

**STUDY KINERJA PANAS (*HOT WORKING*) BAJA LISTRIK
(3% Si) UNTUK APLIKASI LISTRIK PADA TEMPERATUR
1050 °C DAN 1100 °C**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Raihanunnisa

3334190061

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDY KINERJA PANAS (*HOT WORKING*) BAJA LISTRIK
(3% Si) UNTUK APLIKASI LISTRIK PADA TEMPERATUR
1050 °C DAN 1100 °C**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh :

Pembimbing I



Muhammad Fitrullah S.T., M.T.
NIP. 197804142006041002

Pembimbing II



Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D
NIP.198003072005011002

LEMBAR PERSETUJUAN

STUDY KINERJA PANAS (*HOT WORKING*) BAJA LISTRIK
(3% Si) UNTUK APLIKASI LISTRIK PADA TEMPERATUR
1050 °C DAN 1100 °C

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh

Raihanunnisa

3334190061

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal 11 Januari 2024

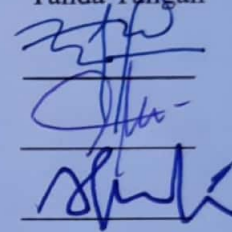
Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

Penguji I : **Muhammad Fitrullah S.T., M.T.**

Penguji II : **Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D**

Penguji III : **Prof. Agus Pramono, S.T., M.T., Ph.D. Tech**



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D

NIP. 198003072005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Study Kinerja Panas (*Hot Working*) Baja Listrik (3% Si) Untuk Aplikasi Listrik Pada Temperatur 1050°C dan 1100°C

Nama : Raihanunnisa

NIM : 3334190061

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau bahkan seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 15 Januari 2023



RAIHANUNNISA
NIM. 3334190061

ABSTRAK

Komponen yang sangat penting untuk dunia bisa berkembang secara progresif adalah tenaga listrik. Dimana dalam pendistribusiannya listrik membutuhkan alat yaitu transformator. Trafo ini terdiri dari autotransformer yang berisi beberapa gulungan kawat yang terbuat dari baja silikon, namun penggunaan baja silikon ini memiliki kekurangan dalam penggunaan energi yang berlebihan sehingga meningkatkan emisi global dunia dengan kapasitas produksi yang kurang optimal dengan proses yang membutuhkan banyak waktu. Berbagai upaya dilakukan untuk mengatasi masalah ini, salah satunya adalah dengan melakukan penambahan 3% Si dalam proses produksi baja listrik dan menggunakan proses *hot working* dalam proses pembuatannya. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui bagaimana pengaruh karakteristik pengerjaan panas dari baja listrik pada temperatur tinggi 1050°C dan 1100°C dan mengetahui bagaimana penyelesaian persamaan matematika eksponensial, nilai Q (energi aktivasi), nilai zenner hollomon dan laju DRV terhadap pengaruh karakteristik pengerjaan panas dari baja listrik pada temperatur tinggi 1050°C dan 1100°C. Semua sampel yang diuji pertama-tama dipanaskan hingga suhu austenisasi 1100°C dengan laju pemanasan 2°C/detik dan ditahan selama 120 detik agar terjadi homogenisasi struktur mikro, kemudian spesimen didinginkan hingga suhu deformasi dengan kecepatan 10°C/s, selanjutnya spesimen didinginkan hingga suhu uji 1050°C dan 1100 °C dan ditahan spesimen diregangkan pada laju regangan sebenarnya yang berbeda yaitu 10⁻¹ s⁻¹, 10⁻² s⁻¹ dan 10⁻³ s⁻¹ selanjutnya dilakukan *hot tensile test* dengan nilai regangan dan temperatur yang sama. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jenis pelunakan pada temperatur 1050 °C dan 1100 °C adalah DRV, dimana DRV meningkat dengan meningkatnya suhu namun apabila DRV meningkat maka laju regangan akan menurun. Nilai DRV tertinggi didapatkan spesimen C3 1100 0,001 dengan nilai 1266,93506 MPa dan nilai DRV terendah didapatkan oleh spesimen C2 1050 0,001 dengan nilai 306,59125 MPa. Nilai parameter Z tertinggi yang didapatkan dari penelitian ini adalah parameter Z yang didapatkan oleh spesimen C3 1050 0,1 dengan nilai 4,46147 x 10²⁶ dan nilai parameter Z terendah didapatkan oleh spesimen C1 1050 0,1 dengan nilai 1,24263 x 10²⁵ dan nilai Q tertinggi yang didapatkan dari penelitian ini adalah didapatkan oleh spesimen dengan temperatur 1050 OC dengan nilai 245,37395 KJ/mol dan nilai Q terendah diapatkan oleh spesimen dengan temperatur 1100 OC dengan nilai 245,37128 KJ/mol. Dapat disimpulkan bahwa spesimen dengan kekuatan terendah atau spesimen dengan sifat mekanik yang kurang baik adalah spesimen C2 dan untuk spesimen yang memiliki kekuatan tertinggi dan memiliki sifat mekanik yang sangat baik adalah spesimen C3 1100 °C karena kandungan Si yang paling rendah diantara 3 spesimen lainnya dan memiliki nilai DRV yang terbesar diantara 3 spesimen lainnya hal ini dikarenakan nilai DRV yang tinggi akan tidak akan menghasilkan pertumbuhan butir baru sehingga sifat mekanik dari baja tidak akan mengalami penurunan.

Kata Kunci : Baja Silikon, DRV, Energi Aktivasi, Hot Working, Parameter Z

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penyusunan skripsi ini dilaksanakan guna memenuhi syarat kelulusan mata kuliah Skripsi di jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Maka dari itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
2. Bapak Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Bapak Muhammad Fitrullah, S.T., M.T selaku Pembimbing I pada penelitian ini.
4. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D selaku Pembimbing II pada penelitian ini.
5. Bapak Prof. Agus Pramono, S.T., M.T., Ph.D. Tech selaku Penguji III pada penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat kesalahan serta kekurangan. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik serta saran dari pembaca agar skripsi ini menjadi lebih baik. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca atau sebagai bahan kajian serta studi sebagai sumber referensi. Atas perhatiannya, penulis mengucapkan terima kasih.

Cilegon, 15 Januari 2023

Raihanunnisa

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Hipotesis	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Batasan Masalah	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pengertian <i>Silicon Steel</i>	6
2.2 Sejarah <i>Silicon Steel</i>	8
2.3 Jenis Jenis <i>Electrical Steel</i> dan Aplikasinya	10
2.4 Kandungan <i>Silicon</i> di <i>Silicon Steel</i>	17
2.5 <i>Hot Working</i>	21
2.6 Macam – Macam <i>Hot Working</i>	24
2.7 Struktur Mikro	27

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir Penelitian	30
3.2	Alat dan Bahan	31
3.2.1	Alat yang Digunakan.....	31
3.2.2	Bahan yang Digunakan	31
3.3	Prosedur Penelitian.....	31

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil Penelitian	36
4.2	Pembahasan Penelitian.....	38
4.2.1	<i>Test Machine Hot Compression</i> INSTRON 4507.....	38
4.2.2	<i>Recovery</i> dan Rekrystalisasi.....	40
4.2.3	<i>Dynamic Recovery (DRV)</i> dan <i>Dynamic Recrystallization (DRX)</i> ..	44
4.2.4	Kurva Regangan Sebenarnya dan Tegangan Sebenarnya.....	46
4.2.5	Fenomena DRV Pada Kurva Regangan Sebenarnya dan Tegangan Sebenarnya	49
4.2.6	Parameter Zenner Hollomon	54
4.2.7	Standar ASTM	67
4.2.8	<i>Test Machine Hot Tensile</i> INSTRON 4507	69
4.2.9	Hasil Penelitian <i>Hot Tensile</i> INSTRON 4507	70

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	78
5.2	Saran.....	79

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Aplikasi <i>Non-Oriented Steel</i> dan <i>Grain-Oriented Steel</i>	16
Tabel 4.1 Komposisi Sampel Baja Pada <i>Hot Compression Test</i>	39
Tabel 4.2 Mekanisme Pelunakan Material Pada <i>Hot Compression Test</i>	49
Tabel 4.3 Nilai Parameter Zenner Hollomon Pada Setiap Spesimen.....	63
Tabel 4.4 Komposisi Sampel Baja Pada <i>Hot Tensile Test</i>	69
Tabel 4.5 Hasil Penelitian <i>Hot Tensile Test</i> Pada Setiap Spesimen.....	72

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 <i>Silicon Steel</i>	7
Gambar 2.2 <i>Non-Oriented Electrical Steel dan Oriented Electrical Steel</i>	10
Gambar 2.3 Desain E-I Pada 2 Jenis Baja Listrik	14
Gambar 2.4 Tekstur Goss atau Orientas Goss Pada Baja Listrik	15
Gambar 2.5 Karakteristik Pada 2 Jenis Baja Listrik	19
Gambar 2.6 Alur Produksi Pembuatan Baja Listrik	21
Gambar 2.7 Struktur Mikro Sampel Pengujian Metalografi Pada 1100 °C (a) dan 1050 °C (b)	28
Gambar 2.8 Struktur Mikro Sampel Pengujian Fraktografi Pada 1100 °C (a) dan 1050 °C (b)	29
Gambar 3.1 Diagram Alir Percobaan.....	30
Gambar 4.1 Grafik Hasil <i>Hot Compression Test</i> Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C Pada Strain Rate (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	36
Gambar 4.2 Grafik Hasil <i>Hot Compression Test</i> Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C Pada Strain Rate (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	36
Gambar 4.3 Grafik Hasil <i>Hot Compression Test</i> Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050 °C Pada Strain Rate (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	37
Gambar 4.4 Grafik Hasil <i>Hot Compression Test</i> Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100 °C Pada Strain Rate (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	37
Gambar 4.5 Grafik Hasil <i>Hot Compression Test</i> Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100 °C Pada Strain Rate (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	38
Gambar 4.6 Grafik Hasil <i>Hot Compression Test</i> Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada Strain Rate (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1}	

(c) 10^{-3} s^{-1}	38
Gambar 4.7 Skema Grafik DRV dan DRX.....	48
Gambar 4.8 Grafik $\ln\sigma$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	55
Gambar 4.9 Grafik $\ln\sigma$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	55
Gambar 4.10 Grafik $\ln\sigma$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	56
Gambar 4.11 Grafik $\ln\sigma$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	56
Gambar 4.12 Grafik $\ln\sigma$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	56
Gambar 4.13 Grafik $\ln\sigma$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	57
Gambar 4.14 Grafik σ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	57
Gambar 4.15 Grafik σ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	57
Gambar 4.16 Grafik σ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	58
Gambar 4.17 Grafik σ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	58
Gambar 4.18 Grafik σ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	58
Gambar 4.19 Grafik σ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	59
Gambar 4.20 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	59
Gambar 4.21 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	59
Gambar 4.22 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur	

1050 °C Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	60
Gambar 4.23 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100 °C Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	60
Gambar 4.24 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100 °C Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	60
Gambar 4.25 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	61
Gambar 4.26 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	61
Gambar 4.27 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	61
Gambar 4.28 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050 °C Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	62
Gambar 4.29 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100 °C Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	62
Gambar 4.30 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100 °C Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	62
Gambar 4.31 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada <i>Strain Rate</i> (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}	63
Gambar 4.32 Grafik Hasil <i>Hot Tensile Test</i> Pada Temperatur 1050 °C Pada Spesimen (a) C1 (b) C2 (c) C3	71
Gambar 4.33 Grafik Hasil <i>Hot Tensile Test</i> Pada Temperatur 1100 °C Pada Spesimen (a) C1 (b) C2 (c) C3	71
Gambar 4.34 Grafik Temperatur vs <i>Reduction Area</i> Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C	73
Gambar 4.35 Grafik Temperatur vs <i>Reduction Area</i> Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C	73
Gambar 4.36 Grafik Temperatur vs <i>Reduction Area</i> Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C	73

Gambar 4.37 Grafik Temperatur vs <i>Ultimate Tensile Test</i> Pada Spesimen C1	
Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C	74
Gambar 4.38 Grafik Temperatur vs <i>Ultimate Tensile Test</i> Pada Spesimen C2	
Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C	74
Gambar 4.39 Grafik Temperatur vs <i>Ultimate Tensile Test</i> Pada Spesimen C3	
Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C	74

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aspek dan komponen yang sangat penting yang menjadi fondasi dunia modern untuk bisa berkembang secara dinamis dan progresif adalah tenaga listrik. Semua umat manusia sangat membutuhkan tenaga listrik untuk kehidupan sehari-hari, mengirimkannya ke jarak yang jauh, dan setelahnya menggunakan listrik sebagai penyokong di fasilitas yang ditandai dengan parameter gaya listrik yang sangat bervariasi. Dalam mendistribusikan listrik ke jarak yang jauh membutuhkan trans energi dan alat pembentuk trans energi yang paling sederhana adalah transformator. Dimana transformator ini merupakan perangkat elektromagnetik statis sehingga bagiannya tidak bergerak yang digunakan untuk mengubah sistem arus bolak-balik dari satu tegangan menjadi sistem arus bolak-balik dari tegangan lain dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetik pada frekuensi yang tidak berubah dan tanpa kehilangan daya yang besar.

Trafo ini terdiri dari autotransformer yang berisi beberapa gulungan kawat yang saling berinsulasi yang ditutupi oleh fluks magnet dan digulung pada konduktor magnet (inti) yang terbuat dari bahan lunak magnetis feromagnetik. Bahan lunak magnetis feromagnetik ini sebagian besar memiliki sifat-sifat transformator pada umumnya. Bahan lunak magnetis feromagnetik memiliki beberapa ciri, yaitu magnetisasi yang mudah, magnetisasi pembalikan permeabilitas magnet tinggi), memiliki tingkat induksi magnet tinggi, dan memiliki nilai kerugian minimum untuk magnetisasi pembalikan. Dua kondisi pertama ini menentukan ukuran dan berat belitan listrik dan inti magnetik. Kerugian minimum untuk pembalikan magnetisasi sangat menentukan efisiensi dari transformator dan suhu operasi transformatornya. Pada saat ini inti dan bagian aktif magnet yang merupakan bahan perangkat elektroteknik diproduksi dari jenis baja anisotropik elektroteknik (EAS). Tingkat dari sifat magnet ini dievaluasi dari beberapa karakteristik yang utama adalah kehilangan magnet spesifik $P_{1.7} 50$, W/kg yang

diukur dalam medan dengan nilai induksi sebesar 1,7 T pada frekuensi medan 50 Hz) dan induksi elektromagnetik B800 dimana T diukur pada nilai tetap 800 A m dari intensitas medan magnet.

Baja listrik adalah bahan fungsional dan canggih digunakan dalam motor, generator listrik dan transformer untuk aplikasi listrik. Baja silicon mengandung Si merupakan bahan feromagnetik terpenting yang diproduksi saat ini dan membentuk inti dari berbagai macam mesin listrik. Baja listrik ini memiliki banyak jenis yaitu baja listrik yang tidak berorientasi dan baja listrik berorientasi. Banyak faktor yang mempengaruhi pembuatan baja listrik yaitu sifat magnetik, resistivitas, ukuran butir, dan tekstur yang dapat dikontrol melalui pilihan komposisi dan dikontrol melalui kondisi pemrosesan yang tepat. Beberapa parameter penting harus diperhatikan dalam pembuatan baja listrik yaitu permeabilitas relatif, koersivitas, magnetisasi saturasi, dan konduktivitas listrik. Baja listrik biasanya diproduksi dengan *continuous casting* dan dilebur dalam tungku oksigen, kemudian masuk ke proses *hot rolling* setelahnya masuk ke *annealing process* dan *descaling process*, di mana kotoran dan kerak dihilangkan dari permukaan. Setelah itu, selanjutnya masuk ke proses *cold reduction*, di mana ketebalan baja dikurangi dan dikoreksi sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Selanjutnya, kandungan karbon dalam baja dikurangi dengan anil dekarbonisasi, di mana gulungan baja dipanaskan dalam campuran hidrogen, nitrogen, dan uap air. Kontaminan tambahan, seperti sulfur dihilangkan dalam proses ini. Untuk baja tipe berorientasi butir kumparan mengalami anil kumparan suhu tinggi (HTCA) pada sekitar 1100 °C untuk mencapai sifat magnetik dan pertumbuhan butir yang diperlukan.

Baja listrik yang merupakan bahan magnetik lunak dengan sifat listrik yang ditingkatkan banyak digunakan di seluruh aplikasi seperti relai kecil, solenoida, motor listrik, generator, dan banyak perangkat elektromagnetik lainnya dan dapat disimpulkan bahwa baja listrik bisa diaplikasikan di semua elemen perkembangan dunia, hal ini didukung dengan baja listrik terbuat dari besi feromagnetik yang mengandung silikon (Si) dalam jumlah yang bervariasi antara 1% hingga 6,5%. Baja listrik juga disebut sebagai baja silikon, baja transformator, atau baja laminasi dan digunakan terutama dalam sistem distribusi tenaga listrik dan industri otomotif.

Perkembangan baja listrik didorong oleh banyaknya perangkat listrik yang membutuhkan baja, karena hal inilah wajib untuk mengetahui bagaimana pengaruh karakteristik pengerjaan panas (*hot working*) dari baja listrik yang merupakan inti dari trafo pada temperatur tinggi, untuk penelitian ini menggunakan temperatur sebesar 1050°C-1100°C yang berguna untuk menunjang perkembangan baja listrik dalam pembangunan dunia yang lebih baik.

Baja listrik memiliki sifat yang diinginkan berikut untuk mendukung pembangkitan, distribusi dan konsumsi listrik dunia ini, sifat tersebut adalah baja listrik memiliki permeabilitas tinggi yaitu peningkatan kapasitas untuk mendukung medan magnet, memiliki tingkat magnetostriksi rendah yaitu memiliki kecenderungan rendah untuk mengembang atau menyusut dalam medan magnet, memiliki resistivitas listrik tinggi yang dapat mengurangi kehilangan inti dengan mengurangi komponen arus eddy dan memiliki penurunan kehilangan histeresis, dimana kehilangan histeresis rendah berarti lebih sedikit energi yang terbuang dalam bentuk panas dari gaya magnetisasi bolak-balik. Karena hal inilah penting untuk mengetahui bagaimana pengaruh karakteristik pengerjaan panas (*hot working*) dari baja listrik yang merupakan inti dari trafo pada temperatur tinggi sehingga diperlukan uji kompresi panas pada temperatur tinggi sebesar 1050°C-1100°C dan output dari penelitian ini didapatkan hasil pengujian berupa grafik dan persamaan matematika untuk temperatur 1050°C-1100°C.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dirumuskan, didapat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana penyelesaian persamaan matematika eksponensial terhadap pengaruh karakteristik pengerjaan panas (*hot working*) dari baja listrik yang merupakan inti dari trafo pada temperatur tinggi 1050°C dan 1100°C.
2. Bagaimana cara untuk mengetahui nilai energi aktivasi, nilai zenner hollomon dan nilai laju DRV terhadap pengaruh karakteristik

pengerjaan panas (*hot working*) dari baja listrik yang merupakan inti dari trafo pada temperatur tinggi 1050°C dan 1100°C.

3. Bagaimana pengaruh karakteristik pengerjaan panas (*hot working*) dan kandungan baja listrik 3% Si dari baja listrik yang merupakan inti dari trafo pada temperatur tinggi 1050°C dan 1100°C.

1.3 Hipotesis

Hipotesis awal dari penelitian ini adalah kinerja panas baja listrik (*hot working*) semakin baik seiring meningkatnya temperature yang menghasilkan sifat magnetik yang sangat baik sehingga dapat mempelancar dan meningkatkan produksi dengan proses yang singkat sehingga dapat menyebabkan penghematan energi dan pengurangan emisi global.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Mengetahui penyelesaian persamaan matematika eksponensial terhadap pengaruh karakteristik pengerjaan panas (*hot working*) dari baja listrik yang merupakan inti dari trafo pada temperatur tinggi 1050°C dan 1100°C.
2. Mengetahui nilai energi aktivasi, nilai zenner hollomon dan nilai laju DRV terhadap pengaruh karakteristik pengerjaan panas (*hot working*) dari baja listrik yang merupakan inti dari trafo pada temperatur tinggi 1050°C dan 1100°C.
3. Mengetahui pengaruh karakteristik pengerjaan panas (*hot working*) dan kandungan baja listrik 3% Si dari baja listrik yang merupakan inti dari trafo pada temperatur tinggi 1050°C dan 1100°C.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun yang menjadi manfaat pada penelitian ini adalah:

1. Sarana informasi bahwa silikon dapat dijadikan sebagai unsur tambahan pada baja.

2. Bagi peneliti, sebagai sarana untuk menambah dan memperdalam ilmu pengetahuan tentang baja listrik dan pengaplikasiannya.
3. Bagi peneliti selanjutnya, diharapkan dapat dijadikan sebagai sumber rujukan yang membahas tentang baja listrik.
4. Hasil penelitian ini diharapkan bermanfaat di berbagai bidang.

1.6 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini antara lain:

1. Variasi temperatur yang digunakan pada penelitian yaitu 1050°C dan 1100°C.
2. Komposisi baja yang digunakan yaitu menggunakan baja listrik yang mengandung 3% Si.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian *Silicon Steel*

Baja listrik merupakan bahan magnet lunak yang mengandung besi dan silikon dengan kandungan 1 ~ 4% silikon dan baja listrik ini disebut juga sebagai paduan besi-silikon. Penambahan silikon pada baja listrik dinilai dapat meningkatkan resistivitas listrik hingga 5 kali lipat besarnya dan dapat meningkatkan magnetisasi baja. Sifat utama yang mempengaruhi kinerja dari baja listrik itu sendiri adalah tekstur kristalografi dan ukuran butirnya, dimana pada pembuatan baja silikon lebih memperhatikan komponen kristalografinya dimana hal ini dapat memberikan permeabilitas magnetik yang tinggi. Baja listrik termasuk ke dalam bahan magnetik lunak dengan sifat listrik yang ditingkatkan dimana baja listrik ini merupakan bahan feromagnetik yang terbuat dari besi yang mengandung silikon (Si) dan digunakan untuk menghasilkan inti magnetik tertentu (You & Park, 2018).

Baja listrik digunakan karena dinilai lebih efisien dalam menahan panas sehingga apabila baja listrik digunakan pada suhu tinggi contohnya pada aplikasi mesin manufaktur dan saluran listrik. Dimana apabila dibuat dengan baja listrik maka akan lebih baik dalam efisiensi energi sehingga dapat meningkatkan umur peralatan menjadi lebih panjang. Jenis inti pada baja listrik memiliki nilai kerapatan fluks magnet saturasi tertinggi karena adanya sifat magnetoelektrik yang baik, produksi massal yang mudah, harga rendah, dan tekanan mekanis yang rendah. Dimana hal inilah baja listrik banyak digunakan dalam industri elektronika daya seperti trafo daya, trafo distribusi, trafo arus dan inti besi lainnya (You & Park, 2018).

Sifat magnetik yang sesuai dalam baja listrik dapat dicapai dengan berbagai desain metalurgi melalui asosiasi komposisi kimia dan kontrol proses. Telah diketahui bahwa sifat magnetik utama dari baja listrik bergantung pada tekstur magnetik dan induksi magnetik yang diinginkan dapat dicapai dengan pengontrolan

tekstur. Banyak penelitian telah menunjukkan dengan menambahkan sejumlah kecil elemen tertentu ke dalam baja listrik jenis baja listrik non-berorientasi dengan anil pita panas akan berpengaruh yaitu dapat meningkatkan evolusi tekstur. Hal ini dapat terjadi karena unsur-unsur ini akan memisahkan pada batas butir selama anil pita panas, dimana unsur-unsur tersebut mencegah adanya nukleasi rekristalisasi di dekat batas butir asli, sehingga dapat mengakibatkan adanya penurunan pembentukan butir setelah proses *cold rolling* dan *final annealing* (You & Park, 2018).



Gambar 2.1 *Silicon Steel* (Dough, 2019)

Baja listrik menggunakan bahan magnetic dalam jumlah yang besar, dimana bahan magnetic ini merupakan bahan fungsional logam hemat energi. Baja listrik, terutama dengan jenis baja silikon berorientasi, memiliki proses dan peralatan manufaktur yang kompleks, kontrol komposisi yang ketat, proses manufaktur yang lama. Oleh karena itu, kualitas produk baja silikon yang berorientasi sering dianggap sebagai indikator penting untuk mengukur tingkat teknis manufaktur baja khusus suatu negara. Perkembangan baja listrik didorong oleh banyaknya perangkat listrik yang membutuhkan baja yang dinilai dapat mengurangi pembuangan panas (Diniz & Brandao, 2015).

Baja tanpa penambahan silikon dimana hal ini merupakan masalah yang mengakibatkan pemborosan energi. Adanya masalah ini maka besi dengan tambahan silikon ditemukan sebagai pilihan yang paling ekonomis. Lembaran baja

listrik terbuat dari bahan fungsional yang diproduksi dengan memodifikasi sifat magnetik baja untuk magnetisme yang efisien dan konversi listrik. Dimana baja listrik dapat dinilai sebagai solusi dari kerugian dalam pembangkit listrik, transmisi, dan konsumsi berkurang sehingga baja listrik dapat berkontribusi pada penghematan energi (Diniz & Brandao, 2015).

2.2 Sejarah Silicon Steel

Baja silikon pertama kali diperoleh pada tahun 1900 berdasarkan hasil penelitian E. Gumlich di Jerman dan W. Barret, W. Brown, dan R. Hadfield di Inggris (Honda et al., 1998). E. Gumlich di Jerman dan W. Barret, W. Brown, dan R. Hadfield di Inggris merumuskan bahwa besi dapat dikurangi secara signifikan jika sejumlah silikon ditambahkan ke dalam baja paduan. Paduan besi dengan silikon secara substansial dapat meningkatkan resistivitas, sehingga dengan demikian dapat menurunkan kerugian arus eddy dan histeresis pada magnetisasi pembalikan. Contohnya ditahun 1900, lembaran baja karbon rendah canai panas dengan tebal 0,35 mm banyak digunakan untuk memproduksi inti motor dan transformator. Hal ini masih dipertanyakan kualitasnya, karena baja karbon rendah memiliki resistivitas rendah sehingga tingkat kehilangan intinya lebih besar, kandungan karbon dan nitrogennya tinggi, dan penuaan magnetiknya tinggi. Pada tahun 1903, Amerika Serikat memperoleh hak untuk menggunakan paten dari peneliti Hardfield dan pada tahun yang sama, maka di tahun 1903 Amerika Serikat dan Jerman mulai memproduksi lembaran baja silikon canai panas yang mengandung 1,0 hingga 4,5% silikon (Honda et al., 1998).

Pada tahun 1905, Amerika Serikat terus memproduksi massal, sehingga dalam waktu yang sangat singkat, baja silikon sepenuhnya sudah menggantikan baja karbon rendah canai panas biasa untuk memproduksi motor dan transformator. Periode 1906-1930 adalah tahun di mana produsen dan pengguna memiliki pemahaman terpadu tentang biaya, sifat mekanik, desain dan reformasi manufaktur lembaran baja silikon canai panas, serta peningkatan kualitas produk dan output dimana hal ini sangat memperkuat sepenuhnya baja silikon menggantikan baja karbon rendah canai panas biasa. Pada tahun 1930, peneliti Gauss di Amerika mulai

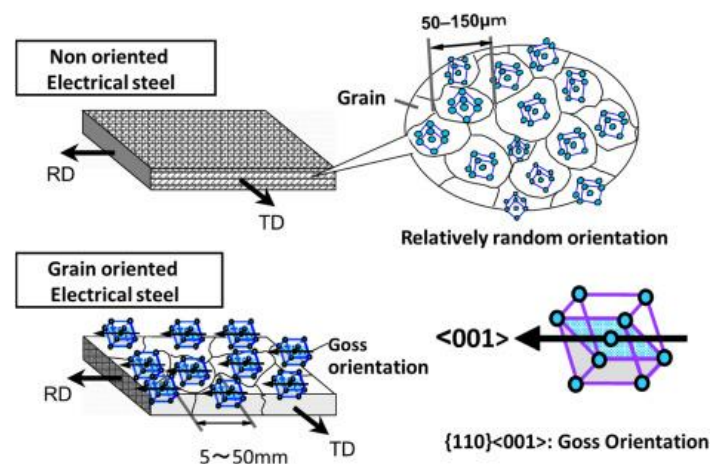
melakukan lagi eksperimen lain dengan menggunakan metode *cold rolling* dan *annealing*, metode ini digunakan untuk mengeksplorasi proses pembuatan strip baja silikon yang berorientasi dengan magnetisasi butiran yang mudah dan magnetisasi yang memiliki arah sejajar dengan arah *rolling*. Pada tahun 1934, peneliti NP Goss membuat dua lembaran baja silikon dengan proses canai dingin dengan kandungan silikon 3% berorientasi biji-bijian dengan dua proses pengerolan dingin (Morito et al., 1998).

Pada tahun 1935, Armco Steel Company bekerja sama dengan Westinghouse Electric Company untuk memproduksi baja silicon dengan cara yang sesuai dengan teknologi yang dipatenkan Gaussian. Setelah itu, Armco Steel menggunakan teknologi lainnya seperti analisis karbon yang cepat dan proses peralatan manufaktur yang terus ditingkatkan untuk meningkatkan kualitas produk secara bertahap. Pada tahun 1957, Republik Federal Jerman membuat lembaran baja silikon berorientasi kubik, baja silicon yang diproduksi ini memiliki sifat magnetik vertikal dan horizontal yang tinggi, tetapi belum diproduksi secara resmi karena proses yang dipilih sangatlah rumit. Selanjutnya di tahun 1958, setelah menguasai dua proses manufaktur yaitu pra-proses inhibitor MnS dan pemanasan suhu tinggi pelat, teknologi yang dipatenkan untuk pembuatan baja silikon dinilai menjadi teknologi yang lebih sempurna karena dari teknologi ini dihasilkan baja silikon dengan sifat magnetik produk yang lebih meningkat dan lebih stabil (Morito et al., 1998).

Pada mulanya, lembaran baja silikon dibuat dengan proses penggulungan panas ingot ke ukuran akhir, biasanya ukuran ini memiliki ukuran sekitar 0,4 mm. Sifat baja dengan ukuran tersebut ditingkatkan dengan cara menurunkan konsentrasi silikon, menaikkan suhu anil, dan memajukan proses peleburan. Selanjutnya Cina mulai memproduksi lembaran baja silikon rendah silikon canai panas yaitu dengan kandungan silikon 1~2% pada tahun 1953. Selanjutnya pada tahun 1955, mulai memproduksi lembaran baja silikon tinggi-silikon canai panas dengan kandungan silicon 3,0 - 4,5% dan pada tahun 1962-1970an mulai memproduksi strip baja silikon tipis berorientasi canai dingin (Lobanov et al., 2011).

2.3 Jenis Jenis *Electrical Steel* dan Aplikasinya

Electrical steel atau baja listrik terbagi menjadi dua jenis, jenis pertama adalah *non-oriented electrical steel* dan *oriented electrical steel*, baja listrik non-berorientasi disebut sebagai isotropi magnetik (atau dikenal sebagai baja listrik isotropik) secara luas berlaku untuk pembuatan semua jenis motor listrik dan inti transformator elektronik. Baja listrik non-orientasi (NO) atau alternator adalah bahan magnet lunak yang paling umum digunakan (sekitar 80% dari total volume, nilai pasar diperkirakan mencapai USD 12,57 miliar pada tahun 2020, dengan Tingkat Pertumbuhan Tahunan Majemuk sekitar 5,19%, yang diperkirakan akan mencapai USD 18,24 miliar pada tahun 2028. Baja ini biasanya diterapkan sebagai bahan inti dalam memutar mesin listrik, di mana sifat isotropik adalah salah satu persyaratan penting. Kisaran lembaran NO yang diproduksi saat ini mencakup beberapa tingkatan, berbeda dalam ketebalan dan persentase kandungan silikon dan aluminium (biasanya 1,0-3,7% berat Si, 0,2-0,8% berat Al) (Chwastek, 2022).



Gambar 2.2 *Non-Oriented Electrical Steel dan Oriented Electrical Steel* (Dough, 2019)

Meskipun perangkat dan mesin listrik biasanya menampilkan efisiensi tinggi, kehilangan energi total dalam sistem rekayasa tenaga listrik dapat mencapai nilai substansial, yang mengarah pada pengisian cepat sumber energi primer dan biaya energi listrik yang tinggi. Bahan terpenting yang digunakan dalam perangkat listrik adalah baja listrik, yang digunakan untuk mengatur sirkuit magnetik. Selama

proses magnetisasi, sebagian energi diubah menjadi panas. Bagian ini biasa disebut sebagai rugi-rugi besi. Di Cina, konsumsi baja listrik non-orientasi mewakili sekitar 90% dari total konsumsi baja listrik. Baja listrik non-orientasi biasanya mengandung tingkat silikon 2% -3,5% dan baja ini memiliki sifat magnetik yang serupa di segala arah, yang disebut isotropi (Chwastek, 2022).

Lembaran baja listrik non-orientasi adalah lembaran yang dirancang untuk menghasilkan sifat tertentu dan diproduksi dari paduan Fe-Si atau Fe-Si-Al. Lembaran baja listrik non-orientasi digabungkan ke dalam berbagai peralatan, dari peralatan rumah tangga paling sederhana hingga kendaraan listrik hibrida dan murni. Upaya di masa depan akan difokuskan pada pengendalian elemen sisa dalam baja, mengoptimalkan penggulangan panas dan dingin, dan mengoptimalkan pengembangan tekstur kristalografi, dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja produk jadi (Evine & Petrovi, 2010).

Lembaran baja listrik non-orientasi, secara komersial juga disebut baja laminasi, baja listrik silikon, baja silikon atau baja transformator, adalah lembaran baja khusus yang dirancang untuk menghasilkan sifat magnetik tertentu. Mereka digunakan dalam bentuk tumpukan laminasi, terutama pada motor listrik, transformator dan alternator, tergantung pada sifatnya. Lembaran baja listrik non-berorientasi dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu nilai yang diproses sepenuhnya, yang dikirim dalam kondisi jadi, terus menerus dianil dan terkadang dipernis dimana mereka memiliki sifat magnetik yang dijamin, sesuai dengan standar. Yang kedua adalah nilai semi-proses, yaitu proses yang dilakukan dan yang diberi perlakuan anil akhir untuk mengembangkan sifat magnetiknya oleh pengguna, dimana lembaran baja listrik non-orientasi biasanya diproduksi dalam bentuk lembaran/strip canai dingin dengan ketebalan (0,35, 0,50, 0,65 dan 1,00) mm dan diklasifikasikan menurut nilai kehilangan total spesifik maksimum dalam W/kg (Evine & Petrovi, 2010).

Bahan magnet lunak mudah dimagnetisasi dan didemagnetisasi, dimana hal ini dapat berubah dengan memperhatikan beberapa parameter penting yaitu permeabilitas relatif, koersivitas, magnetisasi saturasi, dan konduktivitas listrik. Baja listrik non-berorientasi dicirikan oleh sifat magnetik yang kira-kira sama di

semua arah dari bidang lembaran. Parameter mikrostruktur seperti tekstur kristalografi dan ukuran butir memiliki pengaruh yang kuat terhadap sifat magnetik baja listrik non-berorientasi. Dengan bertambahnya ukuran butir, rugi-rugi histeresis berkurang tetapi rugi-rugi arus eddy meningkat, oleh karena itu, ukuran butir penting untuk kehilangan energi (Kvackaj et al., 2017).

Baja silikon ini dibuat tanpa penekanan khusus untuk mengontrol orientasi kristal (ini adalah tekstur keseluruhan material). Dengan tumbukan butiran yang tidak berorientasi ini, menghasilkan bahan isotropik (di mana sifat magnetik bersifat omnidirectional). Ini adalah pilihan yang lebih murah dan digunakan ketika biaya lebih diprioritaskan daripada efisiensi, di mana fluks magnet tidak harus konstan. Baja ini ditemukan di generator dengan bagian yang bergerak dan motor listrik (Feng, 2022).

Baja listrik non-orientasi yang diproses sepenuhnya memiliki tingkat silikon yang bervariasi mulai dari tingkat 0,5% hingga tingkat 3,25% Si. Dimana baja ini memiliki sifat magnetik yang seragam ke segala arah. Baja listrik jenis ini tidak memerlukan proses rekristalisasi untuk mengembangkan sifat-sifatnya. Nilai paduan silikon rendah memberikan permeabilitas magnetik dan konduktivitas termal yang lebih baik (Feng, 2022).

Untuk nilai paduan tinggi, kinerja yang lebih baik sangat diharapkan pada frekuensi tinggi, dengan kerugian yang sangat rendah. Jenis ini sangat baik untuk sirkuit magnetik di motor, transformator, dan rumah sistem kelistrikan. Baja non-orientasi banyak digunakan dalam mesin yaitu mesin listrik berputar. Contoh dari mesin ini misalnya, motor dan generator) di mana arah magnetisasi diputar di bidang lembaran (Feng, 2022).

Jenis kedua adalah *grain-oriented electrical steel* atau baja listrik berorientasi butir biasanya mengandung tingkat silikon 3% dan diproses dengan cara untuk mengembangkan sifat ideal dalam arah rolling. Baja non-butir canai dingin (CRNGO) lebih murah daripada baja berorientasi butiran canai dingin (CRGO). CRNGO dapat digunakan dalam aplikasi berorientasi biaya dengan arah fluks magnet yang tidak konstan, seperti motor listrik dan generator. CRGO biasanya dalam bentuk koil dan harus dipotong menjadi laminasi lebih lanjut,

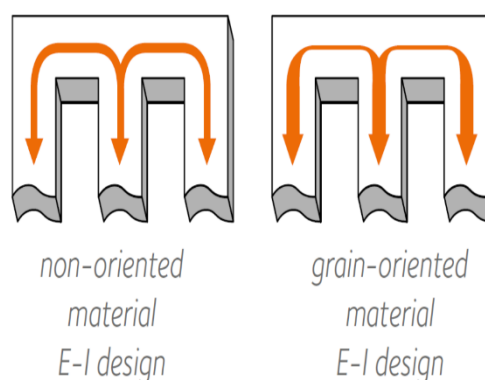
digunakan dalam aplikasi inti transformator, seperti bagian internal tertentu dalam transformator keluaran audio (Rolling, 2022).

Baja silikon berorientasi butir adalah sejenis baja listrik dengan arah magnetisasi yang mudah sejajar dengan arah penggulangan dan kandungan silikon sekitar 3%. Baja silikon berorientasi butir dapat dibagi menjadi dua kategori utama termasuk baja silikon berorientasi butir umum dan baja silikon berorientasi butir induksi magnetik tinggi. Hal ini sebagian besar berlaku untuk bidang transmisi daya (seperti transformer) dan merupakan bahan logam fungsional penting dalam tenaga listrik, industri elektronik dan militer. Baja silikon berorientasi butir telah lama dikenal sebagai karya seni baja, yang berteknologi canggih dan rumit secara teknis (Rolling, 2022).

Baja listrik berorientasi butir adalah bahan inti berteknologi tinggi yang sangat canggih. Ini digunakan untuk mengubah gerakan menjadi energi listrik atau energi listrik diubah menjadi gerakan dan di mana energi listrik ditransmisikan melintasi jarak yang jauh. Baja listrik berorientasi butiran atau luka yang dilaminasi adalah bahan inti yang digunakan dalam transformator daya dan distribusi dan juga pada transformator kecil. Baja listrik berorientasi butir secara signifikan mengurangi emisi kebisingan di transformer, sebuah keuntungan tersendiri mengingat pertumbuhan urbanisasi (Rolling, 2022).

Sebelum tahun 2000, di Cina, hanya WISCO yang memiliki kemampuan volume produksi baja silikon *cold-rolled grain-oriented* dengan kapasitas tahunan sekitar 100 ribu ton, hanya memenuhi 30% dari permintaan pasar domestik. Kesenjangan yang tersisa terutama bergantung pada impor. Akibatnya, pengembangan industri listrik dibatasi. Dengan perkembangan ekonomi rendah karbon dan kenaikan biaya energi yang konstan, transmisi daya *ultrahigh-voltage*, berkapasitas besar, *low-loss* dan cerdas menjadi tren dunia. Karena itu, industri transformator Cina sangat membutuhkan baja silikon berorientasi butir bermutu tinggi. Karena teknologi untuk pembuatan baja silikon berorientasi butir bermutu tinggi hanya dimiliki oleh sejumlah kecil perusahaan yang menganggap teknologi tersebut sangat rahasia dan menolak untuk mentransfernya, salah satu aplikasi dari kedua jenis baja listrik adalah untuk penggunaan transformator, dimana untuk

penggunaan transformator ini menggunakan desain E-I, dimana jalur fluks tertentu mengikuti transversal arah baja, sehingga kelas non-berorientasi (NO) memiliki keuntungan di zona tersebut yaitu di bagian belakang E-shape, dimana ini menggunakan jenis metode pemotongan yang biasanya terbatas pada transformator yang lebih kecil (dan ballast dan kontaktor), tetapi penggunaan NO dapat dipertimbangkan untuk transformator yang lebih besar juga dan desain E-I dapat dilihat pada gambar 2.1 (Rolling, 2022).

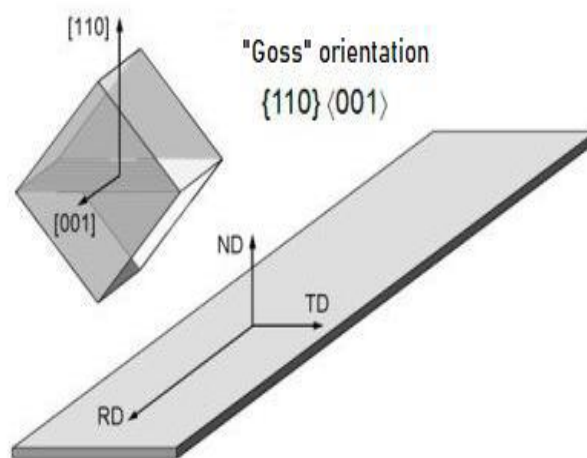


Gambar 2.3 Desain E-I Pada 2 Jenis Baja Listrik (Dough, 2019)

Baja listrik berorientasi butir dinilai sangat hemat energi sehingga sekarang dapat memungkinkan untuk membuat trafo yang jauh lebih kecil dengan output daya yang sama. Karena ini mengurangi konsumsi sumber daya yang terbatas seperti tembaga, dan bahan isolasi, baja listrik berorientasi butir dapat dikatakan memberikan kontribusi yang berharga bagi kelestarian lingkungan. Baja listrik berorientasi butir disuplai dengan lapisan anorganik tipis pada lapisan film kaca yang terbentuk selama anil. Ketebalan lapisan 2 hingga 5 μm , dimana hal ini dapat memberikan pengaruh yang baik yaitu hambatan listrik yang baik dan faktor penumpukan yang tinggi dengan lapisan yang tahan anil hingga temperatur $840\text{ }^{\circ}\text{C}$, karena hal inilah memungkinkan laminasi berlubang dan berubah menjadi anil (Qaiser et al., 2021).

Baja listrik berorientasi butir diproses agar fluks magnetnya konstan dan arahnya menjadi terarah. Dimana hal ini memiliki orientasi kristal ketat yang dicapai selama proses penggulangan. CRGO disuplai dalam bentuk koil dan

kemudian digulung menjadi *strip* "cold-rolled" dengan ukuran khusus yaitu kurang dari 2 mm. Dalam kedua kasus baja listrik lembaran laminasi berorientasi non-butir dan berorientasi butir, pada awalnya koil akan digulung dan kemudian dilanjutkan pada proses selanjutnya yaitu dipotong menjadi berbagai bentuk, diantara kedua jenis baja listrik memiliki tekstur goss atau orientasi goss yang dapat dilihat seperti gambar 2.2 (Qaiser et al., 2021).



Gambar 2.4 Tekstur Goss atau Orientasi Goss Pada Baja Listrik (Rohal' et al., 2020)

Baja listrik berorientasi butir terdiri dari besi dengan tambahan kandungan senyawa lain yaitu dengan tambahan 3% Si dengan berorientasi butir untuk menghasilkan permeabilitas tinggi dan nilai kehilangan energi yang rendah. Nilai berorientasi butir memiliki satu ciri yang khas yaitu memiliki sifat kristalografi yang kuat. Hal ini dikarenakan jenis ini mengalami proses rekristalisasi yang menghasilkan struktur butir yang disempurnakan yang dapat menunjukkan baja menjadi memiliki sifat magnetik yang lebih baik dalam arah penggulungan lembaran. Baja berorientasi butir banyak digunakan untuk aplikasi yang konstan atau tidak berputar, contohnya yaitu seperti transformator. Baja listrik berorientasi butir terutama digunakan sebagai bahan inti untuk peralatan statis (misalnya transformator) dimana untuk aplikasi lainnya dari kedua jenis baja listrik diatas dapat dilihat di tabel 2.1 (Qaiser et al., 2021).

Tabel 2.1 Aplikasi *Non-Oriented Steel* dan *Grain-Oriented Steel* (You & Park, 2018)

<i>Application</i>	<i>Non-Oriented Steel</i>			<i>Grain-Oriented Steel</i>	
	<i>Silicon Free</i>	<i>Low Silicon</i>	<i>High Silicon</i>	<i>Conventional Grade</i>	<i>High Permeability Grade</i>
<i>Small motors</i>	✓	✓			
<i>Lamp ballasts</i>	✓	✓			
<i>Medium AC motors</i>	✓	✓	✓		
<i>Welding transformers</i>	✓	✓	✓		
<i>Audio transformers</i>		✓	✓		
<i>Small power transformers</i>		✓	✓	✓	
<i>Large rotating machines</i>			✓	✓	
<i>Medium generators</i>		✓	✓		
<i>Distribution transformers</i>				✓	✓
<i>Power transformers</i>				✓	✓

2.4 Kandungan Silikon di *Silicon Steel*

Baja listrik adalah bahan magnetik lunak dengan sifat listrik yang ditingkatkan yang banyak digunakan di seluruh aplikasi seperti relai kecil, solenoida, motor listrik, generator, dan banyak perangkat elektromagnetik lainnya. Baja listrik juga disebut sebagai baja silikon, baja transformator, atau baja laminasi. Ini digunakan terutama dalam sistem distribusi tenaga listrik dan di industri otomotif. Baja listrik adalah bahan feromagnetik yang terbuat dari besi yang mengandung jumlah silikon (Si) yang bervariasi antara 1% hingga 6,5%. Perkembangan baja listrik didorong oleh perangkat listrik yang membutuhkan baja yang dapat mengurangi pembuangan panas, masalah yang mengakibatkan pemborosan energi (Rohal' et al., 2020).

Besi ditemukan sebagai pilihan yang paling ekonomis, tetapi pengotornya tidak optimal. Ditemukan bahwa penambahan silikon meningkatkan resistivitas, meningkatkan permeabilitas, dan mengurangi kehilangan histeresis. Baja listrik yang tersedia secara komersial paling banyak digunakan mengandung sekitar 3,25% Si karena kandungan silikon yang lebih tinggi cenderung membuat bahan yang dihasilkan terlalu rapuh untuk pengerolan dingin. Baja listrik dengan 6,5% Si memiliki sifat magnetik dan listrik yang paling baik, tetapi proses termomekanis tambahan diperlukan untuk mengatasi kerapuhan dan daktilitas terbatas (Rohal' et al., 2020).

Penambahan silikon dalam besi sangat berpengaruh bagi besi yaitu dapat meningkatkan sifat fisik baja listrik. Baja listrik memiliki sifat yang diinginkan berikut untuk mendukung pembangkitan, distribusi dan konsumsi listrik yang pertama ada permeabilitas tinggi yaitu peningkatan kapasitas untuk mendukung medan magnet. Yang kedua ada magnetostriksi rendah yaitu membuat kecenderungan rendah untuk mengembang atau berkontraksi dalam medan magnet. Yang ketiga yaitu resistivitas listrik tinggi yaitu mengurangi kehilangan inti dengan mengurangi komponen arus eddy. Yang terakhir yaitu kehilangan histeresis yang berkurang - kehilangan histeresis yang rendah berarti lebih sedikit energi yang terbuang dalam bentuk panas dari gaya magnetisasi bolak-balik (Rohal' et al., 2020).

Ditemukan bahwa penambahan silikon meningkatkan resistivitas, meningkatkan permeabilitas, dan mengurangi kehilangan histeresis. Penambahan dari silikon ini dapat meningkatkan resistivitas listrik setrika hingga 5 kali lipat. Perubahan ini menghasilkan penurunan kerugian arus eddy paduan, yang secara langsung mempengaruhi inti magnetik. Arus eddy adalah loop arus listrik yang dilengkapi dengan konduktor yang dirancang untuk mengubah medan magnet, dan inti magnet pada dasarnya adalah bahan pemandu yang sangat magnetis (konduktor) (Rohal' et al., 2020).

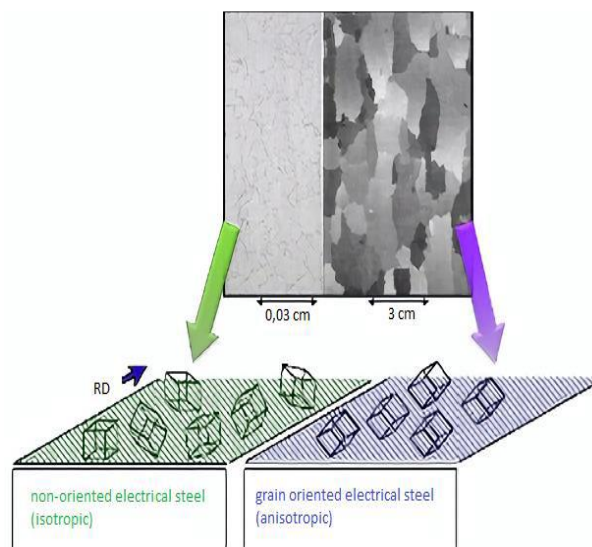
Jika arus eddy tetap konstan, tidak akan ada kehilangan inti magnetik, membuat fungsi lancar. Ketika persentase silikon yang ditambahkan melebihi 2%, terjadi penurunan suhu Curie. Suhu Curie adalah suhu maksimum di mana bahan yang diberikan kehilangan sifat feroelektrik dan piezoelektrik dengan feroelektrik adalah polarisasi listrik spontan dan piezoelektrik adalah muatan listrik akumulatif dalam bahan padat yang disebabkan oleh tekanan mekanis (biasanya tekanan dan panas) (Rohal' et al., 2020).

Ketika konten Si meningkat, permeabilitas magnetik meningkat, karena anisotropi magneto-kristal rendah dan koefisien magnetostrictive. Kehilangan besi arus eddy berkurang, karena peningkatan resistivitas listrik. Namun, ketika kandungan Si meningkat lebih lanjut, magnetisasi saturasi menurun, dan penggulungan dingin menjadi sulit di atas 3% massa Si karena penggetasan. Oleh karena itu, kandungan Si biasanya dibatasi sekitar 3% massa, dan nilai ini diakui sebagai kompromi terbaik antara kinerja magnetik dan mekanis, diantara kedua jenis baja listrik yang ada keduanya memiliki karakteristik atau tekstur yang berbeda beda untuk menyokong kegunaannya yang dapat diaplikasikan pada banyak perangkat listrik, karakteristik keduanya dapat dilihat pada gambar 2.7 (Rohal' et al., 2020).

Untuk mengurangi kerugian arus eddy, pengurangan ketebalan lembaran dinilai sebagai cara yang efektif. Ketebalan baja listrik biasanya dalam kisaran 0,20 mm hingga 0,65 mm. Ketebalan dari baja dibatasi oleh biaya pembuatan dan kerumitan penanganan untuk bangunan inti. Lapisan isolasi listrik biasanya diterapkan pada baja listrik untuk membuat lapisan isolasi antara lembaran baja

laminasi untuk menghindari adanya peningkatan kehilangan arus eddy (Rohal' et al., 2020).

Parameter terpenting yang menentukan sifat magnetik lembaran baja adalah tekstur. Untuk lembaran baja silikon nonorientasi, tekstur yang ideal adalah tekstur butiran kubik dengan bidang (001) atau (110) sejajar dengan bidang lembaran dan distribusi arah yang seragam [100], sedangkan pada silikon berorientasi butiran baja tekstur butirannya adalah Goss dengan (110) [100] orientasi butiran kristalografi yang dapat dilihat pada Gambar 2.2. Baja silikon adalah inti dari peralatan listrik dan memberikan kombinasi terbaik untuk distribusi dan transmisi listrik. Sifat yang diinginkan dari baja ini adalah kehilangan magnet yang rendah, permeabilitas dan induksi yang tinggi, dan magnetostriksi yang rendah (Rohal' et al., 2020).



Gambar 2.7 Karakteristik Pada 2 Jenis Baja Listrik (Rohal' et al., 2020)

Kerugian magnetik yang rendah mengurangi pembangkitan panas dan konsumsi daya, permeabilitas tinggi dan hasil induksi dalam ukuran dan massa bagian yang berkurang, dan magnetostriksi yang rendah mengurangi kebisingan (dimanifestasikan sebagai dengungan) pada transformator dan mesin berkapasitas besar. Perkembangan baja listrik disebabkan oleh perangkat listrik yang membutuhkan baja yang dapat mengurangi pembuangan panas, suatu masalah yang mengakibatkan pemborosan energi. Besi ditemukan sebagai pilihan yang paling

ekonomis, tetapi pengotornya tidak optimal. Ditemukan bahwa penambahan silikon meningkatkan resistivitas, meningkatkan permeabilitas, dan menurunkan kerugian hysteresis (Rohal' et al., 2020).

Baja listrik yang tersedia secara komersial paling banyak digunakan mengandung sekitar 3,25% Si. Hal ini dikarenakan kandungan silikon yang lebih tinggi cenderung membuat bahan yang dihasilkan terlalu rapuh untuk pengerolan dingin. Baja listrik dengan 6,5% Si memiliki sifat magnetik dan listrik yang paling baik. Selanjutnya untuk proses termomekanis tambahan diperlukan untuk mengatasi kerapuhan dan keuletannya yang terbatas (Rohal' et al., 2020).

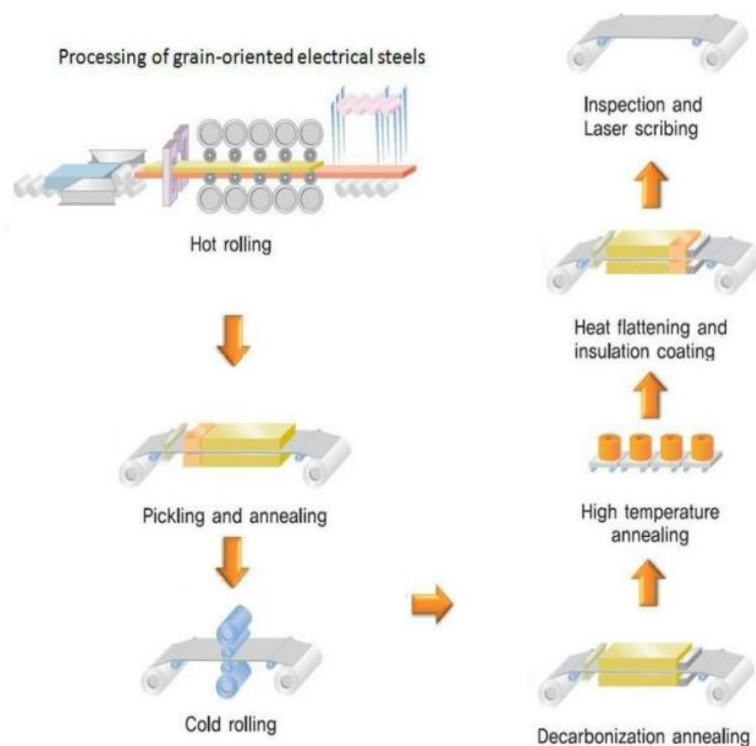
Baja listrik banyak digunakan untuk keperluan elektromagnetik seperti motor dan transformator. Silikon ditambahkan untuk meningkatkan resistivitas listrik dan untuk mengurangi anisotropi magnetik. Namun, menambahkan lebih dari 3% berat silikon membuat material lebih keras dan mengurangi kemampuan kerja dan menambahkan kurang dari 2,5% berat silikon mengarah pada transformasi fase. Sifat utama yang mempengaruhi kinerja baja listrik adalah ukuran butir dan tekstur kristalografi (Botelho et al., 2015).

Saat ini, pembuatan baja silikon lebih menyukai komponen kristalografi (110)[001], yang memberikan permeabilitas magnetik yang tinggi dalam arah penggulangan. Namun, tekstur ideal yang harus dimiliki baja listrik untuk digunakan dalam aplikasi motor adalah $\langle 001 \rangle // \text{Normal Direction (ND)}$. Ukuran butir ideal untuk baja berorientasi non-butir, untuk meminimalkan kerugian magnetik, adalah 100 hingga 150 m. Proses pembuatannya terdiri dari tahap rolling dan annealing (Botelho et al., 2015).

Pada rolling simetris, kedua silinder memiliki diameter, kekasaran dan pelumasan yang sama. Sedangkan pada rolling asimetris, satu atau lebih variabel tersebut berbeda. Tujuan dari pekerjaan ini adalah untuk mempelajari pengaruh cold rolling asimetris. Pengaruhnya dinilai dengan atau tanpa anil menengah, pada perilaku magnetik 3% Si *Non-Grain Oriented Steel* (NGO) dan untuk menyelidiki struktur mikro dan tekstur kristalografi bahan olahan (Botelho et al., 2015).

Baja listrik biasanya diproduksi dengan *continuous casting* dan dilebur dalam tungku oksigen, kemudian masuk ke proses *hot rolling* setelahnya masuk ke

annealing process dan *descaling process*, di mana kotoran dan kerak dihilangkan dari permukaan. Setelah itu, selanjutnya masuk ke proses *cold reduction*, di mana ketebalan baja dikurangi dan dikoreksi sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Selanjutnya, kandungan karbon dalam baja dikurangi dengan anil dekarbonisasi, di mana gulungan baja dipanaskan dalam campuran hidrogen, nitrogen, dan uap air. Kontaminan tambahan, seperti sulfur dihilangkan dalam proses ini dan untuk baja tipe berorientasi butir kumparan mengalami anil kumparan suhu tinggi (HTCA) pada sekitar 1100 °C untuk mencapai sifat magnetik dan pertumbuhan butir yang diperlukan, berikut merupakan alur produksi pembuatan baja listrik dapat dilihat pada Gambar 2.4 (Rohal' et al., 2020).



Gambar 2.6 Alur Produksi Pembuatan Baja Listrik (Rohal' et al., 2020)

2.5 Hot Working

Proses kerja mekanis yang dilakukan di atas suhu rekristalisasi logam dikenal sebagai proses kerja panas. Beberapa logam, seperti timbal dan timah, memiliki suhu rekristalisasi yang rendah dan dapat dikerjakan dengan panas bahkan

pada suhu kamar, tetapi sebagian besar logam komersial memerlukan pemanasan. Namun, suhu ini tidak boleh terlalu tinggi untuk mencapai suhu solidus, jika tidak, logam akan terbakar dan menjadi tidak layak digunakan. Dalam pengerjaan panas, suhu penyelesaian pengerjaan logam penting karena panas ekstra yang tersisa setelah bekerja membantu pertumbuhan butir (Singh, 2016).

Peningkatan ukuran butir ini terjadi oleh proses koalesensi butir yang berdekatan dan merupakan fungsi dari waktu dan suhu. Pertumbuhan butir menghasilkan sifat mekanik yang buruk. Jika pengerjaan panas selesai hanya di atas suhu rekristalisasi maka ukuran butir yang dihasilkan akan baik-baik saja. Jadi untuk setiap proses pengerjaan panas, logam harus dipanaskan sampai suhu di bawah suhu solidusnya, sehingga setelah selesainya pekerjaan panas, suhunya akan tetap sedikit lebih tinggi dari dan sedekat mungkin dengan suhu kristalisasinya (Singh, 2016).

Proses ini umumnya dilakukan pada logam yang ditahan pada suhu sedemikian rupa sehingga logam tidak bekerja-mengeraskan. Beberapa logam misalnya, Pb dan Sn (karena mereka memiliki suhu kristalisasi) dapat bekerja panas pada suhu kamar. Menaikkan suhu logam menurunkan tekanan yang diperlukan untuk menghasilkan deformasi dan meningkatkan kemungkinan jumlah deformasi sebelum pengerasan kerja yang berlebihan terjadi. Pengerjaan panas lebih disukai di mana deformasi besar harus dilakukan yang tidak memiliki tujuan utama menyebabkan pengerasan kerja. Pengerjaan panas menghasilkan hasil bersih yang sama pada logam seperti pengerjaan dingin dan anil (Singh, 2016).

Dalam proses pengerjaan panas, ketidakteraturan komposisi disetrika dan pengotor nonlogam dipecah menjadi fragmen kecil yang relatif tidak berbahaya, yang tersebar secara merata di seluruh logam alih-alih terkonsentrasi dalam jumlah besar massa kerja logam yang meningkatkan tegangan. Pengerjaan panas seperti proses penggulangan memurnikan struktur butir, kolumnar kasar dendrit dari logam tuang dimurnikan menjadi butiran equiaxed yang lebih kecil dengan perbaikan sifat mekanik komponen. Permukaan akhir dari logam yang dikerjakan panas hampir tidak sebagus dengan pengerjaan dingin, karena oksidasi dan penskalaan. Harus sangat berhati-hati dalam hal suhu untuk memulai pekerjaan panas dan di mana

harus berhenti karena ini mempengaruhi sifat-sifat yang akan diperkenalkan di panas bekerja logam dan selama pengerjaan panas, terjadi self-annealing dan rekristalisasi terjadi segera setelah deformasi plastis. Tindakan self-annealing ini mencegah pengerasan dan hilangnya keuletan (Singh, 2016).

Keuntungan dari *Hot Working Process* adalah *hot-working* yang pertama yaitu cocok untuk pekerjaan produksi massal. Yang kedua yaitu bentuk dan ukuran logam dapat dengan mudah diubah. Yang ketiga, karena material berada di atas suhu rekristalisasi, pekerjaan apa pun dapat dilakukan pada logam tanpa tekanan pengerasan. Lalu yang keempat, karena material berada pada suhu tinggi sehingga memiliki jumlah daktilitas yang lebih tinggi, yang berarti tidak ada batasan pada pengerjaan panas logam (Lei et al., 2022).

Selanjutnya, karena logam yang bekerja panas memiliki struktur butir yang halus, maka dengan demikian meningkatkan sifat mekanik. Pada proses ini, porositas sangat berkurang. Jika tidak ada kesalahan, pengerjaan panas tidak akan mempengaruhi kekuatan, kekerasan, dan korosi. Suhu yang lebih tinggi menghasilkan pengurangan tegangan geser, sehingga hal ini menyebabkan lebih sedikit gaya yang diperlukan untuk deformasi yang diperlukan, karena logam dalam keadaan plastis, deformasi yang lebih besar dapat dicapai sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik, fisik dan kimia, karena ekonomis dan dapat diandalkan (Lei et al., 2022).

Kerugian dari *Hot Working Process* adalah karena adanya oksidasi, itu menyebabkan permukaan akhir yang buruk. Karena oksidasi, ada kehilangan karbon terkadang menyebabkan kekuatan yang lebih lemah. Memelihara dan menangani pengaturan kerja panas sangat tidak mudah karena kerja panas ini membutuhkan unit dengan harga yang sangat mahal seperti tungku gas atau pemanas induksi. Akurasi dimensi sulit dicapai karena ekspansi termal logam dan proses ini tidak cocok untuk semua jenis logam dan proses pengerjaan panas digunakan untuk memproduksi berbagai jenis produk seperti tabung, pipa, dan lembaran logam dan berbagai jenis produk yang kita temui sehari-hari diproduksi menggunakan metode ini seperti berbagai jenis peralatan mobil, *aerospace*, arsitektur dan dekorasi rumah (Lei et al., 2022).

2.6 Macam – Macam *Hot Working*

Macam – macam hot working terdiri dari *rolling*, *extrusion*, *forging* dan *hot drawing*, untuk *extrusion* terbagi lagi klasifikasinya menjadi 2 jenis yaitu ekstrusi langsung dan ekstrusi tidak langsung. Contoh yang pertama yaitu *rolling*, *rolling* atau pengerolan adalah proses pengerjaan logam yang paling penting dan dapat dilakukan pada logam panas atau dingin. Bahan dilewatkan di antara gulungan baja cor atau tempa, yang memampatkannya dan menyeretnya ke depan. Pengerolan adalah metode deformasi yang ekonomis jika logam diperlukan dalam panjang penampang yang seragam. Ingot pertama-tama digulung menjadi lembaran persegi panjang atau mekar persegi, yang diproduksi sebagai tahap perantara (Ma et al., 2016).

Dalam proses penggulangan ingot dilewatkan melalui gulungan polos berulang kali dalam satu arah dan kemudian ke arah sebaliknya. Pada setiap tahap, gulungan dibawa lebih dekat satu sama lain. Jika diperlukan square bloom, material diputar hingga 90° di antara operasi rolling. Proses penggulangan dapat digunakan untuk menghasilkan pelat, strip dan bagian yang digulung termasuk saluran, kolom universal, sudut dan bagian (Ma et al., 2016).

Pelat dan strip umumnya dibentuk menggunakan gulungan biasa, dimana gulungan ini bisa melengkung yang mengakibatkan pelat lebih tebal di bagian tengah. Gulungan dapat dicadangkan dalam empat pengaturan gulungan tinggi dengan gulungan tambahan untuk mengurangi kecenderungan ini. Pabrik penggilingan berdiameter kecil lebih efektif daripada yang besar dalam menyalurkan gaya guling ke logam yang mengalami deformasi. Pabrik memanfaatkan prinsip ini, dimana dari proses ini dapat mencapai pengurangan ketebalan hingga perbandingan 25:1 dimana sebuah rolling mill terdiri dari minimal sepasang gulungan, bantalan, lalu perumahan untuk menampung bagian-bagian ini dan mekanisme penggerak dengan kelengkapan satu set pengontrol (Ma et al., 2016).

Contoh yang kedua yaitu *extrusion*, proses ekstrusi dapat digambarkan sebagai sebuah siput logam atau *billet* ditempatkan di ruang tertutup. Logam tersebut kemudian didorong untuk bergerak melalui bukaan die di salah satu ujung

ruangan dengan menerapkan tekanan dengan ram yang dioperasikan secara mekanis atau hidraulik. Logam yang melewati die mempertahankan bentuk penampang lubang die. Logam lunak dapat dengan mudah berubah bentuk pada suhu kamar (Ma et al., 2016).

Logam dengan ketahanan yang lebih tinggi terhadap deformasi harus dipanaskan sampai suhu di mana mereka plastis, seperti dalam proses pengerjaan panas konvensional. Sebagai alternatif, metode deformasi kecepatan tinggi dapat digunakan. Metode Ekstrusi ada beberapa macam, yang pertama ada ekstrusi langsung yaitu dalam proses ini, aliran logam melalui lubang die searah dengan gerakan ram. Ram memiliki diameter yang sama dengan lubang wadah (Ma et al., 2016).

Yang kedua ada ekstrusi tidak langsung, dimana dalam hal ini, ram berdiameter sama dengan lubang wadah tetapi ram berongga dimana sebuah die dipasang di atas lubang ram dan logam mengalir pada ekstrusi dalam arah yang berlawanan dengan gerakan ram dan melalui lubang ram. Yang ketiga ada ekstrusi mundur, dimana diameter ram lebih kecil dari wadah dan material dipindahkan ke atas anulus yang dibentuk oleh ram dan wadah dan biasanya billet yang dipanaskan digunakan. Yang keempat, ada ekstrusi dampak dimana ini pada prinsipnya mirip dengan ekstrusi mundur tetapi dilakukan pada kecepatan yang lebih tinggi dan suhu yang jauh lebih rendah dan produk yang diekstrusi biasanya tidak memerlukan penopang setelah ekstrusi, oleh karena itu wadah dibuat sesingkat mungkin. Yang kelima, ada ekstrusi hidrostatik, dimana dalam hal ini, logam dikelilingi oleh fluida kerja, yang ditekan untuk memberikan suatu gaya yaitu gaya ekstrusi (Ma et al., 2016).

Contoh yang ketiga yaitu forging, forging atau penempaan adalah proses manufaktur yang melibatkan pembentukan logam menggunakan gaya tekan lokal. Pukulan disampaikan dengan palu (sering palu kekuatan) atau mati. Penempaan sering diklasifikasikan menurut suhu di mana itu dilakukan. Ada beberapa jenis penempaan yaitu penempaan dingin (dilakukan pada suhu kamar), penempaan hangat (dilakukan pada suhu kamar yang tinggi), dan penempaan panas (sejenis pengerjaan panas) (Ma et al., 2016).

Penempaan merupakan proses manufaktur pembentukan logam yang melibatkan pembentukan logam melalui gaya tekan local dimana ini termasuk pemanasan, deformasi, dan memberikan bentuk pada potongan logam dan kekuatan lokal ini dikirim melalui palu manual atau mesin palu dan dadu. Aplikasi dari penempaan adalah crankshaft dan Connecting rod untuk I.C. Mesin, cakram turbin, roda gigi, kepala tebal, perkakas tangan dan banyak jenis komponen structural. Manfaat penempaan yaitu meningkatkan struktur serta sifat mekanik bagian logam, komponen yang ditempa dapat menahan beban yang tidak terduga, bagian yang ditempa konsisten dalam bentuk dengan kehadiran minimum rongga dan porositas, penempaan dapat menghasilkan bagian dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan proses penempaan dinilai sangat ekonomis untuk produksi volume sedang hingga tinggi. Lalu kerugian dari penempaan adalah adanya biaya awal dan biaya perawatannya yang sangat tinggi, dalam penempaan panas, karena suhu tinggi, ada oksidasi cepat pada permukaan yang menghasilkan hasil akhir yang buruk, penempaan biasanya memiliki harga yang lebih mahal daripada casting dan operasi penempaan terbatas hanya bisa pada bentuk bentuk yang sederhana (Ma et al., 2016).

Contoh yang keempat yaitu hot drawing, hot drawing adalah proses pembentukan logam di mana logam ditarik melalui cetakan atau set cetakan untuk mencapai pengurangan diameter material. Dalam proses ini, blanko logam yang dipanaskan selanjutnya akan ditempatkan pada bukaan die, dan punch akan mendorong blanko melalui bukaan die untuk membentuk cangkir atau cangkang. Hot drawing merupakan proses di mana penampang batang, batang, atau kawat dikurangi dengan menariknya melalui lubang cetakan, selanjutnya sebuah mandrel akan mendorong benda kerja dan dengan demikian menarik pekerjaan melalui die dimana prosesnya mirip dengan proses hot working lainnya yaitu proses ekstrusi, kecuali bahwa dalam proses ini material akan ditarik melalui die, sedangkan dalam ekstrusi material didorong, hot drawing digunakan untuk membuat bagian berdinding tebal dari bentuk silinder sederhana, silinder hidrolis tugas berat, peluru artileri, dan tangki oksigen dibuat dengan proses menggambar panas (Ma et al., 2016).

2.7 Struktur Mikro

Struktur mikro pada suatu sampel dapat dilihat melalui metallography test. Metalografi adalah studi tentang struktur mikro berbagai logam atau dapat dijelaskan sebagai ilmu untuk mengamati struktur kimia dan atom dari bahan-bahan tersebut. Langkah-langkah untuk menyiapkan spesimen metalografi meliputi berbagai operasi, beberapa di antaranya adalah sectioning dan cutting, mounting, grinding, polishing, dan etching. Ilmu metalografi ini memberikan informasi tentang ukuran butir, struktur fasa, dan struktur pemadatan suatu sampel (Akca & Trgo, 2015).

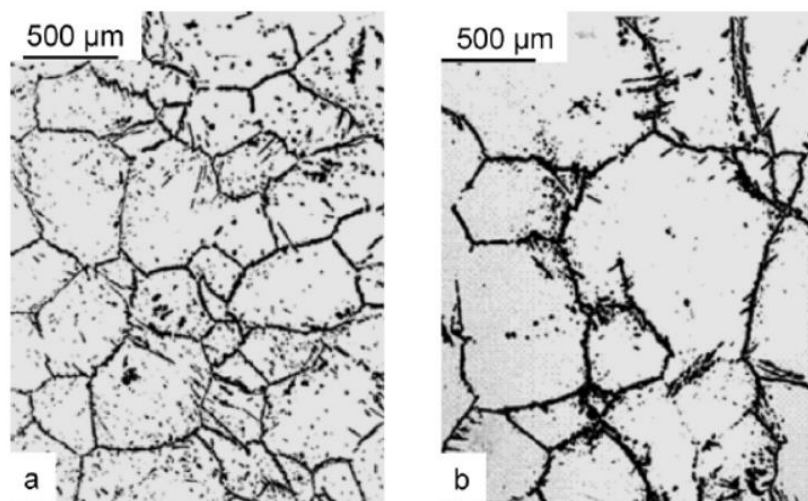
Metalografi terdiri dari studi tentang konstitusi dan struktur logam dan paduan. Pada pengujian ini menggunakan alat SEM. Teknik yang salah dalam menyiapkan sampel dapat mengakibatkan perubahan struktur mikro yang akan menghasilkan kesimpulan yang salah. SEM (Scanning Electron Microscopy) mengidentifikasi permukaan sampel dengan memindainya menggunakan berkas electron dalam pola pemindaian raster. Elektron berinteraksi dengan atom sampel menghasilkan sinyal yang berisi informasi tentang topografi permukaan sampel, komposisi dan sifat lainnya seperti konduktivitas listrik (Liu et al., 2010).

Sinyal yang dihasilkan oleh SEM berasal dari interaksi berkas elektron dengan atom pada atau dekat permukaan sampel, termasuk elektron sekunder. Dengan mendeteksi elektron sekunder, SEM dapat menghasilkan gambar yang jelas dari permukaan sampel (gambar elektron sekunder atau SEI), dengan resolusi superior sekitar 1 hingga 5 nm, karena pancaran elektron yang relatif lebih sempit, SEM memiliki kedalaman bidang yang jauh lebih besar (yaitu, kedalaman di mana objek tetap berada dalam fokus). Sinar-X karakteristik dipancarkan saat berkas electron menghilangkan elektron kulit bagian dalam dari sampel, menyebabkan elektron berenergi lebih tinggi mengisi kulit dan melepaskan energi. Sinar-X ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan menentukan secara kuantitatif unsur-unsur dalam sampel (Liu et al., 2010).

BSE diproduksi oleh interaksi elastis sinar elektron dengan inti atom dalam spesimen, karena atom berat dengan nomor atom tinggi adalah penghambur yang lebih kuat daripada yang ringan, gambar dengan BSE mengandung informasi

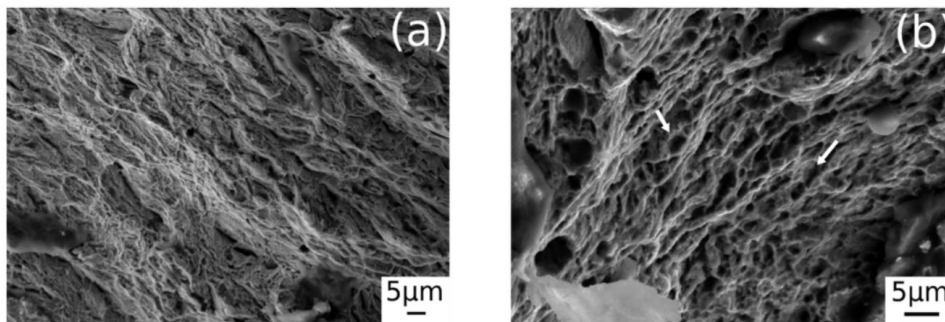
komposisi sehingga distribusi elemen yang berbeda dalam sampel dapat diperoleh dari gambar BSE. Dari alasan dan keuntungan yang ada inilah yang membuat SEM digunakan untuk menyelidiki pertumbuhan kristal atau proses evolusi struktur sampel. Spektrum sinar-X difraksi energi (EDX) yang terintegrasi dalam sistem SEM dan spektrum difraksi sinar-X (XRD) juga digunakan untuk mengidentifikasi komposisi dan fase kristal sampel. Sehingga ini menunjukkan bahwa SEM adalah alat yang sangat kuat untuk mempelajari morfologi pertumbuhan kristal dan membantu pembuatan mikro dan nano (Liu et al., 2010).

SEM (Scanning Electron Microscopy) memiliki berbagai jenis contohnya adalah SEM morfologi dan SEM fraktografi. SEM morfologi digunakan untuk mengkarakterisasi material, memberikan informasi terukur tentang kimia, ukuran, dan jumlah fase dan partikel yang ada dan memberikan informasi tentang hubungan fisik dari ukuran, kristalinitas, dan penjajaran fase yang ada. Lalu untuk SEM fraktografi digunakan untuk mempelajari permukaan patahan suatu bahan. Mempelajari karakteristik permukaan retak dapat membantu menentukan penyebab kegagalan pada produk rekayasa. Mode kegagalan yang berbeda menghasilkan fitur karakteristik di permukaan, memungkinkan analisis untuk menentukan akar penyebab kegagalan, hasil pemeriksaan sampel pengujian metalografi pada 1050°C dan 1100°C dapat dilihat pada Gambar 2.5 dibawah ini (Wouters & Froyen, 1996).



Gambar 2.5 Struktur Mikro Sampel Pengujian Metalografi Pada 1100°C (a) dan 1050°C (b) (Akta et al., 2005)

Hasil pemeriksaan sampel pengujian metalografi pada 1050°C dan 1100 °C terlihat bahwa ada peningkatan jumlah austenit pada 1050°C yaitu meningkat sebanyak 14% dan pada temperatur 1100 °C meningkat sebanyak 16%. Dimana struktur mikro yang didapatkan berasal dari proses quenching selama 60 menit. Dimana pada temperatur 1050°C terlihat bahwa batas butir halus dan batas butir yang direkristalisasi secara statis bebas dari substruktur. Lalu pada temperatur 1100°C terlihat bahwa batas butir lebih kasar dan batas butir yang direkristalisasi secara statis berkembang butirnya menjadi substruktur, setelah dilakukan pengujian metalografi dilanjutkan dengan fraktografi yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 2.8 dibawah ini (Akta et al., 2005).



Gambar 2.8 Struktur Mikro Sampel Pengujian Fraktografi Pada 1100°C (a) dan 1050°C (b) (Franceschi et al., 2020)

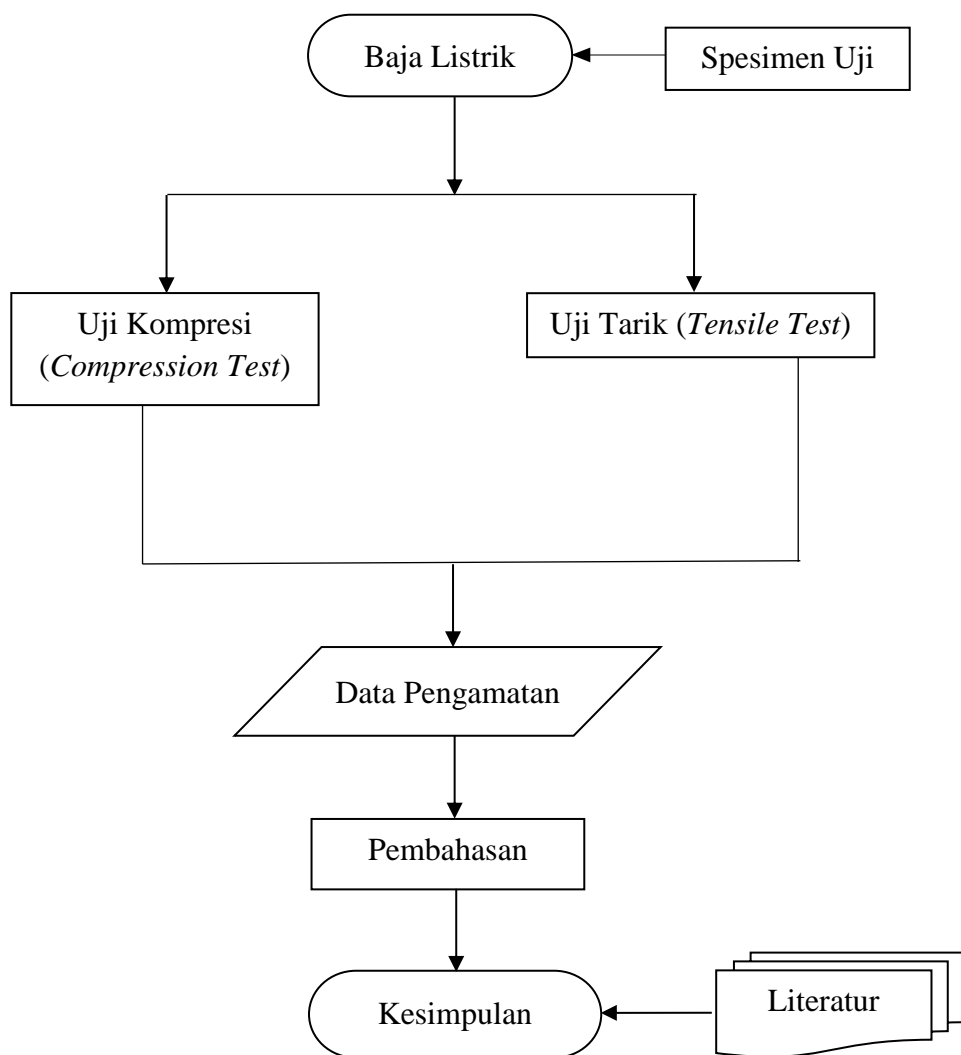
Pada temperatur 1050°C dan 1100 °C terjadi transformasi fasa dari ferit menjadi austenite keras. Dimana pengaruh dari meningkatnya temperatur menyebabkan kekuatan tarik menurun sehingga deformasi meningkat yang membuat ukuran butir lebih besar sehingga kerapatan dislokasi menurun. Meningkatnya temperatur juga menyebabkan perpanjangan meningkat sehingga dapat mencegah pembentukan retakan belahan sehingga meningkatkan plastisitas. Meningkatnya temperature mengakibatkan tidak ada retakan ketika baja di rolling sehingga menghasilkan sifat magnetic yang sangat baik sehingga dapat memperlancar dan meningkatkan produksi dengan proses yang singkat sehingga dapat menyebabkan penghematan energi dan pengurangan emisi global (Franceschi et al., 2020).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan prosedur percobaan pada penelitian ini yang dapat dijelaskan melalui diagram alir penelitian pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Percobaan

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat Yang Digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Quartz glass tube* 50 cm
2. *Radiation furnace* ChamIR
3. *Universal test machine Hot Compression* INSTRON 4507 and *controlling panel*
4. *Universal test machine Hot Tensile* INSTRON 4507 and *controlling panel*

3.2.2 Bahan Yang Digunakan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Argon
2. *Boron nitride*
3. *Electrical Steel* (Baja Listrik) yang berasal dari Arcelor Mittal Steel Belgium
4. Etanol
5. *Tantalum sheets*

3.3 Prosedur Penelitian

Adapun beberapa prosedur yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

A. Test machine Hot Compression INSTRON 4507

1. Hidupkan instron dan tempatkan sakelar di sudut kanan bawah. Setelah mesin berfungsi, rak bawah seluler harus diaktifkan dengan menekan tombol E yang terletak di sebelah kanan. Pergerakan rak bawah dapat dikontrol secara manual dengan menekan tombol A dan B. Selain itu, terdapat tombol berhenti darurat, di sisi kanan mesin, di atas sakelar utama. Untuk mem-boot ulang sistem, putar tombol searah jarum jam dan itu akan memulihkan peralatan.

2. Lakukan kalibrasi *load cell*, tekan tombol CAL dan ENTER sehingga akan menampilkan identifikasi sel beban. Lalu lakukan uji keseimbangan *load cell* dengan menekan tombol BAL dan ENTER. Sebelum memulai pengujian, ingatlah untuk meletakkan 0 pada posisi bingkai dengan menekan tombol RESET GL dan ENTER.
3. Menempatkan sampel baja listrik pada landasan namun sebelum meletakkan sampel di landasan bawah, kedua ujungnya harus dilumasi dengan boron nitrida. Boron nitrida harus diencerkan menggunakan etanol. Setelah boron nitrida, sepotong kecil foil tantalum ditempatkan pada setiap ujung sampel, di atas bahan dan boron nitride dan sebelumnya mengoleskan pelumas, ukur terlebih dahulu dimensi sampel.
4. Setelah sampel dengan semua pelumas ditempatkan di landasan bawah, rak bawah dipindahkan ke bawah untuk memasukkan tabung kuarsa yang akan melindungi landasan TZM dan sampel. Naikkan rak bawah dengan hati-hati sampai tantalum atau foil mika di atas sampel hampir menyentuh landasan atas, biarkan pemisahan kecil lebih rendah dari 1 mm. Pada titik ini, tutup tabung kuarsa menggunakan wol batu, buka sistem pendingin, tutup tungku radiasi, dan sambungkan argon dengan laju aliran rendah.
5. Sebelum memulai pengujian, ingatlah untuk mengatur posisi awal rak sebagai 0. Tekan tombol RESET GL dan ENTER lalu hidupkan computer dan jalankan software 4507. Pada toolbar, pilih FITXER lalu NOU. Bilah alat baru ditampilkan. Untuk memperkenalkan tes baru, pilih ASSAIG lalu jendela dialog terbuka dan perkenalkan jumlah siklus, biasanya 1 angka. Kolom berikutnya menentukan parameter kontrol pengujian (Control de l'assaig). Pilih opsi option Vel. Def. Vert. (True strain rate) dan perkenalkan nilai dalam s-1.
6. Bidang berikutnya termasuk dalam kondisi Akhir pengujian. Pilih True strain dan MINIM. Perkenalkan nilai regangan maksimum dan

RETURN. Perhatikan arah gerakan rak Instron dimana ini disebut juga sebagai UP untuk tes kompresi. Selanjutnya perhatikan nilai pre load. Setelah nilai preload tercapai, komputer akan mulai mendaftarkan data uji. Klik Terima. Pada titik ini, pesan "Premer Computer Control" akan muncul. Pada saat ini, tekan tombol Kontrol komputer. Mesin akan melakukan kalibrasi terakhir sebelum memulai dan sebuah pesan akan muncul di layar. Klik Aseptar.

7. Pada titik ini, Instron akan melakukan pengujian dan komputer akan merekam data pengujian, pada layar akan ditampilkan tegangan sebenarnya-regangan sebenarnya secara real time. Setelah pengujian selesai, jika kita menempatkan RETURN pada tindakan terakhir, anvil akan terpisah secara otomatis dan kita dapat memadamkan sampel dengan menggerakkan pegangan quench yang terletak di landasan bawah. Pada titik ini matikan tungku. Sirkuit argon dan refrigerasi harus diaktifkan hingga suhu setidaknya di bawah 200°C.
8. Untuk menyimpan data pengujian, buka menu utama perangkat lunak dengan urutan berikut: FITXER/DESA/GUARDAR COMO. Pada titik ini harus memilih folder tempat untuk menyimpan data. Penting untuk menyimpan data dalam 2 format: .res dan .mul. File .mul dapat dibuka di excel untuk mengolah data. File .res dimaksudkan hanya untuk bekerja dengan perangkat lunak 4507.

B. *Test machine Hot Tensile INSTRON 4507 and controlling panel*

1. Hidupkan instron dan tempatkan sakelar di sudut kanan bawah. Setelah mesin berfungsi, rak bawah seluler harus diaktifkan dengan menekan tombol E yang terletak di sebelah kanan. Pergerakan rak bawah dapat dikontrol secara manual dengan menekan tombol A dan B. Selain itu, terdapat tombol berhenti darurat, di sisi kanan mesin, di atas sakelar utama. Untuk mem-boot ulang sistem, putar tombol searah jarum jam dan itu akan memulihkan peralatan.

2. Lakukan kalibrasi load cell, tekan tombol CAL dan ENTER sehingga akan menampilkan identifikasi sel beban. Lalu lakukan uji keseimbangan load cell dengan menekan tombol BAL dan ENTER. Sebelum memulai pengujian, ingatlah untuk meletakkan 0 pada posisi bingkai dengan menekan tombol RESET GL dan ENTER.
3. Menempatkan sampel yaitu baja listrik pada landasan, dimana dekati kedua landasan sampai sampel dapat disisipkan di antara keduanya. Perhatikan bahwa tabung kuarsa harus berada di dalam landasan, dipegang di bagian atas untuk menempatkan sampel. Sampel harus dimasukkan di antara landasan dan tetap longgar, jangan ditekan, karena selama pemanasan kita dapat menimbulkan tekanan karena dilatasi landasan. Setelah sampel siap, tabung kuarsa dapat ditopang di landasan bawah dan sebelum memasukkan sampel ke dalam landasan harus ukur dimensi sampel.
4. Pada titik ini, tutup tabung kuarsa menggunakan wol batu, buka sistem pendingin, tutup tungku radiasi dan sambungkan argon dengan laju aliran rendah. Sebelum memulai pengujian, ingatlah untuk mengatur posisi awal rak sebagai 0. Tekan tombol RESET GL dan ENTER. Hidupkan komputer, dan jalankan software 4507. Pada toolbar, pilih FITXER lalu NOU. Bilah alat baru ditampilkan. Untuk memperkenalkan tes baru, pilih ASSAIG untuk melihat angka. Jendela dialog terbuka. Perkenalkan jumlah siklusnya dimana biasanya 1.
5. Kolom berikutnya menentukan parameter kontrol pengujian (Control de l'assaig). Pilih opsi option Vel. Def. Vert. (True strain rate) dan perkenalkan nilai dalam s-1. Bidang berikutnya termasuk dalam kondisi akhir pengujian. Pilih Desplaçament dan MAXIM.
6. Setelah pengujian selesai, jika kita menempatkan RETURN pada tindakan terakhir, anvil akan terpisah secara otomatis dan kita dapat memadamkan sampel dengan menggerakkan pegangan quench yang terletak di landasan bawah. Pada titik ini matikan tungku. Sirkuit

argon dan refrigerasi harus diaktifkan hingga suhu setidaknya di bawah 200°C.

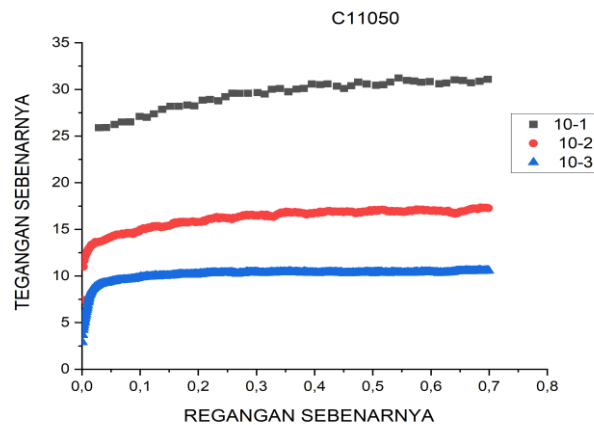
7. Perhatikan nilai preload. Setelah nilai preload tercapai, komputer akan mulai mendaftarkan data uji. Klik Terima. Pada titik ini, pesan "Premier Computer Control" akan muncul. Saat ini, tekan tombol Kontrol komputer. Mesin akan melakukan kalibrasi terakhir sebelum memulai dan pesan akan muncul di layar. Klik Terima. Pada titik ini, Instron akan melakukan pengujian dan komputer akan merekam data pengujian, di layar akan ditampilkan tegangan sebenarnya-regangan sebenarnya secara real time.
8. Perkenalkan nilai perpindahan maksimum, biasanya 100 mm, dan terakhir aksi BERHENTI. Setelah pengujian selesai, jika kita menempatkan RETURN pada tindakan terakhir, anvil akan terpisah secara otomatis dan kita dapat memadamkan sampel dengan menggerakkan pegangan quench yang terletak di landasan bawah. Pada titik ini matikan tungku. Sirkuit argon dan refrigerasi harus diaktifkan hingga suhu setidaknya di bawah 200°C.
9. Untuk menyimpan data pengujian, buka menu utama perangkat lunak dengan urutan berikut: FITXER/DESA/GUARDAR COMO. Pada titik ini harus memilih folder tempat kami ingin menyimpan data. Penting untuk menyimpan data dalam 2 format: .res dan .mul. File .mul dapat dibuka di excel untuk mengolah data. File .res dimaksudkan hanya untuk bekerja dengan perangkat lunak 4507.

BAB IV

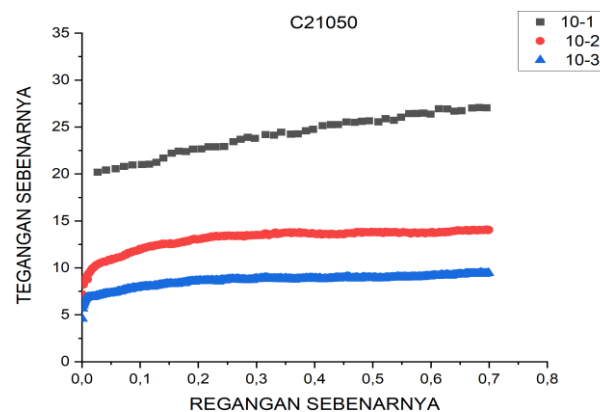
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

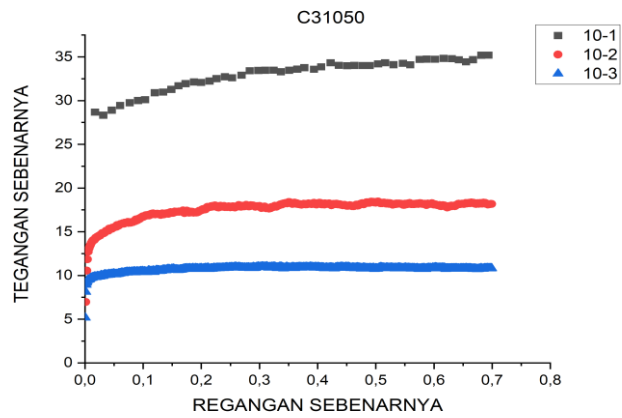
Dibawah ini adalah grafik dari hasil *hot compression test* dengan temperatur 1050 °C dan 1100 °C dan *strain rate* sebesar 10^{-1} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} , dan 10^{-3} s^{-1} yang diaplikasikan pada 3 spesimen yang berbeda, grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1, Gambar 4.2, Gambar 4.3, Gambar 4.4, Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



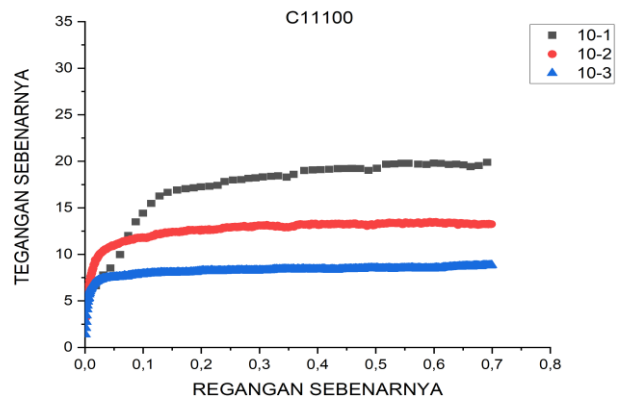
Gambar 4.1 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



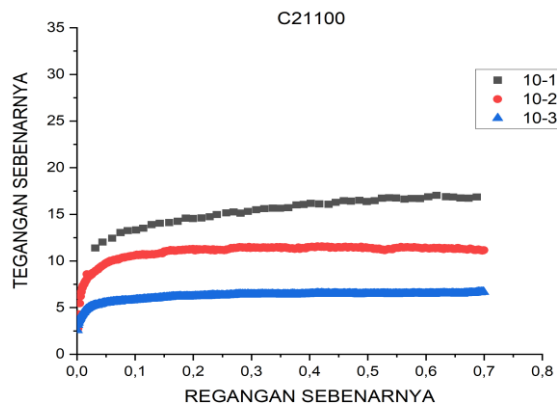
Gambar 4.2 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



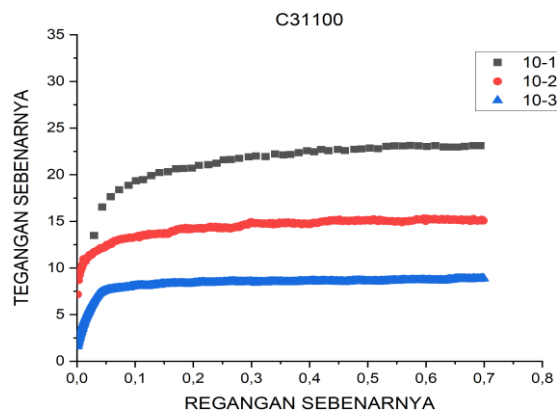
Gambar 4.3 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10⁻¹ s⁻¹ (b) 10⁻² s⁻¹ (c) 10⁻³ s⁻¹



Gambar 4.4 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10⁻¹ s⁻¹ (b) 10⁻² s⁻¹ (c) 10⁻³ s⁻¹



Gambar 4.5 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10⁻¹ s⁻¹ (b) 10⁻² s⁻¹ (c) 10⁻³ s⁻¹



Gambar 4.6 Grafik Hasil *Hot Compression Test* Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10⁻¹ s⁻¹ (b) 10⁻² s⁻¹ (c) 10⁻³ s⁻¹

4.2 Pembahasan Penelitian

4.2.1 Test Machine Hot Compression INSTRON 4507

Hot compression test dilakukan pada 3 spesimen (C₁, C₂ dan C₃) dengan penerapan nilai regangan yang berbeda, yaitu 10⁻¹ s⁻¹, 10⁻² s⁻¹ dan 10⁻³ s⁻¹. Dimana jenis test ini dilakukan untuk mengevaluasi perilaku *creep* pada temperatur tinggi. Dengan temperatur yang digunakan di test ini adalah 1050 °C dan 1100 °C. Baja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja

dengan kandungan 3% Si dengan komposisi kimia lain yang dijelaskan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.1 Komposisi Sampel Baja Pada *Hot Compression Test*

Spe cim en	Content of Elements, wt.%											
	C	Mn	Si	S	Cr	Cu	Ti	Al	Nb	N	O	Fe
C ₁	0,0	0,2	3,0	0,0		0,04		0,0	0,0		0,0	96,0
	275	898	940	057	0,01	892	0,0	136	024	0,0	459	014
	6	3	4	8	573	1	063	3	6	079	9	8
C ₂	0,0	0,2	3,1	0,0			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,8
	262	626	935	077	0,03	0,48	020	207	023	078	778	875
	8	4	5	5	051	098	3	6	5	2	0	3
C ₃	0,0			0,0	0,00			0,0	0,0		0,0	95,9
	437	0,2	3,1	066	309	0,48	0,0	227	019	0,0	537	289
	3	624	59	8	8	105	02	5	8	067	9	4

Baja dengan kandungan 3% Si diproduksi di laboratorium pengecoran lewat proses *Electro Slag Remelting (ESR)*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan mesin uji instron 4507 yang dilengkapi dengan kontrol suhu yang dilakukan oleh termokopel tipe-K yang ditempatkan pada permukaan sampel dan tungku pemanas radiasi inframerah RESEARCH INC model E4 dengan output daya 3000 W. Dimana tungku radiasi ini berbentuk segi delapan ini terdiri dari bingkai aluminium dengan bukaan samping dan dilengkapi dengan empat lampu inframerah (I-R) berbentuk tabung dari kuarsa dengan filamen tungsten, yang dikelilingi oleh reflektor berbentuk elips, energi inframerah densitas tinggi terkonsentrasi dalam volume silinder di bagian tengah ruang tungku. Sistem ini mencakup beberapa bagian seperti sirkuit pendingin yang menggunakan air terdeionisasi untuk melindungi dan menjaga seluruh rakitan lampu tetap dingin, tungku ini juga memiliki kabinet kontrol Model 915 yang dihubungkan dengan termokopel tipe K, yang bersentuhan dengan

tabung reaksi, dimana dengan cara ini, suhu akan dibaca dan dikontrol selama pengujian.

Pada mesin ini, dua kabel termokopel tipe-K dilas di tengah sampel sebelum dipanaskan untuk merekam suhu *realtime* spesimen, hal ini dilakukan dengan tujuan untuk membentuk loop umpan balik untuk penyesuaian dan pengontrolan suhu dinamis di bawah bantuan pembebanan arus AC yang dikendalikan umpan balik yang tergabung pada dua termo diujung sampel silinder dan tujuan lainnya yaitu untuk mengontrol laju pemanasan dan pendinginan secara akurat dan mengukur suhu spesimen. Setelah itu, spesimen dipasang tepat di tengah-tengah landasan dengan dua cakram foil grafit yang disisipkan di antara ujung spesimen dan landasan sebagai pelumas untuk mengurangi gesekan antara landasan dan sampel sehingga meningkatkan keakuratan hasil penelitian. Pada proses ini dialiri gas argon yang digunakan sebagai gas pelindung dan pendinginan di dalam mesin dan tujuan lainnya yaitu untuk menghambat dekarburisasi baja dan oksidasi peralatan mesin. Semua sampel yang diuji pertama-tama dipanaskan hingga suhu austenisasi 1100°C dengan laju pemanasan 2°C/detik dan ditahan selama 120 detik agar terjadi homogenisasi struktur mikro, kemudian spesimen didinginkan hingga suhu deformasi dengan kecepatan 10°C/s, selanjutnya spesimen didinginkan hingga suhu uji 1050°C dan 1100 °C dan ditahan spesimen diregangkan pada laju regangan sebenarnya yang berbeda yaitu 10^{-1} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} dan 10^{-3} s^{-1} .

4.2.2 Recovery dan Rekristalisasi

Logam dapat dideformasi secara plastis dimana logam tidak akan kembali ke aslinya. Sebagian kecil dari energi yang dihabiskan untuk mendeformasi logam secara plastis tetap disimpan dalam strukturnya dan meningkatkan energi dalamnya. Recovery atau proses pemulihan biasanya terjadi pada suhu rendah dan melibatkan cacat titik serta pemusnahan dan penataan ulang dislokasi yang menghasilkan pembentukan subbutir dan batas subbutir (misalnya, batas kemiringan atau puntiran sudut rendah).

Ciri khas dari proses pemulihan adalah tidak melibatkan perubahan apa pun dalam struktur butiran logam yang dikerjakan secara dingin, satu-satunya perubahan yang terjadi adalah pengaturan dislokasi di dalam butiran yang ada. Perubahan kecil dalam kekerasan yang kadang-kadang diamati selama pemulihan dapat dikaitkan dengan penurunan kerapatan dislokasi dan titik cacat dan pertumbuhan subbutir.

Suhu tinggi mempengaruhi perkembangan dislokasi menjadi subbutir, proses ini sebenarnya dapat dimulai pada suhu tinggi sehingga logam mengalami pemulihan dinamis. Kecenderungan dislokasi untuk membentuk sel atau substruktur cukup kuat pada logam murni dan dapat terjadi pada temperatur yang sangat rendah. Pada suhu yang lebih tinggi, penyebab pemulihan dinamis secara alami menjadi lebih kuat, karena mobilitas dislokasi meningkat dengan meningkatnya suhu. Hasilnya adalah sel atau sub-butir cenderung terbentuk pada titik titik kecil, dinding sel menjadi lebih sempit dan tipis dan jelas lebih tajam sehingga ukuran sel menjadi lebih besar.

Pemulihan dinamis memiliki pengaruh yang kuat pada bentuk kurva tegangan-regangan. Dikarenakan adanya pergerakan dislokasi menurunkan energi regangan rata-rata yang terkait dengan dislokasi. Dimana hal ini terjadi untuk membuat lebih mudahnya terjadi nukleasi dislokasi tambahan yang diperlukan untuk lebih meregangkan logam. Pemulihan dinamis dengan demikian cenderung menurunkan tingkat pengerasan kerja. Pemulihan dinamis terjadi paling kuat pada logam dengan energi salah susun tinggi dan juga tidak mudah diamati pada logam dengan energi salah susun yang sangat rendah.

Proses pemulihan yang terjadi pada suhu rendah menghasilkan pemulihan sifat fisik tanpa perubahan struktur mikro yang dapat diamati. Pemulihan ini penting karena dapat digunakan untuk melepaskan tekanan internal pada peralatan penempaan, pengelasan, dan fabrikasi, tanpa mengurangi kekuatan yang diperoleh selama dan pengerjaan. Mekanisme yang beroperasi pada suhu rendah adalah gerak kekosongan. Hal ini

melibatkan migrasi cacat titik ke batas butir dan dislokasi dan kombinasi cacat titik.

Pada suhu menengah mekanismenya adalah gerakan dislokasi tanpa pendakian. Dimana hal ini melibatkan susunan dislokasi yang tidak beraturan, pemusnahan dislokasi dan pertumbuhan butir. Pada suhu tinggi, mekanisme yang terjadi adalah pergerakan dislokasi dengan pendakian, yang melibatkan pendakian dislokasi, hilangnya batas antara dua sub-butir, yang dikenal sebagai penggabungan dan poligonisasi (keadaan antara pemulihan dan rekristalisasi).

Pada proses pemulihan, logam yang diperkeras regangan dipanaskan hingga suhu rendah, distorsi elastis kisi kristal berkurang karena peningkatan amplitudo osilasi termal atom. Pemanasan ini akan menurunkan kekuatan logam yang mengalami pengerasan regangan namun terjadi peningkatan batas elastis dan keuletan logam. Pada keadaan awal, laju pemulihan paling cepat dan menurun dalam waktu yang lebih lama pada suhu tertentu. Oleh karena itu jumlah pemulihan yang terjadi dalam waktu tertentu meningkat seiring dengan meningkatnya suhu.

Proses rekristalisasi terjadi jika peningkatan aktivasi termal tersedia yaitu jika suhu dinaikkan, dimana nukleasi dan pertumbuhan butir bebas regangan dalam matriks yang terdeformasi akan terjadi. Saat butir ini tumbuh, dislokasi dalam matriks dimusnahkan pada batas butir yang baru terbentuk. Kekuatan dan kekerasan menurun drastis dan keuletan meningkat. Suhu terendah di mana butiran bebas tegangan muncul dalam struktur logam yang sebelumnya terdeformasi secara plastis disebut suhu rekristalisasi. Dimana hal ini tergantung pada ukuran butir, tingkat keparahan deformasi plastis, dan keberadaan atom terlarut atau partikel fase kedua. setelah deformasi berat.

Proses rekristalisasi menghilangkan dislokasi dan butiran bebas dislokasi terbentuk di dalam struktur yang terdeformasi atau pulih dan melepaskan energi yang tersimpan. Dimana proses rekristalisasi ini memerlukan deformasi minimum untuk memulai rekristalisasi. Semakin

kecil deformasi, semakin tinggi suhu yang dibutuhkan untuk memulai rekristalisasi dan meningkatkan waktu anil dapat menurunkan suhu yang diperlukan untuk rekristalisasi.

Pada proses ini butir akhir bergantung pada derajat deformasi dan derajat yang lebih kecil pada suhu anil, secara umum semakin kecil semakin besar derajat deformasi maka akan semakin rendah suhu anil. Berlaku juga semakin besar ukuran butir asli, semakin besar jumlah deformasi yang diperlukan untuk memberikan suhu dan waktu rekristalisasi yang sebanding dan jumlah deformasi yang diperlukan untuk menghasilkan pengerasan deformasi yang ekuivalen meningkat dengan meningkatnya suhu kerja dan juga, implikasinya, untuk derajat deformasi tertentu, suhu kerja yang lebih tinggi memerlukan ukuran butiran rekristalisasi yang lebih kasar dan suhu rekristalisasi yang lebih tinggi.

Rekristalisasi ini adalah proses di mana butiran logam pengerjaan panas yang terdistorsi digantikan oleh butiran bebas regangan baru selama pemanasan di atas suhu minimum yang disebut suhu rekristalisasi. Selama rekristalisasi, terjadi penurunan tajam dalam kekerasan dan kekuatan serta peningkatan keuletan. Laju pertumbuhan selama rekristalisasi tidak bergantung pada waktu tetapi meningkat seiring dengan derajat deformasi dan suhu anil. Kehadiran pengotor menurunkan laju pertumbuhan, yaitu laju rekristalisasi dan ketika semua butiran logam yang dikerjakan dengan pengerjaan panas telah digantikan oleh butiran struktur kristal bebas regangan, pertumbuhan berhenti dan rekristalisasi dikatakan selesai.

Efek pertama dari pemanasan logam adalah pembentukan adanya butiran-butiran kecil baru dan butiran-butiran ini dengan cepat membesar hingga pertumbuhan lebih lanjut dibatasi oleh pertemuan butiran-butiran lainnya. Rekristalisasi tidak menghasilkan struktur baru namun menghasilkan butiran atau kristal baru dengan struktur yang sama pada logam. Dimana ini terdiri dari atom-atom logam yang terdeformasi mengatasi ikatan kisi yang terdistorsi, pembentukan inti butir-butir yang seimbang dan pertumbuhan selanjutnya dari butir-butir ini karena

perpindahan atom dari kristalit yang terdeformasi ke kristalit yang tidak terdeformasi.

Suhu saat kristalisasi dimulai, yaitu terbentuknya butiran baru, disebut suhu rekristalisasi. Selama pemulihan, beberapa energi regangan internal yang tersimpan dilepaskan melalui gerakan dislokasi karena peningkatan difusi atom pada ketinggian suhu menyebabkan pengurangan jumlah dislokasi. Setelah pemulihan selesai, butiran masih dalam keadaan energi regangan yang relatif tinggi. Rekristalisasi adalah pembentukan sekumpulan butir baru bebas regangan dan uniaksial yang memiliki kerapatan dislokasi rendah dimana kekuatan pendorong ada untuk menghasilkan struktur butiran baru adalah perbedaan energi internal antara material yang terregangkan dan tidak teregangkan.

4.2.3 *Dynamic Recovery (DRV) dan Dynamic Recrystallization (DRX)*

Dynamic recovery (DRV) dan *dynamic recrystallization (DRX)* adalah proses mendasar dalam deformasi plastis logam, di mana energi regangan elastis yang terkait dengan cacat kisi linier yaitu dislokasi diminimalkan dengan reorganisasi cacat tersebut menjadi konfigurasi energi rendah. Selama *dynamic recrystallization (DRX)*, pengerasan regangan karena akumulasi cacat kisi dinetralkan oleh migrasi batas butir dan nukleasi butir rekristalisasi bebas regangan baru. Cacat seperti dislokasi dan antarmuka meningkat selama deformasi yang membuat material termodinamika tidak stabil. Saat mendeformasi logam pada suhu tinggi, secara termal proses yang diaktifkan cenderung menghilangkan cacat ini untuk mengurangi energi bebas sistem. Struktur mikro dan juga sifat-sifatnya sebagian dapat dikembalikan ke nilai aslinya sebelumnya deformasi dengan pemulihan melalui penataan ulang dislokasi. Pemulihan umumnya membawa perubahan struktur mikro yang relatif homogen dan umumnya tidak melibatkan migrasi HAGB antara butiran yang terdeformasi. Proses pemulihan serupa dapat terjadi selama anil atau selama deformasi, yang dikenal sebagai pemulihan dinamis (DRV).

Pembentukan struktur butiran baru dalam material yang terdeformasi oleh pembentukan dan migrasi HAGB yang didorong oleh energi yang tersimpan yang didapatkan dari deformasi plastis disebut sebagai rekristalisasi. Rekristalisasi dapat terjadi secara heterogen dengan nukleasi yang jelas dan tahap pertumbuhan dan dalam hal ini digambarkan sebagai proses terputus-putus. Sebaliknya, itu bisa juga berlangsung secara seragam sehingga struktur mikro berkembang secara progresif tanpa kejelasan nukleasi dan tahap pertumbuhan yang menunjukkan karakter yang berkelanjutan. Rekristalisasi Statis (SRX) yang mengacu pada proses rekristalisasi selama anil sedangkan yang terjadi selama deformasi di suhu tinggi disebut rekristalisasi dinamis (DRX).

Rekristalisasi dinamis (DRX) merupakan fenomena yang terjadi selama regangan logam pada suhu tinggi, yang ditandai dengan laju nukleasi butir kerapatan dislokasi rendah dan laju pertumbuhan posterior yang dapat menghasilkan ukuran butir homogen saat kesetimbangan tercapai. DRX terjadi setelah jumlah regangan kritis, yang bergantung pada jenis jalur regangan, ukuran butir awal, suhu dan laju regangan. Ketika regangan kritis tercapai, pada logam kubik berpusat muka (fcc) dengan energi kesalahan susun sedang hingga rendah, pengerasan regangan dan pemulihan dinamis tidak lagi menjadi mekanisme utama yang bertanggung jawab atas respons regangan tegangan.

Pada tingkat mikrostruktur, DRX dimulai ketika pengerasan regangan ditambah pemulihan tidak dapat lagi menyimpan lebih banyak dislokasi yang tidak bergerak. Butir menjadi jenuh oleh hambatan dislokasi berupa sel-sel dan batas butir menggelembung hingga terbentuk butir baru. Jika kesetimbangan atau keadaan stabil tercapai dalam satu siklus, kurva aliran panas dikatakan memiliki perilaku tegangan monotonik. Setelah tegangan puncak, tegangan turun mengikuti laju kinetik tertentu hingga mencapai tegangan tunak. Jika osilasi tegangan muncul sebelum mencapai kondisi tunak, maka beberapa siklus rekristalisasi dan pertumbuhan butir terjadi dan perilaku tegangan dikatakan sebagai puncak berganda.

Pemulihan dinamis (DRV) dapat dikaitkan dengan mekanisme penurunan tekanan dengan peningkatan slip silang yang mengarah ke pemusnahan dislokasi yang lebih tinggi ketika dislokasi ulir dengan tanda yang berlawanan membatalkan satu sama lain atau ketika dislokasi mencapai batas butir atau permukaan. Istilah rekristalisasi dinamis mengacu pada semua fenomena rekristalisasi yang terjadi melalui deformasi plastis. Rekristalisasi dinamis sering bersifat eksperimental selama deformasi panas paduan yang disiapkan. Tampaknya cukup sebanding dengan proses yang terjadi pada logam dan dapat diprediksi pada material yang pemulihannya lambat dan terdapat pemeliharaan sejumlah besar energi yang tersimpan.

4.2.4 Kurva Regangan dan Tegangan Sebenarnya

Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah baja dengan kandungan 3% Si, sampel baja ini banyak digunakan pada pembuatan peralatan industri contohnya yaitu digunakan sebagai bahan baku pembuatan tenaga listrik. Elemen paduan dalam baja membuatnya memiliki kekuatan dan ketahanan korosi yang tinggi. Namun, sifat mampu bentuk pada suhu kamar baja membatasi aplikasinya dalam bidang teknik. Proses pembuatan baja biasanya dilakukan pada suhu tinggi untuk mendapatkan sifat mampu bentuk yang lebih baik.

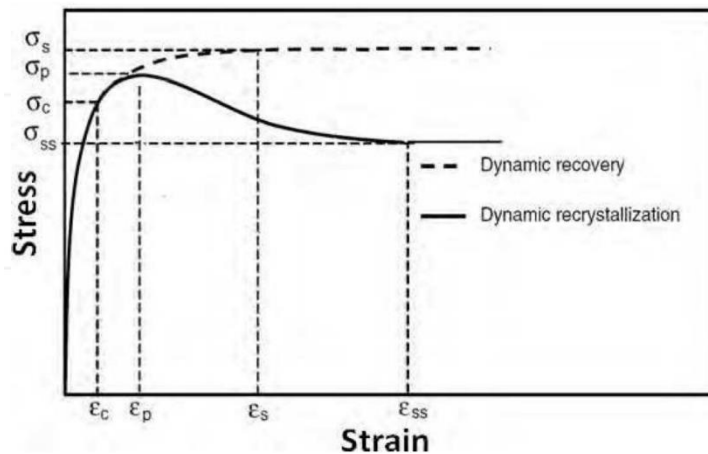
Jenis tegangan yang terjadi pada kurva regangan dan tegangan sebenarnya hasil dari *hot compression test* adalah tegangan tekan. Tegangan tekan adalah keadaan dimana gaya yang diterapkan cenderung akan memampatkan atau menekan material sepanjang sumbu gaya yang diterapkan. Setelah diberikan tegangan, suatu material cenderung mengecil pada arah sejajar dengan arah gaya tekan dan membesar pada arah tegak lurus terhadap penerapan beban tekan. Saat tegangan tekan diterapkan, atom-atom dalam struktur kristal material terdorong semakin berdekatan. Ketika atom-atom dalam struktur kristal bergerak, mereka mendorong atom-atom lain. Karena atom tidak dapat menempati ruang yang sama, atom yang dipindahkan cenderung bergerak tegak lurus terhadap gaya yang

diberikan. Hal ini menyebabkan material menggebu, atau menjadi lebih tebal, ke arah tersebut. Ketika tegangan tekan meningkat, terjadi kegagalan tekuk atau pembengkokan atau puntiran material secara tiba-tiba. Besarnya tegangan tekan yang menyebabkan terjadinya deformasi plastis adalah tegangan luluh, sedangkan besarnya tegangan pada saat keruntuhan adalah kuat tekan. Tegangan tekan ini disebabkan oleh dislokasi atom. Dimensi suatu material cenderung bertambah dalam arah tegak lurus terhadap arah penerapan gaya tekan. Ketika gaya tekan diterapkan, atom-atom terdislokasi di sekitar bidang slip atau bidang imajiner melalui struktur mikro material. Atom-atom yang berada di atas bidang slip terkompresi sedangkan atom-atom yang berada di bawah bidang slip mengalami tegangan.

Selama proses pembentukan panas, baja akan mengalami variasi suhu dan laju regangan yang akan menghasilkan perubahan perilaku mekanis dan perubahan mikrostruktur. Sampel baja yang digunakan pada percobaan ini adalah baja yang berasal dari proses *rolling*, dimana proses *rolling* ini merupakan salah satu proses dalam pengerjaan panas, di mana dalam proses ini material mengalami siklus termal di bawah regangan variabel untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Tegangan aliran material adalah salah satu hal yang paling penting dalam pengerjaan panas, dimana hal ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi produksi dan kualitas baja. Pada regangan rendah, austenit FCC dan ferit BCC mengalami pengerasan regangan dan dengan meningkatnya regangan dan suhu secara bertahap, dua proses restorasi akan terjadi secara kompleks sebagai kombinasi pemulihan dinamis (DRV) dan rekristalisasi dinamis (DRX). Karena energi patahan susun (SFE) yang lebih tinggi, proses restorasi dengan DRV ditemukan secara dominan pada ferit, sedangkan DRX sangat penting dan mempercepat pelunakan tegangan aliran pada austenite karena memiliki SFE yang lebih rendah.

Pemulihan dinamis dan rekristalisasi dinamis terjadi selama operasi pengerjaan panas seperti proses *rolling*. Proses ini penting karena menurunkan tegangan aliran material, sehingga memungkinkannya untuk

dideformasi dengan lebih mudah dan juga memiliki berpengaruh pada tekstur dan ukuran butir material yang dikerjakan. Deformasi panas industri yang dilakukan pada kisaran temperatur kestabilan fasa austenite akan menghasilkan kurva mekanisme pelunakan dinamis seperti pemulihan dinamis (DRV) dan pemulihan dinamis rekristalisasi (DRX). Pemulihan dinamis (DRV) dan rekristalisasi dinamis (DRX) merupakan fenomena restorasi yang secara signifikan mempengaruhi perilaku aliran dimana hal ini dapat dilihat dari kurva yang dihasilkan, hal ini terjadi karena energi patahan susun yang rendah dari austenit, kinetika DRV akan lambat dan karenanya proses DRX biasanya terjadi selama pembentukan baja panas, yang dimulai pada regangan kritis, dimana contoh skema grafik DRV dan DRX dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Skema Grafik DRV dan DRX

Dalam proses pengerjaan panas, perilaku aliran material terjadi mekanisme fisik yang terjadi seperti pemulihan dinamis (DRV) dan rekristalisasi dinamis (DRX), yang dipengaruhi oleh komposisi kimia logam dan paduan. suhu deformasi, derajat deformasi dan laju regangan. Dimana DRX adalah mekanisme pelunakan yang dominan pada rentang $\alpha + \beta$ fasa ganda, sedangkan DRV adalah mekanisme pelunakan utama pada rentang β fasa tunggal. Dari hasil percobaan ini, didapatkan grafik dengan jenis mekanisme pelunakan yang akan dijelaskan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Mekanisme Pelunakan Material Pada *Hot Compression Test*

Temperatur (°C)	Laju Regangan (s ⁻¹)	Mekanisme Pelunakan
Sampel 1 1050 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	
Sampel 2 1050 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	
Sampel 3 1050 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	
Sampel 1 1100 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	
Sampel 2 1100 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	
Sampel 3 1100 °C	10 ⁻¹	DRV
	10 ⁻²	
	10 ⁻³	

4.2.5 Fenomena DRV Pada Kurva Regangan dan Tegangan Sebenarnya

Kurva tegangan-regangan yang khas dengan adanya DRV ditandai dengan peningkatan tegangan yang sebenarnya hingga nilai maksimum yang diikuti dengan tahap akhir nilai konstan yang berbentuk seperti dataran tinggi untuk deformasi yang lebih tinggi. Pada nilai regangan tertentu, pengerasan regangan dan kinetika DRV mencapai kesetimbangan dinamis dan kerapatan dislokasi tetap konstan. Semua ini menghasilkan tegangan

aliran kondisi tunak, yaitu sebanyak dislokasi yang dihasilkan dan dimusnahkan, substruktur dislokasi yang stabil berkembang.

Pada kurva DRV, tegangan aliran meningkat dengan regangan pada tahap awal deformasi dan kemudian mencapai kondisi *steady state* sebagai hasil dari pencapaian keseimbangan antara tingkat pengerasan dan pelunakan kerja. Pada tahap awal deformasi, efek pengerasan kerja lebih jelas daripada efek pelunakan yang disebabkan oleh pemulihan dinamis, efek pelunakan meningkat secara bertahap dengan meningkatnya deformasi, yang dapat menghalangi peningkatan tegangan dengan meningkatnya deformasi. Ketika efek pelunakan yang disebabkan oleh pemulihan dinamis mencapai keseimbangan dinamis dengan pengerasan kerja, nilai tegangan aliran secara umum tetap stabil.

Pemulihan dinamis DRV adalah satu-satunya mekanisme pelunakan paduan yang terjadi pada percobaan ini, contohnya ketika deformasi panas yang dilakukan pada temperatur 1050 hingga 1100 °C dengan berbagai laju regangan antara satu dan 10^{-1} sampai 10^{-3} s^{-1} . Tingkat pemulihan dinamis meningkat dengan meningkatnya suhu dan dengan penurunan laju regangan. Pada laju regangan tinggi 10^{-3} s^{-1} , pelepasan panas selama deformasi memainkan peran penting dalam penurunan tegangan aliran, yang menyebabkan pelunakan termal yang signifikan. Pada laju regangan rendah 10^{-1} hingga 10^{-2} s^{-1} dengan temperatur 1050 hingga 1100 °C, penggabungan presipitasi dinamis, disertai dengan peningkatan pemulihan dinamis, menghasilkan penurunan tegangan aliran yang cukup besar.

Dengan membandingkan kurva dengan temperatur 1050 °C dan 1100 °C pada hasil percobaan ini, terlihat bahwa untuk laju regangan tertentu, tegangan aliran menurun seiring adanya peningkatan temperatur. Alasan di balik fenomena ini adalah yang pertama, peningkatan suhu mampu meningkatkan efek energi aktivasi yang mengakibatkan peningkatan energi kinetik dan penurunan tegangan geser kritis di antara atom. Kedua, efek pelunakan yang disebabkan oleh DRV juga meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Ketiga, beberapa evolusi tekstur dapat

terjadi misalnya, beberapa kisi berubah menjadi bentuk plastisitas yang menguntungkan. Keempat, tahanan geser antar kristal menurun secara signifikan yang menyebabkan mudahnya slip antar kristal, dan akibatnya, konsentrasi tegangan akibat deformasi yang tidak homogen antara butir yang berdekatan dilepaskan. Di sisi lain, untuk temperatur yang sama, tegangan aliran umumnya meningkat mengikuti peningkatan laju regangan. Dengan peningkatan laju regangan, waktu efek pelunakan berkurang karena deformasi yang lebih cepat, yang mengarah pada peningkatan ketahanan deformasi.

Kenaikan tegangan aliran dengan meningkatnya regangan dapat dikaitkan dengan penurunan laju proses restorasi dan peningkatan pekerjaan tingkat pengerasan. Selain itu, laju DRV juga menurun dengan meningkatnya laju regangan. Hal ini telah disimpulkan bahwa pembentukan inti DRX bergantung pada substruktur DRV, oleh karena itu regangan kritis untuk inisiasi DRX meningkat dengan meningkatnya laju regangan. Dari hasil kurva yang didapat juga menunjukkan bahwa kurva tegangan-regangan aliran sangat berpengaruh terhadap kondisi deformasi. Pada laju regangan tertentu, tegangan aliran meningkat seiring dengan menurunnya suhu deformasi dan sebaliknya. Pada suhu konstan, tegangan aliran meningkat seiring dengan meningkatnya laju regangan dimana kurva tegangan-regangan aliran memiliki dua tahap utama yaitu pengerasan kerja dan pelunakan dinamis dan kurva tegangan-regangan aliran memiliki titik-titik karakteristik yang mengindikasikan adanya perubahan mekanisme deformasi.

Dari kurva yang didapat terlihat bahwa tegangan aliran meningkat dengan cepat akibat pengerasan kerja hingga kondisi *steady-state* tercapai yang disebabkan oleh adanya mekanisme pelunakan (DRV). Kurva tegangan-regangan aliran ini digunakan untuk semua kondisi deformasi menunjukkan peningkatan adanya tegangan aliran yang cepat. Peningkatan tegangan aliran yang cepat menunjukkan adanya konsumsi energi yang tinggi untuk pembentukan dislokasi. Pengerasan kerja yang disebabkan oleh

adanya kepadatan dislokasi akumulatif menghalangi deformasi yang menghasilkan tegangan aliran yang lebih tinggi.

Peningkatan suhu dan penurunan laju regangan mengurangi ketahanan deformasi logam, dimana hal ini dikarenakan dalam kurva tegangan-regangan aliran, karakteristik pemulihan dinamis ditemukan dalam kondisi deformasi panas. Kurva tegangan-regangan aliran sesuai dengan karakteristik pemulihan dinamis yang khas pada suhu rendah dan laju regangan tinggi. Di sisi lain, kurva tegangan-regangan aliran memiliki karakteristik rekristalisasi dinamis yang jelas ketika kondisi deformasi adalah suhu tinggi dan laju regangan rendah.

Kurva aliran mencerminkan perubahan mikrostruktur yang terjadi selama deformasi, yang berkaitan erat dengan mekanisme deformasi yang mengendalikan tegangan aliran. Mekanisme deformasi seperti pengerasan kerja (WH) dan mekanisme pelunakan DRV bergantung pada parameter pembentukan. Dimana sampel baja yang digunakan dalam percobaan ini memiliki energi patahan susun yang tinggi, sehingga menunjukkan perilaku pelunakan aliran DRV. Alasannya adalah karena baja tersebut mudah tersusun kembali menjadi struktur sub-butir poligonal melalui slip silang dan dislokasi pendakian selama proses pembentukan. DRV menjadi lebih jelas ketika suhu meningkat karena dislokasi yang tinggi dan pergerakan batas butir terjadi.

Efek pengerasan kerja dan pelunakan dinamis telah dianggap saling bergantung karena fakta bahwa kekuatan pendorong untuk pelunakan dinamis disediakan oleh energi distorsi dari proses pengerasan kerja, sementara efek pelunakan membuat regangan terus menerus cenderung menginduksi pengerasan berikutnya. Terdapat hal dinamis antara pengerasan kerja yang dihasilkan dari reduplikasi dislokasi, dan pelunakan yang dihasilkan dari DRV. Pada daerah fase tunggal β dengan struktur kristal kubik berpusat tubuh (*body-centered cubic* atau BCC) pada suhu tinggi di atas β transisi, sistem slip basal adalah $\{110\}$, $\{112\}$, $\{123\}$, semuanya dengan vektor Burger tunggal yang terdefinisi dengan baik

sebesar $\langle 111 \rangle$. Dimana dalam hal ini, variasi *stacking fault energy* (SFE) dari berbagai jenis struktur kristal memainkan peran penting dalam deformasi metalik karena pengaruhnya terhadap mobilitas dan morfologi dislokasi, sehingga secara signifikan mempengaruhi perilaku pelunakan dinamisnya selama deformasi panas. Untuk fasa bcc β dengan SFE tinggi, penataan ulang dan eliminasi dislokasi yang cukup akan memusnahkan sebagian besar struktur dislokasi yang terbentuk pada deformasi plastis, yang menyebabkan kurangnya kekuatan pendorong untuk rekristalisasi dan akibatnya kesulitan yang lebih besar dalam terjadinya DRV. Dimana dalam konteks tersebut, proses DRV merupakan proses restorasi yang paling menonjol karena mobilitas non-konservatif dan laju slip silang yang tinggi yang memungkinkan penyusunan ulang dislokasi dan pembentukan subgrain.

Dimana apabila pemulihan mengurangi energi elastis internal hingga tingkat yang sangat besar, misalnya laju deformasi sangat rendah atau dalam kasus di mana dislokasi sangat bergerak dan karenanya dapat disusun ulang dengan sangat efisien, rekristalisasi bahkan dapat ditekan sepenuhnya. Dalam fase hcp α dengan SFE rendah (selip silang dan pemulihan dinamis dan statis terhambat), kepadatan dislokasi meningkat menjadi tinggi tingkat, dan akhirnya variasi kerapatan dislokasi lokal adalah cukup tinggi untuk memungkinkan terjadinya nukleasi butir-butir baru, diikuti oleh migrasi jarak jauh dari batas sudut tinggi (*high angle boundaries* atau HAB) dimana hal ini dapat berpengaruh terhadap kekuatan material baja yang dihasilkan.

Terlihat juga pada hasil kurva dengan peningkatan regangan lebih besar, kemiringan kurva tegangan-regangan aliran menurun hingga tegangan aliran mencapai kondisi tunak. Perilaku aliran ini menunjukkan bahwa pelunakan dinamis telah terjadi. Selama tahap ini, kurva aliran menunjukkan bahwa pengerasan kerja dan pemulihan dinamis berada dalam kesetimbangan, sehingga menghasilkan kerapatan dislokasi yang relatif konstan. Sehingga dari semua karakteristik kurva tegangan regangan aliran

yang dihasilkan dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi laju regangan dan temperatur deformasi, semakin cepat proses DRV dan hal ini mengindikasikan bahwa pemulihan dinamis pada percobaan ini didominasi oleh DRV pada setiap semua kondisi deformasi.

4.2.6 Parameter Zenner Hollomon

Parameter material yang penting untuk menjelaskan model kinetik DRV yang merupakan jenis mekanisme pelunakan pada percobaan ini dapat ditentukan dengan serangkaian analisis regresi pada data tegangan-regangan. Selain itu, analisis regresi pada parameter zenner hollomon diawali dengan proses pemecahan persamaan tipe Arrhenius yang dijelaskan pada persamaan 4.1. Dimana persamaan ini menggambarkan hubungan interaksional material logam antara tegangan aliran (σ), suhu (T) dan laju regangan ($\dot{\epsilon}$).

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma)\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots 4.1$$

Dimana A adalah faktor frekuensi konstan, $F(\sigma)$ adalah fungsi dari tegangan aliran yang ditentukan oleh persamaan 4.2.

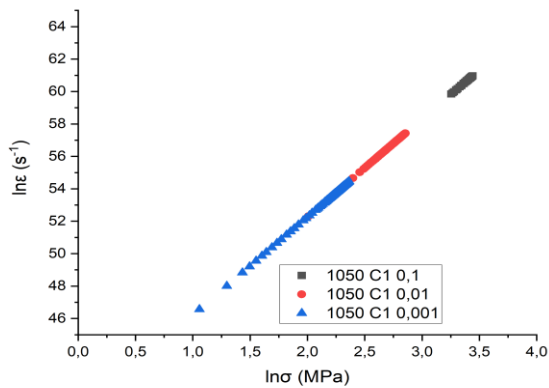
$$\begin{aligned} F(\sigma) &= \sigma^n = \alpha\sigma < 0.8 \\ F(\sigma) &= \exp(\beta\sigma) = \alpha\sigma > 1,2 \\ F(\sigma) &= [\sinh(\alpha\sigma)]^n = \text{untuk semua } \sigma \dots\dots\dots 4.2 \end{aligned}$$

Dimana σ adalah tegangan sebenarnya (MPa) untuk variabel lainnya seperti A, α , n' dan n termasuk kedalam konstanta material, dimana khusus untuk α didapat dari persamaan $\alpha = \beta/n'$.

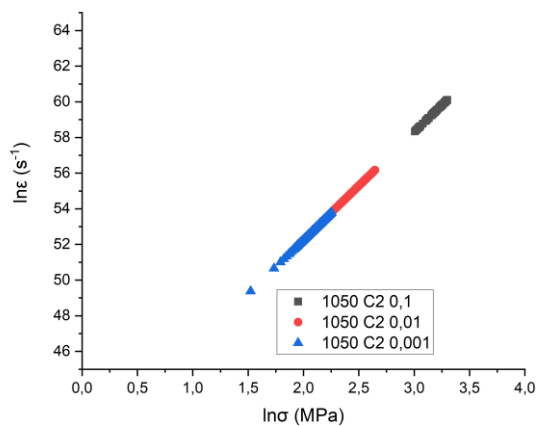
Efek suhu dan laju regangan pada perilaku deformasi biasanya dijelaskan oleh parameter Zener-Hollomon, dimana parameter ini mewakili adanya pengaruh suhu dengan laju regangan kompensasi. Selanjutnya, hukum hiperbolik dalam rumus Arrhenius akan diturunkan sehingga dapat memberikan perkiraan yang lebih baik dan menjelaskan hubungan antara

parameter Z dan tegangan aliran, dimana tegangan aliran (σ) juga dapat didefinisikan sebagai fungsi dari parameter Z , dimana parameter Z ini ditunjukkan pada persamaan 4.3 di mana $\dot{\epsilon}$ adalah laju regangan (s^{-1}), R adalah konstanta gas ($8,31 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$), T adalah temperatur (K) dan Q adalah energi aktivasi semu untuk deformasi (KJmol^{-1})

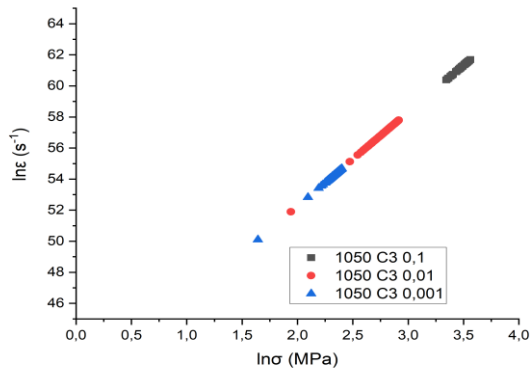
$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots 4.3$$



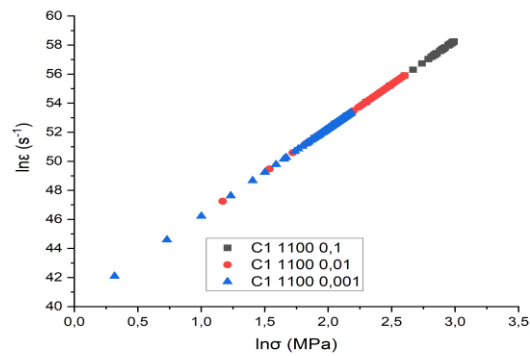
Gambar 4.8 Grafik $\ln \sigma$ vs $\ln \dot{\epsilon}$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



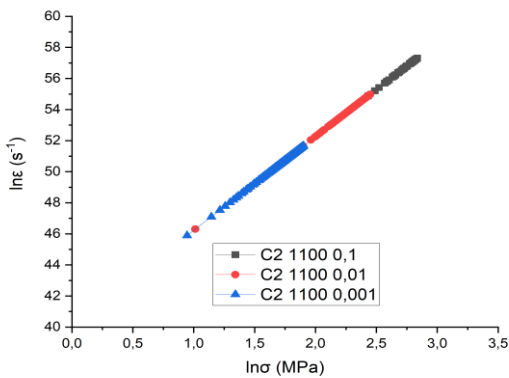
Gambar 4.9 Grafik $\ln \sigma$ vs $\ln \dot{\epsilon}$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



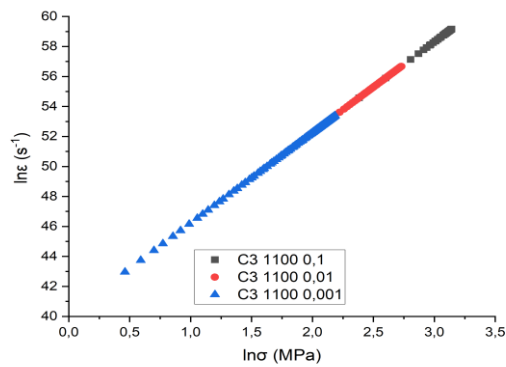
Gambar 4.10 Grafik $\ln \sigma$ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



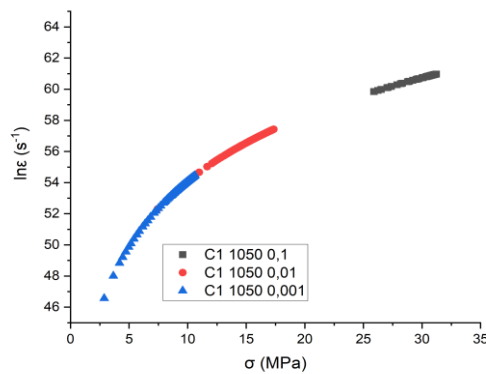
Gambar 4.11 Grafik $\ln \sigma$ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



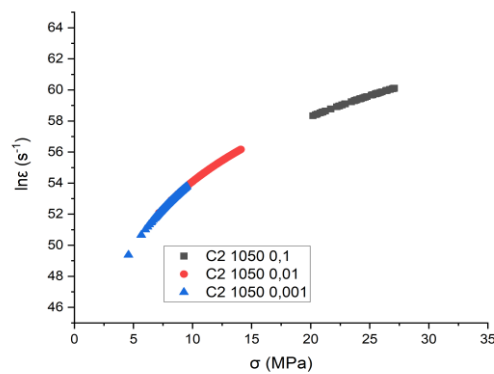
Gambar 4.12 Grafik $\ln \sigma$ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



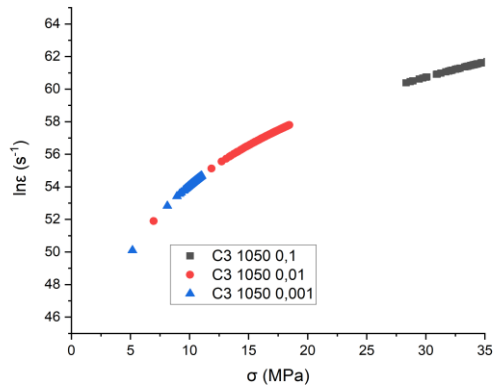
Gambar 4.13 Grafik $\ln \sigma$ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



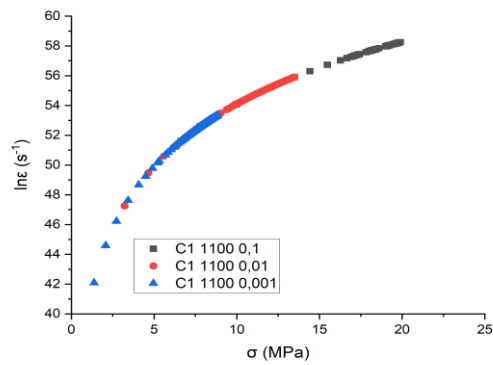
Gambar 4.14 Grafik σ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



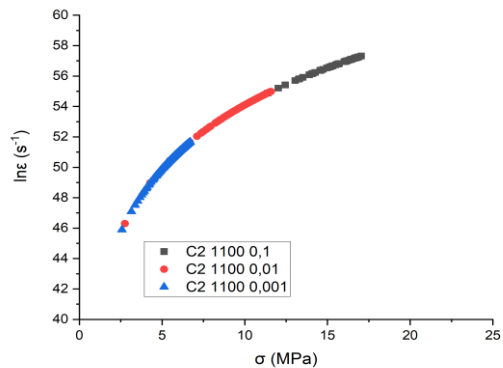
Gambar 4.15 Grafik σ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



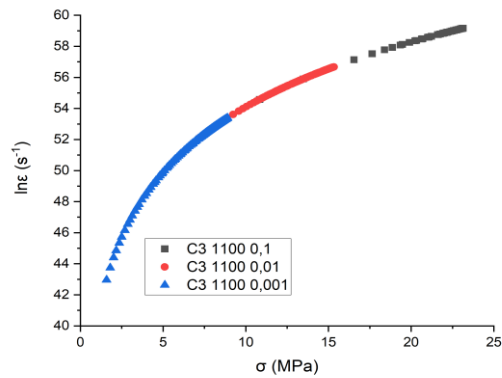
Gambar 4.16 Grafik σ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



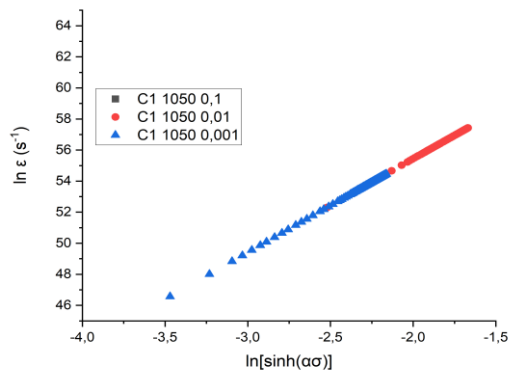
Gambar 4.17 Grafik σ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



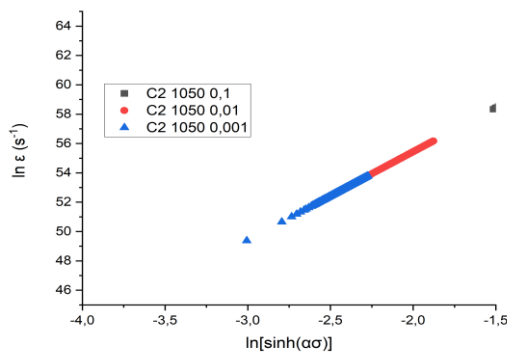
Gambar 4.18 Grafik σ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



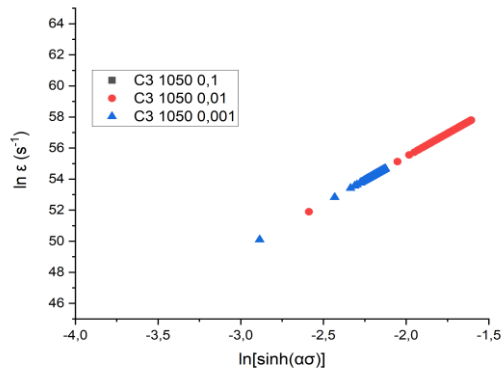
Gambar 4.19 Grafik σ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



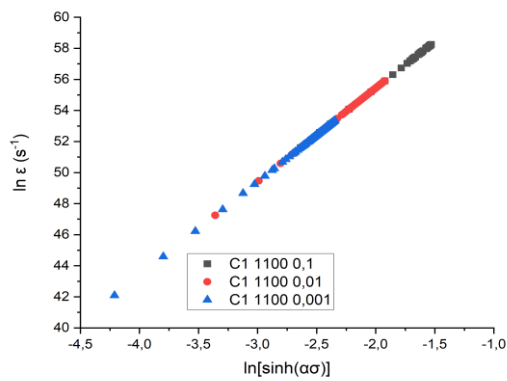
Gambar 4.20 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



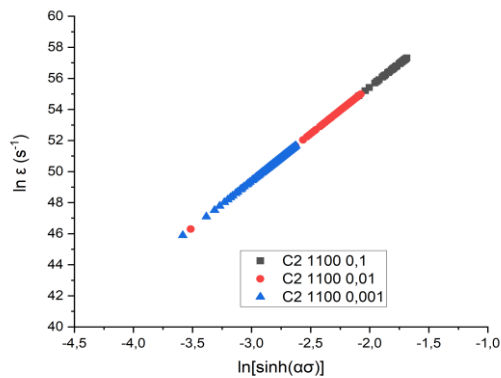
Gambar 4.21 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln \epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



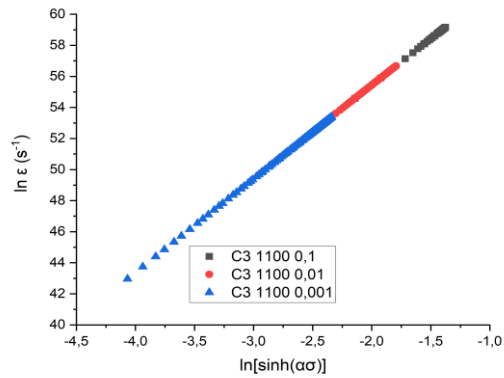
Gambar 4.22 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



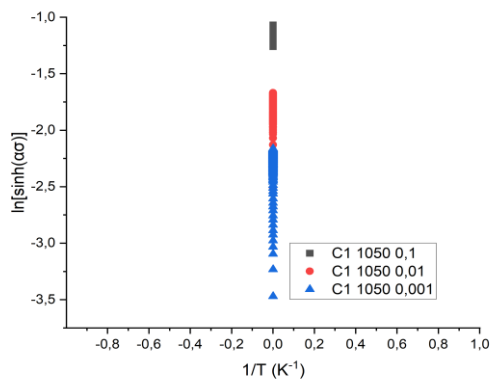
Gambar 4.23 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



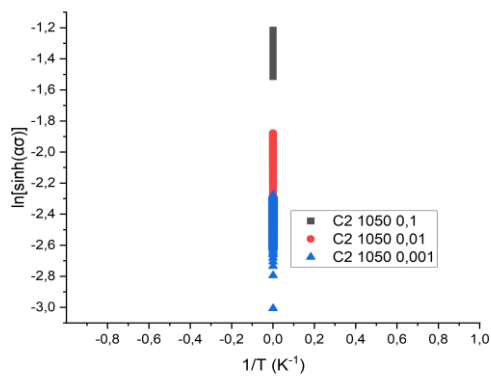
Gambar 4.24 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100°C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



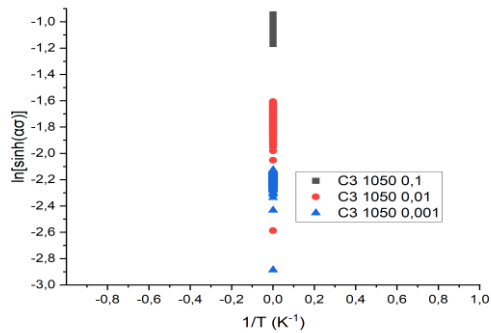
Gambar 4.25 Grafik $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs $\ln\epsilon$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



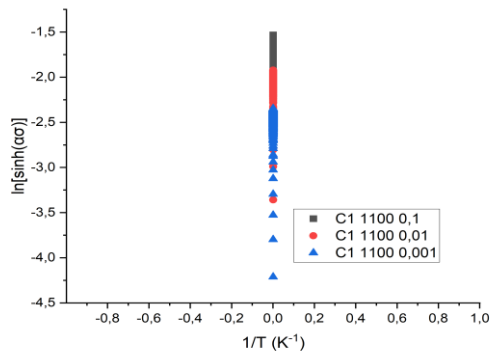
Gambar 4.26 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



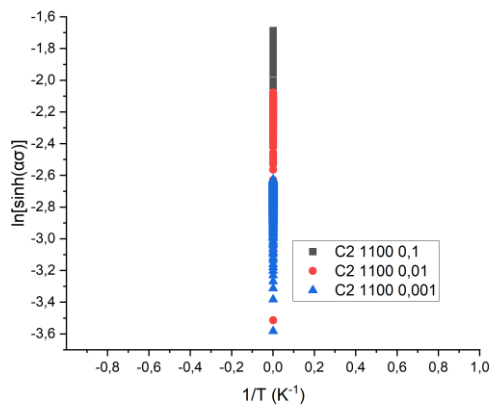
Gambar 4.27 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



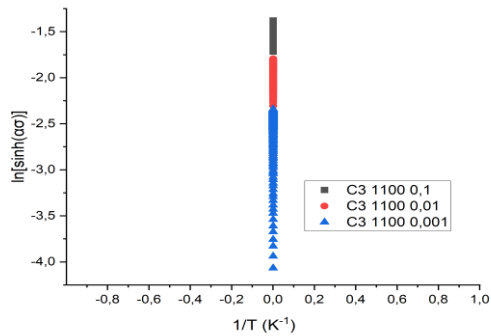
Gambar 4.28 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



Gambar 4.29 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



Gambar 4.30 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}



Gambar 4.31 Grafik $\frac{1}{T}$ vs $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1100 °C Pada *Strain Rate* (a) 10^{-1} s^{-1} (b) 10^{-2} s^{-1} (c) 10^{-3} s^{-1}

T (°C)	ΣQ (KJ.mol ⁻¹)	ΣZ	$\Sigma\sigma$ (Laju DRV MPa)
C1 1050 0,1	245,36921	$2,2598 \times 10^{26}$	443,45344
C1 1050 0,01	245,36699	$6,15721 \times 10^{24}$	376,75517
C1 1050 0,001	245,36188	$3,60076 \times 10^{23}$	324,23702
C2 1050 0,1	245,38941	$7,3324 \times 10^{25}$	422,61343
C2 1050 0,01	245,37984	$1,76416 \times 10^{24}$	353,62551
C2 1050 0,001	245,34933	$1,38564 \times 10^{23}$	306,59125
C3 1050 0,1	245,39674	$4,46147 \times 10^{26}$	1200,5264
C3 1050 0,01	245,37608	$9,95306 \times 10^{24}$	1130,10479
C3 1050 0,001	245,37605	$4,90085 \times 10^{23}$	1074,34445
C1 1100 0,1	245,38782	$1,24263 \times 10^{25}$	1134,21471
C1 1100 0,01	245,37114	$1,43231 \times 10^{24}$	1094,20495
C1 1100 0,001	245,36542	$1,01531 \times 10^{23}$	1045,19228
C2 1100 0,1	245,39017	$4,83136 \times 10^{24}$	1116,7205
C2 1100 0,01	245,37987	$6,08104 \times 10^{23}$	1078,3402
C2 1100 0,001	245,37922	$1,9425 \times 10^{22}$	1014,56637
C3 1100 0,1	245,39757	$3,53748 \times 10^{25}$	1253,58845
C3 1100 0,01	245,39627	$3,00015 \times 10^{24}$	1207,89704
C3 1100 0,001	245,39001	$1,1155 \times 10^{23}$	1266,93506

Tabel 4.3 Nilai Parameter Zenner Hollomon Pada Setiap Spesimen

Seperti yang dijelaskan pada Tabel 4.2 di atas, pada temperatur 1050 °C dan 1100 °C dengan laju regangan $0,1 - 0,001 \text{ s}^{-1}$, proses DRV bertindak sebagai mekanisme pelunakan yang dominan. Pada DRV, dislokasi atom hanya dapat berinteraksi satu sama lain dengan tujuan untuk mengurangi distorsi *cross-slipping* dan *climbing*. Akibatnya, tegangan aliran cenderung meningkat hingga tegangan jenuh yang didominasi oleh DRV mencapai keseimbangan. Tegangan jenuh (*flow stress*) didefinisikan sebagai efek pengerasan maksimum selama proses deformasi dengan mekanisme pelunakan DRV, dimana pada proses DRV meningkat dengan meningkatnya regangan. Hal ini terjadi karena berkurangnya energi yang tersimpan yang disebabkan oleh dominasi pengerasan kerja pada tahap awal deformasi, sehingga semakin tinggi laju regangan dan temperatur deformasi maka akan semakin cepat juga proses DRV.

Perilaku mulur pada suhu tinggi dapat memengaruhi sifat mekanis suatu bahan. Dimana dampak dari perilaku mulur ini dapat dilihat pada kurva tegangan-regangan aliran yang merupakan hasil dari penelitian ini dengan mekanisme pelunakan jenis DRV. Pada DRV, pada tahap awal deformasi, efek pengerasan kerja lebih jelas daripada efek pelunakan yang disebabkan oleh pemulihan dinamis. Efek pelunakan meningkat secara bertahap dengan meningkatnya deformasi, yang dapat menghalangi tren peningkatan tegangan dengan meningkatnya deformasi. Ketika efek pelunakan yang disebabkan oleh pemulihan dinamis mencapai keseimbangan dinamis dengan pengerasan kerja, nilai tegangan aliran secara umum tetap stabil.

Dengan meningkatnya deformasi, efek pelunakan yang disebabkan oleh DRV secara bertahap menjadi jelas, yang tercermin dalam penurunan laju pengerasan kerja. Ketika efek pelunakan dari pemulihan dinamis diimbangi dengan pengerasan kerja, tegangan aliran mendekati nilai konstan. Pada kurva aliran di atas menunjukkan bahwa tegangan aliran menurun dengan meningkatnya temperatur deformasi atau menurunnya laju regangan. Penurunan tegangan aliran dengan suhu deformasi dapat

dikaitkan dengan peningkatan laju proses restorasi dan penurunan laju pengerasan regangan. Karena pembentukan inti DRV menjadi lebih mudah pada temperatur deformasi yang lebih tinggi, maka regangan kritis untuk inisiasi DRV menurun. Selain itu, mobilitas batas butir meningkat dengan meningkatnya suhu deformasi dan karenanya laju DRV meningkat. Oleh karena itu, baik regangan puncak maupun kondisi tunak menurun dengan temperatur deformasi. Peningkatan tegangan aliran dengan laju regangan dapat dikaitkan dengan penurunan laju proses restorasi dan peningkatan laju pengerasan regangan.

Ketika dislokasi terus meningkat, *work hardening* terus menguat. Ketika dislokasi yang meningkat melebihi nilai kritis, DRV akan dihasilkan, menghasilkan efek pelunakan. Ketika regangan terus meningkat, derajat DRV terus meningkat. Ketika efek pelunakan meningkat, tegangan berkurang. Tegangan menurun secara signifikan ketika deformasi T meningkat dan ϵ' menurun. Temperatur yang rendah dapat mempercepat migrasi batas butir, meningkatkan laju difusi kekosongan, dan mempercepat migrasi batas butir. Proses-proses ini memungkinkan peningkatan DRV. Efek pelunakan diperkuat, dan tegangan pun berkurang. Kondisi ini memberikan lebih banyak waktu bagi butiran rekristalisasi dinamis untuk tumbuh. Penguatan DRV juga melemahkan efek pengerasan kerja yang menyebabkan tegangan aliran berubah dengan T dan ϵ' .

Pada tahap awal deformasi, tegangan aliran meningkat dengan cepat akibat pengerasan kerja hingga kondisi *steady-state* tercapai yang disebabkan oleh mekanisme pelunakan seperti *dynamic recovery* (DRV). Kurva tegangan-regangan aliran untuk semua kondisi deformasi menunjukkan peningkatan tegangan aliran yang cepat. Peningkatan tegangan aliran yang cepat menunjukkan konsumsi energi yang tinggi untuk pembentukan dislokasi. Pengerasan kerja yang disebabkan oleh kepadatan dislokasi akumulatif menghalangi deformasi yang menghasilkan tegangan aliran yang lebih tinggi. Peningkatan tegangan aliran yang cepat pada tahap awal deformasi disebabkan oleh pembentukan dan penggandaan dislokasi.

Pengerasan kerja merupakan mekanisme deformasi yang dominan selama deformasi awal. Dengan peningkatan regangan, kemiringan kurva tegangan-regangan aliran naik hingga tegangan aliran mencapai kondisi tunak. Perilaku aliran ini menunjukkan bahwa pelunakan dinamis telah terjadi. Selama tahap ini, kurva aliran menunjukkan bahwa pengerasan kerja dan pemulihan dinamis berada dalam kesetimbangan, sehingga menghasilkan kerapatan dislokasi yang relatif konstan. Perilaku karakteristik kurva tegangan regangan aliran ini menunjukkan bahwa mekanisme pelunakan yang dominan adalah pemulihan dinamis (DRV). Kurva tegangan-regangan aliran juga menunjukkan bahwa proses deformasi dipengaruhi oleh pengerasan kerja dan pemulihan dinamis (pelunakan). Tegangan aliran menurun dengan peningkatan suhu deformasi sehingga terjadi penurunan laju regangan.

Pada temperatur deformasi dan laju regangan yang sama pada Tabel 4.2 tegangan aliran meningkat seiring dengan meningkatnya nilai Q , yang berarti bahwa material dengan nilai Q yang lebih rendah dapat lebih mudah terdeformasi dengan laju yang lebih rendah. Nilai Q yang diperoleh dalam penelitian ini lebih tinggi, hal ini dikarenakan adanya kandungan Si yang dapat meningkatkan energi patahan susun baja. Energi yang lebih tinggi mempengaruhi disosiasi dislokasi, sehingga mempengaruhi kemampuan slip silang dislokasi. Energi aktivasi yang lebih tinggi juga dapat disebabkan oleh nilai eksponen tegangan yang tinggi. Eksponen tegangan dipengaruhi secara signifikan oleh peningkatan tegangan aliran. Saat tegangan aliran meningkat, energi aktivasi meningkat.

Adanya kandungan Si menghambat gerakan dislokasi, sehingga meningkatkan eksponen tegangan. Peningkatan eksponen tegangan meningkatkan energi aktivasi. Oleh karena itu, hal ini menyebabkan terbentuknya banyak endapan yang mencegah pergerakan dislokasi selama deformasi yang menghasilkan energi aktivasi yang lebih tinggi. Adanya penambahan Si mengurangi energi aktivasi karena mereka meningkatkan difusi sementara elemen paduan substitusi meningkatkan Q .

Peningkatan jumlah elemen paduan substitusi menyebabkan peningkatan energi aktivasi karena akumulasi energi yang tersimpan secara internal. Variasi energi aktivasi dapat disebabkan oleh efek elemen paduan, dimana pada penelitian ini Si digunakan sebagai elemen paduan pada baja yang digunakan pada sampel penelitian ini, dimana Si ini berkontribusi pada nilai Q yang tinggi.

Faktor Zener-Hollomon dapat digunakan untuk merepresentasikan efek kombinasi suhu dan laju regangan pada perilaku deformasi pada suhu tinggi dan peningkatan suhu dan penurunan laju regangan mengurangi ketahanan deformasi logam. Sehingga dapat disimpulkan bahwa koefisien pemulihan dinamis meningkat dengan meningkatnya parameter Zener-Hollomon, dimana dalam proses DRV meningkat dimana tegangan meningkat seiring dengan regangan.

4.2.7 Standar ASTM

Standar ASTM yang digunakan untuk pembuatan transformator atau trafo yang terbuat dari baja silikon adalah menggunakan ASTM A 876. Dimana untuk ASTM A 876 baja ini digunakan terutama pada inti transformator yang beroperasi pada suhu sedang hingga tinggi dengan nilai induksi pada frekuensi daya komersial sekitar 50 dan 60 Hz. Baja yang digunakan yaitu baja dengan kandungan silikon kira-kira sampai 3,2 % dengan nilai kehilangan inti rendah dan permeabilitas tinggi. Untuk nilai permeabilitas, permeabilitas pada semua induksi harus setinggi mungkin. Pengendalian kualitas tingkatan ini biasanya didasarkan pada pengukuran permeabilitas puncak relatif (μ_p) dan kekuatan medan magnet ac puncak sebesar 796 A/m. Untuk nilai berorientasi butir konvensional, nilai μ_p relatif pada 796 A/m umumnya di atas 1800 dan untuk kadar permeabilitas tinggi, biasanya di atas nilai 1880 dengan dimensi ukurannya yaitu 0.03-16 x 1200 mm.

Pemilihan kedua temperatur yaitu 1050 °C dan 1100°C adalah untuk mengetahui pengaruh kenaikan temperatur terhadap kinerja baja

listrik 3% Si dan didapatkan hasil bahwa kenaikan temperatur memberikan efek peningkatan kekuatan mekanik pada baja, dimana pada temperatur 1100 °C tidak ditemukan retakan pada hasil akhir baja sehingga hal ini tidak akan menghambat proses produksi dan akan meningkatkan kualitas dari baja itu sendiri. Perbandingan kualitas baja antara baja dari temperatur 700 °C – 1100 °C disimpulkan bahwa kualitas baja yang baik yaitu baja dengan temperatur tertinggi yaitu 1100 °C. Hal ini didukung dengan aspek nilai laju DRV, dimana antara temperatur 700 – 1100 °C memiliki laju DRV yang berbeda beda dan temperatur 1100 °C memiliki laju DRV yang paling tinggi, hal inilah yang mendukung kesimpulan bahwa baja temperatur 1100 °C memiliki sifat mekanik yang paling baik karena laju DRV yang tinggi dapat meningkatkan kualitas sifat mekanik pada baja khususnya pada nilai kekerasan baja yang meningkat.

Selanjutnya dilihat dari sampel dengan kandungan Si tertinggi ditemukan pada spesimen C2 dan kandungan Si terendah ditemukan pada spesimen C1. Kandungan Si ini berpengaruh terhadap kekuatan baja, dimana spesimen C2 memiliki nilai kekuatan yang terendah dikarenakan memiliki kandungan Si yang paling tinggi, hal ini dikarenakan kandungan Si yang tinggi dapat mendorong terjadinya fasa alfa ferit yang akan menurunkan nilai kekuatan dari suatu material dan untuk alasan lainnya adalah karena spesimen C2 pada temperatur 1050 °C memiliki kandungan S paling tinggi diantara 3 spesimen lainnya, hal ini dikarenakan S dapat bergabung dengan Mn menjadi MnS, dimana apabila kandungan MnS dalam suatu spesimen tinggi maka akan meningkatkan keretakan pada baja tersebut dan karena alasan inilah dapat disimpulkan bahwa spesimen dengan kekuatan terendah atau spesimen dengan sifat mekanik yang kurang baik adalah spesimen C2 dan untuk spesimen yang memiliki kekuatan tertinggi dan memiliki sifat mekanik yang sangat baik adalah spesimen C3 1100 °C karena kandungan Si yang paling rendah diantara 3 spesimen lainnya dan memiliki nilai DRV yang terbesar diantara 3 spesimen lainnya hal ini dikarenakan nilai DRV yang tinggi akan tidak akan menghasilkan

pertumbuhan butir baru sehingga sifat mekanik dari baja tidak akan mengalami penurunan.

4.2.8 Test Machine Hot Tensile INSTRON 4507

Hot tensile test dilakukan pada 3 spesimen (C₁, C₂ dan C₃) dengan penerapan nilai regangan yang berbeda, yaitu 10⁻¹ s⁻¹, 10⁻² s⁻¹ dan 10⁻³ s⁻¹. Dengan temperatur yang digunakan di test ini adalah 1050 °C dan 1100 °C. Penelitian ini dilakukan pada 3 spesimen yang berbeda dimana jenis test ini dilakukan untuk mengevaluasi keuletan baja pada temperatur tinggi. Baja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja dengan kandungan 3% Si dengan komposisi kimia lain yang dijelaskan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.4 Komposisi Sampel Baja Pada *Hot Tensile Test*

Spe cim en	Content of Elements, wt. %											
	C	Mn	Si	S	Cr	Cu	Ti	Al	Nb	N	O	Fe
C ₁	0,0	0,2	3,0	0,0	0,01	0,04	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	96,0
	275	898	940	057	573	892	063	136	024	079	459	014
	6	3	4	8		1		3	6		9	8
C ₂	0,0	0,2	3,1	0,0	0,03	0,48	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,8
	262	626	935	077	051	098	020	207	023	078	778	875
	8	4	5	5			3	6	5	2	0	3
C ₃	0,0	0,2	3,1	0,0	0,00	0,48	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,9
	437	624	59	066	309	105	02	227	019	067	537	289
	3			8	8			5	8		9	4

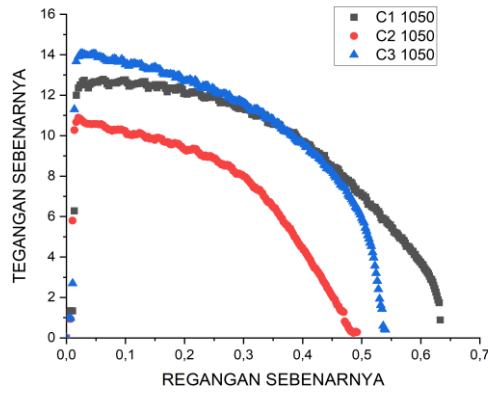
Baja dengan kandungan 3% Si diproduksi di laboratorium pengecoran lewat proses *Electro Slag Remelting (ESR)*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan mesin uji instron 4507 yang dilengkapi dengan dilatometer BAHR DIL 805A/D. Mesin ini dapat beroperasi dalam dua mode yang berbeda yaitu mode dilatometer dan mode deformasi. Mesin

ini juga dilengkapi dengan batang penekan silika dan alumina, atmosfer Ar dan sistem pendingin He.

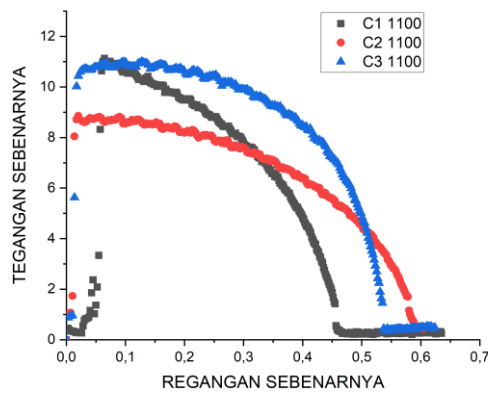
Kurva dilatasi diperoleh dengan menggunakan spesimen silinder padat, menggunakan termokopel tipe-K yang dilas di bagian tengah spesimen. Peralatan yang beroperasi dalam mode dilatometer ini memiliki suhu operasi maksimum 1500 °C, pemanasan induksi (koil berpendingin dengan enam koil berpenampang persegi, atmosfer lembam, vakum atau gas, dilatasi dengan resolusi suhu 0,05°C dan 0,05µm, laju pemanasan hingga 4000 Ks⁻¹ dengan laju pendinginan 2500 Ks⁻¹, dan spesimen silinder padat berongga dengan panjang Ø4 mm dan 10 mm. Semua peralatan beroperasi secara digital dan dengan sistem prosesornya sendiri untuk mengontrol generator frekuensi tinggi (HF), sistem hidrolis, perekaman data pengukuran, suplai gas, unit vakum dan perangkat keselamatan. Selain itu, pengujian ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak komersial FactSageT dengan temperatur transformasi pada kondisi ekuilibrium yang telah ditentukan untuk semua paduan. Perangkat ini digunakan karena perangkat lunak ini memiliki basis data yang diperbarui dan ekstensif, sehingga memungkinkan bahwa hasil penelitian ini lebih akurat dan tepat daripada yang ditentukan dengan menggunakan ekspresi aljabar.

4.2.9 Hasil Penelitian *Hot Tensile INSTRON 4507*

Dibawah ini adalah grafik dari hasil penelitian *hot tensile test* dengan 3 spesimen yang berbeda yaitu spesimen (C₁, C₂ dan C₃) dengan penerapan nilai regangan yang berbeda yaitu 10⁻¹ s⁻¹, 10⁻² s⁻¹ dan 10⁻³ s⁻¹. Dengan temperatur yang digunakan di test ini adalah 1050 °C dan 1100 °C. Dengan temperatur yang digunakan adalah 1050 °C dan 1100 °C yang diaplikasikan pada 3 spesimen yang berbeda. Grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.32 dan Gambar 4.33.



Gambar 4.32 Grafik Hasil *Hot Tensile Test* Pada Temperatur 1050 °C Pada Spesimen (a) C1 (b) C2 (c) C3



Gambar 4.33 Grafik Hasil *Hot Tensile Test* Pada Temperatur 1100 °C Pada Spesimen (a) C1 (b) C2 (c) C3

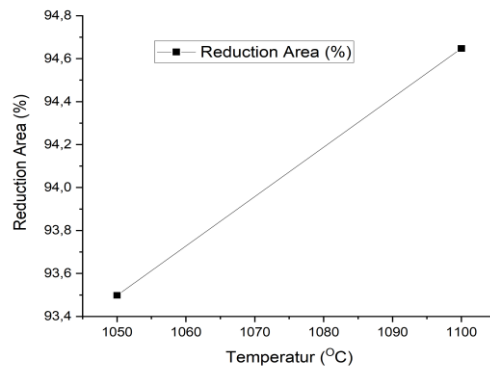
Jenis tegangan yang terjadi pada kurva regangan dan tegangan sebenarnya hasil dari *hot tensile test* adalah tegangan tarik. Tegangan ini menggambarkan keadaan di mana gaya yang diterapkan cenderung memanjangkan material sepanjang sumbu gaya yang diterapkan. Hal ini dapat direpresentasikan secara numerik sebagai rasio besarnya gaya yang diterapkan terhadap luas penampang. Ketika suatu gaya diterapkan pada suatu bahan yang cenderung menarik atom-atom bahan tersebut, maka bahan tersebut akan menolak, karena ikatan antar atom begitu kuat.

Tegangan tarik disebabkan oleh gerakan dislokasi atom-atom dalam struktur mikro suatu material ketika suatu gaya diterapkan. Dislokasi biasanya terjadi searah dengan gaya yang diberikan. Gaya regangan total tersebar ke seluruh atom pada suatu bidang penampang, yang kesemuanya melawan gaya yang diberikan. Gaya regangan per satuan luas penampang disebut dengan “tegangan tarik”. Tingkat tegangan tarik yang menyebabkan terjadinya deformasi plastis bervariasi tergantung pada komposisi kimia bahan, detail mikrostruktur, dan kondisi lingkungan seperti suhu. Faktor-faktor ini sebagian besar mengendalikan sifat mekanik material.

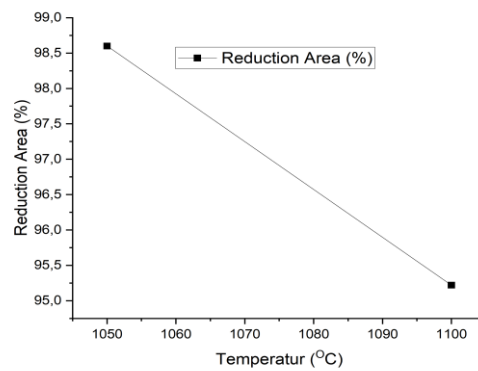
Meningkatnya suhu membuat deformasi meningkat sehingga membuat ukuran butir dalam material menjadi lebih esar sehingga aktivitas molekul meningkat, akibatnya gaya kohesif molekul menurun dan kerapatan dislokasi menurun dan kerapatan dislokasi menurun sehingga menyebabkan tegangan menurun. Pada suhu yang tinggi mobilitas atom dan gerakan dislokasi akan lebih besar didalam material sehingga material mudah mengalami deformasi yang mengakibatkan grafik regangan tegangan menurun sehingga dapat disimpulkan bahwa dari grafik hasil hot tensile test dengan meningkatnya suhu akan menurunkan nilai tegangan dan regangan sebenarnya.

Tabel 4.5 Hasil Penelitian *Hot Tensile Test* Pada Setiap Spesimen

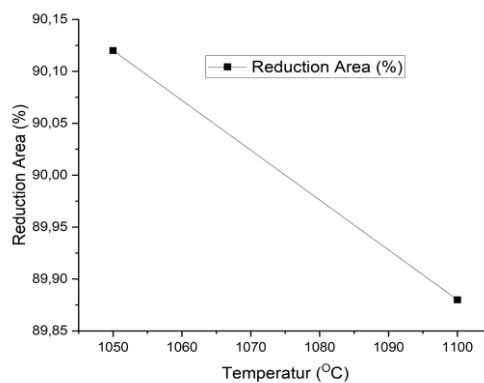
Temperatur (°C)	D0	(D0) ²	A0	A1	%RA	UTS (MPa)
C1 1050	8,21	67,404	52,939	3,442	93,4982	5404,25367
C1 1100	8,18	66,912	52,553	2,813	94,6473	2917,30475
C2 1050	8,19	67,0761	52,68	0,735	98,60	4515,68123
C2 1100	8,17	66,7489	52,42	2,508	95,22	3723,8121
C3 1050	8,23	67,7329	53,20	5,254	90,12	6350,93806
C3 1100	8,19	67,0761	52,68	5,33	89,88	4394,03027



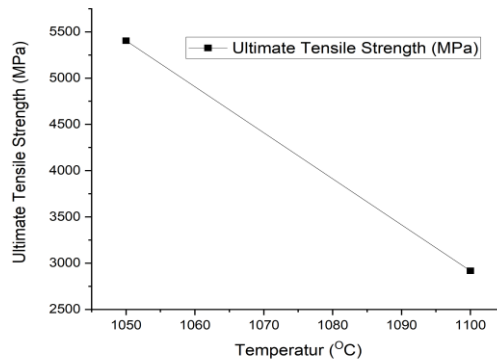
Gambar 4.34 Grafik Temperatur vs *Reduction Area* Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C



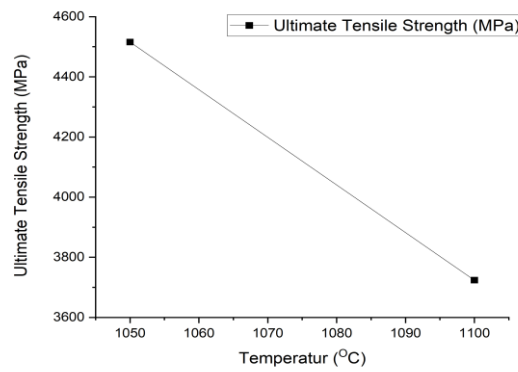
Gambar 4.35 Grafik Temperatur vs *Reduction Area* Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C



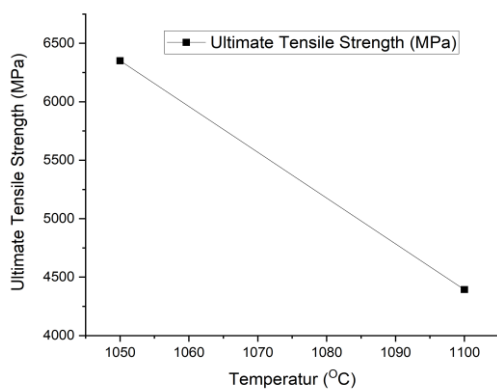
Gambar 4.36 Grafik Temperatur vs *Reduction Area* Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C



Gambar 4.37 Grafik Temperatur vs *Ultimate Tensile Test* Pada Spesimen C1 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C



Gambar 4.38 Grafik Temperatur vs *Ultimate Tensile Test* Pada Spesimen C2 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C



Gambar 4.39 Grafik Temperatur vs *Ultimate Tensile Test* Pada Spesimen C3 Dengan Temperatur 1050 °C dan 1100 °C

Baja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja dengan kandungan silikon tinggi, yaitu yang mengandung 3,0 % berat silicon. Dimana baja ini diproduksi melalui pengerolan panas. Salah satu aplikasinya lembaran baja silikon tinggi yang dihasilkan dari proses ini berfungsi sebagai bahan penting untuk meningkatkan efisiensi transformator dan motor. Alasannya adalah karena memiliki medan magnet yang sangat efisien ketika dialiri aliran listrik.

Uji tarik yang dilakukan pada percobaan ini dilakukan dengan cara memberikan gaya atau tegangan tarik kepada material, dimana tujuan dari percobaan ini adalah untuk mengetahui atau mendeteksi kekuatan dari suatu material. Tegangan tarik yang digunakan adalah tegangan aktual eksternal atau perpanjangan sumbu benda uji. Uji tarik dilakukan dengan cara penarikan uji dengan gaya tarik secara terus menerus, sehingga material dihitung perpajangannya terus menerus meningkat dan teratur sampai putus, dengan tujuan menentukan nilai tarik. Untuk mengetahui kekuatan tarik suatu bahan dalam pembebanan tarik, garis gaya harus berhimpit dengan garis sumbu bahan sehingga pembebanan terjadi beban tarik lurus, dimana hasil uji tarik ini menggambarkan hubungan antara tegangan regangan yang terjadi selama proses uji tarik dilakukan.

Dari grafik diatas terlihat secara umum tegangan aliran meningkat hingga maksimum pada awal regangan sebelum turun ke tingkat kondisi tunak. Daktilitas panas dievaluasi dengan mengukur pengurangan luas area (RA) setelah pengujian tarik statis pada suhu 1050 °C hingga 1100 °C. Terlihat pada gambar diatas, nilai RA sampel pada suhu 1050 °C lebih tinggi dibandingkan dengan sampel pada suhu 1100 °C. Hasil daktilitas panas yang ditentukan oleh pengurangan luas untuk suhu pengujian tertentu dari 1050 °C menjadi 1200 °C terlihat bahwa suhu austenitisasi mempengaruhi pergeseran kisaran suhu penurunan plastisitas.

Penambahan silikon memiliki dua efek yang bertentangan pada sifat mekanik baja. Silikon dapat meningkatkan kekuatan dan ketangguhan karena penyempurnaan ukuran butir dan efek pengerasan larutannya. Pada

saat yang sama. Si adalah elemen pembentuk ferit dan penambahan silikon yang berlebihan akan mengurangi zona fase tunggal austenit dan membentuk δ -ferit dengan mudah di proses austenitisasi dan selanjutnya mempengaruhi struktur mikro dan sifat mekanik baja.

Dengan meningkatnya suhu, kekuatan tarik akhir (UTS) dan kekerasan sedikit menurun, sedangkan pengurangan luas dan perpanjangan meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa keuletan meningkat seiring dengan suhu yang tinggi. Kandungan Si dapat meningkatkan kekuatan, keuletan, kekakuan baja percobaan, namun tidak berpengaruh signifikan terhadap ketangguhan. Pada saat yang sama, UTS mengalami penurunan yang signifikan. Hal ini terkait dengan agregasi dan pengerasan karbida sekunder serta dekomposisi martensit yang disebabkan oleh peningkatan suhu.

Pada kisaran suhu 1050°C hingga sekitar 1100°C , sifat mampu bentuk dipengaruhi secara negatif oleh pengendapan partikel karbida pada batas butir. Ketika suhu naik hingga 1100°C , partikel partikel ini terlarut mengakibatkan peningkatan sifat mampu bentuk. Peningkatan suhu lebih lanjut mengakibatkan penurunan kemampuan mampu bentuk yang relatif tajam yang disebabkan oleh panas berlebih pada material. Ketika suhu semakin meningkat, kemampuan mampu bentuk menurun tajam.

Kandungan silikon yang lebih tinggi, yang dilarutkan dalam austenit, secara bertahap menurunkan sifat mampu bentuk sepanjang suhu pembentukan panas, dan efek ini terutama terlihat pada kandungan Si di atas 1%. Silikon adalah salah satu elemen terpenting dari baja silikon non-orientasi, yang secara efektif dapat mengurangi kehilangan besi. Namun, peningkatan kandungan Si menyebabkan peningkatan distorsi kisi dan fase yang teratur, yang pada gilirannya menghambat gerakan dislokasi. Oleh karena itu, ketika kandungan Si meningkat, rekristalisasi dinamis baja silikon non-orientasi bermutu tinggi terhambat, rasio rekristalisasi lapisan permukaan lembaran canai panas menurun dan ukuran rekristalisasi menurun, selain itu dengan peningkatan dalam kandungan Si, energi aktivasi deformasi panas dari lembaran canai panas meningkat.

Si menghambat rekristalisasi dan meningkatkan ketahanan deformasi. Ketika kandungan Si menurun, rasio rekristalisasi, ukuran butir rekristalisasi, dan intensitas tekstur Goss pada lapisan permukaan lembaran canai panas baja silikon nonberorientasi bermutu tinggi meningkat, tetapi intensitas tekstur serat α pada lapisan tengah berkurang. Kandungan Si yang lebih rendah dan suhu normalisasi yang lebih tinggi pada lembaran canai dingin memiliki lebih banyak pita geser yang berinti lebih awal, tetapi proses rekristalisasi lebih lambat, sehingga menghasilkan distribusi ukuran butiran yang lebih heterogen pada lembaran anil akhir. Pada semua suhu pengujian, saat laju regangan menurun, daktilitas panas juga menurun karena mekanisme pertumbuhan rongga mendominasi kekosongan nukleasi, memberikan waktu bagi retakan berinti untuk tumbuh.

Pada suhu yang sangat tinggi, 1050-1100 °C, baja mempunyai keuletan yang sangat tinggi, mendekati 100% RA, karena tidak ada hambatan pada proses deformasi dan aliran difusi tinggi. Pada temperatur 1050-1100 °C, ketika laju regangan menurun, keuletan panas juga menurun karena mekanisme pertumbuhan rongga lebih mendominasi daripada nukleasi rongga, memberikan waktu bagi retakan untuk tumbuh, yang pada akhirnya menyebabkan kegagalan cata strophic.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisa dan pembahasan terhadap hasil penelitian yang sudah didapatkan, maka dapat ditarik kesimpulan akhir sebagai berikut:

1. Jenis pelunakan pada temperatur 1050 °C dan 1100 °C adalah DRV, dimana DRV meningkat dengan meningkatnya suhu namun apabila DRV meningkat maka laju regangan akan menurun. Penyelesaian persamaan matematika untuk parameter zenner hollomon yang digunakan pada penelitian ini adalah

$$\varepsilon = AF(\sigma)exp\left(-\frac{Q}{RT}\right).....(5.1)$$

$$F(\sigma) = \sigma^{n'}(5.2)$$

$$\varepsilon = 2,881 \times 10^{-17} \times \sigma^{6,04213} \left(exp\left(\frac{Q}{8,31 \times T}\right) \right).....(5.3)$$

$$Z = \varepsilon exp\left(\frac{Q}{RT}\right).....(5.4)$$

$$Z = \varepsilon exp\left(\frac{Q}{8,31 \times T}\right).....(5.5)$$

2. Nilai DRV tertinggi didapatkan oleh spesimen C3 1100 0,001 dengan nilai 1266,93506 MPa dan nilai DRV terendah diapatkan oleh spesimen C2 1050 0,001 dengan nilai 306,59125 MPa. Nilai parameter Z tertinggi yang didapatkan dari penelitian ini adalah parameter Z yang didapatkan oleh spesimen C3 1050 0,1 dengan nilai 4,46147 x 10²⁶ dan nilai parameter Z terendah diapatkan oleh spesimen C1 1050 0,1 dengan nilai 1,24263 x 10²⁵ dan nilai Q tertinggi yang didapatkan dari penelitian ini adalah didapatkan oleh spesimen dengan temperatur 1050 °C dengan nilai 245,37395 KJ/mol dan nilai Q terendah diapatkan oleh spesimen dengan temperatur 1100 °C dengan nilai 245,37128 KJ/mol.
3. Sampel dengan kandungan Si tertinggi ditemukan pada spesimen C2 dan kandungan Si terendah ditemukan pada spesimen C1. Kandungan Si ini berpengaruh terhadap kekuatan baja, dimana spesimen C2 memiliki nilai

kekuatan yang terendah dikarenakan memiliki kandungan Si yang paling tinggi, hal ini dikarenakan kandungan Si yang tinggi dapat mendorong terjadinya fasa alfa ferit yang akan menurunkan nilai kekuatan dari suatu material dan untuk alasan lainnya adalah karena spesimen C2 pada temperatur 1050 °C memiliki kandungan S paling tinggi diantara 3 spesimen lainnya, hal ini dikarenakan S dapat bergabung dengan Mn menjadi MnS, dimana apabila kandungan MnS dalam suatu spesimen tinggi maka akan meningkatkan keretakan pada baja tersebut dan karena alasan inilah dapat disimpulkan bahwa spesimen dengan kekuatan terendah atau spesimen dengan sifat mekanik yang kurang baik adalah spesimen C2 dan untuk spesimen yang memiliki kekuatan tertinggi dan memiliki sifat mekanik yang sangat baik adalah spesimen C3 1100 °C karena kandungan Si yang paling rendah diantara 3 spesimen lainnya dan memiliki nilai DRV yang terbesar diantara 3 spesimen lainnya hal ini dikarenakan nilai DRV yang tinggi akan tidak akan menghasilkan pertumbuhan butir baru sehingga sifat mekanik dari baja tidak akan mengalami penurunan.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya dengan hasil yang lebih optimal adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pengujian dengan menggunakan sampel baja dengan kandungan Si lebih besar dari 3% atau dengan kandungan Si lebih kecil dari 3%
2. Melakukan pengujian dengan menggunakan variasi temperatur selain temperatur 1050 °C dan 1100 °C
3. Melakukan pengujian dengan menggunakan variasi nilai regangan selain $0,1 \text{ s}^{-1}$, $0,01 \text{ s}^{-1}$ dan $0,001 \text{ s}^{-1}$

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadabadi, R. M., Naderi, M., Mohandesi, J. A., & Cabrera, J. M. (2017). The Effect of Hot Deformation Parameters on Grain Size Refinement in a Martensitic Stainless Steel. *IJMF Iranian Journal of Materials Forming*, 4(2), 25–36.
- Akbari, Z., Mirzadeh, H., & Cabrera, J. M. (2015). A simple constitutive model for predicting flow stress of medium carbon microalloyed steel during hotdeformation. *Materials and Design*, 77, 126–131.
- Akca, E., & Trgo, E. (2015). Metallographic Procedures and Analysis – A review. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 3(2).
<https://doi.org/10.21533/pen.v3i2.51>
- Akta, S., Richardson, G. J., & Sellars, C. M. (2005). Hot deformation and recrystallization of 3% silicon steel part 3: Effect of hot deformation variables on static recrystallization. *ISIJ International*, 45(11), 1686–1695.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.1686>
- Al Omar, A., Chenaoui, A., Dkiouak, R., Cabrera, J. M., & Prado, J. M. (2006). Aproximación al control de la microestructura de dos aceros microaleados con contenido medio de carbono en condiciones de conformado en caliente. *Revista de Metalurgia (Madrid)*, 42(2), 103–112.
- Azarbarmas, M., Aghaie-Khafri, M., Cabrera, J. M., & Calvo, J. (2016a). Dynamic recrystallization mechanisms and twinning evolution during hot deformation of Inconel 718. *Materials Science and Engineering: A*, 678, 137–152.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.100>
- Azarbarmas, M., Aghaie-Khafri, M., Cabrera, J. M., & Calvo, J. (2016b).

Microstructural evolution and constitutive equations of Inconel 718 alloy under quasi-static and quasi-dynamic conditions. *Materials and Design*, 94, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.157>

Berrios Ortiz, J. ., Huaman Marros, P. K., & Higuera Cobos, O. F. (2022). Comportamiento a la fatiga de un cobre refinado sin y con severa deformación mediante Presión en Canal Angular Constante. *Revista Minerva*, 1(1), 9–17. <https://doi.org/10.5377/revminerva.v1i1.12548>

Binti Abdullah, A. F., & Adesta, E. Y. T. (2015). Implementation of functional analysis using value analysis value engineering (VAVE). *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(21), 10072–10076.

Blum, W., Dvořák, J., Král, P., Eisenlohr, P., & Sklenička, V. (2019). Strain rate contribution due to dynamic recovery of ultrafine-grained cu–zr as evidenced by load reductions during quasi-stationary deformation at 0.5 Tm. *Metals*, 9(11), 1–17. <https://doi.org/10.3390/met9111150>

Botelho, R. A., Diniz, S. B., Da Cunha, M. A., & Brandao, L. P. (2015). Properties of NGO 3% silicon steel asymmetrically cold rolled. *Materials Research*, 18(Suppl 2), 143–147. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.352714>

Bulín, T., Švábenská, E., Hapla, M., Ondrůšek, C., & Schneeweiss, O. (2017). Magnetic properties and structure of non-oriented electrical steel sheets after different shape processing. *Acta Physica Polonica A*, 131(4), 819–821. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.131.819>

Byon, S. M., Roh, Y. H., Yang, Z., & Lee, Y. (2021). A roll-bending approach to suppress the edge cracking of silicon steel in the cold rolling process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235(1–2), 112–124.

- Cabrera, J. M., Al Omar, A., Jonas, J. J., & Prado, J. M. (1997). Modeling the flow behavior of a medium carbon microalloyed steel under hot working conditions. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 28(11), 2233–2244. <https://doi.org/10.1007/s11661-997-0181-8>
- Calvo, J., Rodriguez-Calvillo, P., Cabrera, J. ., & Mateo, A. (2012). Características de la deformacion en caliente de los aceros TWIP. In XIII Congreso nacional de propiedades mecánicas de sólidos.
- Chen, X., Liao, Q., Niu, Y., Jia, W., Le, Q., Cheng, C., Yu, F., & Cui, J. (2019). A constitutive relation of AZ80 magnesium alloy during hot deformation based on Arrhenius and Johnson-Cook model. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 1859–1869. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.003>
- Choi, S., & Park, N. (2014). Evolution of Goss Orientation during Heating with Different Heating Rates in Cold-Rolled Grain-Oriented Electrical Steel. 4(4), 136–140. <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20140404.03>
- Chwastek, K. R. (2022). The Effects of Sheet Thickness and Excitation Frequency on Hysteresis Loops of Non-Oriented Electrical Steel. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(20). <https://doi.org/10.3390/s22207873>
- Cross, A. J., & Skemer, P. (2019). Rates of Dynamic Recrystallization in Geologic Materials. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(2), 1324–1342. <https://doi.org/10.1029/2018JB016201>
- De Oliveira, T. S., Silva, E. S., Rodrigues, S. F., Nascimento, C. C. F., Leala, V. S., & Reis, G. S. (2017). Softening mechanisms of the AISI 410 martensitic stainless steel under hot torsion simulation. *Materials Research*, 20(2), 395–406. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0795>

- Diniz, S. B., & Brandao, L. P. (2015). Properties of NGO 3 % Silicon Steel Asymmetrically Cold Rolled. November 2016. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.352714>
- Dough, F. (2019). Non-oriented fully processed electrical steels. Accelor Mital, L.
- Ebrahimi, R., & Shafiei, E. (2012). Mathematical Modeling of Single Peak Dynamic Recrystallization Flow Stress Curves in Metallic Alloys. Recrystallization, March. <https://doi.org/10.5772/34445>
- El Wahabi, M., Cabrera, J. M., & Prado, J. M. (2003). Hot working of two AISI 304 steels: A comparative study. *Materials Science and Engineering: A*, 343(1–2), 116–125. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00357-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00357-X)
- El Wahabi, M., Gavard, L., Cabrera, J. M., Prado, J. M., & Montheillet, F. (2005). EBSD study of purity effects during hot working in austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering: A*, 393(1–2), 83–90.
- El Wahabi, M., Gavard, L., Montheillet, F., Cabrera, J. M., & Prado, J. M. (2005). Effect of initial grain size on dynamic recrystallization in high purity austenitic stainless steels. *Acta Materialia*, 53(17), 4605–4612.
- Fedoriková, A., Kvačkaj, T., Kočiško, R., Bidulský, R., & Petroušek, P. (2017). Hot compression test of heat resistant steel. *Acta Physica Polonica A*, 131(5), 1340–1343. <https://doi.org/10.12693/APHYSPOLA.131.1340>
- Feng, Z. (2022). Roles of Silicon Content and Normalization Temperature on Cold Workability and Recrystallization of High-Grade Non-Oriented Silicon Steel. April. <https://doi.org/10.3390/cryst12050593>
- Franceschi, M., Pezzato, L., Gennari, C., Fabrizi, A., Polyakova, M., Konstantinov,

- D., Brunelli, K., & Dabalà, M. (2020). Effect of intercritical annealing and austempering on the microstructure and mechanical properties of a high silicon manganese steel. *Metals*, 10(11), 1–19. <https://doi.org/10.3390/met10111448>
- Guerrero, G. A. (2012). Determination of the critical parameters for the onset of dynamic recrystallization (DRX) in advanced ultrahigh strength steels (A-UHSS) microalloyed with boron. *Computer Methods in Materials Science*, 12(3), 152–162. <http://upcommons.upc.edu/e-prints/handle/2117/18712>
- Hashimoto, K. (1994). High temperature deformation behavior of TiAl. *Keikinzoku/Journal of Japan Institute of Light Metals*, 44(11), 609–613. <https://doi.org/10.2464/jilm.44.609>
- He, J., Zhang, D., Zhang, W., Qiu, C., & Zhang, W. (2017). Constitutive equation and hot compression deformation behavior of homogenized Al-7.5Zn-1.5Mg-0.2Cu-0.2Zr alloy. *Materials*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/ma10101193>
- Hill, A. S., Searle, J., Bingham, P., & Robinson, F. (2011). Understanding and Development of Pseudo Glass Film for Grain Oriented Electrical Steel. *Materials and Manufacturing Academy*, 5.
- Honda, A., Obata, Y., & Okamura, S. (1998). History and recent development of non-oriented electrical steel in Kawasaki Steel. *Kawasaki Steel Technical Report*, 39(39), 13–20.
- Huang, K., & Logé, R. E. (2016). A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials. *Materials and Design*, 111(November 2017), 548–574. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.012>
- Ivaniski, T. M., De Souza, T. F., Épp, J., & Da Silva Rocha, A. (2020). Constitutive modelling of high temperature flow behaviour for a low carbon high silicon

bainitic steel. *Materials Research*, 23(5). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0264>

Ji, H., Cai, Z., Pei, W., Huang, X., & Lu, Y. (2020). DRX behavior and microstructure evolution of 33Cr23Ni8Mn3N: Experiment and finite element simulation. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 4340–4355. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.059>

Jiménez-Lugos, J. C., Cabrera-Marrero, J. M., Chávez-Alcalá, J. F., Hallen-López, J. M., & López-Rodríguez, J. (2022). Constitutive Modeling of Hot Deformation of Carbon Steels in the Intercritical Zone. *Materials Research*, 25. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0275>

Karthikeyan, G., & Jinu, G. R. (2017). Tensile behaviour and fractography analyses of LM6/ZrO₂ composites. *Materiali in Tehnologije*, 51(3), 549–553. <https://doi.org/10.17222/mit.2015.319>

Kim, K., Park, H. W., Ding, S., Park, H. W., & Yanagimoto, J. (2021). Flow stress of duplex stainless steel by inverse analysis with dynamic recovery and recrystallization model. *ISIJ International*, 61(1), 280–291.

Kingkam, W., Li, N., Zhang, H. X., & Zhao, C. Z. (2017). Hot Deformation Behavior of High Strength Low Alloy Steel by Thermo Mechanical Simulator and Finite Element Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 205(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/205/1/012001>

Kvackaj, T., Bella, P., Bidulský, R., Kociško, R., Petroušek, P., Fedoriková, A., Bidulská, J., Jandacka, P., Lupták, M., Cerník, M., & Pernise, R. (2017). The effect of cryo-rolling and annealing on magnetic properties in non-oriented electrical steel. *Acta Physica Polonica A*, 131(4), 1105–1107. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.131.1105>

- Lei, Y., Yang, Y., Tan, Y., Zhang, W., Wu, S., & Ma, M. (2022). Effect of Hot Working Parameters on Microstructure and Texture Evolution of Hot-Deformed Zr-45Ti-5Al-3V Alloy. *Materials*, 15(4).
- Li, M., Duan, Y., Yao, D., Guan, Y., & Yang, L. (2020a). Constitutive model and flow behavior of B1500hs high-strength steel during the hot deformation process. *Metals*, 10(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/met10010064>
- Liu, F., Wu, J., Chen, K., & Xue, D. (2010). Morphology Study by Using Scanning Electron Microscopy. *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education*, February 2015, 1781–1792.
- Lobanov, M. L., Rusakov, G. M., & Redikul'tsev, A. A. (2011). Electrotechnical anisotropic steel. Part 1. History of development. *Metal Science and Heat Treatment*, 53(7–8), 326–332. <https://doi.org/10.1007/s11041-011-9391-1>
- López-Chipres, E., Mejía, I., Maldonado, C., Bedolla-Jacuinde, A., El-Wahabi, M., & Cabrera, J. M. (2008). Hot flow behavior of boron microalloyed steels. *Materials Science and Engineering: A*, 480(1–2), 49–55.
- Ma, Y., Du, Z., Cui, X., Cheng, J., Liu, G., Gong, T., Liu, H., Wang, X., Chen, Y., Y., Rusnák, J., Malega, P., Svetlík, J., Rudy, V., Šmajda, N., Processes, F., Sethi, G., Myers, N. S., German, R. M., Working, C., ... Thouas, G. A. (2016). MANUFACTURING PROCESSES. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(6), 1–57.
- Mei, R., Bao, L., Li, G., Zhang, X., Qi, X., & Liu, X. (2017). Tensile Deformation Behavior and Fracture of Fe-3.3%Si Steel At a Wide Range of Moderate Temperatures. *International Journal of Advanced Research*, 5(12), 37–43. <https://doi.org/10.21474/ijar01/5934>

- Mejía, I., López-Chipres, E., Maldonado, C., Bedolla-Jacuinde, A., & Cabrera, J. M. (2008). Modeling of the hot deformation behavior of boron microalloyed steels under uniaxial hot-compression conditions. *Zeitschrift Fuer Metallkunde/Materials Research and Advanced Techniques*, 99(12), 1336–1345. <https://doi.org/10.3139/146.101771>
- Mejía, I., López-chipresa, E., Maldonado, C., & Bedolla-jacuinde, A. (2008). Pemodelan perilaku deformasi panas baja mikroalloy boron di bawah kondisi kompresi panas uniaksial. 99, 1336–1345.
- Mirzadeh, H., Cabrera, J. M., Najafizadeh, A., & Calvillo, P. R. (2012). EBSD study of a hot deformed austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 538, 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.037>
- Mirzadeh, H., Cabrera, J. M., Prado, J. M., & Najafizadeh, A. (2011). Hot deformation behavior of a medium carbon microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528(10–11), 3876–3882.
- Mirzadeh, Hamed, Cabrera, J. M., & Najafizadeh, A. (2011). Constitutive relationships for hot deformation of austenite. *Acta Materialia*, 59(16), 6441–6448. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.07.008>
- Mirzadeh, Hamed, Cabrera, J. M., & Najafizadeh, A. (2012). Modeling and prediction of hot deformation flow curves. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 43(1), 108–123. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0836-3>
- Mirzaie, T., Mirzadeh, H., & Cabrera, J. M. (2016). A simple Zerilli-Armstrong constitutive equation for modeling and prediction of hot deformation flow stress of steels. *Mechanics of Materials*, 94, 38–45.

- Model, T., & Control, S. C. R. P. (1952). Product Data Sheet Model 5620 Power Control Solution High Reliability / Low Maintenance Phase Angle Power Control Multiple Line Voltages / Amperages Phase Angle Control. 4–5.
- Morito, N., Komatsubara, M., & Shimizu, Y. (1998). History and recent development of grain oriented electrical steel at Kawasaki Steel. Kawasaki Steel Technical Report, 39(39), 3–12.
- Nakanishi, D., Kawabata, T., & Aihara, S. (2016). An Observation of Brittle Crack Propagation in Coarse Grained 3% Silicon Steel. *Procedia Structural Integrity*, 2, 493–500. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.064>
- Obiko, J., Chown, L., Whitefield, D., & Bodunrin, M. (2022). Metal flow behaviour and processing maps of high heat resistant steel during hot compression. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(5–6), 4153–4167. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09577-3>
- Ouchi, C., & Okita, T. (1983). DYNAMIC RECOVERY AND STATIC RECRYSTALLIZATION OF 1. 8% Al STEEL IN HOT DEFORMATION. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 23(2), 128–136. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.128>
- Páramo-Kañetas, P., Öztürk, U., Calvo, J., Cabrera, J. M., & Guerrero-Mata, M. (2018). High-temperature deformation of delta-processed Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 255(2), 204–211.
- Qaiser, M. H., Umar, S., Nauman, S., Dudy, L., Aulbach, J., & Lara, A. (2021). Fatigue behaviour of thin Fe-Si steel sheets for electric motor production Fatigue behaviour of thin Fe-Si steel sheets for electric motor production. 0–11. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1038/1/012004>

- Qiang, F., Bouzy, E., Kou, H., Zhang, Y., Wang, L., & Li, J. (2021). Grain fragmentation associated continuous dynamic recrystallization (CDRX) of hexagonal structure during uniaxial isothermal compression: High-temperature α phase in TiAl alloys. *Intermetallics*, 129, 0–41.
- Quan, G. Z., Wang, X., Li, Y. L., & Zhang, L. (2017). Analytical descriptions of dynamic softening mechanisms for Ti-13Nb-13Zr biomedical alloy in single phase and two phase regions. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(4), 2029–2043. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0302>
- Reyes, F., Calvo, J., Cabrera, J. M., & Mejía, I. (2012). Effect of v on hot deformation characteristics of TWIP steels. *Steel Research International*, 83(4), 334–339. <https://doi.org/10.1002/srin.201100320>
- Rezayat, M., Parsa, M. H., Mirzadeh, H., & Cabrera, J. M. (2019). Texture development during hot deformation of Al/Mg alloy reinforced with ceramic particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 798, 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.233>
- Rohaľ, V., Spišák, E., Mulidrán, P., & Majerníková, J. (2020). Basic classification and processing of electrical steels. 1–6. <https://doi.org/10.9790/1813-0907010106>
- Romero, P., Otero, N., Cabrera, J. M., & Masagué, D. (2010). Laser Assisted Conical Spin Forming of dual phase automotive steel. Experimental demonstration of work hardening reduction and forming limit extension. *Physics Procedia*, 5(PART 2), 215–225.
- Saadatkia, S., Mirzadeh, H., & Cabrera, J. M. (2015). Hot deformation behavior, dynamic recrystallization, and physically-based constitutive modeling of plain carbon steels. *Materials Science and Engineering: A*, 636, 196–202.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.104>

Sablik, M. J., Landgraf, F. J. G., Magnabosco, R., Fukuhara, M., de Campos, M. F., Machado, R., & Missell, F. P. (2006). Fitting the flow curve of a plastically deformed silicon steel for the prediction of magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304(2), 155–158.

Salas-Reyes, A. E., Mejía, I., & Cabrera, J. M. (2017). Influence of Nb Microaddition on Microstructure and Texture Evolution in a Fe-21Mn-1.3Al-1.5Si-0.5C TWIP Steel under Uniaxial Hot-Tensile Conditions. *MRS Advances*, 2(61), 3797–3803. <https://doi.org/10.1557/adv.2017.600>

Sampson, B. (2010). Heat treatment. *Professional Engineering*, 23(7), 19–20. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v15.a0005230>

Shinozaki, M., Matoba, I., Kan, T., & Gotoh, T. (1978). Effect of Primary Recrystallized Texture on the Behavior of Secondary Recrystallization in 3% Silicon Steel. In *Trans Jpn Inst Met* (Vol. 19, Issue 2, pp. 85–91). <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.19.85>

Silva, M. B. dos R., Gallego, J., Marrero, J. M. C., Balancin, O., & Jorge Júnior, A. M. (2018). Análise Do Tempo Entre Passes Na Evolução Microestrutural De Aços Inoxidáveis Austeníticos De Alto Nitrogênio, Com E Sem Nióbio. 105–114. <https://doi.org/10.5151/12abinox-26989>

Silva, M. B. dos R., Gallego, J., Marrero, J. M. C., Balancin, O., & Jorge Júnior, A. M. (2019). Efeito Do Tempo Entre Passes Na Interação Recristalização-Precipitação De Um Aço Ino-Xidável Austenítico Com Alto Teor De Nióbio E Nitrogênio. 8834–8845. <https://doi.org/10.5151/1516-392x-25069>

Singh, R. (2016). *Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop*

Technology. University of Basrah College of Engineering Mechanical Engineering Department, 1–8.

Tehovnik, F., Žužek, B., & Burja, J. (2016). Hot tensile testing of SAF 2205 duplex stainless steel. *Materiali in Tehnologije*, 50(6), 989–993. <https://doi.org/10.17222/mit.2016.242>

Thomas, A., El-Wahabi, M., Cabrera, J. M., & Prado, J. M. (2006). High temperature deformation of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1–3), 469–472.

Varela-Castro, G., Calvo, J., & Cabrera, J. M. (2010). Analysis of hot tensile and compression curves to assess the hot ductility of C-Mn steels. *Materials Science Forum*, 638–642, 3158–3163.

Wang, L., Ji, L., Yang, K., Gao, X., Chen, H., & Chi, Q. (2022). The Flow Stress–Strain and Dynamic Recrystallization Kinetics Behavior of High-Grade Pipeline Steels. *Materials*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/ma15207356>

Wang, R., Wang, M., Li, Z., & Lu, C. (2018). Physics-based Constitutive Model for the Hot Deformation of 2Cr11Mo1VNbN Martensitic Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(9), 4932–4940. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3527-z>

Wang, W., Ma, R., Li, L., Zhai, R., Ma, S., Yan, H., Zhang, S., & Gong, S. (2020). Constitutive analysis and dynamic recrystallization behavior of as-cast 40CrNiMo alloy steel during isothermal compression. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 1929–1940.

WANG, X., LI, Z., XIAO, Z., & QIU, W. ting. (2020). Microstructure evolution and hot deformation behavior of Cu–3Ti–0.1Zr alloy with ultra-high strength.

Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 30(10), 2737–2748. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65416-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65416-4)

Watson, H., Cockbain, A. J., Spencer, J., Race, A., Volpato, M., Loadman, P., Toogood, G., & Hull, M. A. (2016). Author ' s Accepted Manuscript Author ' s Accepted Manuscript. Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids, 115, 60–66. <https://doi.org/10.1097/JU.0000000000002945>

Wouters, R., & Froyen, L. (1996). Scanning electron microscope fractography in failure analysis of steels. *Materials Characterization*, 36(4–5), 357–364. [https://doi.org/10.1016/s1044-5803\(96\)00070-8](https://doi.org/10.1016/s1044-5803(96)00070-8)

Xiao, F., Zhang, Z. H., & Fu, H. D. (2019). Effect of Si content on hot deformation behavior and dynamic recrystallization of high-silicon electrical steel. *Gongcheng Kexue Xuebao/Chinese Journal of Engineering*, 41(3), 332–342. <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.03.006>

Yao, Z., Wang, H., Dong, J., Wang, J., Jiang, H., & Zhou, B. (2020). Characterization of hot deformation behavior and dislocation structure evolution of an advanced nickel-based superalloy. *Metals*, 10(7), 1–18. <https://doi.org/10.3390/met10070920>

Yu, T., Hansen, N., Huang, X., & Godfrey, A. (2014). Observation of a new dynamic recovery mechanism in the high strain regime. *Proceedings of the 35th Risoe International Symposium on Materials Science: New Frontiers of Nanometals*, 35, 493–500.

You, D., & Park, H. (2018). Developmental trajectories in electrical steel technology using patent information. *Sustainability (Switzerland)*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/su10082728>

- Zhang, X., Wang, X., & Zhang, D. (2019). Investigation into constitutive equation and hot compression deformation behavior of 6061 Al Alloy. *Tehnicki Vjesnik*, 26(5), 1376–1382. <https://doi.org/10.17559/TV-20190606144011>
- Zhang, Yi, Huili, S., Volinsky, A. A., Tian, B., Chai, Z., Liu, P., & Liu, Y. (2016). Hot Deformation and Dynamic Recrystallization Behavior of the Cu-Cr-Zr-Y Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(3), 1150–1156. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-1914-x>
- Zhang, Yingbo, Zou, D., Wei, T., Li, J., Tong, L., & Zhang, W. (2020). Microstructural evolution and precipitation behavior of the 0.1C-18Cr-1Al-1Si ferritic heat-resistant stainless steel during hot deformation. *Materials Research Express*, 7(3), 36513. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab7d0d>

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN

Lampiran A. Perhitungan

A1. Hasil Penelitian *Hot Compression* INSTRON 4507

A.1.1 ΣZ

$$Z = \varepsilon \exp\left(\frac{245,43}{RT}\right)$$

a) C₁ 1050 0,1

$$Z = 2,20993 \times 10^{26} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right) = 2,2598 \times 10^{26}$$

b) C₁ 1050 0,01

$$Z = 6,02131 \times 10^{24} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right) = 6,15721 \times 10^{24}$$

c) C₁ 1050 0,001

$$Z = 3,52129 \times 10^{23} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right) = 3,60076 \times 10^{23}$$

d) C₂ 1050 0,1

$$Z = 7,17056 \times 10^{25} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right) = 7,3324 \times 10^{25}$$

e) C₂ 1050 0,01

$$Z = 1,72522 \times 10^{24} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right) = 1,76416 \times 10^{24}$$

f) C₂ 1050 0,001

$$Z = 1,35506 \times 10^{23} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right) = 1,38564 \times 10^{23}$$

g) C₃ 1050 0,1

$$Z = 4,36299 \times 10^{26} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right) = 4,46147 \times 10^{26}$$

h) C₃ 1050 0,01

$$Z = 9,73338 \times 10^{24} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right) = 9,95306 \times 10^{24}$$

i) C₃ 1050 0,001

$$Z = 4,79268 \times 10^{23} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right) = 4,90085 \times 10^{23}$$

j) C₁ 1100 0,1

$$Z = 1,21619 \times 10^{25} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1373}\right) = 1,24263 \times 10^{25}$$

k) C₁ 1100 0,01

$$Z = 1,40183 \times 10^{24} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1373}\right) = 1,43231 \times 10^{24}$$

l) C_1 1100 0,001

$$Z = 9,93707 \times 10^{22} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1373}\right) = 1,01531 \times 10^{23}$$

m) C_2 1100 0,1

$$Z = 4,72856 \times 10^{24} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1373}\right) = 4,83136 \times 10^{24}$$

n) C_2 1100 0,01

$$Z = 5,95165 \times 10^{23} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1373}\right) = 6,08104 \times 10^{23}$$

o) C_2 1100 0,001

$$Z = 1,90116 \times 10^{22} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1373}\right) = 1,9425 \times 10^{22}$$

p) C_3 1100 0,1

$$Z = 3,46221 \times 10^{25} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1373}\right) = 3,53748 \times 10^{25}$$

q) C_3 1100 0,01

$$Z = 2,93632 \times 10^{24} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1373}\right) = 3,00015 \times 10^{24}$$

r) C_3 1100 0,001

$$Z = 1,09176 \times 10^{23} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1373}\right) = 1,1155 \times 10^{23}$$

A.1.2 ΣQ (KJ.mol⁻¹)

$$Z = \varepsilon \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

a) C_1 1050 0,1

$$2,2598 \times 10^{26} = 2,20993 \times 10^{26} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1323}\right)$$

$$Q = 245,36921$$

b) C_1 1050 0,01

$$6,15721 \times 10^{24} = 6,02131 \times 10^{24} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1323}\right)$$

$$Q = 245,36699$$

c) C_1 1050 0,001

$$3,60076 \times 10^{23} = 3,52129 \times 10^{23} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right)$$

$$Q = 245,36188$$

d) C₂ 1050 0,1

$$7,3324 \times 10^{25} = 7,17056 \times 10^{25} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1323}\right)$$

$$Q = 245,38941$$

e) C₂ 1050 0,01

$$1,76416 \times 10^{24} = 1,72522 \times 10^{24} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1323}\right)$$

$$Q = 245,37984$$

f) C₂ 1050 0,001

$$1,38564 \times 10^{23} = 1,35506 \times 10^{23} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1323}\right)$$

$$Q = 245,34933$$

g) C₃ 1050 0,1

$$4,46147 \times 10^{26} = 4,36299 \times 10^{26} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right)$$

$$Q = 245,39674$$

h) C₃ 1050 0,01

$$9,95306 \times 10^{24} = 9,73338 \times 10^{24} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right)$$

$$Q = 245,37608$$

i) C₃ 1050 0,001

$$4,90085 \times 10^{23} = 4,79268 \times 10^{23} \exp\left(\frac{245,43}{8,31 \times 1323}\right)$$

$$Q = 245,37605$$

j) C₁ 1100 0,1

$$1,24263 \times 10^{25} = 1,21619 \times 10^{25} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1373}\right)$$

$$Q = 245,38782$$

k) C₁ 1100 0,01

$$1,43231 \times 10^{24} = 1,40183 \times 10^{24} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1373}\right)$$

$$Q = 245,37114$$

l) C₁ 1100 0,001

$$1,01531 \times 10^{23} = 9,93707 \times 10^{22} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1373}\right)$$

$$Q = 245,36542$$

m) C₂ 1100 0,1

$$4,83136 \times 10^{24} = 4,72856 \times 10^{24} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1373}\right)$$

$$Q = 245,39017$$

n) C₂ 1100 0,01

$$6,08104 \times 10^{23} = 5,95165 \times 10^{23} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1373}\right)$$

$$Q = 245,37987$$

o) C₂ 1100 0,001

$$1,9425 \times 10^{22} = 1,90116 \times 10^{22} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1373}\right)$$

$$Q = 245,37922$$

p) C₃ 1100 0,1

$$3,53748 \times 10^{25} = 3,46221 \times 10^{25} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1373}\right)$$

$$Q = 245,39757$$

q) C₃ 1100 0,01

$$3,00015 \times 10^{24} = 2,93632 \times 10^{24} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1373}\right)$$

$$Q = 245,39627$$

r) C₃ 1100 0,001

$$1,1155 \times 10^{23} = 1,09176 \times 10^{23} \exp\left(\frac{Q}{8,31 \times 1373}\right)$$

$$Q = 245,39001$$

A.1.3 $\Sigma\sigma$ (Laju DRV MPa)

$$\sigma = \frac{1}{a} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

a) $C_1 1050 0,1$

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{60,10427 + 60,11258\} = 443,45344$$

b) $C_1 1050 0,01$

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{29,23938 + 29,25647\} = 376,75517$$

c) $C_1 1050 0,001$

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{16,57182 + 16,60196\} = 324,23702$$

d) $C_2 1050 0,1$

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{47,98888 + 47,9993\} = 422,61343$$

e) $C_2 1050 0,01$

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{22,77188 + 22,79383\} = 353,62551$$

f) $C_2 1050 0,001$

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{13,69057 + 13,72704\} = 306,59125$$

g) $C_3 1050 0,1$

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{213744,81842 + 213744,70754\}$$

$$\sigma = 1200,5264$$

h) $C_3 1050 0,01$

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{99905,94323 + 99905,95578\}$$

$$\sigma = 1130,10479$$

i) $C_3 1050 0,001$

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{54708,43382 + 54708,40887\}$$

$$\sigma = 1074,34445$$

j) $C_1 1100 0,1$

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{104440,36162 + 104440,41364\}$$

$$\sigma = 1134,21471$$

k) C_1 1100 0,01

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{67796,52043 + 67796,53384\}$$

$$\sigma = 1094,20495$$

l) C_1 1100 0,001

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{39931,87774 + 39931,8169\}$$

$$\sigma = 1045,19228$$

m) C_2 1100 0,1

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{86459,73098 + 86459,75943\}$$

$$\sigma = 1116,7205$$

n) C_2 1100 0,01

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{57120,96977 + 57121,0119\}$$

$$\sigma = 1078,3402$$

o) C_2 1100 0,001

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{28686,14607 + 28686,1465\}$$

$$\sigma = 1014,56637$$

p) C_3 1100 0,1

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{128747,49819 + 128747,42716\}$$

$$\sigma = 1253,58845$$

q) C_3 1100 0,01

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{78601,09455 + 78601,08142\}$$

$$\sigma = 1107,89704$$

r) C_3 1100 0,001

$$\sigma = \frac{1}{0,0108} \ln\{40690,58324 + 40690,53945\}$$

$$\sigma = 1266,93506$$

A2. Hasil Penelitian *Hot Tensile* INSTRON 4507

A.2.1 UTS (*Ultimate Tensile Strength*)

$$UTS = \frac{F_{max} \times 1000}{D0^2}$$

a) C1 1050

$$UTS = \frac{364,2683142 \times 1000}{67,404} = 5404,25367$$

b) C1 1100

$$UTS = \frac{195,2026954 \times 1000}{66,912} = 2917,30475$$

c) C2 1050

$$UTS = \frac{302,8942857 \times 1000}{67,0761} = 4515,68123$$

d) C2 1100

$$UTS = \frac{248,5603614 \times 1000}{66,7489} = 3723,8121$$

e) C3 1050

$$UTS = \frac{430,1674528 \times 1000}{67,7329} = 6350,93806$$

f) C3 1100

$$UTS = \frac{294,7344141 \times 1000}{67,0761} = 4394,03027$$

LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN

Lampiran B. Data Penelitian

C.1 Hasil Hot Compression Test

C1 1050					
0,1		0,01		0,001	
TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.
25.8954	0.0292704	7.44574	0.0013155	2.88127	0.000788402
25.9173	0.041496	13.2045	0.0153673	3.65686	0.001402
26.5215	0.0828877	13.7561	0.0355046	4.19003	0.002192
28.928	0.220089	14.0668	0.0471963	4.4604	0.002894
30.0975	0.340326	14.4191	0.063966	4.71987	0.003509
30.5136	0.409626	15.2971	0.133206	10.5935	0.696656
30.7809	0.474911	16.7275	0.646404	10.5915	0.697359
30.8962	0.571022	17.1773	0.670102	10.5841	0.698063
30.8838	0.683578	17.2909	0.697539	10.5602	0.698767
31.0891	0.697527	17.2587	0.698772	10.5691	0.699472

C2 1050					
0,1		0,01		0,001	
TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.
20.1935	0.0269988	7.17327	0.001139	4.57976	0.000700158
20.419	0.041459	8.20947	0.00298167	5.66047	0.00140081
20.5604	0.0579807	8.60183	0.004388	6.00661	0.00210195
20.8039	0.0724298	8.76568	0.00562	6.18827	0.00280358
20.9654	0.0869955	8.98038	0.007206	6.33633	0.0035935
26.6868	0.640414	14.0934	0.694374	9.42222	0.697355
26.7338	0.652416	14.0955	0.695778	9.42106	0.698059
27.0253	0.671035	14.0563	0.697008	9.44169	0.698762
27.0786	0.683067	13.9929	0.698415	9.45683	0.699466
27.0477	0.695596	14.0435	0.699472	9.45683	0.699466

C3 1050					
0,1		0,01		0,001	
TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.
28.6768	0.017238	6.95962	0.001402	5.16561	0.0007
28.3312	0.0316073	10.5471	0.00307	8.12271	0.001401
28.9054	0.0460944	11.858	0.004388	8.94113	0.00219
29.4385	0.0605151	12.7293	0.005884	9.16646	0.002804
29.7486	0.0769435	13.112	0.007294	9.29182	0.003506
34.6633	0.642731	18.1192	0.692972	10.8196	0.696653
34.4289	0.655141	18.1387	0.6949	10.8175	0.697355
34.6785	0.667194	18.1645	0.69648	10.7934	0.698059
35.1888	0.681298	18.1747	0.697711	10.8242	0.698762
35.1994	0.693498	18.1816	0.699119	10.8221	0.699466

C1 1100					
0,1		0,01		0,001	
TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.
6.62017	0.018989	3.22055	0.001665	1.37315	0.000701
7.78852	0.031461	4.65507	0.00307	2.07478	0.00149
8.53021	0.043816	5.59516	0.004564	2.72026	0.002192
9.97518	0.060406	6.20634	0.00606	3.43113	0.002806
12.0185	0.074445	6.73121	0.007206	4.07466	0.003597
19.6985	0.638169	13.2271	0.693498	8.83469	0.696656
19.6135	0.650668	13.2764	0.694725	8.80111	0.697359
19.4298	0.662985	13.2687	0.696129	8.82227	0.698063
19.5371	0.677005	13.2477	0.697711	8.81059	0.698767
19.8933	0.691399	13.2446	0.698767	8.84808	0.699472

C2 1100					
0,1		0,01		0,001	
TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.
11.3881	0.031579	2.75457	0.001751	2.57474	0.000701
12.0257	0.043855	4.28371	0.003155	3.14227	0.001402
12.4469	0.06046	5.46063	0.004648	3.36953	0.002192
13.0506	0.074984	6.20043	0.006143	3.52053	0.002806
13.2522	0.08733	6.6788	0.007553	3.66009	0.003509
16.8933	0.634482	11.1349	0.694198	6.68102	0.696656
16.8647	0.646444	11.15	0.695775	6.67087	0.697359
16.7554	0.659059	11.0948	0.696828	6.68254	0.698063
16.7325	0.673207	11.1118	0.698234	6.68329	0.698767
16.8609	0.687384	11.1523	0.699466	6.66768	0.699472
C3 1100					
0,1		0,01		0,001	
TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.
10.8368	0.014554	7.15282	0.001139	1.58589	0.000788
13.4788	0.029322	8.68445	0.002718	1.80504	0.001402
16.539	0.043398	9.23353	0.004124	2.01258	0.002192
17.642	0.058138	9.5739	0.005356	2.16543	0.002806
18.3851	0.072627	9.82471	0.006677	2.35041	0.003509
22.9645	0.642274	15.0818	0.693322	8.86894	0.696656
22.9612	0.654499	15.1158	0.694725	8.90112	0.697359
23.0344	0.666705	15.1854	0.695953	8.88389	0.698063
23.111	0.680963	15.1337	0.697183	8.86668	0.698767
23.1103	0.693498	15.0711	0.698415	8.87138	0.699472

C.2 Hasil Hot Tensile Test

1050					
C1		C2		C3	
TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.
1.27971	0.0036457	0.943182	0.00379494	0.953016	0.00390994
1.35069	0.00707669	0.936785	0.00714133	0.984558	0.0072013
1.336	0.0103286	5.80195	0.0103767	2.69735	0.0104484
6.27962	0.0134365	10.2752	0.0136016	11.2997	0.0135851
11.9969	0.0168342	10.6761	0.0169153	13.6775	0.0167784
2.26006	0.625651	0.323378	0.483954	1.61647	0.532276
2.06958	0.627458	0.246894	0.486025	1.42723	0.534257
1.87839	0.629262	0.278331	0.488093	0.594519	0.536235
1.73975	0.631063	0.309895	0.490156	0.450795	0.538208
0.889225	0.632861	0.27948	0.492215	0.403289	0.540178

1100					
C1		C2		C3	
TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.	TENSIO.VER	DEF.VERT.
0.457905	0.00267159	1.04355	0.00380419	0.876128	0.00337838
0.382634	0.00541208	1.06642	0.00729529	0.936855	0.00721587
0.345305	0.00811981	1.73478	0.0104434	0.959058	0.010436
0.336544	0.0105934	8.04533	0.0137796	5.62871	0.0136793
0.327753	0.0131111	8.71246	0.0171046	10.0224	0.0171782
0.285684	0.629508	0.468535	0.598539	0.527642	0.616876
0.321831	0.630865	0.538936	0.600375	0.493365	0.618701
0.304363	0.63222	0.522508	0.602207	0.441308	0.620522
0.322703	0.633573	0.43622	0.604036	0.47748	0.62234
0.251331	0.634924	0.489459	0.605862	0.478347	0.624154

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan

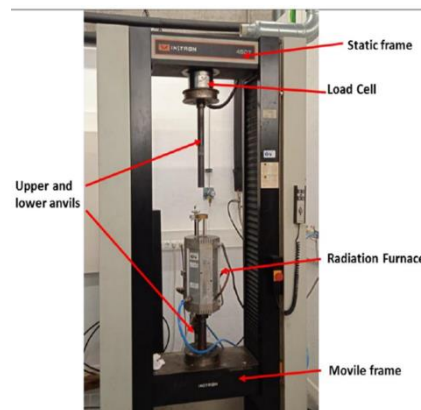
C.1 Gambar Alat dan Bahan



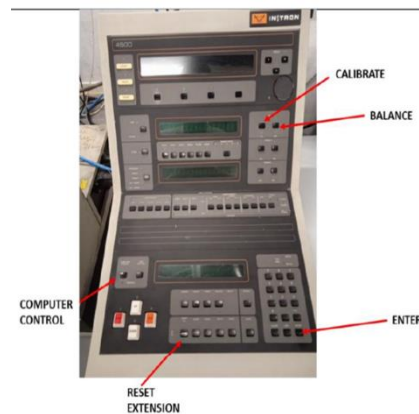
Gambar C.1 *Quartz Glass Tube*



Gambar C.2 *Radiation Furnace*



Gambar C.3 *Test Machine
Hot Compression and Tensile*



Gambar C.4 *Radiation Furnace*



Gambar C.5 *Argon*



Gambar C.6 *Boron Nitride*



Gambar C.7 Silicon Steel



Gambar C.8 Etanol



Gambar C.9 Tantalum Sheets