

Laporan Penelitian

**PENGARUH WAKTU TAHAN DAN LAJU PEMANASAN
TERHADAP BESAR BUTIR AUSTENIT DAN
KEKERASAN PADA PROSES HEAT TREATMENT
BAJA HSLA**

Oleh

**Charles Manurung, ST. MT
Dr. Richard A. M. Napitupulu, ST. MT
Dosen Tetap Fakultas Teknik**



**LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN MASYARAKAT
UNIVERSITAS HKBP NOMMENSEN
MEDAN, 2014**

KATA PENGANTAR

Dengan segala kerendahan hati peneliti mengucapkan puji syukur kepada Tuhan YME yang telah memberikan berkat dan kasih karunia yang begitu besar sehingga dapat menyelesaikan laporan penelitian ini. Adapun laporan penelitian ini merupakan bagian dari pelaksanaan Tri Dharma Perguruan Tinggi penulis sebagai sivitas akademik Universitas HKBP Nommensen Medan.

Pada penelitian ini peneliti mengambil judul :
“PENGARUH WAKTU TAHAN DAN LAJU PEMANASAN TERHADAP BESAR BUTIR AUSTENIT DAN KEKERASAN PADA PROSES *HEAT TREATMENT* BAJA HSLA”.

Pada kesempatan ini juga peneliti mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Dekan Fakultas Teknik Universitas HKBP Nommensen, yang telah memotivasi para dosen untuk melakukan penelitian.
2. Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas HKBP Nommensen yang telah memberikan kesempatan kepada peneliti untuk mengusulkan usulan penelitian.
3. Rekan peneliti Dr. Richard A. M. Napitupulu, ST. MT dan rekan-rekan sejawat dosen atas diskusinya dalam peningkatan kemampuan dosen pada rapat dosen prodi.
4. Kepala dan pegawai Laboratorium Teknik Metalurgi Universitas HKBP Nommensen atas izin pemakaian peralatan.
5. Otto H. Situmorang, ST yang telah membantu penulis dalam mengumpulkan data penelitian.
6. Adik-adik mahasiswa yang telah membantu mencari data awal yang diperlukan.

Peneliti menyadari bahwa dalam penulisan laporan ini masih terdapat kekurangan dan kelemahan, oleh karena itu kritik dan saran sangat penting untuk penyempurnaan laporan penelitian ini. Akhir kata peneliti mengucapkan terima kasih.

Hormat Saya,
Peneliti,

Charles Manurung, ST. MT

DAFTAR ISI

PENGESAHAN LAPORAN PENELITIAN	i
RINGKASAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Baja	4
2.1.1 Baja Carbon (Carbon Steel)	4
2.1.2 Baja Paduan	5
2.1.3 Baja HSLA	5
2.2 Diagram Fasa Besi – Karbon (Fe – C)	7
2.3 Uji Keras Vickers	8
2.4 Pengamatan Struktur Mikro	9
2.4.1 Pertumbuhan butir austenit	9
2.4.2 Metode perhitungan besar butir Austenit Prior	14
2.5. Analisa Regresi	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1. Bahan dan Alat	18
3.1.1. Bahan	18
3.1.2. Bentuk dan Ukuran Sampel	18
3.2. Lokasi dan Alat Penelitian	18
3.3. Metode Penelitian	22
3.4. Prosedur Penelitian	23
3.4.1. Pembuatan Sampel	23
3.4.2. Proses Water Quenching	23
3.4.3. Pengujian Kekerasan	23
3.4.4. Foto Struktur Mikro	23
3.4.5. Perhitungan Besar Butir	24
3.4.6. Pembuatan Model Dengan Analisa Regresi	24
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Hasil Penelitian	26
4.1.1. Uji Keras	26
4.1.2. Penampakan Batas Butir Austenite	27
4.2. Pembahasan	31
4.3. Model Empiris Besar Butir	34
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	38
5.1. Kesimpulan	38
5.2. Saran	38
DAFTAR PUSTAKA	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram kesetimbangan Besi-Karbon (Fe-C)	8
Gambar 2.2. Uji Vickers	8
Gambar 2.3. Pengaruh temperatur dan persen karbon pada pertumbuhan butir austenit	10
Gambar 2.4. Metode Intercept, dengan menggunakan garis berbentuk lingkaran dengan total panjang garis 500 mm, dengan foto perbesaran 100X	15
Gambar 2.5 Bentuk Hubungan Antara Variabel (a) Hubungan Searah; (b) Hubungan Berlawanan Arah	16
Gambar 2.6 Pola Perubahan Nilai Variabel (a) Hubungan Linier; (b) Hubungan Kuadratik; (c) Hubungan logaritmik	17
Gambar 3.1 Dimensi specimen	18
Gambar 3.2 Gergaji	19
Gambar 3.3 Tungku Pemanas	19
Gambar 3.4. Sarung Tangan	19
Gambar 3.5. Penjepit	20
Gambar 3.6. Wadah pendingin	20
Gambar.3.7. Mesin <i>Polish</i>	20
Gambar 3.8. Alat uji kekerasan	21
Gambar 3.9. Mikroskop Optik	21
Gambar 3.10. Diagram Alir Penelitian	22
Gambar 4.1. Butir austenit yang terbentuk pada temperatur 1120°C, pada waktu tahan 10,30 dan 60 menit dengan laju pemanasan 5°C/menit	27
Gambar 4.2. Butir austenit yang terbentuk pada temperatur 1120°C, pada waktu tahan 10,30 dan 60 menit dengan laju pemanasan 7,5°C/menit	27
Gambar 4.3. Butir austenit yang terbentuk pada temperatur 1120°C, pada waktu tahan 10,30 dan 60 menit dengan laju pemanasan 10°C/menit	28
Gambar 4.4. Grafik hubungan pengaruh laju pemanasan dan waktu tahan terhadap kekerasan butir austenite	32
Gambar 4.5. Grafik hubungan pengaruh laju pemanasan dan waktu tahan terhadap diameter butir austenite yang terbentuk	33
Gambar 4.6. Nilai konstanta a dan eksponen b untuk hubungan besar butir dan waktu tahan	35
Gambar 4.7. Nilai konstanta c dan eksponen d untuk hubungan besar butir dan laju pemanasan	35
Gambar 4.8 Grafik hubungan besar butir austenite hasil eksperimen dengan model perhitungan besar butir yang terjadi	37

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Persamaan yang memperlihatkan pertumbuhan butir austenite	11
Tabel 3.1. Komposisi Baja HSLA (% Berat)	18
Tabel. 4.1 Data nilai kekerasan degan laju pemanasan 5 °C	26
Tabel. 4.2 Data nilai kekerasan degan laju pemanasan 7,5 °C	26
Tabel. 4.3 Data nilai kekerasan degan laju pemanasan 10 °C	26
Tabel. 4.4. Besar butir austenit hasil pengamatan dan standart deviasinya.	28
Tabel. 4.5. Rata-rata besar butir austenit hasil pengamatan dan kekerasannya	31

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Baja *High Strength Low Alloy Steel* (HSLA) merupakan baja karbon paduan rendah dengan kekuatan tinggi yang sangat dibutuhkan di industri manufaktur, serta memiliki sifat kuat dan ringan, sehingga aplikatif untuk bidang transportasi dan disain struktur. Baja HSLA telah mampu diproduksi oleh industri baja nasional melalui proses canai panas. Namun daya saing industri baja masih perlu ditingkatkan baik dari segi kualitas maupun efisiensi. Untuk itu diperlukan model disain proses produksi yang lebih akurat. Salah satu parameter penting yang mempengaruhi sifat mekanis baja HSLA adalah besar butir *Prior Austenit* (besar butir austenit saat *reheating* sebelum mengalami deformasi) dan besar butir austenit setelah deformasi. Proses canai panas baja terdiri dari proses *reheating* (pemanasan baja ke suhu austenit), *roughing dan finishing* (proses deformasi canai panas) dan *cooling* (pendinginan ke suhu ruang). Penelitian yang berawal dari *prior austenit* memiliki peran penting dimana ukuran butir *prior austenit* akan menentukan ukuran butir setelah rekristalisasi dan pertumbuhan butir setelah baja mengalami deformasi, yang digambarkan pada persamaan untuk baja HSLA-Nb di bawah ini^[1].

$$D_{rek} = A d_o^{0,67} \cdot 7 \varepsilon^{-0,67} \quad (1.1)$$

$$d^n = d_{rek}^n + A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot t \quad (1.2)$$

Pada Persamaan 1.1 ,

d_{rek} : diameter austenit setelah rekristalisasi,

d_o : diameter *prior austenit*, ε adalah deformasi.

Pada Persamaan 1.2

n dan A : konstanta yang tergantung pada komposisi material dan kondisi proses.

Q : energi aktivasi pertumbuhan butir

R : konstanta gas, dan

t : temperatur absolut.

Sehingga dari persamaan 1.1 di atas tampak bahwa d_{rek} ditentukan oleh ukuran *prior austenit* dan pada tahap pertumbuhan butir, besar butir austenit akhir ditentukan oleh

d_{rek} (Pers. (1.2)). Saat ini, dalam aplikasi di industri, diameter *prior austenit* (d_0) sebagai dasar perhitungan hanya didapatkan melalui *trial-error* dengan memanaskan baja hingga temperatur *reheating*, dengan kondisi yang ada pada industri, sehingga ada beberapa faktor yang diabaikan seperti kecepatan pemanasan (*heating rate*), lama pemanasan, dan waktu tahan. Akibatnya perhitungan besar butir *prior austenit* tidak konsisten, yang mengakibatkan perhitungan besar butir austenit setelah proses canai panas tidak tepat dan sifat mekanis tidak sesuai dengan yang diharapkan. Untuk itu dibutuhkan suatu sistem yang dapat mengontrol mikrostruktur baja HSLA selama proses pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*), serta pendinginan (transformasi akhir). Sistem tersebut dicapai dengan berbagai studi pembuatan model transformasi dan perilaku butir pada proses canai panas^[3] sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas proses canai panas. Besar butir pada mikrostruktur akhir ditentukan oleh butir *prior austenit* pada proses pemanasan awal (*reheating*), dimana untuk mendapatkan butir ferit yang halus, dibutuhkan butir austenit yang berukuran kecil saat proses pemanasan awal^[1]. Penelitian pertumbuhan butir *prior austenit* pada baja dilakukan berbagai peneliti, seperti Beck^[1,3], Sellars^[3], Richard^[4,5]. Namun pada penelitian terdahulu, pendekatan kinetika pertumbuhan butir *prior austenit* dirumuskan dengan asumsi *reheating* dilakukan pada kondisi isothermal. Sedangkan pada kondisi nyata, proses *reheating* didahului dengan pemanasan non-isothermal hingga dicapai temperatur *reheating* dan dilanjutkan dengan penahanan pada temperatur *reheating*. Akibatnya prediksi dengan model isothermal memberikan perhitungan yang kurang tepat. Maka, penelitian yang diajukan melalui Proposal Penelitian ini adalah untuk mendapatkan model pertumbuhan butir *prior austenit* pada proses *reheating*. Pendekatan dilakukan secara empiris, melalui percobaan eksperimental di laboratorium yang kemudian dirumuskan dalam suatu model hubungan temperatur pemanasan, laju pemanasan dan waktu tahan terhadap besar butir austenit. Diharapkan akan didapat model perhitungan besar butir *prior austenit* yang tepat untuk diaplikasikan, yang menjadi dasar perhitungan besar butir austenit akhir yang akurat.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh dari waktu tahan dan laju pemanasan terhadap besar butir austenite yang terbentuk dan kekerasan baja HSLA sebagai hasil dari proses pemanasan kembali dan pendinginan seketika dengan media pendingin air.

1.3. Manfaat Penelitian.

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan pendekatan teori metalurgi mekanik dan fisik yang dapat digambarkan dalam bentuk model empiris dari hubungan antara laju pemanasan dan waktu tahan terhadap besar butir austenit (γ) pada proses *reheating* isothermal pada baja HSLA selama proses pemanasan awal (*reheating*).
2. Mengetahui pengaruh laju pemanasan dan waktu tahan terhadap besar butir austenit baja HSLA dan sifat mekaniknya.
3. Untuk keperluan pemilihan alternatif dalam bahan-bahan industri manufaktur dan pemesinan.

1.4. Batasan Masalah.

Mengingat metode yang dilakukan yang akan dilakukan adalah proses *Heat Treatment* maka penulis membatasi masalah yaitu :

1. Proses yang dilakukan adalah *Heat Treatment*
2. Specimen yang digunakan adalah baja HSLA Gr A.572
3. Temperatur pemanasan 1120 °C.
4. Laju pemanasan 5°C/menit, 7,5°C/menit dan 10°C/menit
5. *Holding time* 10, 30, dan 60 menit.
6. Media pendingin yang digunakan adalah air.
7. Pengujian sifat mekanik yang dilakukan adalah pengujian kekerasan dengan menggunakan metode *Vickers*.
8. Pengamatan struktur mikro dengan menggunakan *Mikroskop optic*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja

Baja merupakan paduan yang terdiri dari besi, karbon dan unsur yang lainnya. Seperti : *Silicon (Si)*, *Fospor (S)*, *Tembaga (Cu)*. Karbon merupakan suatu unsur terpenting karena dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja. Baja merupakan logam yang paling banyak digunakan dalam dunia teknik, dalam bentuk pelat, lembaran, pipa batang, profil dan sebagainya. Baja dapat dibentuk melalui pengecoran pencairan dan penempaan. Secara garis besar baja dapat dikelompokkan sebagai berikut :

2.1.1. Baja Karbon (*Carbon Steel*)

a. Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*)

Baja karbon rendah ini disebut dengan baja lunak atau baja yang bukan keras. Baja karbon rendah memiliki kandungan karbon kurang dari 0,25% C. Baja karbon rendah digunakan untuk kawat, baja profil, mur, baut, ulir sekrup, dan lain- lain.

b. Baja Karbon Sedang (*Medium Carbon Steel*)

Baja karbon sedang memiliki kandungan karbon diatas 0,25% C – 0,6% C ditambah dengan unsur paduan tertentu biasanya digunakan untuk rel kereta api dan sejumlah peralatan mesin seperti roda gigi otomotif, poros bubutan, poros engkol, sikrup dan alat angkat presisi.

c. Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*)

Baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon diatas 0,6% C - 1,4% C dibuat dengan roll panas. Baja karbon tinggi digunakan untuk perkakas seperti pisau, gurdi, tap dan bagian-bagian yang tahan gesekan. Apabila baja ini digunakan untuk bahan khusus, maka harus dikerjakan dalam keadaan panas dan digunakan untuk peralatan mesin-mesin berat, batang-batang pengontrolan, alat tangan seperti palu, obeng, tang, dan lain-lain.

2.1.2. Baja Paduan

Baja yang mengandung unsur C tidak akan memiliki sifat seperti yang diinginkan, dengan penambahan unsur-unsur paduan seperti Si, Mn, Ni, V, W, dan lain sebagainya dapat menolong untuk mencapai sifat-sifat yang diinginkan.

Penambahan beberapa unsur paduan spesifikasi terhadap sifat baja antara lain:

a. Unsur Silikon (Si)

Silikon merupakan unsur paduan yang ada pada setiap baja dengan jumlah kandungan lebih dari 0,4% yang mempunyai pengaruh kenaikan tegangan tarik dan menurunkan kecepatan pendinginan kritis (laju pendinginan minimal yang dapat menghasilkan 100 *martensite*)

b. Unsur Mangan (Mn)

Unsur mangan dalam proses pembuatan baja berfungsi sebagai *deoxider* (pengikat O₂) sehingga proses peleburan dapat berlangsung baik. Kadar Mn yang rendah dapat menurunkan kecepatan pendinginan kritis.

c. Unsur Nikel (Ni)

Nikel memberi pengaruh sama seperti Mn yaitu menurunkan suhu kritis dan kecepatan pendinginan kritis. Ni membuat struktur butiran menjadi halus dan menambah keuletan.

d. Unsur Krom (Cr)

Unsur krom meninggikan kekuatan tarik dan keplastisan, menambah mampu keras, meningkatkan tahan korosi dan tahan suhu tinggi.

e. Unsur Vanadium (V) dan Wolfram (W)

Unsur vanadium dan wolfram membentuk karbidat yang sangat keras dan memberikan baja dengan kekerasan yang tinggi, kemampuan potong dan daya tahan panas yang cukup tinggi pada baja yang sangat diperlukan untuk pahat potong dengan kecepatan tinggi.

2.1.3. Baja HSLA

Baja HSLA adalah salah satu kelompok baja karbon rendah yang memanfaatkan sebagian kecil elemen paduan untuk mencapai nilai *yield strength* lebih dari 275 MPa (40 ksi) pada kondisi *as-rolled*. Baja jenis ini mempunyai sifat mekanik dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan baja karbon lainnya pada kondisi yang sama.

Dengan kekuatannya yang lebih tinggi tersebut, baja HSLA dapat dihasilkan dengan kadar karbon yang rendah sehingga kemampuan lasnya lebih baik dari *mild steel*. Komposisi kimia dari baja HSLA dapat bervariasi bergantung pada sifat yang ingin dicapai.

Baja HSLA dalam bentuk lembaran biasanya memiliki kadar karbon yang rendah berkisar antara 0.05% C hingga 0.25% C dengan tujuan meningkatkan mampu bentuk dan mampu lasnya. unsur Mangan (Mn), Chromium (Cr), Nikel, Molybdenum, Nitrogen, Vanadium, Niobium, Titanium, dan Zirconium juga biasanya ditambahkan ke dalam baja jenis ini dalam perbandingan dan kombinasi yang beragam^[6]. Baja HSLA mempunyai beberapa tipe dan standar yang digunakan bergantung pada sifat-sifat yang dimilikinya seperti ketangguhan, mampu bentuk, mampu las, dan ketahanan korosinya. Baja ini tidak dapat digolongkan ke dalam baja paduan meskipun sifat-sifat yang diinginkan dapat tercapai dengan hanya penambahan sedikit paduan. Adapun penggolongan baja HSLA adalah sebagai berikut :

- *Weathering steels*, baja yang ditambahkan sedikit Tembaga (Cu) dan Fosfor (P) untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi atmosferik dan kemampuan untuk dikuatkan melalui mekanisme penguatan larutan padat
- *Microalloyed ferrite-pearlite steels*, baja yang ditambahkan sedikit (kurang dari 0.10%) elemen pembentuk Karbida dan Karbonitrida seperti Niobium, Vanadium, dan atau Titanium untuk penguatan presipitat, penghalus butir, dan kontrol terhadap perubahan temperatur.
- *As-rolled pearlitic steels*, disebut juga baja C-Mn tetapi dengan penambahan elemen paduan lain untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, mampu bentuk, dan kemampulan.
- *Acicular Ferrite (Low carbon bainite) steels*, baja dengan kandungan karbon di bawah 0.05% C dan memiliki kombinasi tegangan luluh, mampu bentuk, ketangguhan, kemampulan yang sangat baik.
- *Dual Phase Steels*, baja dengan mikrostruktur martensit yang tersebar di matriks ferrit dan memiliki kombinasi yang baik dari keuletan dan tegangan luluh yang tinggi.

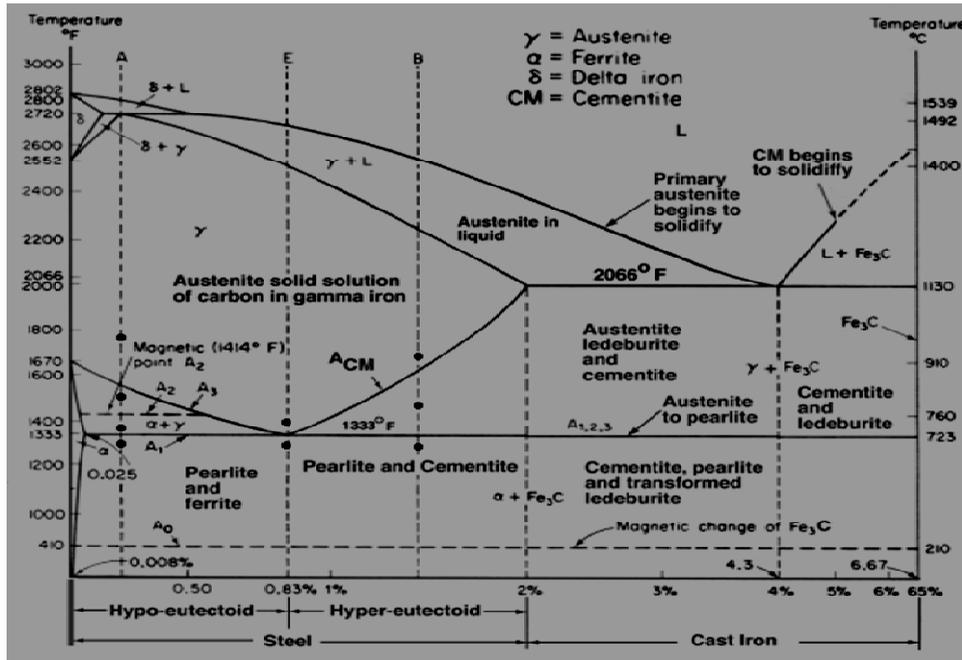
- *Inclusion-shape-controlled steels*, penambahan Calcium, Zirconium, Titanium, dan logam-logam jarang sehingga bentuk dari inklusi sulfide berubah menjadi lebih kecil, tersebar, dan berbentuk globular yang akan meningkatkan keuletan.

Penggunaan baja HSLA sangat banyak diaplikasikan pada baja konstruksi, transmisi pipa minyak dan gas, kendaraan berat, peralatan industri, gerbong kereta api, jembatan, struktur lepas pantai, dan *part* otomotif . Sebagian besar aplikasi, faktor yang paling utama dalam pemilihan baja ini adalah perbandingan kekuatan dan berat (*weight*) yang sesuai, yaitu dengan massa yang ringan baja HSLA mampu menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi dari baja karbon biasa. Selain itu, HSLA juga diaplikasikan pada kondisi aplikasi tegangan pada temperatur yang sangat rendah

2.2. Diagram Fasa Besi – Karbon (Fe - C)

Diagram kesetimbangan fasa Fe-C adalah alat penting untuk memahami struktur mikro dan sifat-sifat baja karbon, suatu jenis logam paduan besi (Fe) dan karbon (C). Karbon larut di dalam besi dalam bentuk larutan padat (*solid solution*) hingga 0,005% berat pada temperature ruang. Baja dengan atom karbon terlarut hingga jumlah tersebut memiliki *alpha ferrit* pada temperatur ruang. Pada kadar karbon lebih dari 0,05% akan terbentuk endapan karbon dalam bentuk *hard intermetallic stoichiometrik compound* (Fe₃C) yang dikenal sebagai *cementite* atau *carbide*. Selain larutan padat *alpha-ferrite* yang dalam kesetimbangan dapat ditemukan pada temperature ruang terdapat fase-fase penting lainnya, yaitu *delta-ferrite* dan *gamma-austenit*

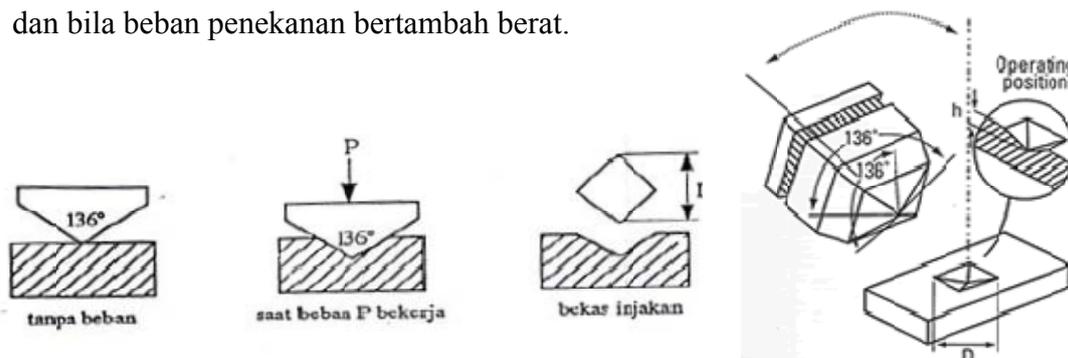
Logam Fe bersifat *polymorphism* yaitu memiliki struktur kristal berbeda pada temperature berbeda. Pada Fe murni, misalnya, *alpha-ferrite* akan berubah menjadi *gamma-austenite* saat dipanaskan melewati temperature 910°C. Pada temperatur yang lebih tinggi, mendekati 1400°C *gamma-austenite* akan kembali berubah menjadi *delta-ferrite*. (*alpha dan delta*) *ferrite* dalam hal ini memiliki struktur kristal BCC sedangkan (*gamma*) *austenite* memiliki struktur kristal FCC.



Gambar 2.1 Diagram kesetimbangan Besi-Karbon (Fe-C)^[7]

2.3. Uji Keras *Vickers*

Pengujian yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan metode penekanan yaitu metode *Vickers*. Pada pengukuran kekerasan menurut *Vickers* sebuah intan yang berbentuk limas (piramid), kemudian intan tersebut ditekan pada benda uji dengan suatu gaya tertentu, maka pada benda uji terdapat bekas injakan dari intan ini. Bekas injakan ini akan lebih besar apabila benda uji tersebut semakin lunak dan bila beban penekanan bertambah berat.



Gbr 2.2. Uji *Vickers*^[8]

Perhitungan kekerasan didasarkan pada panjang diagonal segi empat bekas injakan dan beban yang digunakan. Nilai kekerasan hasil pengujian metode *Vickers*

disebut juga dengan kekerasan HV atau VHN (*Vickers Hardness Numbers*) yang besarnya .

$$\begin{aligned}
 VHN &= \frac{2 \sin \frac{(\theta)}{2} P}{d^2} \\
 &= \frac{2 \sin \frac{(136^\circ)}{2} P}{d^2} \\
 VHN &= \frac{1,854 P}{d^2} \quad \dots(2.1)
 \end{aligned}$$

dimana :
 P = Beban tekan yang diberikan (kgf)
 d = Panjang diagonal bekas injakan (mm)
 θ = Sudut puncak penetrator (136°)

Pengujian *mikro Vickers* adalah metode pengujian kekerasan dengan pembebanan yang relatif kecil yang sulit dideteksi oleh metode *makro Vickers*. Pada penelitian ini menggunakan metode *mikro Vickers* karena untuk mengetahui seberapa besar nilai kekerasan pada permukaan benda uji hasil dari proses *heat treatment*, sehingga pembebanan yang dibutuhkan juga relatif kecil yaitu berkisar antara 10 sampai 1000gf.

2.4. Pengamatan Struktur Mikro

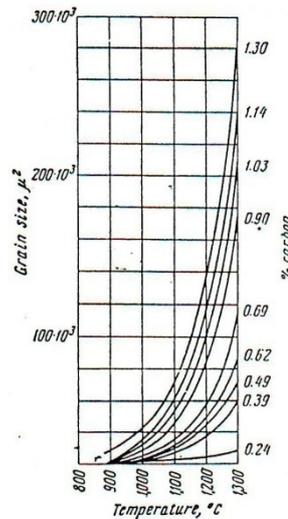
Pengamatan yang dilakukan setelah specimen terlebih dahulu diampelas sampai sehalus mungkin. Spesimen yang telah dipoles dicelupkan ke larutan etsa selama beberapa detik. Pada pemeriksaan struktur mikro digunakan mikroskop optik dimana pada alat terdapat bagian-bagian penting yaitu : *lensa kondensor, filter cahaya, dan lensa objektif*,

2.4.1. Pertumbuhan butir austenit

Pertumbuhan butir terjadi karena adanya pembesaran butir tertentu dan terdifusinya butir yang lebih kecil. Batas butir memiliki atom-atom dengan energi bebas yang lebih tinggi daripada atom-atom yang terdapat dalam butir. Agar tercapai kondisi yang stabil, maka atom-atom pada batas butir mengurangi energi bebasnya yang tinggi dengan cara mengurangi luas permukaan batas butir, sehingga terjadi migrasi batas butir. Migrasi batas butir pada dasarnya adalah difusi atom-atom pada batas butir. Energi minimum yang dibutuhkan agar atom-atom dapat berdifusi untuk memperoleh keadaan yang lebih stabil dinamakan energi aktivasi untuk pertumbuhan

butir (Q). Migrasi batas butir akan mengurangi energi bebas batas butir serta meningkatkan ukuran butir.

Butir austenit muncul secara langsung begitu terjadi proses transformasi dari perlit ke austenit. Ukurannya bergantung dari kecepatan pertumbuhan serta jumlah inti (*nuclei*) yang ada pada volume dan waktu tertentu. Semakin banyak fasa karbida yang tersebar pada struktur awal, maka semakin kecil ukuran butir austenitnya, karena karbida (partikel fasa kedua) tersebut menghambat batas butir.



Gambar 2.3. Pengaruh temperatur dan persen karbon pada pertumbuhan butir austenit^[9].

Pertumbuhan butir austenit dipengaruhi oleh temperatur dan waktu pemanasan, kadar karbon, dan jumlah paduan dalam baja. Peningkatan waktu dan temperatur pemanasan akan meningkatkan difusi karbon pada saat pembentukan inti austenit sehingga butir austenit yang dihasilkan menjadi lebih besar. Dengan meningkatnya temperatur dan kadar karbon, maka ukuran butir semakin besar (Gambar 2.3) dan pertumbuhan butir terus terjadi pada butir-butir tertentu dengan ”memakan” butir yang lebih kecil. Ukuran butir austenit sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik dan kekuatan impak baja setelah perlakuan panas.

Pertumbuhan butir selama pemanasan lambat dalam dapur telah diteliti secara ekstensif oleh berbagai peneliti. Dua metode yang secara luas digunakan untuk memodelkan pertumbuhan butir adalah persamaan empiris yang didasarkan pada suatu hukum energi dan model fisika yang didasarkan pada pematangan Zener^[10].

a. Persamaan empiris untuk pertumbuhan butir

Persamaan empiris telah digunakan secara luas untuk menggambarkan karakter pertumbuhan butir selama pemanasan isothermal. Relasi hukum energi pertama sekali dinyatakan oleh Beck dkk., (1948) untuk pertumbuhan butir normal selama anil isothermal dalam bentuk persamaan :

$$D^n - D_0^n = k_1.t \quad \dots (2.2)$$

dimana D_0 dan D adalah diameter butir austenit prior (awal) dan akhir, t adalah waktu anil, n dan k_1 adalah konstanta. Sellars dan Whiteman (1979) menyatakan bahwa nilai k_1 dapat diekspresikan dari suatu persamaan Arrhenius, sehingga persamaan 2.2 dapat dinyatakan sebagai :

$$D^n - D_0^n = k_2.exp(-Q_{gg}/RT).t \quad \dots (2.3)$$

dimana k_2 adalah konstanta dan Q_{gg} adalah energi bagi pertumbuhan butir ^[1,3].

Angel Zulfia^[10] menyatakan bahwa untuk melihat kinetika pertumbuhan butir dalam kondisi non isothermal, dapat dilakukan dengan menggunakan suatu fungsi temperatur menggantikan fungsi waktu. Oleh Angel Zulfia persamaan Beck dan Sellars diatas dirumuskan dengan menyatakan t sebagai fungsi perubahan gradien temperatur ($\Delta t = \Delta T/C_r$), sehingga :

$$D^n - D_0^n = k_2/C_r . exp(Q/RT).\Delta T \quad \dots (2.4)$$

Beberapa persamaan empiris untuk pertumbuhan butir dari baja karbon dan mikroalloy dapat dilihat pada tabel 2.1. berikut.

Tabel 2.1. Persamaan yang memperlihatkan pertumbuhan butir austenite^[9]

Baja	Kondisi Austenit	Persamaan
C – Mn	Statik rekristalisasi	$n=10, k_2=3,87.10^{12}, Q_{gg} = 400\text{kJ/Mol}$ ($T>1273$ K) $n=10, k_2=5,02.10^{53}, Q_{gg} = 914\text{kJ/Mol}$ ($T<1273$ K)
low C – Mn	Statik rekristalisasi	$n = 2, k_2 = 4,27.10^{12}, Q_{gg} = 278,4$ kcal/mol
0.22C – 0.9Mn	Statik rekristalisasi	$n = 2, k_2 = 1,44.10^{12}, Q_{gg} = 266,6$ kcal/mol
C – Mn	Statik atau metadinamik rekristalisasi	$n = 7, k_2 = 1,45.10^{27}, Q_{gg} = 400$ kJ/mol
C – Mn – V		
C – Mn – Ti	Statik atau metadinamik rekristalisasi	$n = 10, k_2 = 2,6.10^{28}, Q_{gg} = 437$ kJ/mol
C – Mn – Nb	Statik atau metadinamik rekristalisasi	$n = 4,5 k_2 = 4,1.10^{23}, Q_{gg} = 435$ kJ/mol

b. Model physic bagi pertumbuhan butir

Tekanan penggerak (P_d) bagi pergerakan dari suatu elemen kurva berbentuk bola dari batas butir dinyatakan oleh Anderson dan Grong, 1995, sebagai :

$$P_d = 2\gamma_{gb}/\lambda \quad \dots (2.5)$$

dimana γ_{gb} adalah batas energi butir dan λ adalah jari-jari dari kurva kelengkungan permukaan. Karena λ tidak mudah untuk dinyatakan, biasanya diganti dengan satu besaran yang terukur seperti diameter butir rata-rata. Biasanya $\lambda = 3D$ digunakan dalam perhitungan (Patterson dan Liu, 1992; Anderson dan Grong, 1995). Dalam prakteknya, konstanta numerik pada persamaan 2.22 dapat bervariasi dengan suatu faktor yang sedikitnya tiga. Sebagai akibatnya, pada kasus yang umum tekanan gaya penggerak dinyatakan dengan $P_d = k_d \cdot \gamma_{gb}/r$ [9].

Pengaruh dari pematangan endapan pada pertumbuhan butir pertama sekali dinyatakan oleh Zener [14]. Tekanan pematangan Zener (P_Z) dinyatakan dengan persamaan :

$$P_Z = 3 \gamma_{gb} \cdot f_v / 4r \quad \dots (2.6)$$

Diasumsikan bahwa seluruh endapan berukuran sama. Selanjutnya, disebabkan ketidakpastian dari konstanta numerik, persamaan 2.6 berubah menjadi $P_Z = k_p \cdot \gamma_{gb} \cdot f_v / r$. Jari-jari butir kritis (R_c) ditentukan ketika $P_Z = P_d$, yang mana memberikan suatu persamaan yang dikenal dengan nama persamaan Zener :

$$R_c = k_Z \cdot r / f_v \quad \dots (2.7)$$

dimana k_Z adalah suatu konstanta ($k_Z = k_p / k_d$). Walaupun pematangan Zener telah dikenal selama lebih dari dua puluh tahun, beberapa pendapat masih tetap ada untuk nilai k_Z [14]. Pada model asli Zener, nilai k_Z ditetapkan sebesar 4/3. Hellman dan Hillert (1975) mengajukan dua nilai yaitu 4/9 untuk pertumbuhan butir normal dan 2/3 untuk pertumbuhan butir tidak normal. Manohar dkk. (1998) [11] menyimpulkan data percobaan dari berbagai sistem paduan dan menemukan bahwa nilai k_Z sebesar 0,17 untuk $f_v < 0,05$. Gladman dkk. (1997) menyatakan nilai k_Z sebagai suatu fungsi dari distribusi ukuran butir. Pada kasus ini, $k_Z = \pi/6(3/2 - 2/Z_g)$ dimana Z_g adalah rasio dari diameter selama pertumbuhan butir dan pematangan butir. Berdasarkan pendekatan ini, nilai k_Z dari model Hillert berhubungan dengan $Z_g = 3$ untuk pertumbuhan butir normal, sedangkan untuk model Manohar $Z_g = 1,7$. Dengan berbagai asumsi, nilai R_c mungkin bervariasi untuk setiap persamaan [9].

Beberapa asumsi tersebut telah memberikan kontribusi dalam persamaan Zener, termasuk ukuran endapan yang seragam, distribusi endapan kacau secara random, butir dan endapan spherical. Kebanyakan dari asumsi tersebut telah dimodifikasi oleh beberapa peneliti berikut untuk suatu kondisi yang realistis, yang telah dinyatakan oleh Nes dkk. (1985) dan Manohar dkk. (1998) ^[11]. Bagaimanapun, perhatian yang kecil telah diberikan pada efek dari distribusi ukuran endapan terhadap pematangan Zener. Fullman mengenalkan suatu “ faktor pengotor pertama’ untuk menggambarkan tekanan pematangan total dari suatu distribusi endapan (Manohar dkk., 1998) sebagai :

$$P_Z = 3 \gamma_{gb} I/4 \quad \dots (2.8)$$

dimana $I = \sum f_v(r)/r$ dan $f_v(r)$ adalah fraksi volume dari endapan berbentuk bola dengan ukuran tunggal berjari-jari r . Persamaan ini telah jarang digunakan sejak $f_v(r)$ tidak dapat ditentukan dengan mudah. Oleh sebab itu, pengaruh dari distribusi ukuran butir pada pematangan Zener sampai saat ini masih belum diketahui. Pada kondisi ini, rata-rata ukuran endapan biasanya digunakan untuk mencari tekanan pematangan endapan^[9].

Pengaruh dari solute drag pada pertumbuhan butir telah digambarkan secara sederhana melalui pendekatan yang dilakukan oleh Hu dan Rath (1969, 1970). Laju perpindahan batas butir (v) terkait dengan tekanan penggerak efektif (ΔP_G) dan eksponen (n) melalui persamaan :

$$v = dR/dt = M_{gb} \cdot \Delta P_G^{n-1} \quad \dots (2.9)$$

dimana M_{gb} adalah mobilitas batas butir yaitu $M_{gb} = M_0 \cdot \exp(-Q_{gb}/RT)$. Laju perpindahan batas butir (v) menjadi proporsional terhadap tekanan penggerak efektif (ΔP_G) ketika eksponen $n=2$. Hal ini berhubungan dengan keterbatasan keadaan ketika batas butir akan lepas dari kekotoran udara disekelilingnya. Pada kebanyakan kasus, berdasarkan hasil pengamatan, nilai eksponen n akan lebih besar daripada nilai teoritis yang disebabkan oleh *solute drag* ^[9].

Pada paduan yang mengandung endapan, (ΔP_G) didefinisikan sebagai perbedaan antara P_d dan P_Z . Dengan merubah ekspresi dari P_G dan P_Z kedalam persamaan 2.9, diperoleh (Anderson dan Grong, 1995)^[9]:

$$v = M_{gb} \cdot (k_{gb} \cdot \gamma_{gb})^{n-1} [1/D - f_v/k_Z r]^{n-1} \quad \dots (2.10)$$

Jadi kita memiliki persamaan berikut untuk pertumbuhan butir dengan *solute drag* dan pematangan endapan yaitu :

$$dD/dt = M' \cdot \exp(-Q_{gg}/RT)(1/D - f_v/k_Zr)^{n-1} \quad \dots (2.11)$$

dimana $M' = 2M_{gb}(k_{gb} \cdot \gamma_{gb})^{n-1}$, M' dan k_Z adalah suatu konstanta fisik yang menyatakan mobilitas batas butir dan efisiensi pematangan dari endapan. Persamaan 2.11 dapat diintegrasikan untuk memperoleh rata-rata ukuran butir sebagai fungsi dari waktu yaitu :

$$\int_{D_0}^D \frac{dD}{(1/D - 1/D_c)^{n-1}} = M'_0 \int_{t_0}^t \exp(-\frac{Q_{gg}}{RT}) dt \quad \dots (2.12)$$

dimana D_c adalah diameter kritis butir ($D_c = 2R_c$).

Bentuk sebelah kanan dari persamaan 30 menyatakan pengaruh dari siklus thermal yang berhubungan dengan pertumbuhan butir, yang mana dapat ditentukan secara metode numerik ketika siklus T-t diketahui. Pengaruh dari endapan pada pertumbuhan butir diperlihatkan pada D_c [9].

Penelitian-penelitian di atas berfokus pada penelitian transformasi dari fasa Ferit dan Perlit menjadi Austenit, kelarutan endapan dalam matriks austenit dan pertumbuhan butir Austenit selama proses pemanasan awal secara empiris dan physis dalam kondisi temperatur tetap. Sesuai tahapan proses canai panas pada gambar 2.6 di bawah, maka fokus penelitian yang akan dilakukan adalah pada daerah *reheating* yang dimulai dari temperatur ruang hingga temperatur *reheating* sesuai dengan perhitungan *solubility product*. Tampak dari gambar tersebut, bahwa pada tahap *reheating*, transformasi ferit (α) menjadi austenit (γ) berlangsung secara non-isothermal hingga ke temperatur austenit, selanjutnya dengan penahanan pada temperatur *reheating*. akan memberikan hasil perhitungan yang lebih akurat dibandingkan perhitungan yang mengasumsikan kondisi *reheating* yang dianggap berlangsung pada kondisi temperatur tetap (isothermal).

2.4.2. Metode perhitungan besar butir Austenit Prior.

Setelah metode etsa dapat menampilkan batas butir Austenit Prior, maka besar butir dihitung dengan menggunakan metode Intercept, sesuai dengan standar perhitungan Metalografi kuantitatif ASTM E112. Teknik Penghitungan dilakukan sebagai berikut;

Dari gambar 2.4 di bawah , dihitung jumlah titik potong antara total panjang garis yang ditarik sepanjang 500mm dengan batas butir pada foto struktur mikro dengan perbesaran 100 kali. Jumlah titik potong persatuan panjang (P_L) dihitung dengan

$$P_L = PLT/M. \quad \dots(2.13)$$

dimana P_L = jumlah titik potong fasa dan garis hitung LT (500 mm)/satuan panjang.

P = Total titik potong fasa dan garis hitung LT (500 mm).

M = Perbesaran



Gambar 2.4. Metode Intercept, dengan menggunakan garis berbentuk lingkaran dengan total panjang garis 500 mm, dengan foto perbesaran 100X

Panjang garis Perpotongan (L_3) ;

$$L_3 = 1/PL \quad \dots(2.14)$$

L_T = Panjang Garis Total (Sesuai standar ASTM =500mm)

Dari P_L atau L_3 , dapat dilihat di tabel besar butir ASTM E 112, atau dimasukkan ke dalam rumus Empiris ;

$$G = [6,646 \log (L_3) - 3,298]$$

2.5. Analisa Regresi

Analisa Regresi adalah metode statistika yang digunakan untuk menentukan kemungkinan bentuk dari hubungan variabel-variabel. Tujuan pokok dalam penggunaan metode ini adalah untuk meramalkan atau memperkirakan nilai dari suatu variabel dalam hubungannya dengan variabel lain yang diketahui.

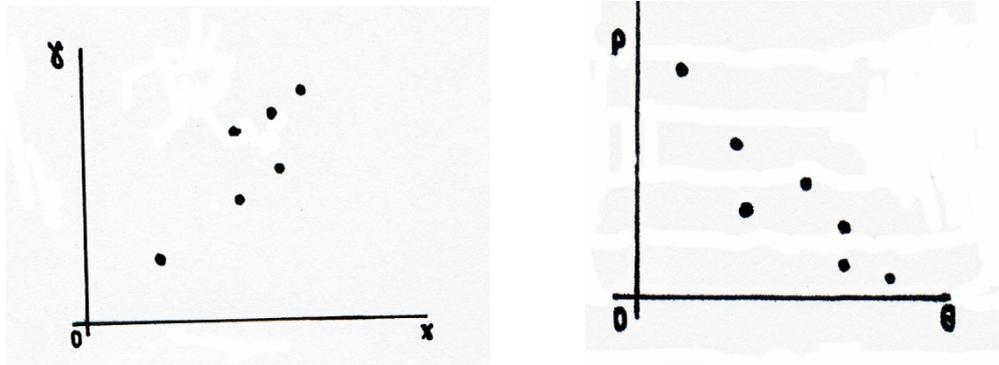
Analisa Regresi merupakan teknik untuk membangun persamaan. Persamaan ini dapat menggambarkan hubungan antara dua atau lebih variabel dan menaksir nilai variabel dependen berdasar pada nilai tertentu variabel independennya. Hubungan antara variabel dependen dan variabel independen ini dapat dirumuskan ke dalam suatu bentuk hubungan fungsional sebagai berikut :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \dots(2.15)$$

dimana, Y = variabel dependen
 X_1, X_2, \dots, X_n = variabel independen

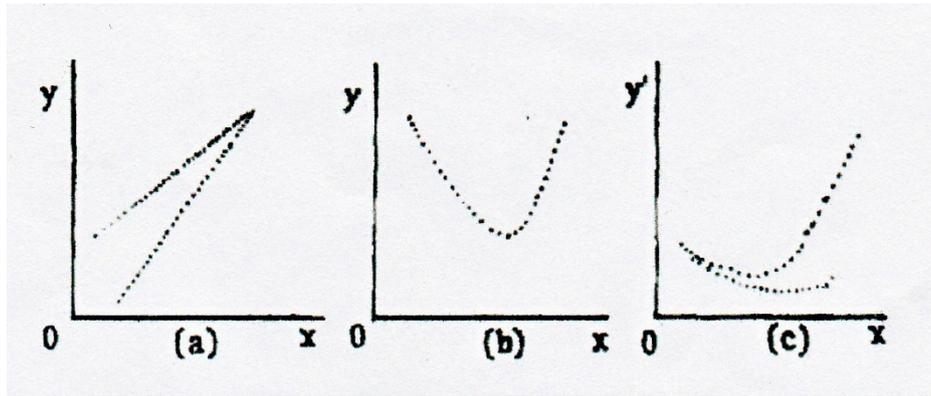
Di dalam suatu persamaan, variabel dependen adalah variabel yang nilai tergantung dari nilai variabel lain. Sedangkan variabel independen adalah variabel yang nilainya tidak tergantung dari variabel lain.

Bentuk hubungan antara dua variabel dapat searah (*direct relationship*) dan dapat berlawanan arah (*inverse relationship*). Jika dua variabel mempunyai hubungan searah artinya perubahan nilai yang satu dengan nilai yang lain adalah searah. Sedangkan dua variabel mempunyai hubungan berlawanan arah artinya perubahan nilai yang satu dengan yang lain adalah berlawanan arah.



Gambar 2.5 Bentuk Hubungan Antara Variabel
(a) Hubungan Searah; (b) Hubungan Berlawan Arah^[12]

Perubahan nilai dua variabel yang memiliki hubungan kausalitas akan cenderung membentuk pola tertentu. Pola perubahan nilai dua variabel dapat memiliki hubungan linier, kuadrat, eksponensial atau logaritmik.



Gambar 2.6 Pola Perubahan Nilai Variabel
 (a) Hubungan Linier; (b) Hubungan Kuadrat; (c) Hubungan logaritmik^[12]

Hubungan antara dua variabel atau lebih dapat diketahui dengan cara persamaan linier. Model persamaan regresi dapat dibentuk dengan cara ini. Pada regresi linier sederhana hanya ada satu variabel independen (X) yang dihubungkan dengan satu variabel dependen (Y) linier (pangkat satu) di dalam X sehingga dapat membentuk model $\hat{Y} = a + bX$. Sedangkan pada regresi multi linier variabel dependen (Y) tidak hanya dihubungkan pada satu variabel independen (X) tetapi lebih dari satu variabel independen (X_1, X_2, \dots, X_n).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan dan Alat

3.1.1. Bahan

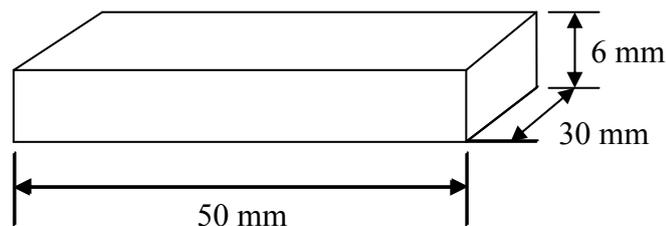
Bahan yang diteliti adalah baja HSLA Gr A.572 . Bahan yang diteliti adalah baja karbon rendah dengan paduan Niobium rendah yang merupakan produksi dalam negeri;

Tabel 3.1. Komposisi Baja HSLA (% Berat)

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	N	Cu+Cr+Ni
0,12	0,266	0,645	0,009	0,005	0,034	0,028	0,011	0,0037	0,077

3.1.2. Bentuk dan Ukuran Sampel

Sampel dipotong dari slab baja berbentuk kubus dengan ukuran 50x30x6 mm. Ukuran ini diambil sesuai dengan kebutuhan dalam pengambilan data temperatur dan struktur mikro selama proses perlakuan pada material, dan memungkinkan untuk dimonitor dengan *thermocouple*.



Gambar 3.1 dimensi specimen

3.2 Lokasi dan Alat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Universitas HKBP Nomensen Medan. Dan alat yang digunakan antara lain :

1. Gergaji

Gergaji digunakan untuk memotong (membentuk) specimen penelitian



Gambar 3.2 Gergaji

2. Tungku pemanas

Tungku pemanas digunakan untuk proses pemanasan spesimen penelitian tungku pemanas ini terdapat Pada Laboratorium Teknik Metalurgi Universitas HKBP Nommensen Medan.



Gambar 3.3 Tungku Pemanas

3. Sarung tangan

Sarung tangan digunakan untuk melindungi tangan pada saat mengeluarkan benda kerja dari tungku pemanas.



Gambar 3.4.Sarung Tangan

4. Penjepit

Penjepit digunakan untuk menjepit benda kerja saat mengeluarkan benda kerja dari tungku pemanas.



Gambar 3.5. Penjepit

5. Wadah Pendingin

Wadah Pendingin digunakan untuk wadah media pendingin air



Gambar 3.6. Wadah pendingin

6. Mesin Polish

Sebelum melakukan pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik, dilakukan *surface polishing* dengan mesin *polish*

Merek mesin polish : MARUMOTO METALOGRAPHI PREGRINDER

Model : 6528-B: No.8185: 220 Volt: 50 Hz

MARUMOTO KOGYO KAISHA, LTD. TOKYO JAPAN.



Gambar.3.7. Mesin *Polish*

7. Mesin Uji Keras Mikro

Mesin uji keras gunanya untuk mengetahui kekerasan specimen penelitian sebelum dan sesudah proses *tempering*.



Gambar 3.8. Alat uji kekerasan

8. Mikroskop Optik

Alat mikroskop dalam penelitian ini digunakan untuk melihat atau mengetahui bentuk struktur mikro logam yang telah dipolish dan dietsa.



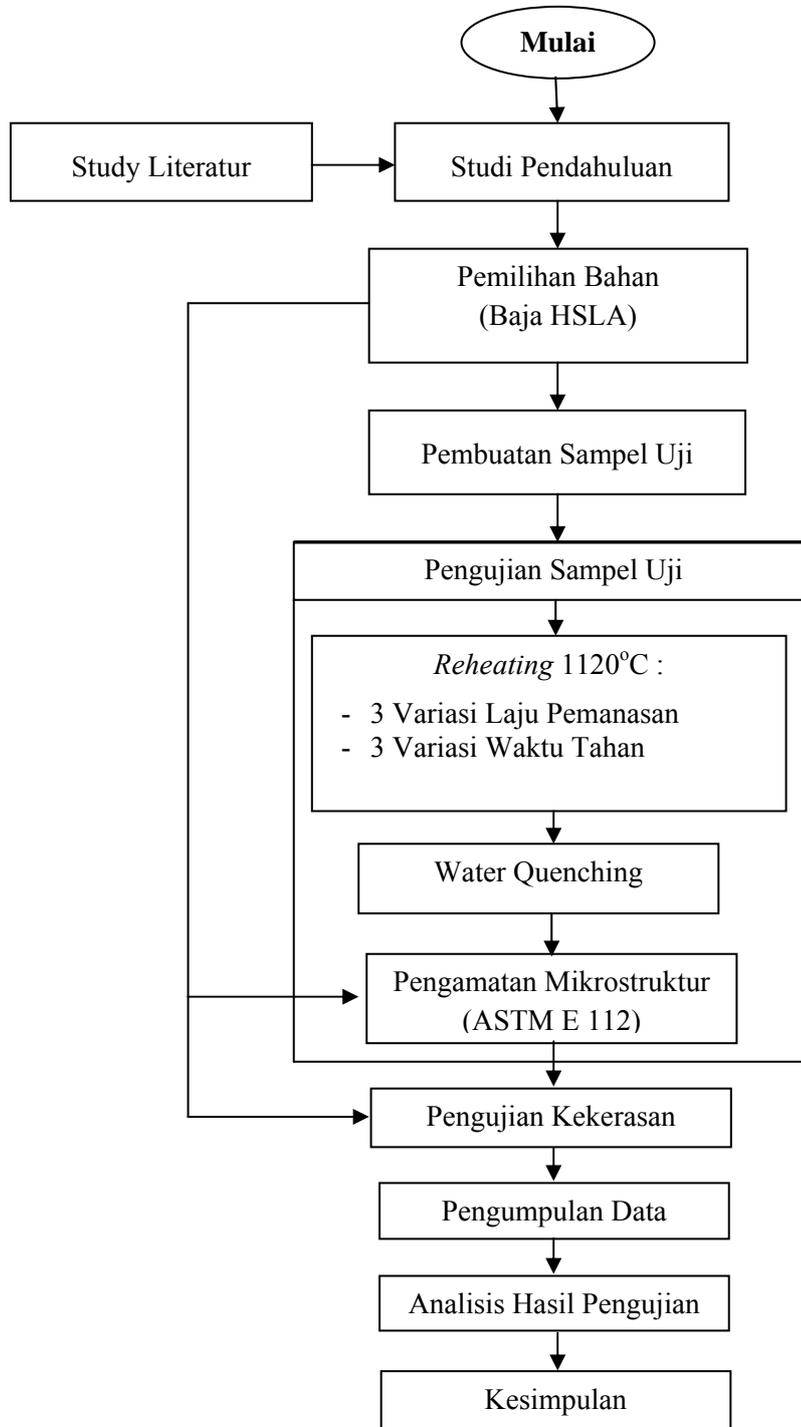
Gambar 3.9. Miskroskop Optik

9. Media Pendingin.

Media pendingin yang digunakan adalah air

3.3. Metode Penelitian

Penelitian berlangsung seperti skema diagram alir di bawah ini



Gambar 3.10. Diagram Alir Penelitian

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Pembuatan Sampel

Sepesimen baja HSLA (*high strenght low alloy stell*) dipotong dengan spesifikasi spesimen yang telah ditentukan. Jumlah spesimen yang dibuat adalah 9 buah. Spesimen yang telah dipotong kemudian di bersihkan dari beram-beram sisa-sisa pemotongan.

3.4.2 Proses *water quenching*

Proses *water quenching* dilakukan pada tempratur pemanasan 1120 °C, 3 variasi laju pemanasan 5°C/menit, 7,5°C/menit dan 10°C/menit, serta 3 variasi waktu tahan 10, 30, dan 60 menit kemudian pendinginannya dilakukan dengan pendinginan cepat menggunakan air. Proses ini bertujuan agar benda kerja tidak mengalami distorsi dan retak. Pada perlakuan panas ini, panas merambat dari luar ke dalam dengan kecepatan tertentu.

3.4.3 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan ini dilakukan dengan alat uji kekerasan *mikro Vickers*, pengujian ini dengan cara:

- a. Permukaan material dihaluskan dengan cara diampelas dengan urutan ampelas No. 120-240-320-400-600-800-1000-200-1500.
- b. Setelah diampelas pada bagian permukaan sampel di polish sampai mengkilap dengan menggunakan tepung titanium dioksida.
- c. Memasang/meletakkan sampel pada dudukan.
- d. Menentukan besar pembebanan.
- e. Menekan tombol untuk menggerakkan penginjak (*indenter*).
- f. Mengukur bekas injakan indenter dengan mistar yang dilihat pada lensa.
- g. Menentukan nilai kekerasan dari diameter bekas injakan sesuai dengan rumus atau tabel nilai kekerasan mikro.

3.4.4 Foto struktur mikro.

Sebelum melakukan foto mikro benda kerja dipoles. Pemolesan dilakukan dengan cara mengamplas bagian permukaan sampai halus kemudian di polish supaya mengkilap dan dicelup pada larutan *etsa* pikral 4% kurang lebih 1-5 menit kemudian dikeringkan setelah itu dilakukan foto struktur mikro pada permukaan yang telah di etsa.

3.4.5 Perhitungan besar butir

Setelah dilakukan foto mikro pada sampel yang sudah di etsa lalu dilakukan perhitungan besar butir austenit pada material dengan standrat ASTM E112.

3.4.6. Pembuatan model dengan analisa regresi

Analisa Regresi adalah metode statistika yang digunakan untuk menentukan kemungkinan bentuk dari hubungan variabel-variabel. Tujuan pokok dalam penggunaan metode ini adalah untuk meramalkan atau memperkirakan nilai dari suatu variabel dalam hubungannya dengan variabel lain yang diketahui.

Analisa Regresi merupakan teknik untuk membangun persamaan. Persamaan ini dapat menggambarkan hubungan antara dua atau lebih variabel dan menaksir nilai variabel dependen berdasar pada nilai tertentu variabel independennya. Hubungan antara variabel dependen dan variabel independen ini dapat dirumuskan ke dalam suatu bentuk hubungan fungsional sebagai berikut :

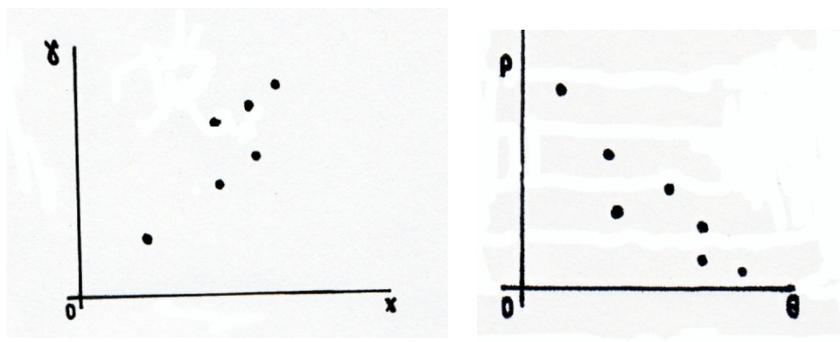
$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

dimana, Y = variabel dependen

X_1, X_2, \dots, X_n = variabel independen

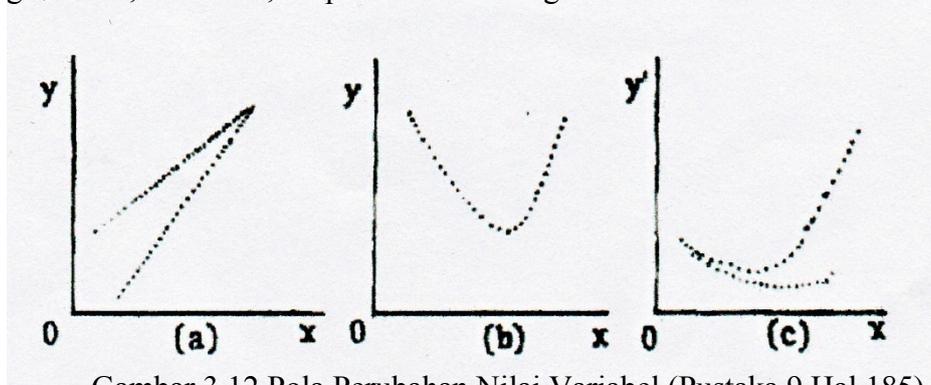
Di dalam suatu persamaan, variabel dependen adalah variabel yang nilai tergantung dari nilai variabel lain. Sedangkan variabel independen adalah variabel yang nilainya tidak tergantung dari variabel lain.

Bentuk hubungan antara dua variabel dapat searah (*direct relationship*) dan dapat berlawanan arah (*inverse relationship*). Jika dua variabel mempunyai hubungan searah artinya perubahan nilai yang satu dengan nilai yang lain adalah searah. Sedangkan dua variabel mempunyai hubungan berlawanan arah artinya perubahan nilai yang satu dengan yang lain adalah berlawanan arah.



Gambar 3.11 Bentuk Hubungan Antara Variabel (Pustaka 9 Hal 185)
(a) Hubungan Searah; (b) Hubungan Berlawan Arah

Perubahan nilai dua variabel yang memiliki hubungan kausalitas akan cenderung membentuk pola tertentu. Pola perubahan nilai dua variabel dapat memiliki hubungan linier, kuadratik, eksponensial atau logaritmik.



Gambar 3.12 Pola Perubahan Nilai Variabel (Pustaka 9 Hal 185)
(a) Hubungan Linier; (b) Hubungan Kuadratik; (c) Hubungan logaritmik

Hubungan antara dua variabel atau lebih dapat diketahui dengan cara persamaan linier. Model persamaan regresi dapat dibentuk dengan cara ini. Pada regresi linier sederhana hanya ada satu variabel independen (X) yang dihubungkan dengan satu variabel dependen (Y) linier (pangkat satu) di dalam X sehingga dapat membentuk model $\hat{Y} = a + bX$. Sedangkan pada regresi multi linier variabel dependen (Y) tidak hanya dihubungkan pada satu variabel independen (X) tetapi lebih dari satu variabel independen (X_1, X_2, \dots, X_n).

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Dari hasil penelitian diperoleh data-data struktur mikro dan kekerasan baja HSLA yang telah mengalami proses *Water Quenching* yang menggunakan Media Pendingin Air seperti pada uraian berikut.

4.1.1 Uji Keras

Dari hasil penelitian, diperoleh data bekas jejak diameter 1 dan 2 serta kekerasan seperti pada tabel berikut.

Tabel. 4.1 Data nilai kekerasan dengan laju pemanasan 5 °C

NO.	NILAI KEKERASAN, HV LAJU PEMANASAN 5°C		
	1120°C t=10 mnt	1120°C t=30 mnt	1120°C t=60 mnt
1	401	315	265
2	391	311	280
3	376	348	262
Rata2	389,33	324,67	269,00

Tabel. 4.2 Data nilai kekerasan dengan laju pemanasan 7,5 °C

NO.	NILAI KEKERASAN, HV LAJU PEMANASAN 7,5°C		
	1120°C t=10 mnt	1120°C t=30 mnt	1120°C t=60 mnt
1	371	283	227
2	371	281	257
3	336	293	234
Rata2	359,33	285,67	239,33

Tabel. 4.3 Data nilai kekerasan dengan laju pemanasan 10 °C

NO.	NILAI KEKERASAN, HV LAJU PEMANASAN 10°C		
	1120°C t=10 mnt	1120°C t=30 mnt	1120°C t=60 mnt
1	306	321	306
2	376	333	303
3	401	326	271
Rata2	361	326,67	293,33

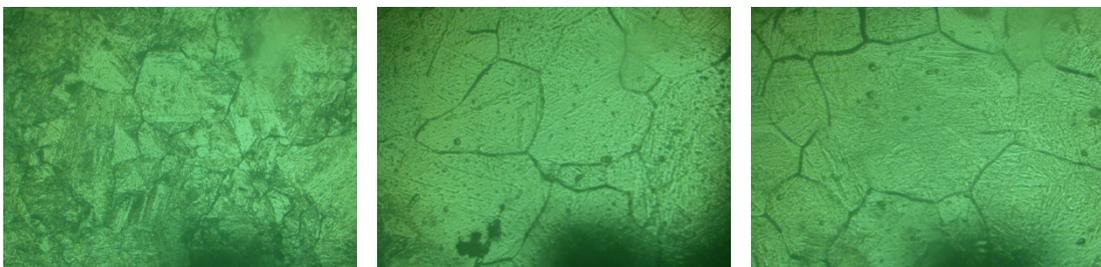
4.1.2 Penampakan Batas Butir Austenite

Untuk mengetahui kondisi struktur micro yang terjadi, maka harus dilakukan pengamatan struktur micro khususnya fasa austenit. Dengan etsa larutan 4 gr asam picric dalam 100 ml aquades ditambah dengan 8 tetes teepol dan 8 tetes HCL, dengan teknik pengetsaan larutan dalam keadaan panas dan sampel juga dalam keadaan panas, untuk keseluruhan sampel menunjukkan batas butir yang cukup jelas untuk pemanasan isothermal pada temperatur 1150°C. Dari hasil studi literatur dan pengamatan hasil penelitian, untuk sementara diketahui bahwa zat etsa dan teknik pengetsaan ini sangat tepat untuk baja HSLA dengan 0,028% Nb dan belum ada dilakukan oleh para peneliti lainnya.

Dari hasil evaluasi zat etsa terhadap penampakan batas butir austenite, diperoleh campuran dan metode etsa yang sesuai untuk penelitian ini. Adapun penampakan batas butir untuk setiap proses perlakuan yang dialami oleh setiap sampel dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4.1. Butir austenit yang terbentuk pada temperatur 1120°C, pada waktu tahan 10,30 dan 60 menit dengan laju pemanasan 5°C/menit.



Gambar 4.2. Butir austenit yang terbentuk pada temperatur 1120°C, pada waktu tahan 10,30 dan 60 menit dengan laju pemanasan 7,5°C/menit.



Gambar 4.3. Butir austenit yang terbentuk pada temperatur 1120°C, pada waktu tahan 10,30 dan 60 menit dengan laju pemanasan 10°C/menit.

Dari gambar 4.1 sampai gambar 4.3 dapat diamati bahwa batas butir austenite untuk semua perlakuan tampak dengan jelas dengan menggunakan larutan dan metode etsa di atas. Oleh sebab itu maka besar butir austenite dapat diamati dan dihitung dengan menggunakan metode intercept Heyn dan ASTM E 112.

Tabel. 4.4. Besar butir austenit hasil pengamatan dan standart deviasinya.

Sampel Temp. 1120 holding time 10 mnt Laju pemanasan 5 C							
No	Jumlah Perpotongan (P)	L ₃	G _i	diameter (d _i) μm	d=Σd _i /N	d - d _i	(d - d _i) ²
1	17,5	0,142857	2,327047	160,893	155,817	5,076	25,767
2	16	0,15625	2,068479	175,683	155,817	19,866	394,664
3	20	0,125	2,71234	140,808	155,817	-15,009	225,274
4	17,5	0,142857	2,327047	160,893	155,817	5,076	25,767
5	20	0,125	2,71234	140,808	155,817	-15,009	225,274
	Σ			779,084			896,75
	sd= (Σ(d-d _i) ² /N-1) ^{1/2}						14,973

Sampel Temp. 1120 holding time 30 mnt Laju pemanasan 5 C							
No	Jumlah Perpotongan (P)	L ₃	G _i	diameter (d _i) μm	d=Σd _i /N	d - d _i	(d - d _i) ²
1	13	0,192308	1,469355	216,076	185,872	30,204	912,295
2	15	0,166667	1,882259	187,606	185,872	1,735	3,009
3	18,5	0,135135	2,487389	151,721	185,872	-34,150	1166,255
4	13,5	0,185185	1,578251	208,278	185,872	22,406	502,039
5	17	0,147059	2,243406	165,677	185,872	-20,195	407,821
	Σ			929,36			2991,42
	sd= (Σ(d-d _i) ² /N-1) ^{1/2}						27,35

Sampel Temp. 1120 holding time 60 mnt Laju pemanasan 5 C							
No	Jumlah Perpotongan (P)	L ₃	G _i	diameter (d _i) μm	d=Σd _i /N	d - d _i	(d - d _i) ²
1	12	0,208333	1,238399	234,737	199,357	35,380	1251,73
2	14	0,178571	1,683186	197,721	199,357	-1,636	2,68
3	16	0,15625	2,068479	190,000	199,357	-9,357	87,56
4	13,5	0,185185	1,578251	203,724	199,357	4,367	19,068
5	16,5	0,151515	2,157268	170,604	199,357	-28,753	826,733
	Σ			996,79			2187,76
	sd= (Σ(d-d _i) ² /N-1) ^{1/2}						23,39

Sampel Temp. 1120 holding time 10 mnt Laju pemanasan 7,5 C							
No	Jumlah Perpotongan (P)	L ₃	G _i	diameter (d _i) μm	d=Σd _i /N	d - d _i	(d - d _i) ²
1	19	0,131579	2,56434	147,339	143,268	4,071	16,571
2	22,5	0,111111	3,05219	122,354	143,268	-20,914	437,40
3	19	0,131579	2,56434	147,339	143,268	4,071	16,571
4	20,5	0,121951	2,78359	138,414	143,268	-4,854	23,563
5	18	0,138889	2,40833	160,895	143,268	17,627	310,704
	Σ			716,341			804,81
	sd= (Σ(d-d _i) ² /N-1) ^{1/2}						14,185

Sampel Temp. 1120 holding time 30 mnt Laju pemanasan 7,5 C							
No	Jumlah Perpotongan (P)	L ₃	G _i	diameter (d _i) μm	d=Σd _i /N	d - d _i	(d - d _i) ²
1	21	0,119048	2,853119	160,893	143,688	17,205	296,023
2	15,5	0,16129	1,976871	162,399	143,688	18,711	350,12
3	17,5	0,142857	2,327047	138,414	143,688	-5,274	27,811
4	20,5	0,121951	2,783588	134,732	143,688	-8,956	80,202
5	22	0,113636	2,987348	122,000	143,688	-21,688	470,351
	Σ			718,4379			1224,50
	sd= (Σ(d-d _i) ² /N-1) ^{1/2}						17,496

Sampel Temp. 1120 holding time 10 mnt Laju pemanasan 7,5 C								
No	Jumlah Perpotongan (P)	L ₃	G _i	diameter (d _i) μm	d=Σd _i /N	d - d _i	(d - d _i) ²	
1	21,5	0,116279	2,921014	132,208	160,490	-28,282	799,872	
2	19	0,131579	2,564337	151,032	160,490	-9,458	89,45	
3	17	0,147059	2,243406	166,818	160,490	6,328	40,044	
4	14	0,178571	1,683186	194,253	160,490	33,763	1139,940	
5	18	0,138889	2,408331	158,139	160,490	-2,351	5,527	
	Σ			802,45			2074,84	
	sd= (Σ(d-d _i) ² /N-1) ^{1/2}							22,775

Sampel Temp. 1120 holding time 10 mnt Laju pemanasan 10 C								
No	Jumlah Perpotongan (P)	L ₃	G _i	diameter (d _i) μm	d=Σd _i /N	d - d _i	(d - d _i) ²	
1	19,5	0,128205	2,639287	144,314	135,503	8,811	77,637	
2	22	0,113636	2,987348	127,607	135,503	-7,896	62,343	
3	21	0,119048	2,853119	134,050	135,503	-1,453	2,111	
4	18,5	0,135135	2,487389	151,721	135,503	16,218	263,032	
5	23,5	0,106383	3,177664	119,822	135,503	-15,681	245,882	
	Σ			677,5152			651,01	
	sd= (Σ(d-d _i) ² /N-1) ^{1/2}							12,757

Sampel Temp. 1120 holding time 30 mnt Laju pemanasan 10 C								
No	Jumlah Perpotongan (P)	L ₃	G _i	diameter (d _i) μm	d=Σd _i /N	d - d _i	(d - d _i) ²	
1	14,5	0,17241	1,784439	194,258	166,744	27,514	757,039	
2	17,5	0,14286	2,327047	160,892	166,744	-5,852	34,24	
3	18,5	0,13514	2,487389	151,721	166,744	-15,023	225,680	
4	18	0,13889	2,408331	156,243	166,744	-10,501	110,264	
5	16,5	0,15152	2,157268	170,604	166,744	3,861	14,905	
	Σ			833,72			1142,13	
	sd= (Σ(d-d _i) ² /N-1) ^{1/2}							16,898

Sampel Temp. 1120 holding time 60 mnt Laju pemanasan 10 C							
No	Jumlah Perpotongan (P)	L ₃	G _i	diameter (d _i) μm	d=Σd _i /N	d - d _i	(d - d _i) ²
1	17,5	0,142857	2,327047	160,893	186,671	-25,778	664,485
2	15	0,166667	1,882259	187,606	186,671	0,935	0,875

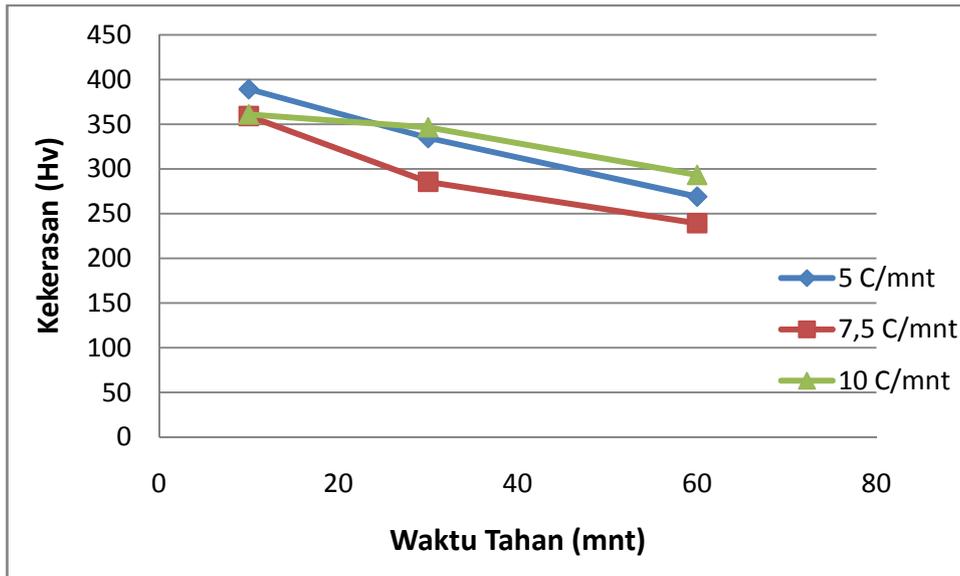
3	13	0,192308	1,469355	216,076	186,671	29,405	864,678
4	15,5	0,16129	1,976871	181,172	186,671	-5,499	30,235
5	15	0,166667	1,882259	187,606	186,671	0,935	0,875
	Σ			933,35			1561,15
	$sd = (\Sigma(d-d_i)^2 / (N-1))^{1/2}$						19,76

Tabel. 4.5. Rata-rata besar butir austenit hasil pengamatan dan kekerasannya.

No	Waktu Tahan (menit)	Laju Pemanasan (°C/menit)	$d_{rata-rata}$ (µm)	HV
1	10	5	155,82	389,3
2	30	5	185,87	334,6
3	60	5	199,36	269
4	10	7,5	143,27	359,3
5	30	7,5	143,69	285,6
6	60	7,5	160,49	239,3
7	10	10	135,5	361
8	30	10	166,74	346,6
9	60	10	186,67	293,3

4.2 Pembahasan

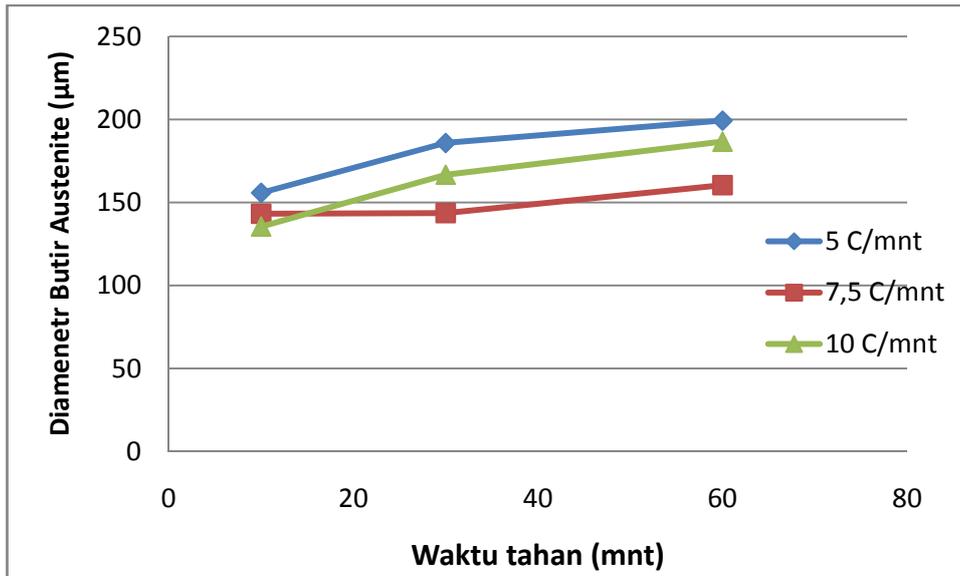
Dari tabel 4.1. sampai 4.5. tersebut diatas dapat digambarkan grafik hubungan pengaruh temperatur, laju pemanasan dan waktu tahan terhadap kekerasan, serta grafik hubungan pengaruh temperatur, laju pemanasan dan waktu tahan terhadap besar butir austenite, sebagaimana berikut.



Gambar 4.4. Grafik hubungan pengaruh laju pemanasan dan waktu tahan terhadap kekerasan butir austenite.

Dari grafik diatas, seiring dengan semakin meningkatnya lama (waktu) penahanan pada temperatur pemanasan 1120 °C terjadi penurunan kecenderungan rata-rata kekerasan. Hal ini sesuai dengan teori yang ada, dimana pada waktu tahan yang kecil, persentase unsur paduan yang terurai lebih kecil dibandingkan dengan pada waktu tahan yang lama, sehingga masih banyak terdapa unsur paduan pada batas butir yang akan menghalangi pergerakan batas butir untuk bertumbuh. Selain itu unsur paduan yang belum terurai secara lebih homogen akan memberikan pengaruh terhadap pergerakan dislokasi-dislokasi, sehingga ketika dilakukan pengujian kekerasan akan menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi.

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa pada laju pemanasan 10°C/mt, kekerasan yang terjadi lebih besar dibandingkan dengan laju pemanasan 7,5 dan 5oC/mt. Hal ini dimungkinkan karena persentase unsur paduan yang terurai lebih kecil dibandingkan dengan laju pemanasan yang lebih kecil, sehingga masih banyak terdapat unsur paduan pada batas butir yang akan menghalangi pergerakan batas butir untuk bertumbuh. Selain itu unsur paduan yang belum terurai secara lebih homogen akan memberikan pengaruh terhadap pergerakan dislokasi-dislokasi, sehingga ketika dilakukan pengujian kekerasan akan menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi.



Gambar 4.5. Grafik hubungan pengaruh laju pemanasan dan waktu tahan terhadap diameter butir austenite yang terbentuk.

Dari gambar 4.5 dapat dilihat bahwa dengan semakin meningkatnya waktu tahan maka besar butir austenit yang terjadi semakin besar. Hal ini dapat dipahami karena semakin lama waktu tahan dan semakin besar temperatur aktivasi akan meningkatkan energi aktivasi pertumbuhan, yang akan menguraikan dislokasi-dislokasi yang ada sebelumnya, sehingga pertumbuhan batas butir tidak terhalang oleh dislokasi untuk semakin membesar.

Jika melihat pada gambar 4.5 diatas, dapat diduga bahwa dengan laju pemanasan yang rendah, kehomogenan terurainya dislokasi-dislokasi yang ada lebih tinggi sehingga menurunkan halangan yang menghambat pertumbuhan butir khususnya pada batas butir. Selain itu, energi minimum yang dibutuhkan agar atom-atom dapat berdifusi untuk memperoleh keadaan yang lebih stabil (Q) akan semakin kecil yang akan meningkatkan migrasi batas butir untuk terus bertumbuh semakin besar. Dengan laju pemanasan yang lebih rendah, kehomogenan terurainya endapan yang terdapat pada matriks lebih tinggi sehingga tidak menghalangi batas butir untuk terus bertumbuh.

4.3 Model Empiris Besar Butir

Untuk memperoleh pemodelan matematika dari pengaruh temperatur pemanasan, laju pemanasan dan waktu tahan terhadap besar butir austenite, dapat digunakan analisa statistik yaitu metode regresi. Secara umum, dari gambar 4.5 dapat diturunkan persamaan besar butir sebagai fungsi dari

$$d = f(Hr) \cdot f(t) \quad \dots(4.1)$$

dimana ;

d = besar butir austenite yang terjadi (μm)

$f(Hr)$ = fungsi dari heating rate (laju pemanasan)

$f(t)$ = fungsi dari waktu tahan

Persamaan 4.1 diatas dapat dituliskan sebagai ;

$$d = a \cdot Hr^b \cdot t^d \quad \dots(4.2)$$

dimana:

- a adalah konstanta hubungan antara laju pemanasan dan besar butir, serta b adalah eksponen kecenderungan kurva antara laju pemanasan dan besar butir.
- c adalah konstanta hubungan antara waktu tahan dan besar butir, serta d adalah eksponen kecenderungan kurva antara waktu tahan dan besar butir.

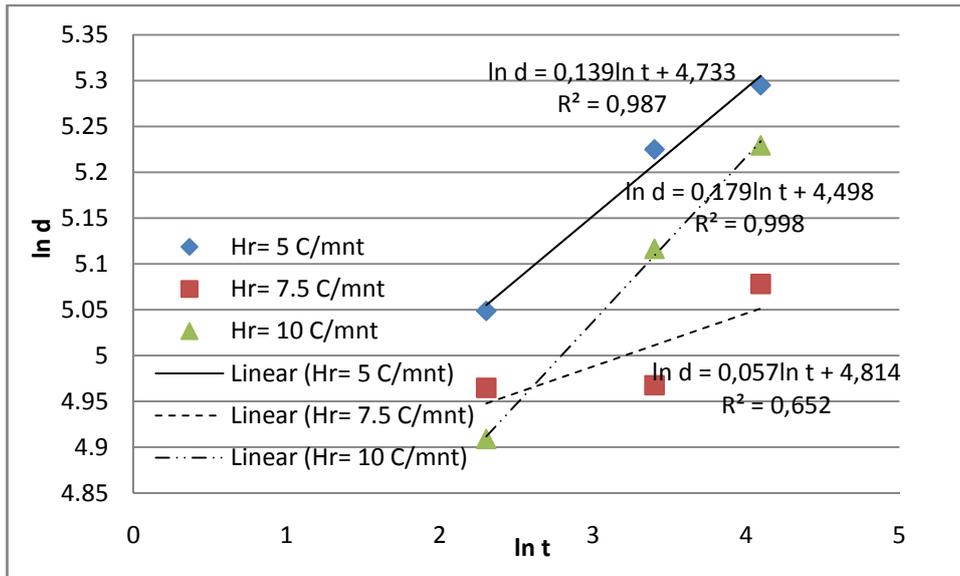
Persamaan besar butir dari 4.2 diatas dapat diselesaikan dengan menglogaritma natural kan persamaan tersebut menjadi :

$$\begin{aligned} \ln d &= \ln(a \cdot Hr^b \cdot t^d) \\ \ln d &= \ln a + b \cdot \ln Hr + \ln c + d \cdot \ln t + \ln K \end{aligned} \quad \dots(4.3)$$

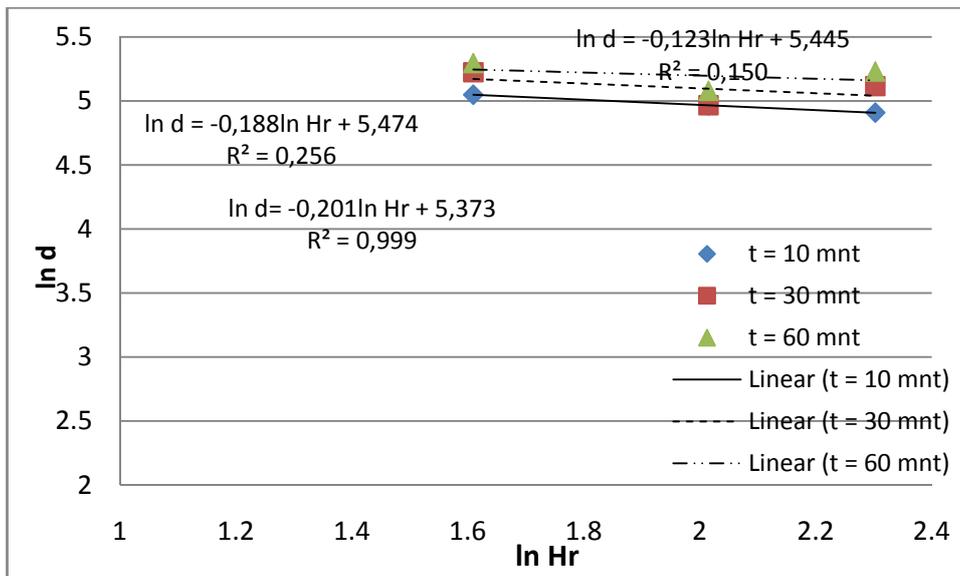
dimana: $\ln a + \ln c + \ln K = \ln C$, sehingga persamaan 4.3 menjadi :

$$\ln d = b \cdot \ln Hr + d \cdot \ln t + \ln C \quad \dots(4.4)$$

Persamaan (4.4) diatas dapat diselesaikan dengan menggambarkan grafik hubungan logaritma natural antara masing-masing variabel laju pemanasan (Hr) dan waktu tahan (t) dengan besar butir austenit (d) dengan menggunakan data pada tabel 4.5. dari grafik tersebut akan diperoleh nilai konstanta dan eksponen yang sesuai untuk ketiga variabel tersebut.



Gambar 4.6. Nilai konstanta a dan eksponen b untuk hubungan besar butir dan waktu tahan



Gambar 4.7. Nilai konstanta c dan eksponen d untuk hubungan besar butir dan laju pemanasan

Dari grafik pada gambar 4.6 sampai gambar 4.7 dan persamaan 4.3, maka diperoleh :

1. $\ln d = d \cdot \ln t + \ln c \rightarrow y = 0,139x + 4,733$ dengan korelasi sebesar 0,9934
 $\ln d = d \cdot \ln t + \ln c \rightarrow y = 0,057x + 4,814$ dengan korelasi sebesar 0,8074
 $\ln d = d \cdot \ln t + \ln c \rightarrow y = 0,179x + 4,498$ dengan korelasi sebesar 0,9989

dimana: $d = 0,139, 0,057$ dan $0,179$
 $\ln c = 4,733, 4,814$ dan $4,498$

2. $\ln d = b \cdot \ln Hr + \ln a \rightarrow y = -0,188x + 5,474$ dengan korelasi sebesar $0,5059$
 $\ln d = b \cdot \ln Hr + \ln a \rightarrow y = -0,201x + 5,373$ dengan korelasi sebesar $0,9995$
 $\ln d = b \cdot \ln Hr + \ln a \rightarrow y = -0,123x + 5,445$ dengan korelasi sebesar $0,387$
 dimana: $b = -0,188; -0,201$ dan $-0,123$
 $\ln a = 5,474; 5,373$ dan $5,445$

Dari hasil besar nilai konstanta dan eksponen seperti pada grafik gambar 4.6 sampai 4.7 diatas, dapat diperoleh model matematika untuk besar butir austenite dengan menyederhanakan persamaan 4.3. Besar nilai konstanta dan eksponen yang diperoleh kemudian dicoba dimasukkan ke dalam persamaan 4.3. Nilai konstanta dan eksponen yang memberikan persentase error mendekati nol antara diameter butir austenite hasil eksperimen dan hasil perhitungan, merupakan konstanta dan eksponen yang akan digunakan sebagai persamaan akhir untuk persamaan 4.3, dan hasilnya dapat ditabelkan seperti pada tabel berikut.

Tabel 4.6. Logaritma natural dari diameter butir austenite eksperimen dan model.

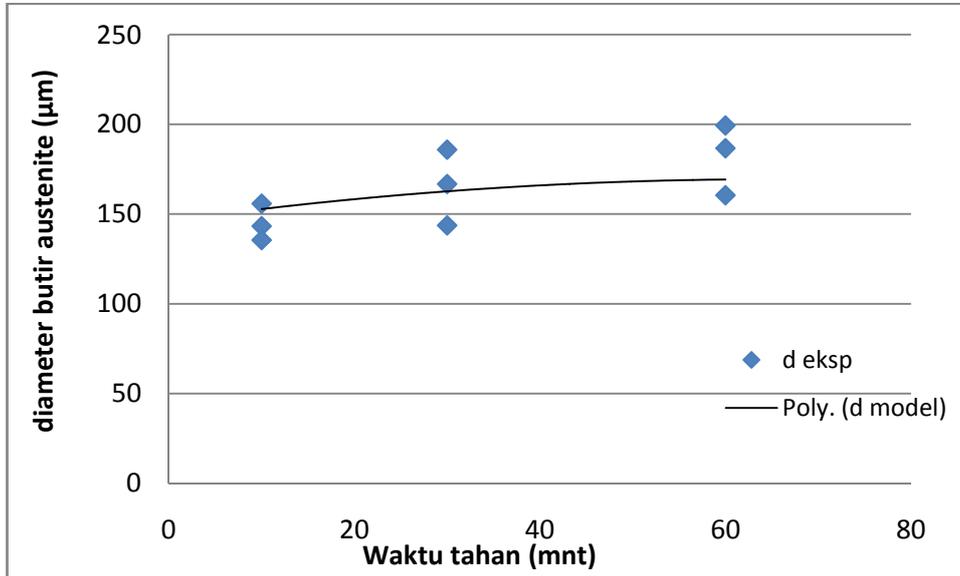
Sehingga persamaan 4.4 dapat ditulis ulang menjadi :

$$\ln d = -0,201 \cdot \ln Hr + 0,057 \cdot \ln t + 4,6$$

Dengan meng anti logaritma naturalkan persamaan diatas, maka diperoleh model persamaan besar butir austenite untuk penelitian ini adalah :

$$d_{\text{model}} = 198,98 \cdot Hr^{-0,201} \cdot t^{0,057} \quad \dots(4.5)$$

Yang jika digrafikkan dapat melihat pengaruh dari temperatur pemanasan, laju pemanasan dan waktu tahan secara keseluruhan terhadap besar butir austenite yang terjadi.



Gambar 4.8 Grafik hubungan besar butir austenite hasil eksperimen dengan model perhitungan besar butir yang terjadi

Dari hasil perhitungan dapat dilihat bahwa model matematika memiliki nilai eror yang berfluktuasi jika di bandingkan dengan perhitungan. Hal ini dimungkinkan karena:

- Akibat tidak seragamnya pengambilan spesimen dari dalam tungku pemanas sehingga mempengaruhi laju pendinginan benda kerja.
- Tingkat ketelitian dan kemampuan mata mengamati secara fisual sehingga mengurangi nilai efisien dari benda kerja.
- Adanya factor lain yang tidak terdeteksi misalnya pengaruh komposisi unsur.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengamatan dan pembahasan data diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Besar butir austenite yang terjadi akan semakin meningkat dengan meningkatnya waktu tahan.
2. Besar butir austenite yang terjadi akan semakin kecil dengan meningkatnya laju pemanasan.
3. Kekerasan yang terjadi akan semakin menurun dengan semakin meningkatnya waktu tahan.
4. Ada hubungan yang saling terkait antara temperatur pemanasan, laju pemanasan dan waktu tahan terhadap pertumbuhan butir austenit dan kekerasan yang terjadi.
5. Dari hasil penelitian ini, diperoleh model pertumbuhan butir akibat pengaruh waktu tahan dan laju pemanasan pada temperatur pemanasan 1120°C adalah :

$$d = 198,98.Hr^{-0,201}.t^{0,057}$$

5.2 Saran

Untuk lebih baiknya hasil penelitian ini, maka perlu diadakan :

1. Peralatan yang digunakan lebih baik khususnya mikroskop optik.
2. Perlu pengamatan lebih lanjut menggunakan SEM dan TEM

DAFTAR PUSTAKA

1. C.M Sellars, (1980) :“ The Physical Metallurgy of Hot Working , *Proc. Int. Conf.on Hot Working and Forming Processes , Sheffield, England*, pg 3-15.
2. I.V.Samarasekera and E.B.Hawbolt, July-August 1995, “Overview of Modelling the Microstructural State of Steel Strip During Hot Rolling” *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp 157-165
3. C.M Sellars, (1982), ”Static Recrystallization and Precipitation During Hot Rolling of Microalloyed Steels” , *Mat Science Seminar, Sheffield, England*.
4. D. Priadi, **R.A.M. Napitupulu** and E.S. Siradj, 15 May 2011, “*Austenite grain growth calculation of 0.028% Nb steel*”, *Journal of Mining and Metalurgy B*, ISSN 1450-5339, IF. 1.294, University of Belgrade, Serbia, pp. 199 – 209.
5. D. Priadi, **R.A.M. Napitupulu** and E.S. Siradj, October 2011, “*Austenite Grain Growth Calculation during Hot Rolling of 0.028% Nb Steel*”, *Journal of Materials Science and Engineering A*, ISSN 1934-8959 , USA, pp. 678 – 683.
6. Khaled F. H., 2005, Disertasi: “*The Grain Coarsening and Sbsequent Transformation Of Austenite in the HSLA Steel During High Temperature Thermomechanical Processing*”, University of Pittsburgh, USA.
7. Pat L Mangonon,PhD,PE,FASM, 1999, ”The Priciples of Materials Selection for Engineering Design”, Prentice Hall Inc, Simon & Schuster/A Viacom Company,Upper Saddle River,New Jersey 07458.
8. ASM Handbook Volume 4, 1991, *Heat Treating*, ASM International.
9. Panigrahi B. K., August 2001, “*Processing of Low Carbon Steel Plate and Hot Strip—An Overview*”, *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 24, No. 4.
10. Liu T., September 2001, *Disertasi: Modelling Microstructural Evolution of Microalloyed Forging Steels During Thermomechanical Processing*, Ontario Canada, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Queen’s University, Canada.
11. Russel K. C., *Precipitate Coarsening and Grain Growth in Steels*, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

12. Zainal Abidin M, (2000), Skripsi : *Studi Kinetika Rekrystalisasi Butir Austenit Baja C-Mn (0,046% C) Hasil Proses Canai Panas Sebagai Fungsi Dari Regangan dan Temperatur Deformasi*, Jurusan Metalurgi FT UI, Depok.
13. Zulfia A., J. M. Llanos, 2001, *Mathematical Simulation and Controlled Cooling in an EDC Conveyor of a Wire Rod Rolling Mill*, ISIJ International Vol. 41 No. 10.
14. Manohar P.A. et. al., 1998, "*Five Decades of the Zener Equation*". ISIJ International, Vol.38, No. 9.
15. Dedi Priadi, **Richard A.M.Napitupulu**, Anugrah Martua Raja, Juli 2010, "*Modifikasi Metode Etsa Terhadap Penampakan Batas Butir Fasa Austenit Pada Baja HSLA A572 Grade 50 Hasil Canai Panas*", Proceeding Seminar Nasional Metalurgi dan Material V, Cilegon.
16. A. Di Schino, J. M. Kenny, 2002, "Analysis of the recrystallization and grain growth processes in AISI 316 stainless steel", *Journal Of Materials Science* 37, p. 5291 – 5298.
17. Matthias Militzer, 2007, *Computer Simulation of Microstructure Evolution in Low Carbon Sheet Steels*, ISIJ International, Vol. 47 No. 1.