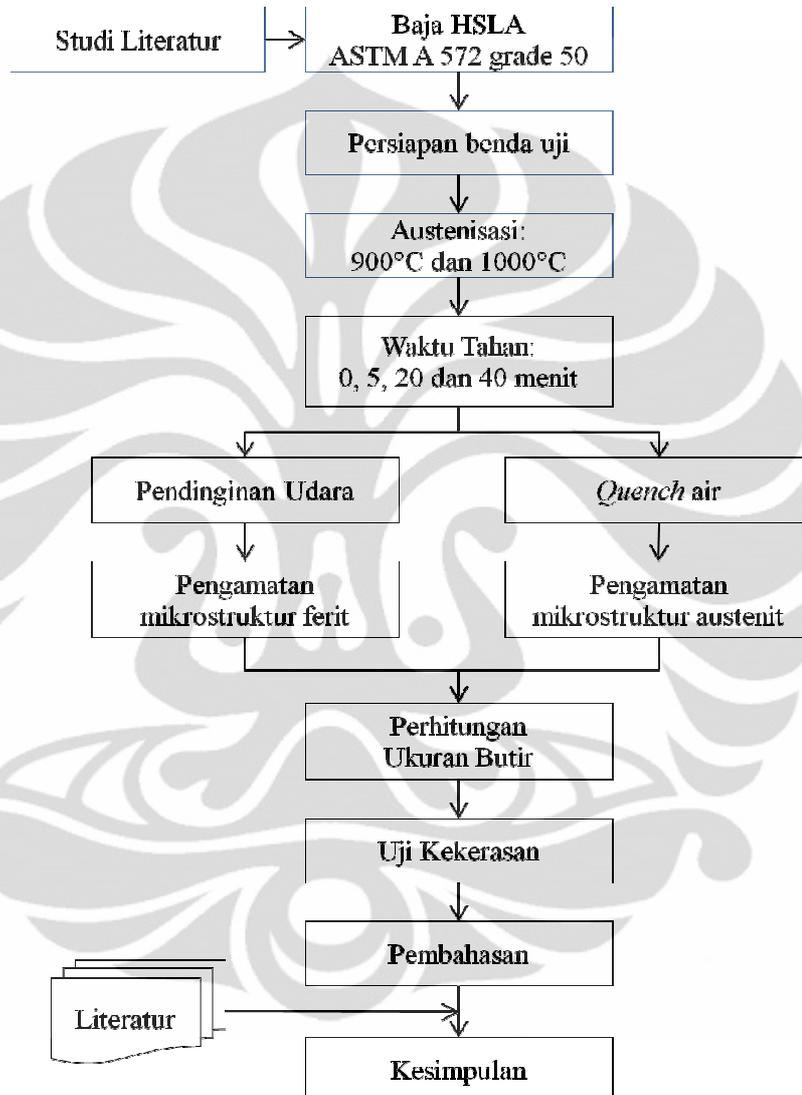
Pembentukan austenit membutuhkan waktu untuk nukleus pertama terbentuk. Sehingga semakin lamanya waktu yang terlibat selama proses pemanasan, maka besar butir austenit akan semakin besar juga. Pada Gambar 2.11 dijelaskan hubungan antara waktu tahan dan besar butir austenit.



Gambar 2.13 pengaruh waktu tahan terhadap besar butir austenit^[21]

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan Penelitian

Sampel uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja HSLA ASTM *grade 50*.

Tabel 3.1 Komposisi kimia baja HSLA ASTM *grade 50* dalam (% berat)

unsur	C	Si	Mn	Cu	Nb	Ti
komposisi	0.085	0.222	1.45	1.45	0.028	<0.002

3.2.1 Alat

1. Dapur pemanas
2. Gergaji logam.
3. Cetakan mounting
4. Mesin amplas.
5. Mesin poles.
6. Mikroskop optik digital.
7. Mikroskop ukur.
8. Lain-lain : kantong plastik, label, spidol, tang penjepit, sarung tangan,.

3.2.2 Bahan

1. Baja HSLA lembaran (ASTM A572 Grade 50)
2. Resin
3. *Hardener*
4. Kertas amplas grid 80, 120, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, dan #500
5. Alumina (Al_2O_3)
6. Kain poles / beludru

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Proses Pemanasan Ulang (*Re-heating*) dan Pendinginan

Proses austenisasi pada sampel uji dilakukan pada temperatur $900^{\circ}C$ dan $1000^{\circ}C$. Setelah mencapai temperatur tersebut, kemudian sampel ditahan dalam dapur dengan variabel waktu yang berbeda. Waktu tahan yang digunakan yaitu 0 menit, 5 menit, 20 menit dan 40 menit. Selanjutnya, proses pendinginan cepat (*quench*) dilakukan untuk mendapatkan austenit prior, dengan media pendingin berupa air. Sedangkan, untuk mendapatkan fasa ferit, pada sampel dilakukan pendinginan udara (*slow cooling*).

3.3.2 Pengamatan Mikrostruktur

Tahapan pengamatan metalografi dimulai dengan pemotongan, mounting serta preparasi permukaan sampel yang meliputi proses pengamplasan, pemolesan dan etsa. Proses pengamplasan dilakukan mulai dari amplas kasar sampai amplas halus, yaitu dimulai dari amplas dengan mesh 60, 80, 120, 240, 320, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200 dan 1500. Selanjutnya, sampel dipoles sampai mengkilap untuk memudahkan terjadinya pemantulan cahaya antara permukaan sampel dan lensa mikroskop optik. Proses pemolesan dilakukan dengan menggunakan mesin poles yang dituangkan cairan titanium oksida. Setelah itu sampel di etsa agar terjadi pengikisan batas butir sehingga dapat diamati struktur mikronya. pengamatan struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik digital olympus. Perhitungan butir ferit dan austenit masing-masing dilakukan pada perbesaran 1000X dan 200X, dengan prosedur *intercept* berdasarkan ASTM E 112-96.

3.3.2.1 Pengamatan Butir Ferit

Untuk menampilkan struktur ferit digunakan etsa *Marshall's reagent* yang diikuti dengan nital 2%, dengan waktu masing-masing 15-20 detik. Komposisi marshall's reagent adalah sebagai berikut: *Part A* : 5 ml asam sulfur, 8 gram oksalat, 100 ml air *Part B* : 30% larutan H₂O₂. Dalam memunculkan butir ferit, marshall's reagent juga dimodifikasi dengan menambahkan 0.5% HF sebanyak 4 tetes. Untuk nital 2%, komposisi 2 ml HNO₃ dan 98 ml alkohol. Hasil pengukuran butir ferit selanjutnya digunakan untuk mengetahui pengaruh ukuran besar butir ferit dengan sifat mekanis, yang dalam hal ini adalah nilai kekerasan.

3.3.2.2 Pengamatan Butir Austenit

Etsa yang digunakan untuk menampilkan struktur austenit adalah dengan picral yang telah dimodifikasi (2 gram picrat; 50 ml aquadest; 5ml HCl; 5 tetes tipol). Proses etsa dilakukan dengan metode tetes selama 90-120 detik, yang kemudian diamati dengan mikroskop optik. Hasil pengukuran butir austenit selanjutnya digunakan untuk menganalisa pengaruh temperatur dan waktu tahan austenisasi terhadap ukuran butir austenit ketika pemanasan ulang dan ukuran butir ferit yang

terjadi setelah pendinginan. Butir austenit yang diamati hanya meliputi temperatur austenisasi 1000°C, sedangkan untuk temperatur austenisasi 900°C tidak dilakukan.

3.3.3 Pengujian Kekerasan

Untuk mengetahui pengaruh waktu tahan dan temperatur austenisasi yang secara langsung berhubungan dengan sifat mekanis dilakukan pengujian kekerasan dengan *Rockwell B*. Pengujian kekerasan dilakukan mengacu pada standard ASTM E-18-08 "*Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*". Kekerasan suatu material dapat didefinisikan sebagai ketahanan material terhadap gaya penekanan dari material yang lebih keras. Metode penekanan tersebut dapat berupa goresan, pantulan, ataupun penjejakan. Pada pengujian ini, penentuan kekerasan material dilakukan dengan metode indentasi (penjejakan) dengan metode *Rockwell B*, dimana indenter berbentuk bola dengan diameter sebesar $\frac{1}{16}$ inch atau 1.588 mm. Metode ini sangat sederhana dan tidak memerlukan keahlian khusus untuk menggunakannya.

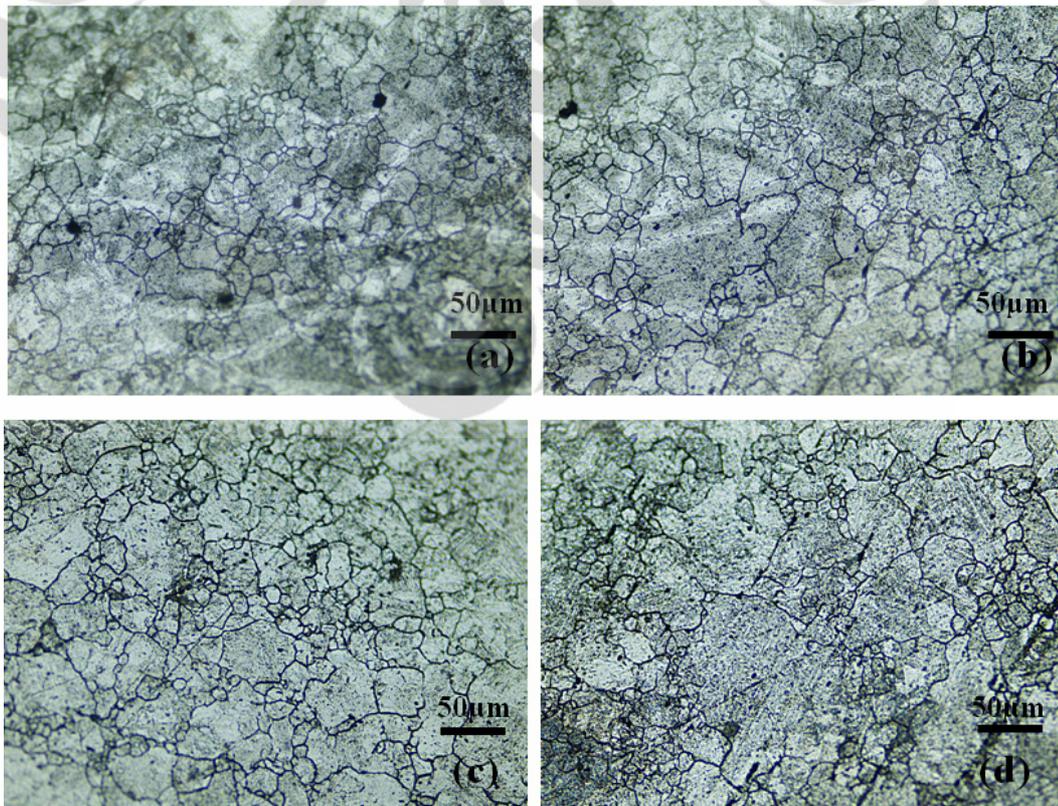
BAB IV

HASIL dan PEMBAHASAN

4.1 Pengamatan Mikrostruktur

4.1.1 Pengamatan Butir Austenit

Pengamatan mikrostruktur austenit prior dilakukan dengan teknik metalografi, dimana benda uji mula-mula diampelas dengan menggunakan kertas ampelas. Proses pengamplasan dilakukan dengan grid ampelas yang kasar atau berukuran kecil sampai ampelas berukuran halus atau kecil, yaitu dimulai dari *grid* 80,120, 240, 320 sampai 1500. Kemudian sampel dipoles dengan menggunakan cairan titanium oksida sampai permukaan sampel mengkilap. Proses selanjutnya yaitu sampel dietsa dengan menggunakan larutan etsa picral, proses pengetsaan dilakukan dalam keadaan larutan etsa yang panas, yaitu pada suhu sekitar 80⁰ C kemudian permukaan sampel ditetesi dengan larutan etsa tersebut selama 90 detik. Dan hasil pengetsaan dapat dilihat pada Gambar 4.1.



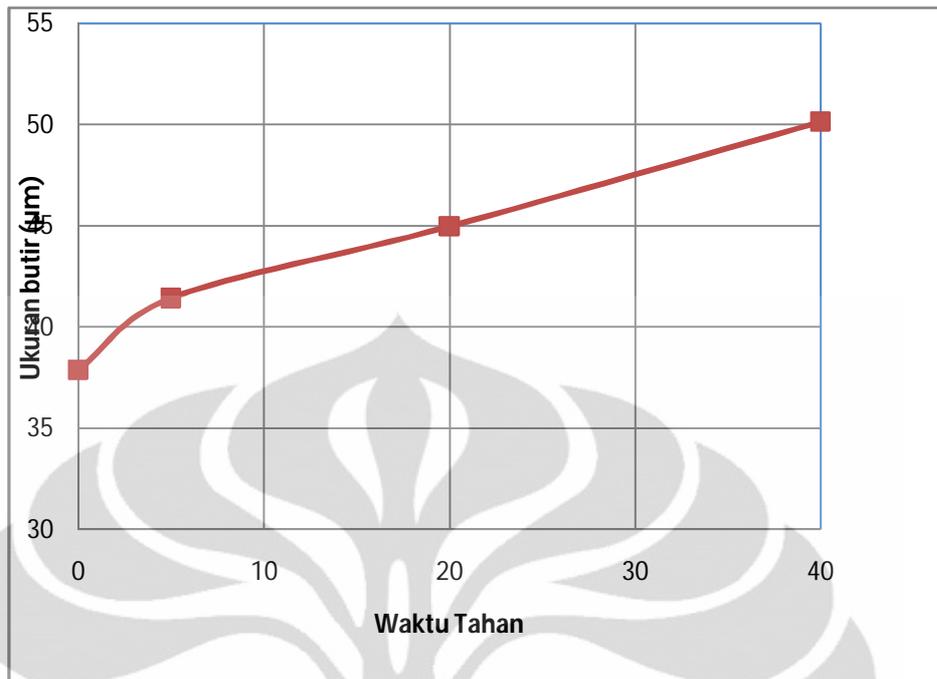
Gambar 4.1 Mikrostruktur Austenit Prior Baja ASTM A 572 gr 50 temperatur austenisasi 1000°C. Etsa Picral 100 detik. (a) tanpa waktu tahan (b) 5 menit (c) 20 menit (d) 40 menit.

Tabel 4.1 Ukuran butir austenit waktu tahan dan temperatur austenisasi berbeda

Temperatur Austenisasi	Tanpa waktu tahan	5 menit	20 menit	40 menit
1000°C	37,883µm	41,420 µm	44,964µm	50,132µm

Berdasarkan percobaan, didapatkan bahwa diameter butir austenit akan bertambah dengan bertambahnya waktu tahan. Hasil ini sesuai dengan percobaan yang pernah dilakukan oleh Seok-Jae Lee, Young-Kook Lee ^[21]. Pertumbuhan butir austenit merupakan sebuah fungsi dari temperatur. Dimana semakin besar temperatur maka butir austenit juga akan semakin besar. Pada baja HSLA pertumbuhan austenit juga dipengaruhi oleh karbida-karbida yang terbentuk akibat penambahan unsur pembentuk karbida. Dimana karbida - karbida tersebut berperan dalam proses penguncian batas butir sehingga menghalangi terbentuknya butir baru yang lebih besar. Pada gambar 2.6 menunjukkan pengaruh temperatur terhadap presipitat NbC.

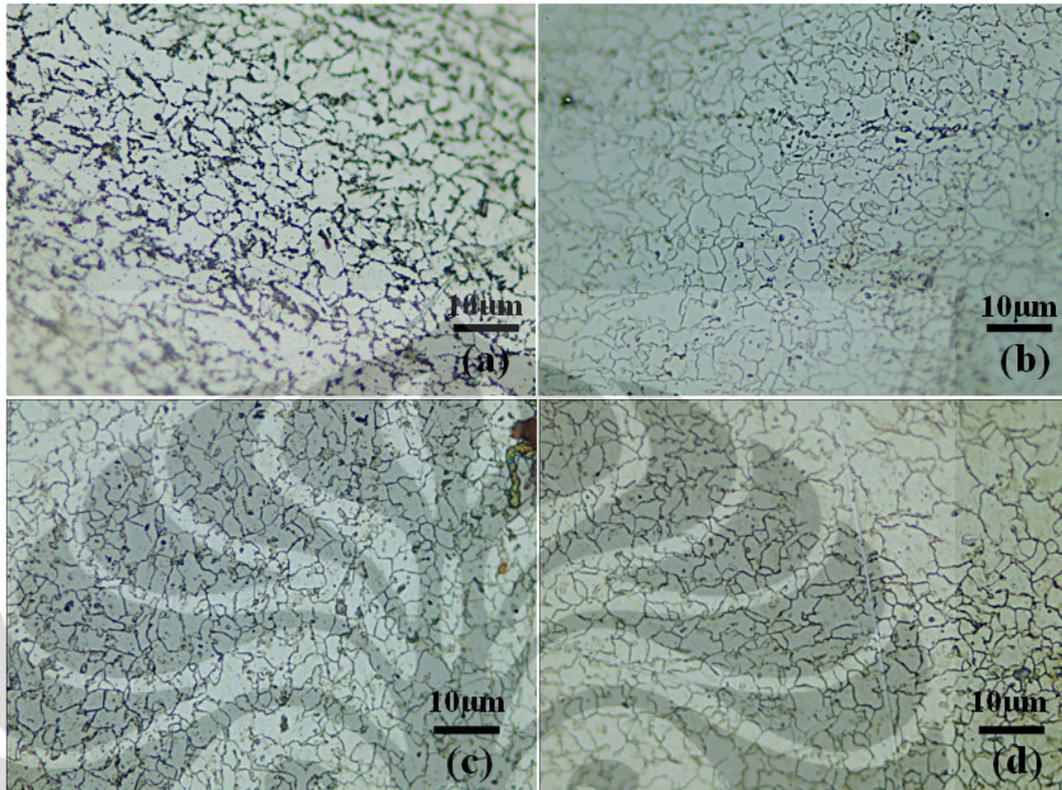
Dari gambar tersebut diketahui bahwa semakin tinggi temperatur maka volume fraksi NbC akan semakin kecil. Pada percobaan didapatkan bahwa diameter butir austenit bertambah, namun pada penelitian tidak hanya temperatur yang perlu diperhatikan melainkan waktu tahan juga perlu diperhatikan. Karena waktu tahan sangat berperan dalam proses nukleasi austenit. Pembentukan austenit membutuhkan waktu untuk nukleus pertama terbentuk. Nukleus tersebut kemudian berkembang dengan kecepatan lebih besar sejalan dengan terbentuknya nukleus austenit yang lebih banyak lagi ^[22]. Hal tersebut tergantung dengan waktu tahannya juga karena difusi karbon dibutuhkan untuk menghasilkan suatu fasa austenit, pada gambar 4.2 terlihat bahwa besar butir austenit bertambah seiring dengan bertambahnya waktu tahan. Jika temperatur meningkat maka kecepatan difusi juga meningkat, sehingga pembentukan austenit juga akan meningkat. Selain itu, semakin besarnya butir austenit akibat semakin tingginya temperatur, maka jarak antar atom akan semakin besar akibat adanya energi aktivasi termal sehingga butir akan lebih besar juga. Hal ini juga sesuai dengan percobaan yang dilakukan oleh Seok-Jae Lee, Young-Kook Lee ^[21], seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.13.



Gambar 4.2 Hubungan waktu tahan dan temperatur austenisasi dengan ukuran butir austenit

4.1.2 Pengamatan Butir Ferit

Pengamatan struktur mikro ferit sama seperti proses pengamatan pada struktur mikro austenit prior, dimana sampel pertama – tama diampelas, poles dan dietsa. Namun yang membedakan disini adalah larutan etsa dan proses pengetsaannya, dimana pada proses pengetsaan untuk mengamati struktur mikro ferit digunakan larutan etsa berupa larutan *marshall* dan nital. Larutan *marshall* yang digunakan merupakan campuran antara larutan *marshall* A dan larutan *marshall* B dengan komposisi 50% *marshall* A dan 50% *marshall* B, dimana larutan *marshall* A terdiri dari campuran 100 ml aquades, 8 gr oksalat, dan 5 ml H_2SO_4 , sedangkan untuk larutan *marshall* B merupakan larutan peroksida. Proses pengetsaan dilakukan dengan cara mengetsa sampel dengan larutan *marshall* terlebih dahulu dan kemudian baru dilakukan pengetsaan dengan larutan nital. Proses pengetsaan dengan larutan *marshall* dilakukan selama 20 detik kemudian sampel dikeringkan dengan *hair drier* setelah dikeringkan, sampel dietsa dengan larutan nital selama 15 detik dan kemudian dikeringkan. Hasil pengamatan struktur mikro ferit dapat dilihat pada Gambar 4.3 untuk temperatur $900^{\circ}C$ dan 4.4 untuk temperatur $1000^{\circ}C$



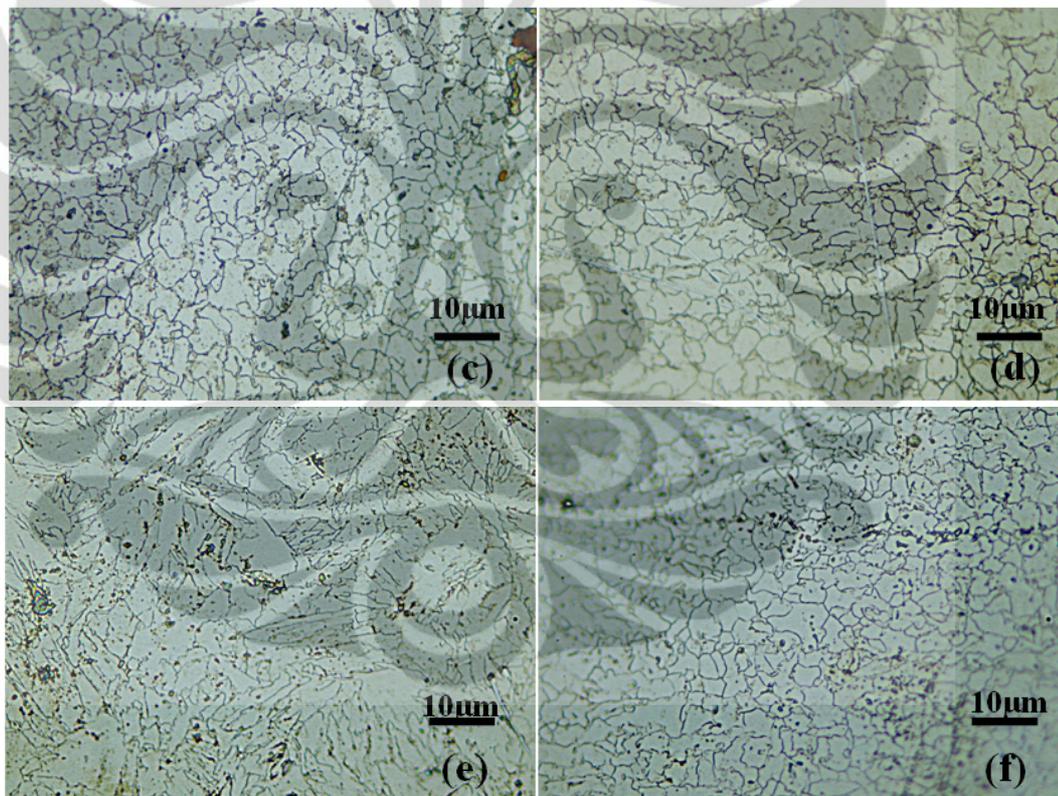
Gambar 4.3 Mikrostruktur dari baja HSLA ASTM A 572 gr 50 setelah reheating dengan temperatur austenisasi 900°C. (a) tanpa waktu tahan (b) 5 menit (c) 20 menit (d) 40 menit. Etsa Marshall's Reagent yang diikuti dengan nital 2%.

Dari percobaan yang telah dilakukan pada temperatur 900°C, didapatkan data bahwa butir ferit akan semakin kecil atau halus dengan semakin lamanya waktu tahan, namun penghalusan butir tersebut tidak terlalu signifikan, karena hanya terjadi penurunan besar butir ferit dengan rentang nilai yang tidak begitu besar dan masih berada pada nilai butir ASTM yang sama, yaitu 12,0 - 12,5. Ini dapat dilihat pada Gambar foto mikro dan data yang terdapat pada Tabel 4.2. dan dapat dibuktikan dari hasil perhitungan butir ferit dengan metode *Intercept Heyn* sesuai dengan ASTM E-112^[23] dan contoh perhitungannya dapat dilihat pada lampiran. Perhitungan butir dilakukan sebanyak 5 kali perhitungan. Untuk setiap sampel setelah dilakukan 5 kali perhitungan maka dapat diperoleh diameter butir rata-rata dari empat waktu tahan yang berbeda.

Pada literatur dikatakan bahwa bila semakin lama waktu tahan maka butir ferit yang dihasilkan akan semakin besar. Namun pada percobaan ini yang dilakukan pada temperatur 900°C tidak berlaku demikian. Hal tersebut disebabkan karena masih optimalnya fungsi dari presipitat karbida yang mengunci pergerakan

batas butir dari austenit, sehingga butir austenit yang terbentuk tidak terlalu besar. Dan menghasilkan butir ferit yang sedikit kecil atau halus. Pada temperatur tersebut partikel-partikel karbida belum larut, karena berdasarkan perhitungan temperatur kelarutan karbida adalah pada temperatur kisaran 1093⁰C.

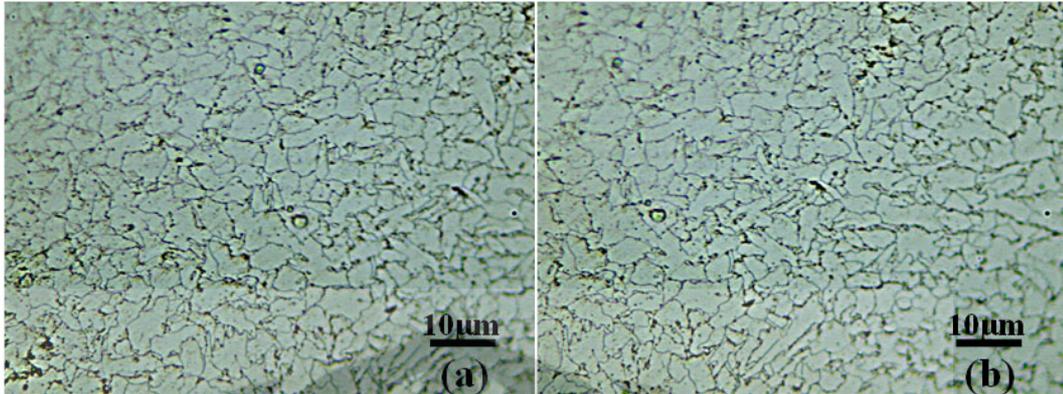
Selain itu, perubahan butir ferit yang terjadi antara baja HSLA yang tidak dilakukan proses *reheating* dan yang dilakukan proses *reheating* tidak terlalu berbeda. Adanya penghalusan butir ini karena temperatur percobaan yang dilakukan merupakan temperatur normalisasi pada baja *hypoeuctoid*. Fenomena yang terjadi pada proses normalisasi yaitu terjadi penghalusan dan pendistribusian butir yang merata dan seragam.



Gambar 4.4 Mikrostruktur dari baja HSLA ASTM A 572 gr 50 setelah reheating dengan temperatur austenisasi 1000°C. (c) tanpa waktu tahan (d) 5 menit (e) 20 menit (f) 40 menit. Etsa Marshall's Reagent yang diikuti dengan nital 2%.

Tabel 4.2 Ukuran butir ferit pada waktu tahan dan temperatur austenisasi berbeda

Temperatur Austenisasi	Tanpa waktu tahan	5 menit	20 menit	40 menit
900°C	5,717μm	5,772 μm	5,63 μm	5,525μm
1000°C	7,195μm	7,75 μm	7,88μm	7,278 μm



Gambar 4.5 Mikrostruktur dari baja HSLA ASTM A 572 gr 50 sebelum *reheating* dengan. Etsa Marshall's Reagent yang diikuti dengan nital 2%.

Tabel 4.3 Ukuran butir ferit sebelum perlakuan panas

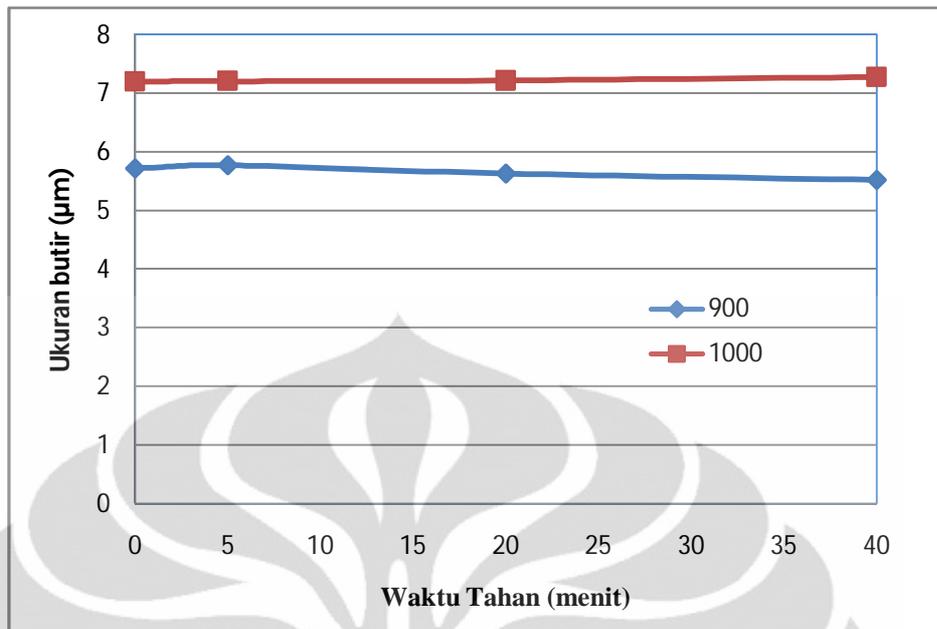
Sampel	d average diameter (μm)
Tanpa Perlakuan	5,724

Kemudian, pada percobaan dengan temperatur 1000°C didapatkan bahwa diameter butir ferit akan membesar dengan bertambahnya waktu tahan, namun sama seperti pada percobaan yang dilakukan pada temperatur 900°C perubahan yang terjadi tidak begitu signifikan. Tapi perubahan yang signifikan dapat dilihat pada perbedaan atau perubahan antara butir ferit yang tidak dilakukan proses *reheating* dan setelah *direheating*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 dimana hal ini dipengaruhi oleh perilaku butir austenit pada saat proses austenisasi. Karena ferit yang bertransformasi dari austenit berada pada batas butir austenit prior, telah diketahui bahwa Menurut Umemoto dkk^[4] pada kondisi tak terdeformasi, batas butir merupakan tempat nukleasi ferit dominan maka bila butir austenitnya berkembang maka feritnya juga akan mengikuti ukuran butir dari austenit tersebut, yaitu butir ferit akan semakin besar jika butir austenit juga semakin besar seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11. Hal ini dikarenakan dengan naiknya temperatur maka volume fraksi dari presipitat akan berkurang sehingga austenit tumbuh atau membesar. Dan juga dapat dikarenakan oleh sifat ferit yang tumbuh dibatas butir austenit, batas butir austenite yang merupakan tempat nukleasi ferit terutama pada sisi-sisi butir. Namun pada percobaan, pertumbuhan ukuran butir ferit tidak mengikuti pertumbuhan butir austenit, hal ini

dikarenakan masih bekerjanya fungsi dari paduan Nb yang berfungsi sebagai penghalus butir ferit.

Nukleasi ferit terjadi secara teratur sepanjang batas butir austenite, dimungkinkan karena merupakan tempat yang mempunyai energi yang lebih tinggi karena merupakan cacat kristal. Nukleasi yang lebih sering akan terjadi pada austenite yang terdeformasi. Namun, Ferit juga dapat tumbuh di dalam matriks austenit atau disebut intragranular ferrite. Tempat nukleasi yang sesuai diantaranya pada inklusi dan dislokasi. Struktur ferit ini cenderung seragam dengan pendinginan lambat dan berbentuk pelat dengan pendinginan cepat. Tetapi laju untuk nukleasi di dalam matriks lebih kecil dibandingkan pada batas butir. Sehingga ukuran dari intragranular ferit bergantung dari ukuran butir austenit. Pada ukuran butir austenit yang halus, ferit yang terbentuk pada batas butir akan meningkatkan konsentrasi karbon dalam matriks, dan mengurangi laju pendinginan sehingga proses nukleasi menjadi lebih sulit. Sedangkan pada butir besar dibutuhkan waktu lebih lama untuk proses difusi karbon menuju bagian tengah matriks sehingga ada banyak waktu untuk nukleasi terjadi dari dalam matriks (intragranular).

Selain itu presipitat juga berpengaruh dalam menentukan terjadinya nukleasi ferit dimana karbida atau nitrida tersebut berfungsi sebagai pengunci pergerakan batas butir atau pertumbuhan butir. Hubungan antara waktu tahan terhadap besar butir Austenit dan ferit dapat dilihat pada gambar 2.5. Pada temperatur 1000°C dengan waktu tahan 20 menit, didapatkan struktur ferit yang berbentuk jarum atau *widmanstätten*. Aaronson memberikan penjelasan bahwa hal tersebut dipengaruhi oleh interfase nukleus dengan butir austenit yang dapat semikoheren dan inkoheren untuk bermigrasi menjadi butir, yang berbeda untuk setiap pendinginan. Pada pendinginan lambat, interfase semikoheren dan inkoheren bermigrasi dengan laju yang sama, sedangkan pada pendinginan lebih cepat hanya interfase inkoheren yang dapat bermigrasi dengan *driving force* yang tinggi.



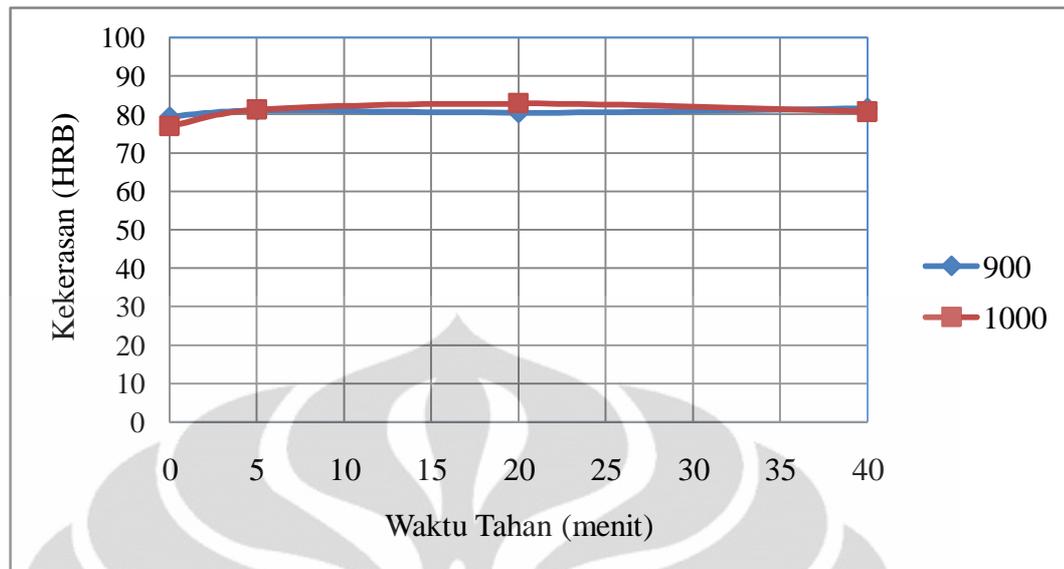
Gambar 4.6 Hubungan waktu tahan dan temperatur austenisasi dengan ukuran butir ferit

Selain itu, pada percobaan yang dilakukan dengan temperatur 1000⁰C diameter butir ferit yang didapat mengalami kenaikan, karena disebabkan pada temperatur yang cukup tinggi migrasi batas butir ferit menjadi mudah, sehingga ferit dapat tumbuh dengan cepat tetapi jumlah total butir akan berkurang dengan meningkatnya waktu tahan, hal itu karena ada batas butir ferit yang menyusut ^[19]. Penambahan waktu tahan juga dapat menyebabkan energi semakin lama bertahan, sehingga memungkinkan bagi butir ferit untuk terus tumbuh.

4.2 Uji Kekerasan

4.2.1 Pengaruh Temperatur Austenisasi dan Waktu Tahan terhadap Kekerasan

Sampel diampelas terlebih dahulu sebelum dilakukan pengujian kekerasan, hal ini dilakukan agar nilai kekerasan yang dihasilkan akan menunjukkan hasil yang valid. Berikut adalah Gambar yang menunjukkan nilai hasil pengujian kekerasan.



Gambar 4.7 pengaruh waktu tahan terhadap kekerasan

Pada percobaan, didapatkan bahwa nilai kekerasan sebelum dan sesudah dilakukan reheating tidak terjadi perubahan yang terlalu signifikan, karena hasil pengujian kekerasan menunjukkan nilai kekerasan yang berada pada rentang 80 HRB. Kemudian dari Gambar di atas dapat diketahui bahwa pada temperatur 1000°C , semakin lama waktu tahan maka kekerasan baja HSLA akan semakin tinggi, namun hal ini tidak selamanya linear, karena pada waktu tahan yang lebih lama lagi kekerasan baja HSLA menurun. Hal tersebut menunjukkan bahwa kekerasan yang dapat dicapai oleh baja HSLA selama pemanasan ulang akan optimum ketika waktu tahan tidak melampaui 20 menit, hal ini karena pada temperatur tersebut menunjukkan struktur mikro berupa jarum. Struktur mikro yang berbentuk jarum sangatlah diinginkan pembentukkannya, hal tersebut karena struktur ferit selalu menunjukkan kekerasan dan sifat mekanik lainnya yang lebih unggul sebagaimana yang diungkapkan Shiro Imai^[24]. Kemudian ketika waktu tahan dinaikkan maka akan memberi waktu kepada butir austenit untuk tumbuh, sehingga akan menurunkan kekerasan baja HSLA tersebut. Sedangkan pada temperatur 900°C kekerasan baja meningkat, walaupun peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan. Adanya peningkatan ini dikarenakan perilaku butir ferit dari baja HSLA.

BAB V

KESIMPULAN

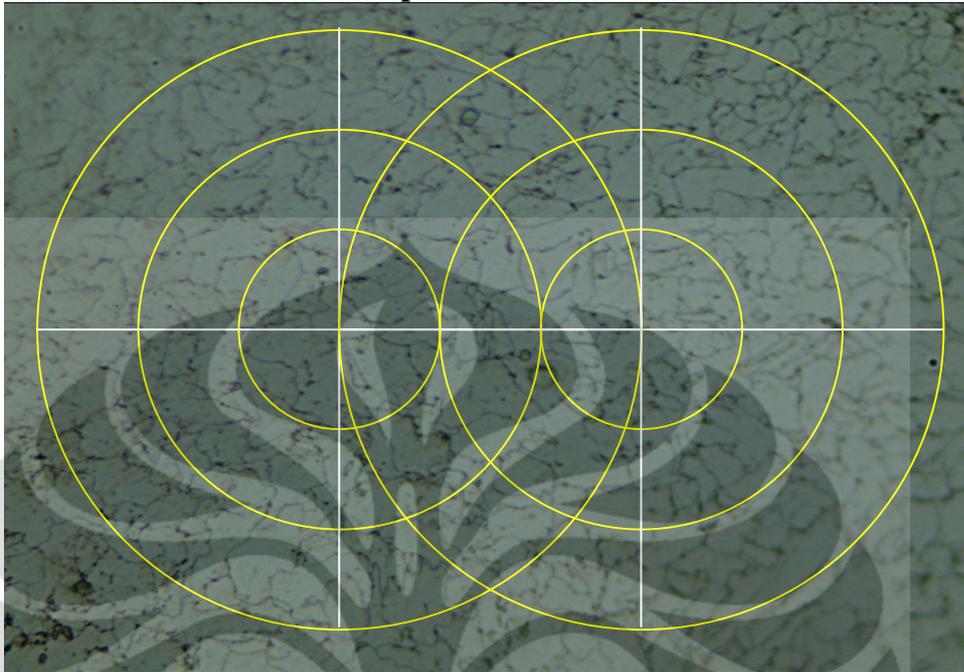
1. Semakin lama waktu tahan, maka semakin banyak waktu yang tersedia untuk bernukleasinya butir austenit, sehingga butir austenit akan semakin besar. Dengan perubahan ukuran butir sebesar 9,3% untuk waktu tahan 0 sampai 5 menit, 8,5% untuk waktu tahan 5 sampai 20 menit dan 11,5% untuk waktu tahan 20 sampai 40 menit
2. Proses *reheating* atau pemanasan ulang pada temperatur 900⁰C dan 1000⁰C dengan waktu tahan yang berbeda-beda tidak memiliki pengaruh terhadap ukuran butir ferit, karena perubahan hanya pada kisaran dibawah 5%.
3. Setelah dilakukan proses *reheating* pada temperatur dan waktu tahan yang berbeda-beda, tidak ditemukan perubahan yang berarti pada nilai kekerasannya antara setelah dan sebelum *reheating*.
4. Pada temperatur 1000⁰C dengan waktu tahan 20 menit, didapatkan struktur ferit berbentuk jarum atau *widmansttaten* sehingga sampel yang mengalami perlakuan panas pada temperatur 1000⁰C dengan waktu tahan 20 menit memiliki kekerasan yang paling tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

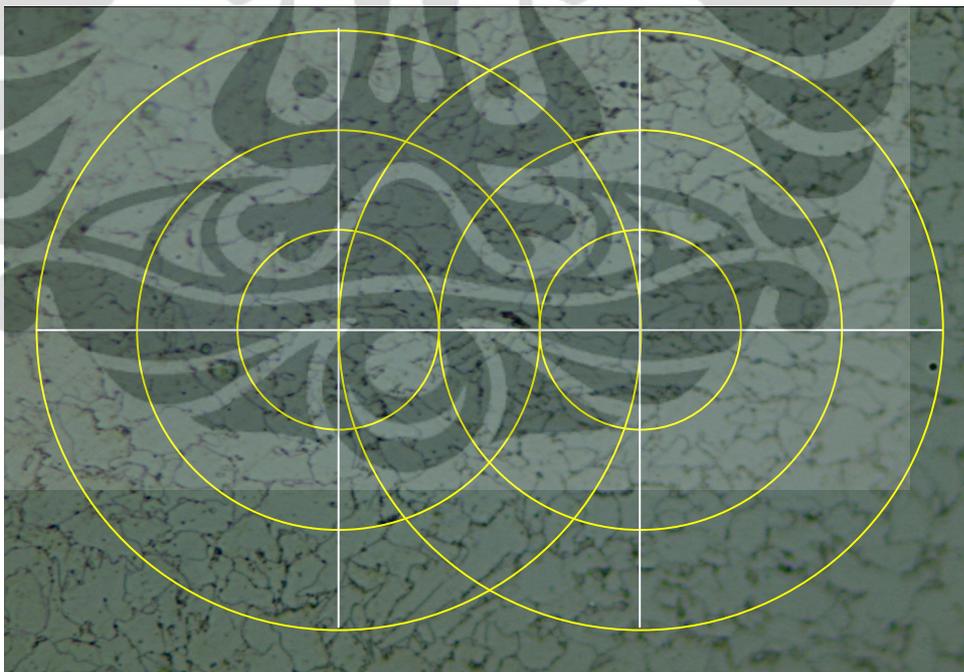
1. Clobberly, *et al.*, *Properties and Selection: Iron and Steels*. Metals Handbook Vol 1, 10th Edition (Ohio: ASM International, 1998)
2. B.K Panigrahi, “*Processing of low carbon steel plate and hot strip-an overview*”, *Jurnal Teknologi*, 24(4): pp. 361-371, 2001.
3. M. Ariati , T. W. Sulistio, A. Manaf, Sutopo, dan E.S. Siradj *Persamaan Empiris Pertumbuhan Butir Austenit Baja HSLA-0,019%Nb pada Proses Pendinginan non-Isotermal*
4. Umemoto, M., *et.al.* (1987). *Ferrite Formation work-Hardened Austenite in an HSLA Steel*. Department of Metal Science and Technology, Kyoto University.
5. Yang H. Bae, *et al.*, *Effects of Austenite Conditioning on Austenite/Ferrite Phase Transformation of HSLA Steel*, *Jurnal Teknologi*, 45(1)
6. K.J. Irvine, F.B.Pickering and T .Gladman, *J.Iron Steel Inst*,1967,205,pg161
7. ASM Handbook Volume 01, *Irons, Steels, and High-Performance Alloys, High Strength Structural and High Strength Low Alloy Steel*
8. Mangonon, Pat L. (1999). *The Principles of Materials selection for Engineering Design: International Edition*. Prentice Hall International, Inc.
9. “*Control of High Strength Low Alloy (HSLA) Steel Properties*” <http://www.key-to-steel.com/default.aspx?ID=CheckArticle&NM=182>
10. Callister, William D., Jr. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction (7th ed.)*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
11. *L Lewelyn, D.T.*”Steel Metallurgy and Application” Butterworth-Henneman.Ltd 1994
12. D.C. Houghton, *J.f Metall Matter*,1 41, 10,(1993),
13. Bhadesia.H.K.D.H and Honeycombe R.W.K, *Steels Microstructure and Properties*
14. Clobberly, *et al.*, *Properties and Selection: Iron and Steels*. Metals Handbook Vol 1, 10th Edition (Ohio: ASM International, 1998), pg 389-423

15. Juliawatri, "Pengaruh Waktu tahan terhadap besar butir austenit piror pada baja HSLA 0.029%Nb hasil coran kontinu selama pemanasan isothermal," *Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI Jurusan Metalurgi*, Depok, 2002
16. M.Militzer, A.Giumelli, E.Bruce Hawbolt, and T.R. Meadowcroft, *Metall .and mater. Trans*, 27A, (1996) ,
17. Sidney Avner, *Introduction to Physical Metallurgy* (Singapore: McGraw-Hill International
18. B.K.Panigrahi, (2001), "Processing of low Carbon Steel Plate and Hot Strip-an overview", *R&D Centre for Iron and Steel, Steel Authority of India Ltd,Ranchi 834002,India..*
19. C.M Sellars, (1982), "Static Recrystallization and Precipitation During Hot Rolling of Microalloyed Steels" , *Mat Science Seminar, Sheffield, England*
20. Porter, D.A., & K.E Easterling. (1992). *Phase Transformations in Metals and Alloys (2nd ed.)*. Chapman and Hall, London.
21. Seok-Jae Lee, Young-Kook Lee ,*Prediction of austenite grain growth during austenitization of low alloy steels*
22. Lakhtin.Y,The iron Carbon-Carbon Equilibrium Diagram, Steels and Its Heat Treatment, Moscow Publisher, 1997.
23. ASTM E 112-96 rev, *Standart Test Methods for Determining Average Grain Size*, ASTM International, 2000.
24. Imai, Shiro. *General Properties of TMCP Steels*. Plate Technical Dept., Nippon Steel Corporation. Tokyo, Japan.. *The International Society of Offshore and Polar Engineers*. 2002.

LAMPIRAN 1
Sampel No treatment



Gambar L.1 Strukturmikro sampel tanpa *reheating*



Gambar L.2 Strukturmikro sampel tanpa *reheating*

PERHITUNGAN BUTIR

Rumus yang digunakan berdasarkan prosedur intercept, menurut ASTM E 112 – 96:

$$\bar{N}_L = \frac{N_i}{LIM}$$

N_L = number of intercepts per unit length of test line

N_i = number of intercepts with a test line

L = 500mm (length of a test line)

M = Perbesaran 1000X

Nilai N_L kemudian dimasukkan dalam persamaan:

$$G = (6.643856 \log N_L) - 3.288$$

TABLE 6 Grain Size Equations Relating Measured Parameters to the Microscopically Determined ASTM Grain Size, G

NOTE 1—Determine the ASTM Grain Size, G , using the following equations:

NOTE 2—The second and third equations are for single phase grain structures.

NOTE 3—To convert micrometres to millimetres, divide by 1000.

NOTE 4—A calculated G value of -1 corresponds to ASTM $G = 00$.

Equation	Units
$G = (3.321928 \log_{10} \bar{N}_A) - 2.954$	\bar{N}_A in mm^{-2}
$G = (6.643856 \log_{10} N_L) - 3.288$	N_L in mm^{-1}
$G = (6.643856 \log_{10} P_L) - 3.288$	P_L in mm^{-1}
$G = (-6.643856 \log_{10} \ell) - 3.288$	ℓ in mm

Data perpotongan sampel

Untuk Sampel Tanpa Perlakuan

Sampel	N_i rata-rata		N_L rata-rata		Nilai G rata-rata	
	Foto 1	Foto 2	Foto 1	Foto 2	G_1	G_2
Tanpa Perlakuan	93	92.5	186	185	11,8	11,76

Data kemudian dimasukkan dalam tabel atau gambar pada ASTM E 112-96 sehingga didapatkan ukuran butir sebagai berikut:

Sampel	d average diameter (μm)
Tanpa Perlakuan	5,724

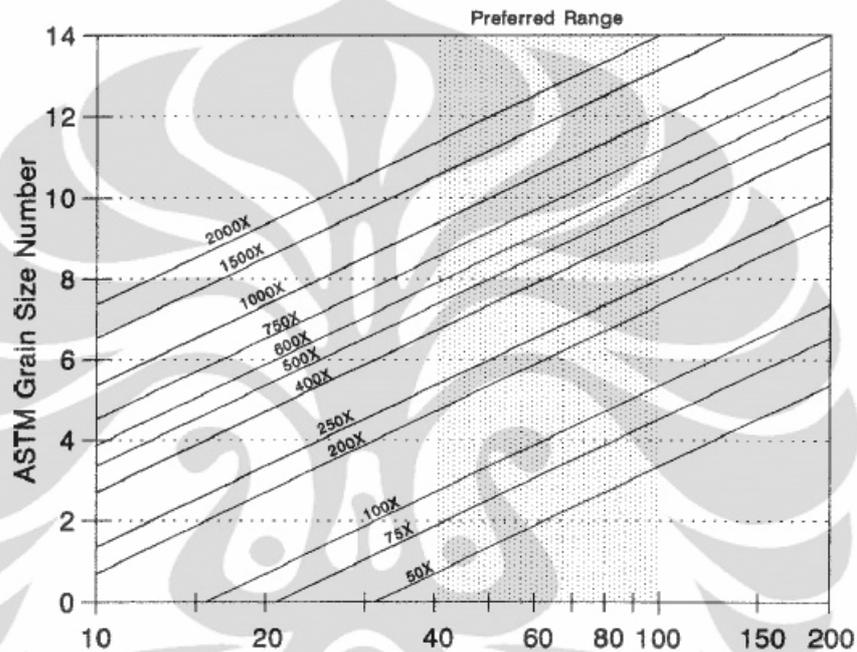
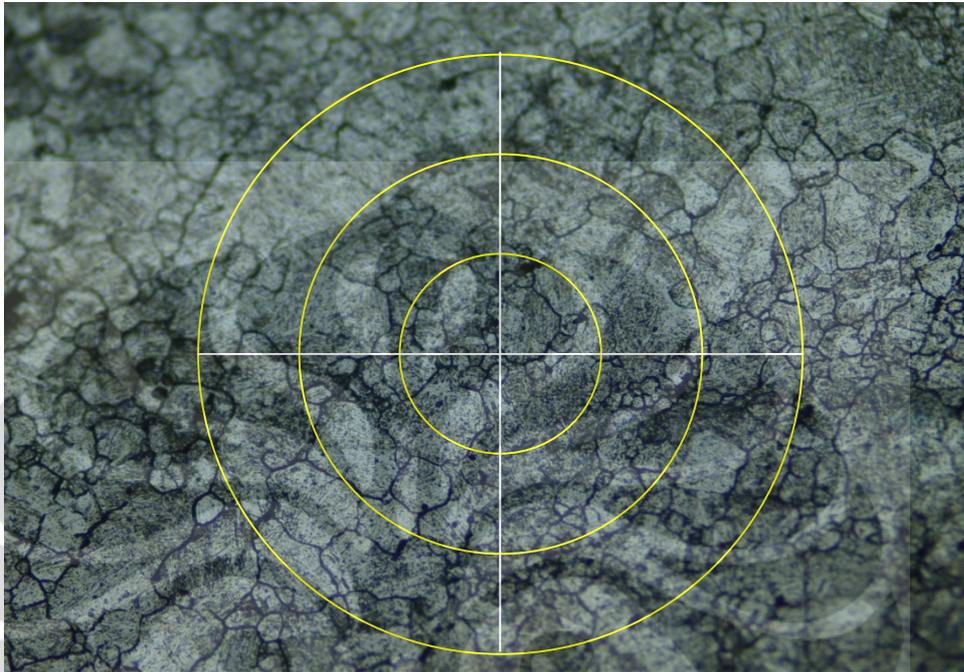


TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

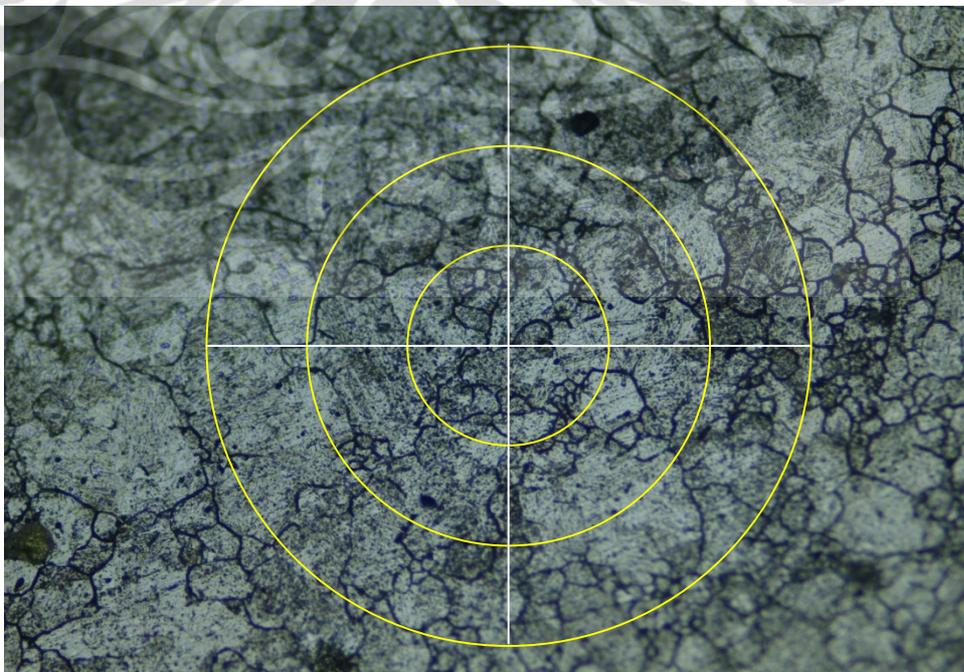
Grain Size No. G	N_A Grains/Unit Area		A Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		\bar{T} Mean Intercept		N_L
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm^2	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.00
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.00
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.00

LAMPIRAN 2

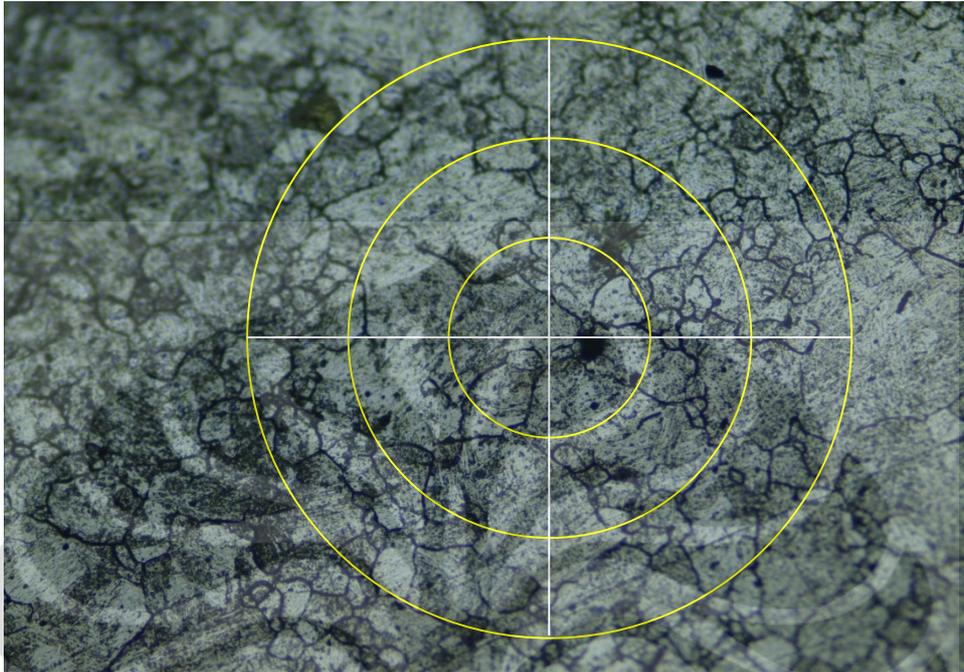
Foto austenit



Gambar 19 struktur mikro austenit setelah reheating 1000⁰C tanpa waktu tahan

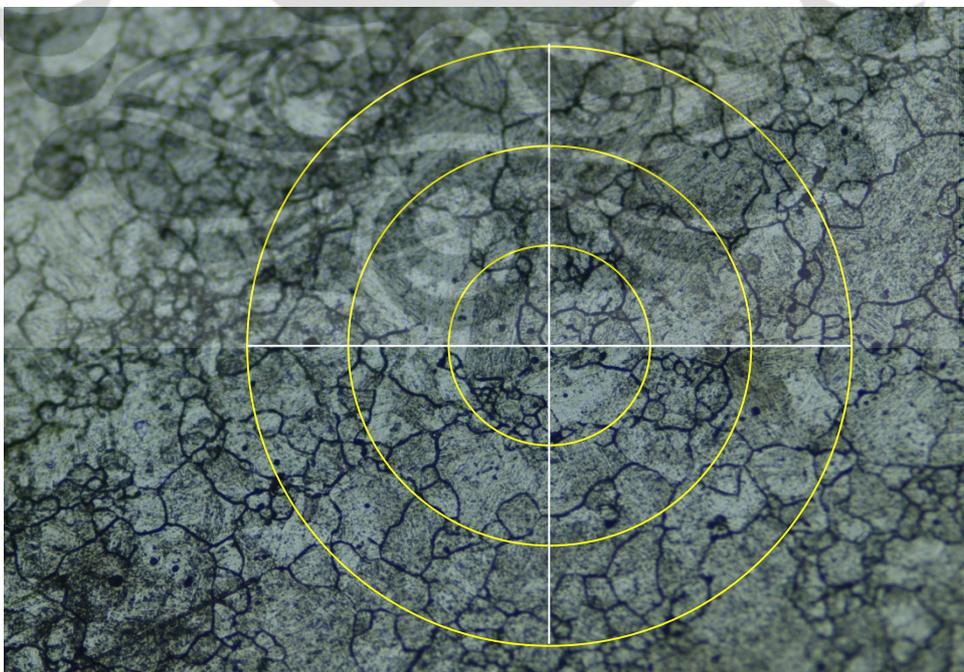


Gambar 20 struktur mikro austenit setelah reheating 1000⁰C dengan waktu tahan 5 menit



Gambar

21 struktur mikro austenit setelah reheating 1000⁰C dengan waktu tahan 20 menit



Gambar

22 struktur mikro austenit setelah reheating 1000⁰C dengan waktu tahan 40 menit

PERHITUNGAN BUTIR

Rumus yang digunakan berdasarkan prosedur intercept, menurut ASTM E 112 – 96:

$$\bar{N}_L = \frac{N_i}{LM}$$

N_L = number of intercepts per unit length of test line

N_i = number of intercepts with a test line

L = 500mm (length of a test line)

M = Perbesaran 200X

Nilai N_L kemudian dimasukkan dalam persamaan:

$$G = (6.643856 \log N_L) - 3.288$$

TABLE 6 Grain Size Equations Relating Measured Parameters to the Microscopically Determined ASTM Grain Size, G

NOTE 1—Determine the ASTM Grain Size, G , using the following equations:

NOTE 2—The second and third equations are for single phase grain structures.

NOTE 3—To convert micrometres to millimetres, divide by 1000.

NOTE 4—A calculated G value of -1 corresponds to ASTM $G = 00$.

Equation	Units
$G = (3.321928 \log_{10} \bar{N}_L) - 2.954$	N_A in mm^{-2}
$G = (6.643856 \log_{10} N_L) - 3.288$	N_L in mm^{-1}
$G = (6.643856 \log_{10} P_L) - 3.288$	P_L in mm^{-1}
$G = (-6.643856 \log_{10} \ell) - 3.288$	ℓ in mm

Data perpotongan sampel

Untuk Temperatur Austenisasi 1000°C

A0 dan A5

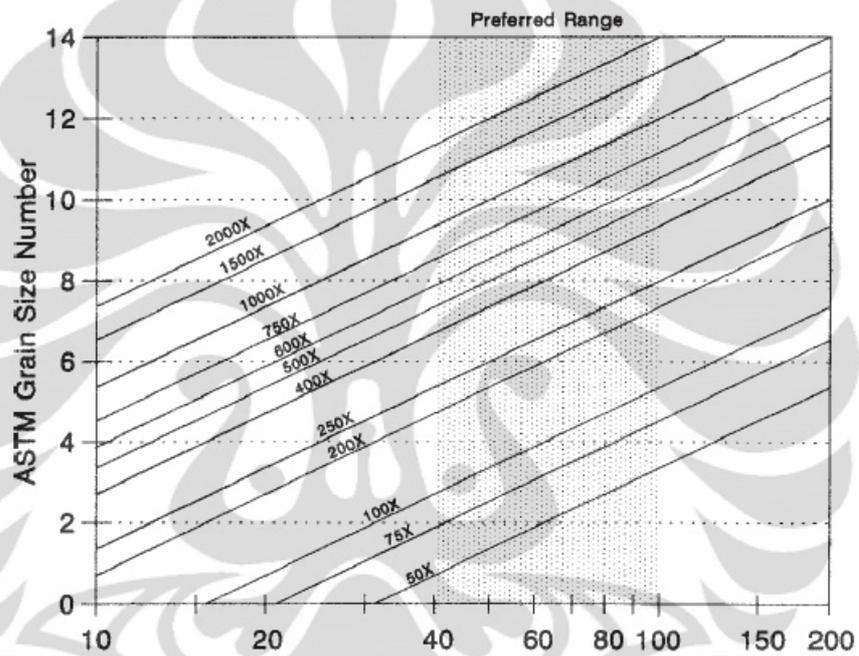
NL	G	D	NL	G	D
33	6,8007	33,856	27,6	6,285112	40,86
29,6	6,48697	37,9986	26,8	6,200242	42,07386
28,2	6,34717	39,9844	28,8	6,407912	39,12
28,4	6,36756	39,6946	25,8	6,0905	43,629

A20 dan A40

NL	G	D	NL	G	D
25	5,99963	44,9252	21,8	5,6044	51,6463
25,2	6,0226	44,5938	21,6	5,5778	52,0986
26,2	6,1349	42,9986	22,8	5,7338	49,4456
23,8	5,857	47,3384	23,8	5,8577	47,338

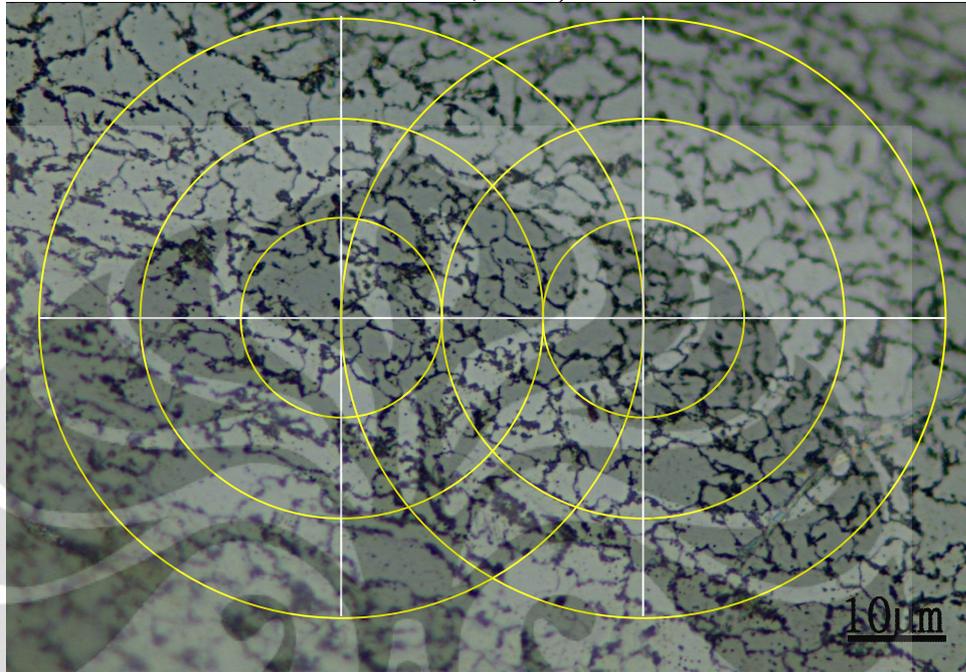
Data kemudian dimasukkan dalam tabel 4 atau gambar 6 pada ASTM E 112-96 sehingga didapatkan ukuran butir sebagai berikut:

Sampel	d average diameter (μm)
A0	37,883
A5	41,420
A20	44,964
A40	50,132

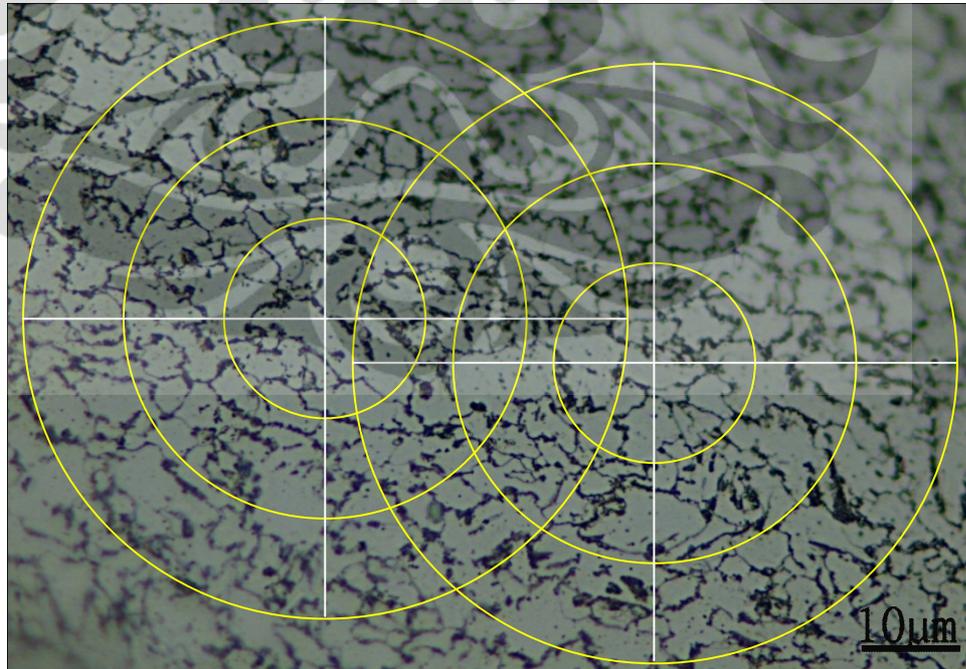


LAMPIRAN 3 Butir Ferit

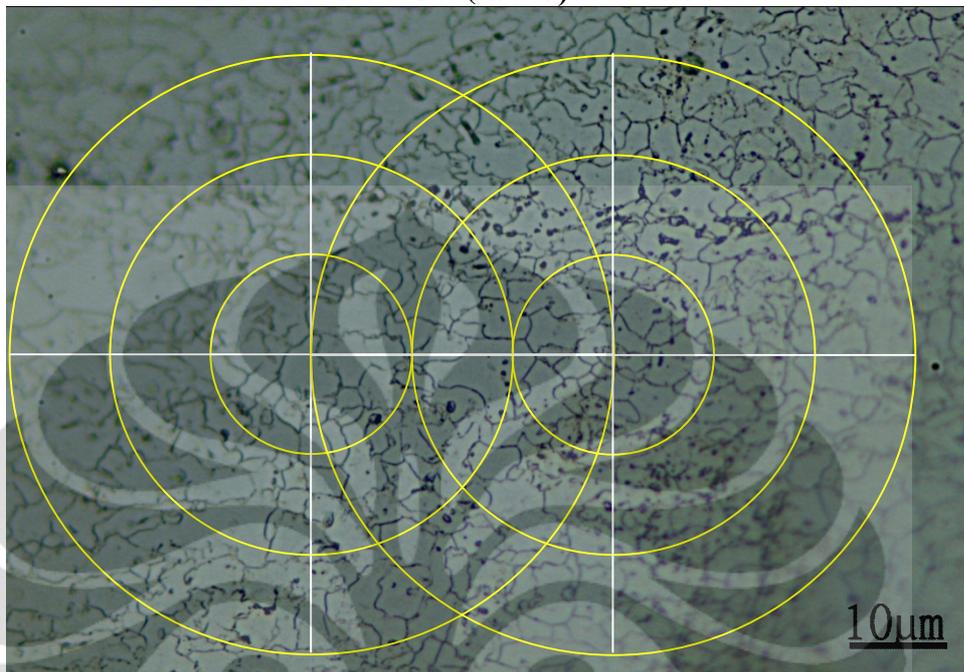
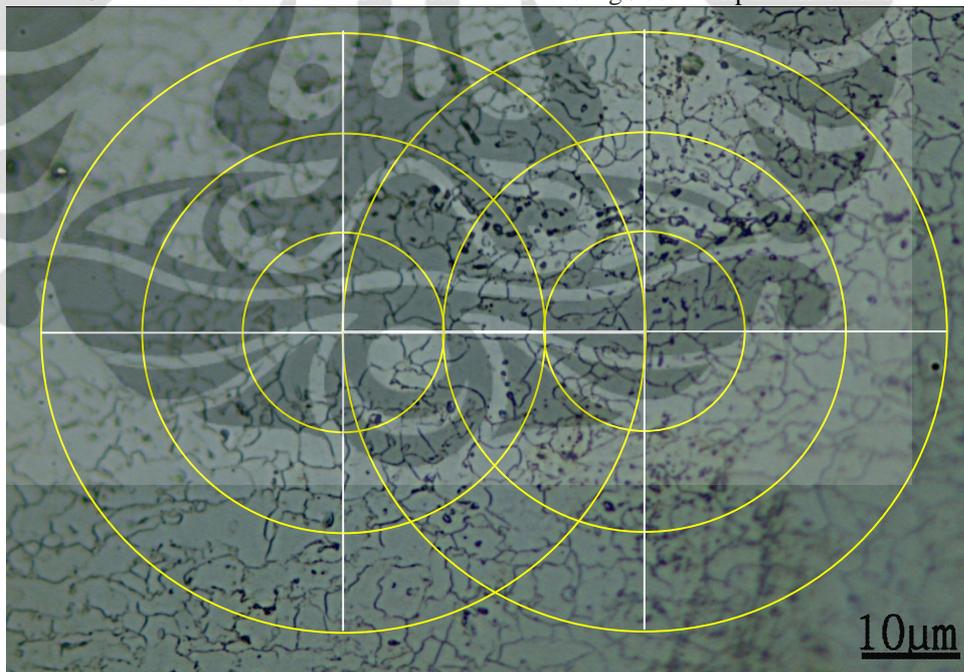
U 0 (900°C)



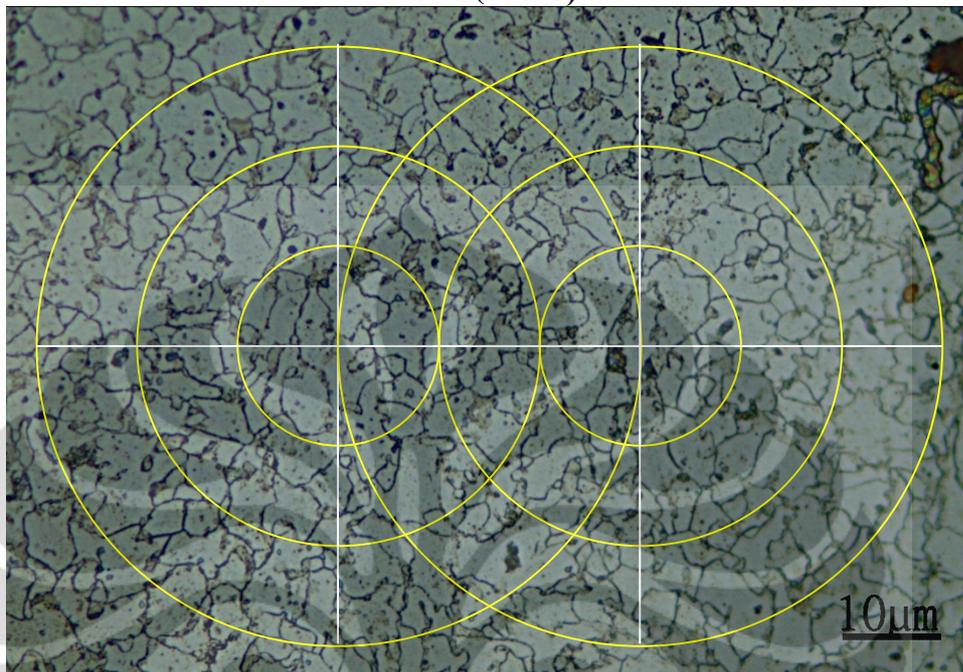
Gambar L 7 struktur mikro ferit setelah reheating 9000C tanpa waktu tahan



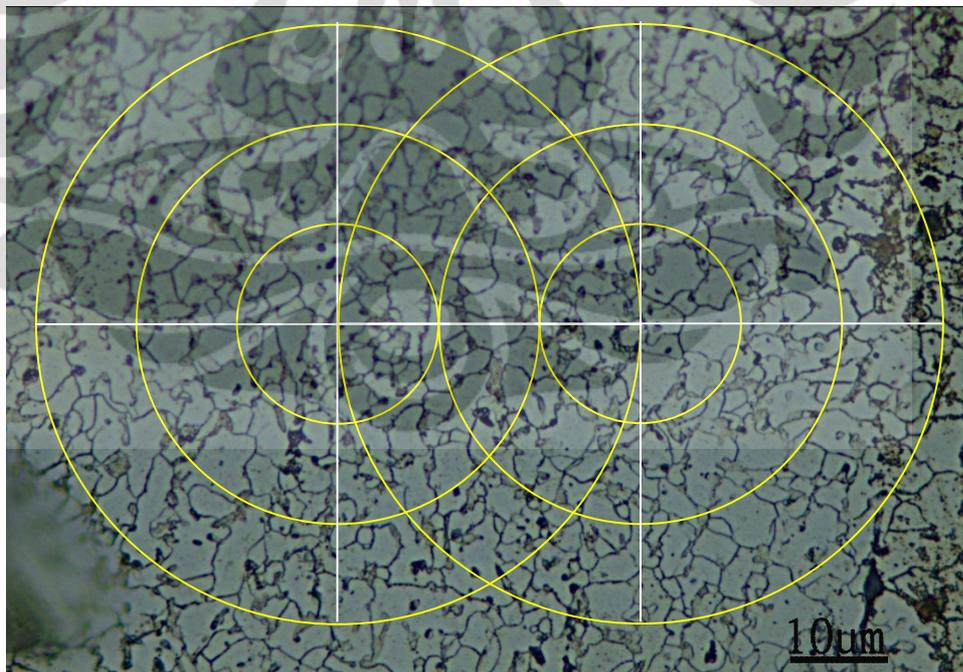
Gambar L 8 struktur mikro ferit setelah reheating 9000C tanpa waktu tahan

U 5 (900°C)**Gambar L 9** struktur mikro ferit setelah reheating 900°C tanpa waktu tahan**Gambar L 10** struktur mikro ferit setelah reheating 900°C tanpa waktu tahan

U 20 (900°C)

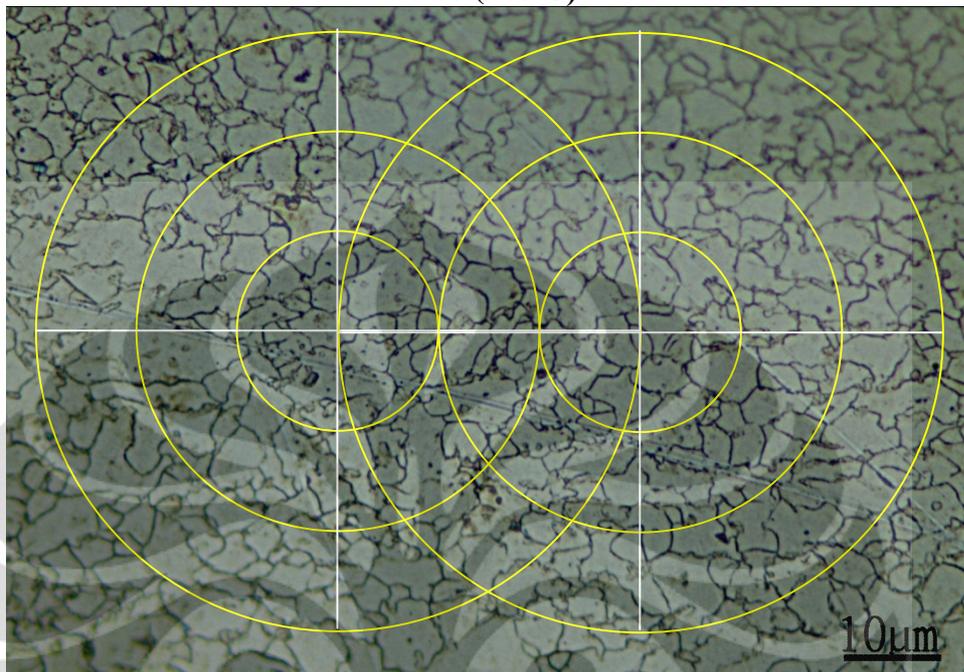


Gambar L 11 struktur mikro ferit setelah reheating 900°C dengan waktu tahan 20 menit

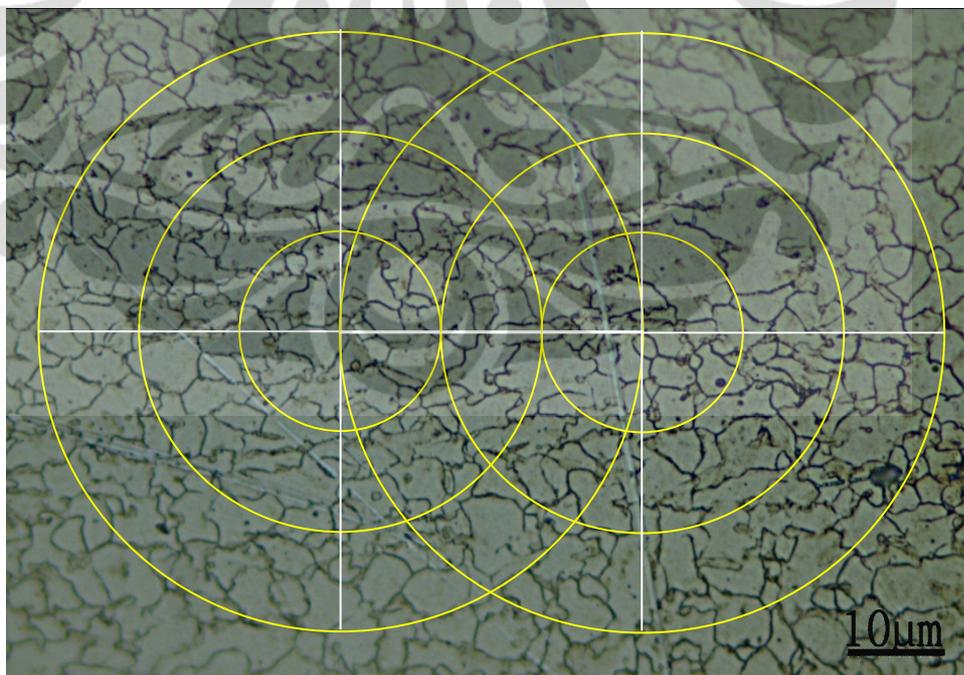


Gambar L 12 struktur mikro ferit setelah reheating 900°C dengan waktu tahan 20 menit

U 40 (900°C)



Gambar L 13 struktur mikro ferit setelah reheating 900°C dengan waktu tahan 40 menit



Gambar L 14 struktur mikro ferit setelah reheating 900°C dengan waktu tahan 40 menit

PERHITUNGAN BUTIR

Rumus yang digunakan berdasarkan prosedur intercept, menurut ASTM E 112 – 96:

$$\bar{N}_L = \frac{N_i}{LIM}$$

N_L = number of intercepts per unit length of test line

N_i = number of intercepts with a test line

L = 500mm (length of a test line)

M = Perbesaran 1000X

Nilai N_L kemudian dimasukkan dalam persamaan:

$$G = (6.643856 \log N_L) - 3.288$$

TABLE 6 Grain Size Equations Relating Measured Parameters to the Microscopically Determined ASTM Grain Size, G

NOTE 1—Determine the ASTM Grain Size, G , using the following equations:

NOTE 2—The second and third equations are for single phase grain structures.

NOTE 3—To convert micrometres to millimetres, divide by 1000.

NOTE 4—A calculated G value of -1 corresponds to ASTM $G = 00$.

Equation	Units
$G = (3.321928 \log_{10} \bar{N}_A) - 2.954$	\bar{N}_A in mm^{-2}
$G = (6.643856 \log_{10} N_L) - 3.288$	N_L in mm^{-1}
$G = (6.643856 \log_{10} P_L) - 3.288$	P_L in mm^{-1}
$G = (-6.643856 \log_{10} \ell) - 3.288$	ℓ in mm

Data perpotongan sampel

Untuk Temperatur Austenisasi 900°C

Sampel	N_i rata-rata		N_L rata-rata		Nilai G rata-rata	
	Foto 1	Foto 2	Foto 1	Foto 2	G_1	G_2
U 0	69	68	158	133	11,33	11,41
U 5	98	96	195	197	11,93	11,95
U 20	95	104	193	156	11,89	12,12
U 40	98	98	196	196	12,06	12,06

Data kemudian dimasukkan dalam tabel 4 atau gambar 6 pada ASTM E 112-96 sehingga didapatkan ukuran butir sebagai berikut:

Sampel	d average diameter (μm)
U0	5,717
U5	5,772
U20	5,63
U40	5,52

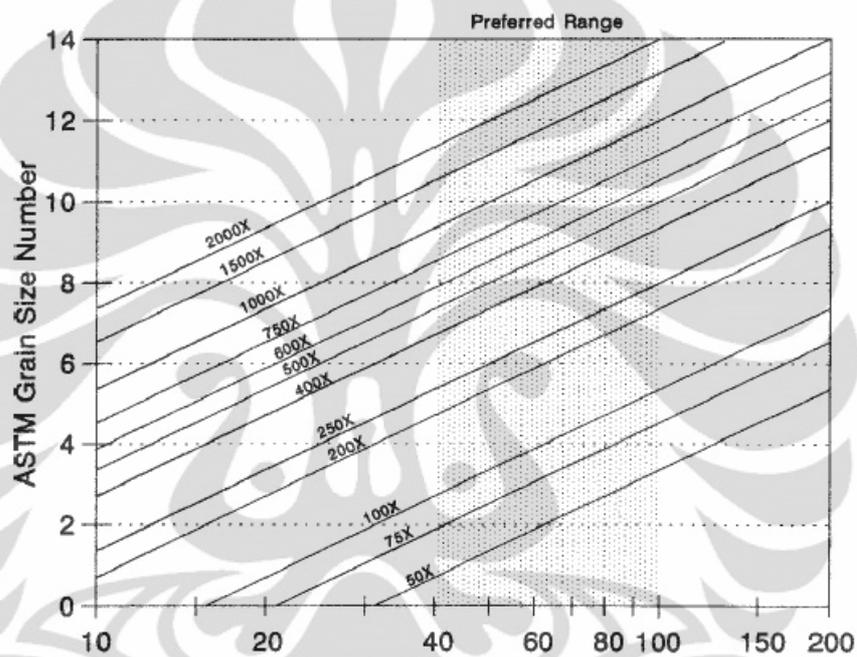
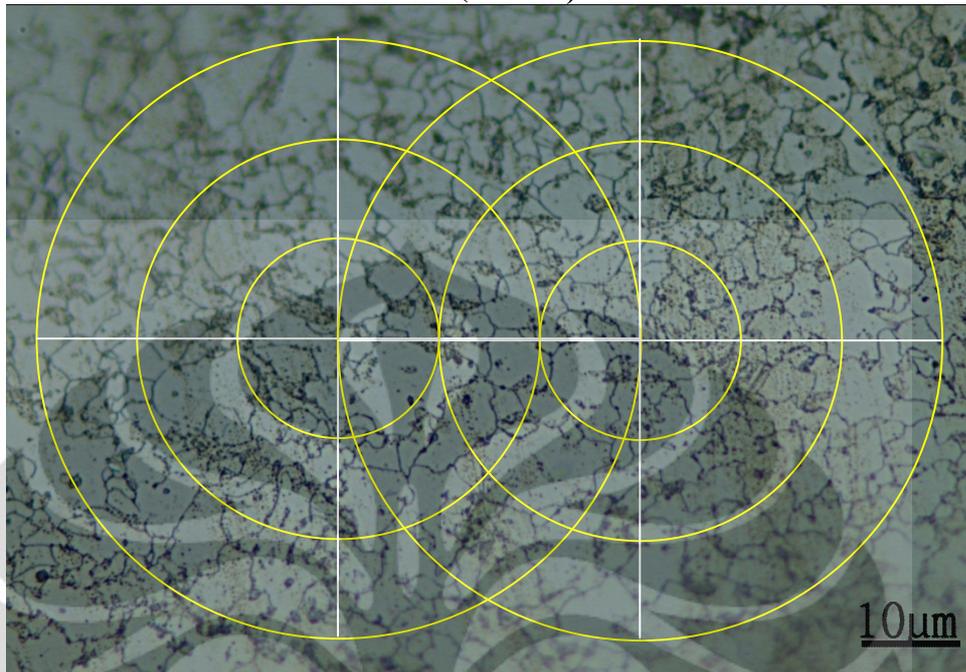


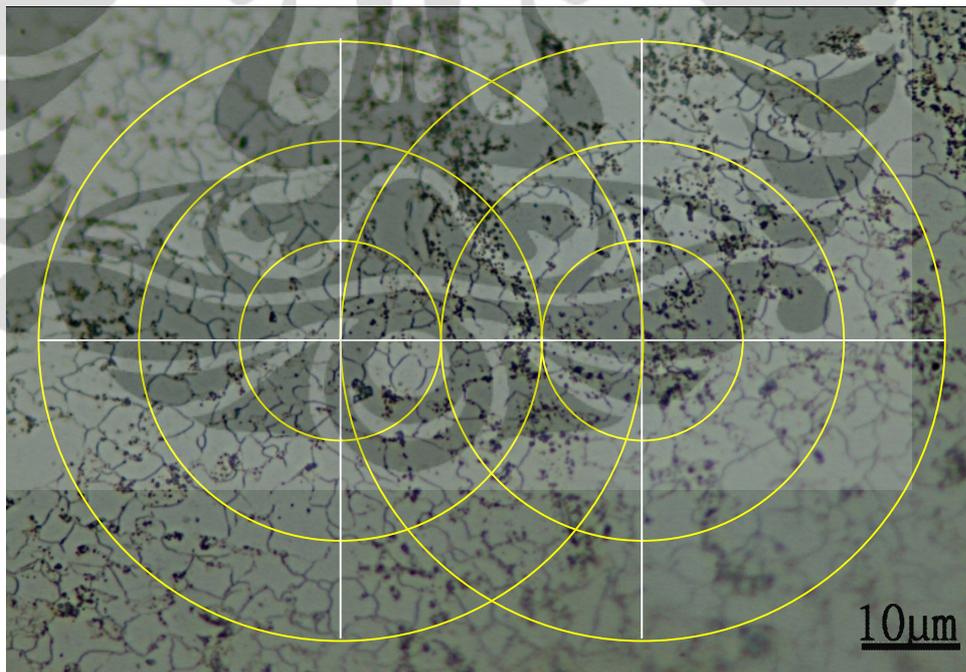
TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		$\bar{\tau}$ Mean Intercept		\bar{N}_L No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm^2	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.00
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.00
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.00

LAMPIRAN 4
U 0 (1000°C)

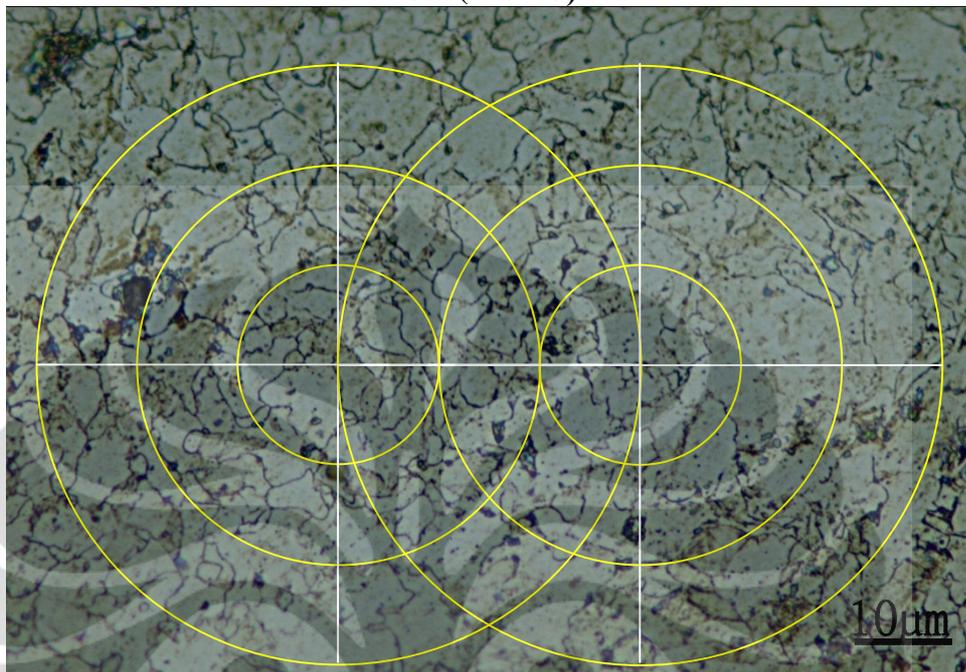


Gambar L 15 struktur mikro ferit setelah reheating 1000⁰C tanpa waktu tahan

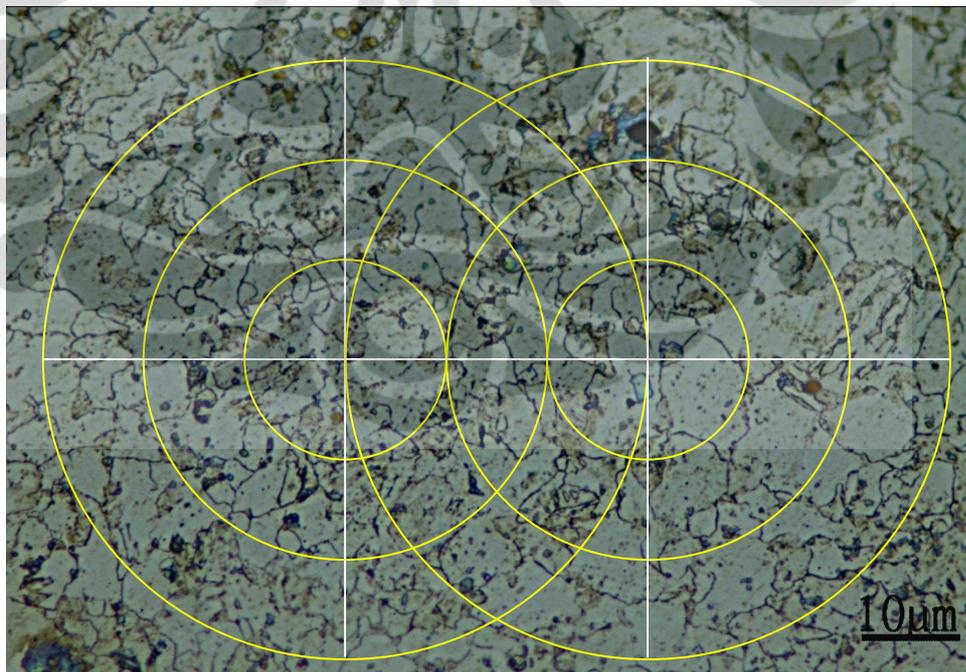


Gambar I 16 struktur mikro ferit setelah reheating 1000⁰C tanpa waktu tahan

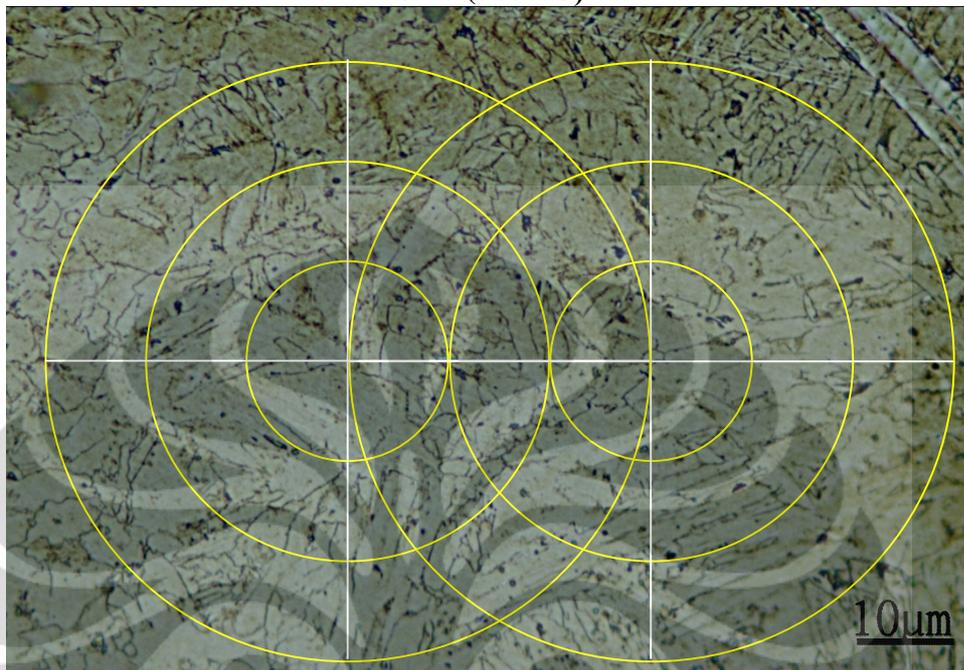
U 5 (1000°C)



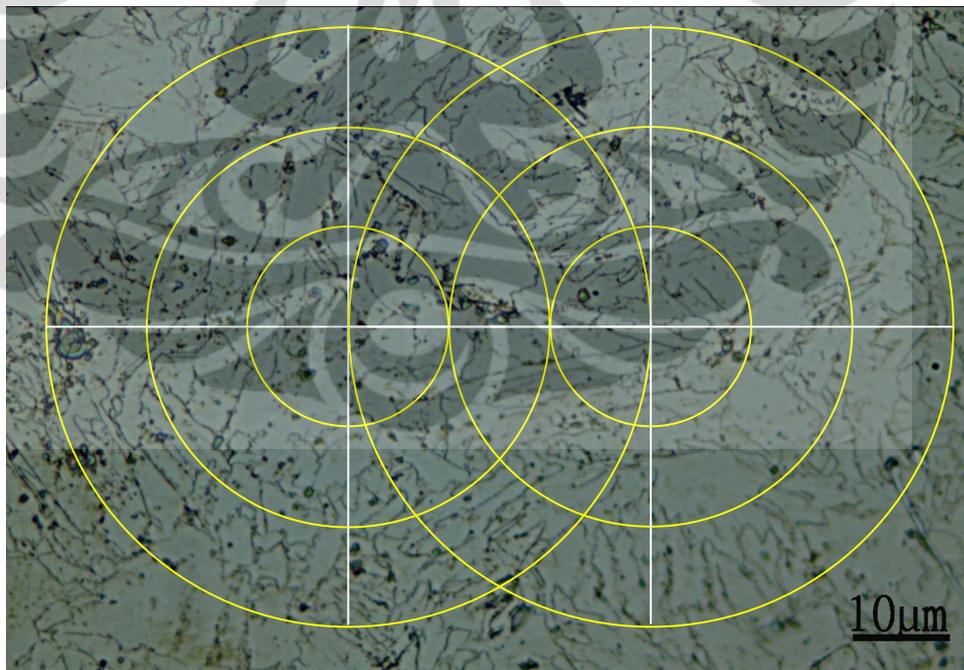
Gambar L 17 struktur mikro ferit setelah reheating 1000°C dengan waktu tahan 5 menit



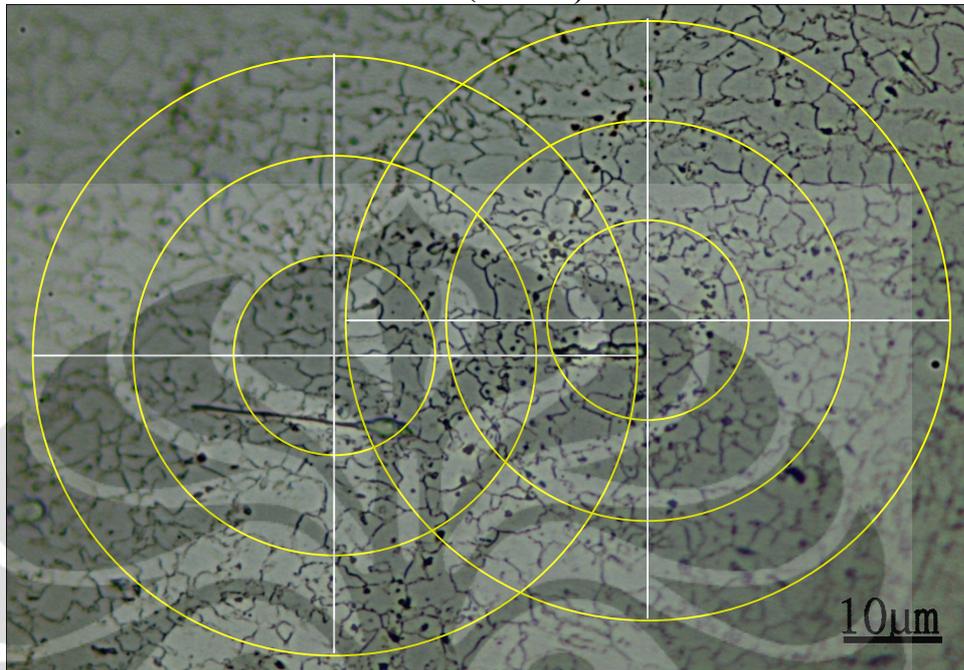
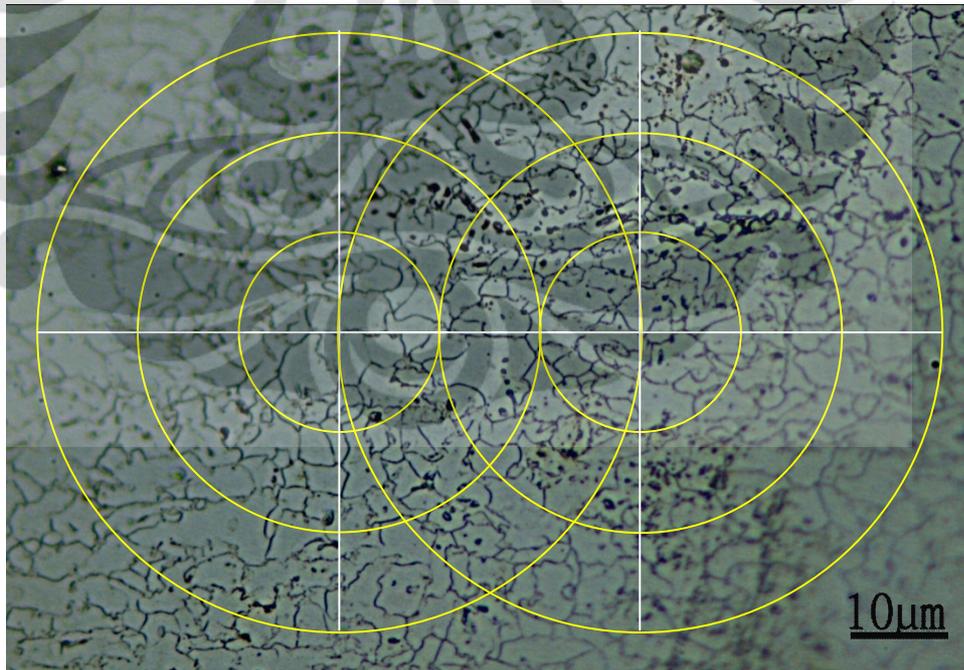
Gambar L 18 struktur mikro ferit setelah reheating 1000°C dengan waktu tahan 5 menit

U 20 (1000°C)

Gambar L 19 struktur mikro ferit setelah reheating 1000⁰C dengan waktu tahan 20 menit



Gambar L 20 struktur mikro ferit setelah reheating 1000⁰C dengan waktu tahan 20 menit

U 40 (1000°C)**Gambar L 21** struktur mikro ferit setelah reheating 1000°C dengan waktu tahan 40 menit**Gambar L 22** struktur mikro ferit setelah reheating 1000°C dengan waktu tahan 40 menit

PERHITUNGAN BUTIR

Rumus yang digunakan berdasarkan prosedur intercept, menurut ASTM E 112 – 96:

$$\bar{N}_L = \frac{N_i}{LIM}$$

N_L = number of intercepts per unit length of test line

N_i = number of intercepts with a test line

L = 500mm (length of a test line)

M = Perbesaran 1000X

Nilai N_L kemudian dimasukkan dalam persamaan:

$$G = (6.643856 \log N_L) - 3.288$$

TABLE 6 Grain Size Equations Relating Measured Parameters to the Microscopically Determined ASTM Grain Size, G

NOTE 1—Determine the ASTM Grain Size, G , using the following equations:

NOTE 2—The second and third equations are for single phase grain structures.

NOTE 3—To convert micrometres to millimetres, divide by 1000.

NOTE 4—A calculated G value of - 1 corresponds to ASTM $G = 00$.

Equation	Units
$G = (3.321928 \log_{10} \bar{N}_A) - 2.954$	\bar{N}_A in mm^{-2}
$G = (6.643856 \log_{10} N_L) - 3.288$	N_L in mm^{-1}
$G = (6.643856 \log_{10} P_L) - 3.288$	P_L in mm^{-1}
$G = (-6.643856 \log_{10} \ell) - 3.288$	ℓ in mm

Data perpotongan sampel

Untuk Temperatur Austenisasi 900°C

Sampel	N_i rata-rata		N_L rata-rata		Nilai G rata-rata	
	Foto 1	Foto 2	Foto 1	Foto 2	G_1	G_2
U 0	79	77	158	154	11,35	11,24
U 5	71	71.5	142	143	11,05	11,07
U 20	74.5	72	149	144	11,17	11,09
U 40	96	91	192	182	11,88	11,72

Data kemudian dimasukkan dalam tabel 4 atau gambar 6 pada ASTM E 112-96 sehingga didapatkan ukuran butir sebagai berikut:

Sampel	d average diameter (μm)
2	7.83
3	7.89
4	7.88
6	7.27

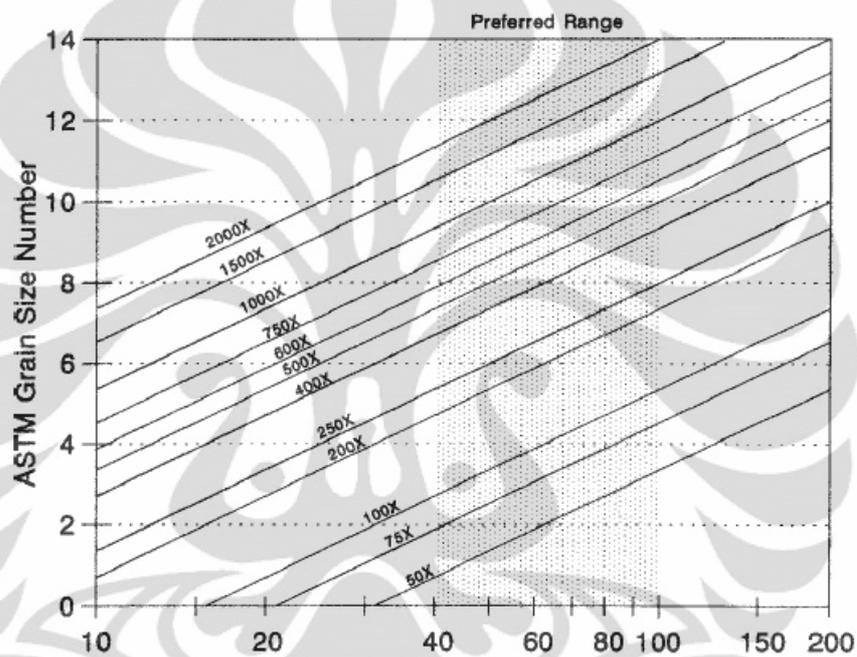


TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		$\bar{\tau}$ Mean Intercept		\bar{N}_L No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm^2	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.00
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.00
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.00



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
 Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888 111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN KEKERASAN
HARDNESS TEST REPORT

Page 3 of 8

No Laporan <i>Report Nr</i>	329	Bahan <i>Material</i>	Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Richard	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	900 U0
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi dan Material Kampus Baru UI Depok 16424	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	10 Juni 2011
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0657/PT.02/FT04/P/2011	Standar <i>Standard</i>	ASTM E18 - 08
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	14 Juni 2011	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Rockwell Hardness Testing Machine

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Penjejakan <i>Indentation</i>	Kekerasan Rockwell <i>Rockwell Hardness</i>	Rata-rata <i>Average</i>	Keterangan <i>Remarks</i>
900 U0	I	82.2	79	HRB Load: 100 Kgf
	II	77.4		
	III	78.8		
	IV	80.5		
	V	77.9		

Catatan: ketidakpastian standar blok uji dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan K=2

Depok, 15 Juni 2011

Manajer Teknis

Laboratorium Uji

Departemen Teknik Metalurgi Dan Material

(Ahmad Ivan Karayan, ST.,M.Eng)

FF-24/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
 Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888 111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN KEKERASAN
HARDNESS TEST REPORT

Page 5 of 8

No Laporan <i>Report Nr</i>	329	Bahan <i>Material</i>	Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Richard	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	1000 U0
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi dan Material Kampus Baru UI Depok 16424	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	10 Juni 2011
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0657/PT.02/FT04/P/2011	Standar <i>Standard</i>	ASTM E18 - 08
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	14 Juni 2011	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Rockwell Hardness Testing Machine

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Penjejakan <i>Indentation</i>	Kekerasan Rockwell <i>Rockwell Hardness</i>	Rata-rata <i>Average</i>	Keterangan <i>Remarks</i>
1000 U0	I	71.1	77	HRB Load: 100 Kgf
	II	78.1		
	III	77.6		
	IV	80.2		
	V	77.3		

Catatan: ketidakpastian standar blok uji dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan K=2

Depok, 15 Juni 2011
 Manajer Teknis
 Laboratorium Uji
 Departemen Teknik Metalurgi Dan Material


 (Ahmad Ivan Karayan, ST.,M.Eng)

FF-24/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
 Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888 111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN KEKERASAN
HARDNESS TEST REPORT

Page 1 of 8

No Laporan <i>Report Nr</i>	329	Bahan <i>Material</i>	Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Richard	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	900 U5
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi dan Material Kampus Baru UI Depok 16424	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	10 Juni 2011
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0657/PT.02/FT04/P/2011	Standar <i>Standard</i>	ASTM E18 - 08
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	14 Juni 2011	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Rockwell Hardness Testing Machine

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Penjejakan <i>Indentation</i>	Kekerasan Rockwell <i>Rockwell Hardness</i>	Rata-rata <i>Average</i>	Keterangan <i>Remarks</i>
900 U5	I	80.2	81	HRB Load: 100 Kg
	II	81.1		
	III	81.4		
	IV	82.3		
	V	80.6		

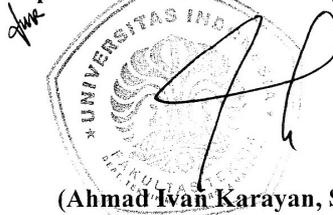
Catatan: ketidakpastian standar blok uji dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan K=2

Depok, 15 Juni 2011

Manajer Teknis

Laboratorium Uji

Departemen Teknik Metalurgi Dan Material


 (Ahmad Ivan Karayan, ST.,M.Eng)

FF-24/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
 Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888 111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN KEKERASAN
HARDNESS TEST REPORT

Page 8 of 8

No Laporan <i>Report Nr</i>	329	Bahan <i>Material</i>	Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Richard	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	Ho Treatment
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi dan Material Kampus Baru UI Depok 16424	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	10 Juni 2011
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0657/PT.02/FT04/P/2011	Standar <i>Standard</i>	ASTM E18 - 08
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	14 Juni 2011	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Rockwell Hardness Testing Machine

<u>Kode Sampel</u> <i>Sample Code</i>	<u>Penjejakan</u> <i>Indentation</i>	<u>Kekerasan Rockwell</u> <i>Rockwell Hardness</i>	<u>Rata-rata</u> <i>Average</i>	<u>Keterangan</u> <i>Remarks</i>
Ho Treatment	I	83.0	81	HRB Load: 100 Kgf
	II	80.5		
	III	78.6		
	IV	81.2		
	V	82.3		

Catatan: Ketidaktepatan standar blok uji dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan K=2

Depok, 15 Juni 2011

Manajer Teknis
Laboratorium Uji

Departemen Teknik Metalurgi Dan Material

(Ahmad Ivan Karayan, ST.,M.Eng)

FF-24/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
 Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax: 021 – 78888 111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN KEKERASAN
HARDNESS TEST REPORT

Page 2 of 8

No Laporan <i>Report Nr</i>	329	Bahan <i>Material</i>	Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Richard	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	900 U40
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi dan Material Kampus Baru UI Depok 16424	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	10 Juni 2011
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0657/PT.02/FT04/P/2011	Standar <i>Standard</i>	ASTM E18 - 08
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	14 Juni 2011	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Rockwell Hardness Testing Machine

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Penjejakan <i>Indentation</i>	Kekerasan Rockwell <i>Rockwell Hardness</i>	Rata-rata <i>Average</i>	Keterangan <i>Remarks</i>
900 U40	I	80.3	81	HRB Load: 100 Kgf
	II	80.9		
	III	82.8		
	IV	82.9		
	V	80.4		

Catatan: ketidakpastian standar blok uji dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan K=2

Depok, 15 Juni 2011

Manajer Teknis

Laboratorium Uji

Departemen Teknik Metalurgi Dan Material



(Ahmad Ivan Karayan, ST., M.Eng)

FF-24/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
 Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax: 021 – 78888 111 E-mail: lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN KEKERASAN
HARDNESS TEST REPORT

Page 4 of 8

No Laporan <i>Report Nr</i>	329	Bahan <i>Material</i>	Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Richard	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	1000 U5
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi dan Material Kampus Baru UI Depok 16424	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	10 Juni 2011
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0657/PT.02/FT04/P/2011	Standar <i>Standard</i>	ASTM E18 - 08
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	14 Juni 2011	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Rockwell Hardness Testing Machine

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Penjejakan <i>Indentation</i>	Kekerasan Rockwell <i>Rockwell Hardness</i>	Rata-rata <i>Average</i>	Keterangan <i>Remarks</i>
1000 U5	I	79.2	81	HRB Load: 100 Kgf
	II	80.6		
	III	80.4		
	IV	83.0		
	V	82.6		

Catatan: ketidakpastian standar blok uji dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan K=2

Depok, 15 Juni 2011

Manajer Teknis

Laboratorium Uji

Departemen Teknik Metalurgi Dan Material



(Ahmad Ivan Karayan, ST.,M.Eng)

FF-24/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
 Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888 111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN KEKERASAN
HARDNESS TEST REPORT

Page 6 of 8

No Laporan <i>Report Nr</i>	329	Bahan <i>Material</i>	Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Richard	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	1000 U20
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi dan Material Kampus Baru UI Depok 16424	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	10 Juni 2011
No Kontrak <i>Contract Nr</i>	0657/PT.02/FT04/P/2011	Standar <i>Standard</i>	ASTM E18 - 08
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	14 Juni 2011	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Rockwell Hardness Testing Machine

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Penjejakan <i>Indentation</i>	Kekerasan Rockwell <i>Rockwell Hardness</i>	Rata-rata <i>Average</i>	Keterangan <i>Remarks</i>
1000 U20	I	81.9	83	HRB Load: 100 Kgf
	II	83.3		
	III	83.1		
	IV	81.3		
	V	84.5		

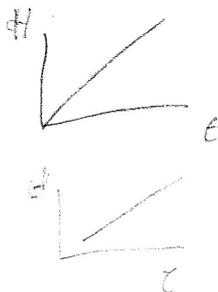
Catatan: ketidakpastian standar blok uji dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan K=2

Depok, 15 Juni 2011

Manajer Teknis
Laboratorium Uji

Departemen Teknik Metalurgi Dan Material

(Ahmad Ivan Karayan, ST.,M.Eng)



FF-24/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
 Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888 111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN KEKERASAN
HARDNESS TEST REPORT

Page 7 of 8

No Laporan <i>Report Nr</i>	329	Bahan <i>Material</i>	Steel
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Richard	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	1000 U40
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi dan Material Kampus Baru UI Depok 16424	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	10 Juni 2011
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0657/PT.02/FT04/P/2011	Standar <i>Standard</i>	ASTM E18 - 08
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	14 Juni 2011	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Rockwell Hardness Testing Machine

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Penjejakan <i>Indentation</i>	Kekerasan Rockwell <i>Rockwell Hardness</i>	Rata-rata <i>Average</i>	Keterangan <i>Remarks</i>
1000 U40	I	81.8	81	HRB Load: 100 Kgf
	II	81.1		
	III	79.8		
	IV	80.1		
	V	80.3		

Catatan: ketidakpastian standar blok uji dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan K=2

40

Depok, 15 Juni 2011

Manajer Teknis

Laboratorium Uji

Departemen Teknik Metalurgi Dan Material

(Ahmad Ivan Karayan, ST.,M.Eng)

FF-24/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM