



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENENTUAN PARAMETER PERSAMAAN KONSTITUTIF BAJA HSLA  
(ASTM A572 *Grade 50*) DENGAN UJI TARIK PANAS**

**SKRIPSI**

**DIWANGKORO KINGKIN**

**0706268423**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI & MATERIAL**

**DEPOK**

**JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENENTUAN PARAMETER PERSAMAAN KONSTITUTIF  
BAJA HSLA (ASTM A572 *Grade 50*) DENGAN UJI TARIK  
PANAS**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**DIWANGKORO KINGKIN**

**0706268423**

**FAKULTAS TEKNIK**


**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI & MATERIAL**

**DEPOK**

**JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Diwangkoro Kingkin  
NPM : 0706268423  
Tanda Tangan :   
Tanggal : 27 Juni 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

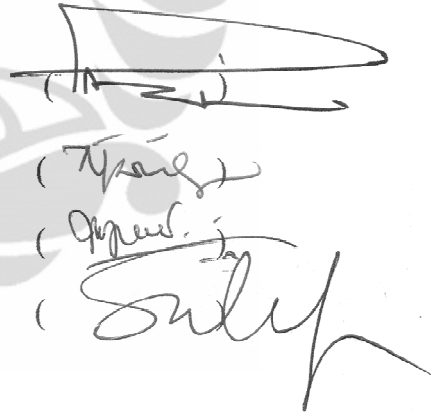
Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Diwangkoro Kingkin  
NPM : 0706268423  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Penentuan Parameter Persamaan Konstitutif Baja  
HSLA (ASTM A572 Grade 50) Dengan Uji  
Tarik Panas

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA  
Penguji 1 : Ir. Rini Riastuti M.Sc.  
Penguji 2 : Dr. Ir. Myrna Ariati Mochtar M.S  
Penguji 3 : Dr. Ir. Sutopo M.Sc



(Dedi Priadi)  
(Rini Riastuti)  
(Myrna Ariati Mochtar)  
(Sutopo)

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 27 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

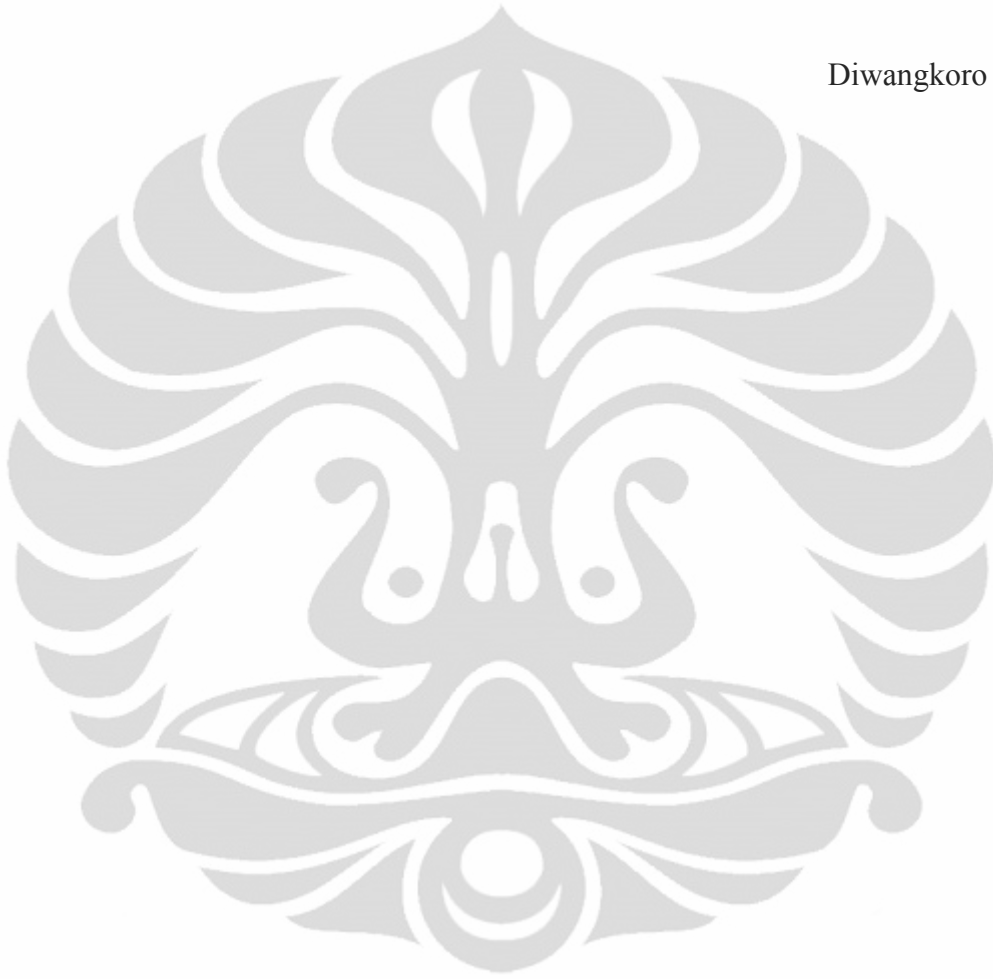
Puji dan syukur penulis sampaikan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulisan skripsi ini dapat diselesaikan sesuai dengan waktu yang telah direncanakan. Adapun tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk memenuhi persyaratan dalam mencapai gelar Sarjana Teknik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

1. Bapak Dr. Ir. Dedi Priadi DEA, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, dorongan, serta motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Ir. Muhammad Anis. M. Met, selaku pembimbing akademis yang telah membantu saya dalam merencanakan dan mengarahkan studi saya selama masa kuliah.
3. Seluruh dosen dan staff pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.
4. Bapak Richard A. M. Napitupulu yang telah menawarkan topik serta bantuan serta saran yang membangun selama penelitian.
5. Rekan 1 Tim Penelitian (Riyan Nuryanto dan Iswanto). Terima kasih atas kerjasama dan bantuannya selama penelitian.
6. Ibunda dan Ayah, atas cinta, motivasi dan restu yang diberikan.
7. Segenap keluarga besar, atas doa, motivasi dan dukungan yang telah diberikan.
8. Sahabat-sahabat Mahasiswa Departemen Metalurgi dan Material, Ardianto, Al Basri Amin, Dobiet Kisan Kaefama dan semua teman-teman 2007, atas bantuan-bantuannya, baik berupa ide, saran dan kenangan indah yang amat berkesan. Saya banyak belajar dari kalian.

9. Semua pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung yang telah membantu penulis, namun tak bisa disebutkan satu persatu.

Depok, 27 Juni 2011

Diwangkoro Kingkin



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR  
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

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

Nama : Diwangkoro Kingkin  
NPM : 0706268423  
Program Studi : Teknik Metalurgi & Material  
Departemen : Teknik Metalurgi & Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**Penentuan Parameter Persamaan Konstitutif Baja HSLA (ASTM A572  
Grade 50) Dengan Uji Tarik Panas**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 27 Juni 2011

Yang menyatakan



(Diwangkoro Kingkin)

## ABSTRAK

Nama : Diwangkoro Kingkin  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Penentuan Parameter Persamaan Konstitutif Baja HSLA (ASTM A572 Grade 50) Dengan Uji Tarik Panas

Mampu bentuk (*formability*) material bukan hanya ditentukan oleh mikrostruktur dari material, temperatur, laju regangan (*strain rate*) dan regangan (*strain*), tetapi juga tahapan tegangan pada zona deformasi. Uji tarik panas merupakan salah satu metode pengujian yang dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanis dari material, memperoleh informasi plastisitas material dan sifat perpatahan (*fracture*). Pengujian dilakukan dengan menggunakan parameter dari persamaan konstitutif dimana tegangan alir merupakan fungsi dari regangan, laju regangan dan temperatur. Hal ini dapat menjelaskan karakteristik *Rheologi* dari material tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik *Rheologi* dari material baja HSLA (ASTM A572 Gr 50) dengan menentukan parameter persamaan konstitutif menggunakan uji tarik panas, dengan variabel temperatur 700 °C, 750 °C, 800 °C, dan 850 °C. Dalam penelitian ini dapat dihasilkan parameter persamaan konstitutif untuk paduan Baja HSLA (ASTM A572 Gr 50), yaitu  $\sigma = K \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot e^{Q/RT}$ , di mana dengan meningkatnya temperatur dari 700 °C ke 800 °C akan menurunkan nilai koefisien pengerasan regang (n) sebesar 47% dan menurunkan % elongasi sampel sebesar 26%. Pada laju regangan 0.1 s<sup>-1</sup> dengan meningkatnya temperatur dari 700 °C ke 850 °C akan menurunkan tegangan luluh sebesar 42%. Pada laju regangan 0.1 s<sup>-1</sup> dengan meningkatnya temperatur dari 750 °C ke 850 °C, akan meningkatkan nilai koefisien sensitifitas laju regangan (m) sebesar 96%. Pada temperatur konstan 850 °C, dengan meningkatnya laju regangan dari 0.01 s<sup>-1</sup> ke 0,1 s<sup>-1</sup> akan menurunkan nilai energi aktivasi sebesar 2%.

Kata kunci:

Rheologi, uji tarik panas, regangan, laju regangan, temperatur, persamaan konstitutif, %elongasi sampel, koefisien pengerasan regang (n), sensitifitas laju regangan (m), energi aktivasi (Q)



## ABSTRACT

Name : Diwangkoro Kingkin  
Major : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : Determination of Parameters Constitutive Equations of HSLA Steel (ASTM A572 Grade 50) by Hot Tensile Test

Formability not only determined by the microstructure of the material, temperature, strain rate and strain, but also stage the voltage on the deformation zone. Hot tensile test one method of testing conducted to evaluate the mechanical properties of the material, information material plasticity and fracture properties. Tests carried out by using the parameters of constitutive equations in which the flow stress is a function of strain, strain rate and temperature. This may explain the rheological characteristics of the material.

This research aims to study the rheological characteristics of HSLA steel material (ASTM A572 Gr 50) by determining the parameters of the constitutive equation using hot tensile test, with variable temperature 700 °C, 750 °C, 800 °C and 850 °C. In this study the constitutive equation can be generated parameters for HSLA steel alloy (ASTM A572 Gr 50), namely  $\sigma = K \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot e^{Q/RT}$ , where with increasing temperature from 700 °C to 800 °C will lower the value of strain hardening coefficient (n) by 47% and lower % elongation of 26% of samples. At the strain rate 0.1 s<sup>-1</sup> with increasing temperature from 700 °C to 850 °C will lower the yield stress by 42%. At the strain rate 0.1 s<sup>-1</sup> with increasing temperature from 750 °C to 850 °C, will increase the value of strain rate sensitivity coefficient (m) of 96%. At a constant temperature of 850 °C, with increasing strain rate from 0.01 s<sup>-1</sup> to 0.1 s<sup>-1</sup> would lower the activation energy value of 2%.

Key words :

Rheological, thermal tensile test, strain, strain rate, temperature, constitutive equation, % sample elongation, strain hardening coefficient (n), strain rate sensitivity (m), the activation energy (Q)

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	1
1.3 Perumusan Masalah.....	2
1.4 Metodologi Penelitian.....	2
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	2
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Baja dan Klasifikasinya.....	4
2.2 Baja HSLA.....	6
2.3 Pengaruh Unsur Paduan Pada Baja HSLA.....	8
2.4 Pengerjaan Panas ( <i>Hot Working</i> ).....	14
2.4.1 Proses Mekanik.....	14
2.4.2 Mampu Bentuk ( <i>Workability</i> ).....	15
2.4.3 Uji Tarik Panas ( <i>Hot Tensile</i> ).....	15
2.4.4 Mekanisme Deformasi Temperatur Tinggi.....	16
2.5 Karakteristik Rheologi.....	17
2.5.1 Persamaan Konstitutif.....	17
2.5.2 Pengaruh Regangan Pada Aliran Tegangan.....	18

2.5.3 Pengaruh Laju Regangan Pada Sifat Aliran Tegangan.....	19
2.5.4 Pengaruh Temperatur Pada Sifat Aliran.....	20
2.5.5 Deformasi dan Dislokasi.....	20
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>21</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	21
3.2 Alat dan Bahan.....	22
3.2.1 Alat.....	22
3.2.2 Bahan.....	22
3.3 Prosedur Penelitian.....	22
3.3.1 Pengujian Tarik.....	23
3.3.2 Proses Pembuatan <i>Grid</i> Pada Spesimen.....	25
3.3.3 Pengukuran Perubahan Dimensi.....	26
3.3.4 Parameter Pengujian.....	28
3.3.5 Data.....	28
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>29</b>
4.1 Komposisi Sampel.....	29
4.2 Data Hasil Pengujian Tarik.....	30
4.2.1 Perhitungan Tegangan dan Regangan Sesungguhnya.....	30
4.2.2 Menentukan Titik Luluh ( $\sigma_y$ ).....	31
4.2.3 Perhitungan Elongasi.....	31
4.2.4 Perhitungan Koefisien Pengerasan Regang (n).....	32
4.2.5 Perhitungan Koefisien Sensitifitas Laju Regangan (m).....	32
4.2.6 Perhitungan Energi Aktivasi (Q).....	34
4.3 Pengaruh Temperatur Terhadap Tegangan.....	34
4.4 Pengaruh Temperatur Terhadap % Elongasi.....	35
4.5 Pengaruh Temperatur Terhadap Pengerasan Regang.....	36
4.6 Pengaruh Temperatur Terhadap Sensitivitas Laju Regangan.....	38
4.7 Pengaruh Laju Regangan Terhadap Energi Aktivasi.....	38
4.8 Validasi Menggunakan Model Persamaan Empiris Besar Butir Ferit....	39
4.8.1 Validasi Sampel 1 (700 °C).....	39

4.8.2 Validasi Sampel 2 (750 °C).....	40
4.8.3 Validasi Sampel 3 (800 °C).....	40
4.8.4 Validasi Sampel 4 (850 °C).....	41
4.8.5 Pembahasan.....	41
4.9 Analisa Grafik.....	43
4.9.1 Grafik P – dl.....	44
4.9.2 Grafik Tegangan-Regangan Sesungguhnya.....	45
4.9.3 Grafik Temperatur (°C) - Tegangan Luluh ( $\sigma_y$ ).....	45
4.9.4 Grafik Temperatur (°C) - % elongasi sampel.....	46
4.9.5 Grafik Temperatur (°C) - Koefisien Pengerasan Regang (n).....	47
4.9.6 Grafik Temperatur (°C) - Sensitivitas Laju regangan (m).....	47
4.9.7 Grafik Energi Aktivasi (Q) - Laju Regangan ( $\dot{\epsilon}$ ).....	48
4.10 Analisa Hasil Perpatahan.....	48
<b>BAB 5 KESIMPULAN.....</b>	<b>51</b>
5.1 Kesimpulan.....	51
<b>DAFTAR REFERENSI.....</b>	<b>53</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>55</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi Baja Berdasarkan Komposisinya.....	5
Gambar 2.2	Diagram Binner Fe-Fe <sub>3</sub> C.....	9
Gambar 2.3	Pengaruh Mn Sebagai Penstabil Fasa Austenit.....	10
Gambar 2.4	Pengaruh Paduan Terhadap Ukuran Butir Pada Baja.....	11
Gambar 2.5	Pengaruh Penambahan Vanadium Pada Sifat Uji Tarik.....	12
Gambar 2.6	Pengaruh Kadar Cr Sebagai Penstabil Fasa Ferit.....	13
Gambar 2.7	Kurva Tegangan – Regangan.....	18
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	21
Gambar 3.2	Mesin Uji Tarik Shimadzu Kapasitas 20 kN.....	24
Gambar 3.3	Dapur Pemanas.....	24
Gambar 3.4	Bentuk dan Dimensi Spesimen (JIS G 0202, Kilfoil L. J., dan Dournaux J.L.).....	25
Gambar 3.5	Bekas/jejak grid dari spesimen yang dipanaskan.....	26
Gambar 3.6	<i>Square Grid</i> pada spesimen.....	26
Gambar 3.7	Bentuk spesimen uji.....	27
Gambar 3.8	Jangka Sorong ( <i>Vernier Caliper</i> ).....	28
Gambar 4.1	Kondisi Penarikan Sampel.....	36
Gambar 4.2	Kurva Tegangan-Regangan dengan Perbedaan Ketangguhan Material.....	42
Gambar 4.3	Kurva Tegangan-Regangan Sampel 1 (700 °C), Sampel 2 (750 °C), Sampel 3 (800 °C) dan Sampe 4 (850 °C).....	43
Gambar 4.4	Grafik P – dl.....	44
Gambar 4.5	Grafik Tegangan-Regangan Sesungguhnya.....	45
Gambar 4.6	Grafik Temperatur (°C) - Tegangan Luluh ( $\sigma_y$ ).....	45
Gambar 4.7	Grafik Temperatur (°C) - % elongasi sampel.....	46
Gambar 4.8	Grafik Temperatur (°C) - Koefisien Pengerasan Regang (n).....	47
Gambar 4.9	Grafik Temperatur (°C) - Sensitivitas Laju regangan (m).....	47
Gambar 4.10	Grafik Energi Aktivasi (Q) - Laju Regangan ( $\dot{\epsilon}$ ).....	48
Gambar 4.11	Sampel 4 (850 °C) Setelah Uji Tarik Panas.....	49
Gambar 4.12	Tampak Atas Foto Makro Sampel 4 (850 °C).....	50

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik uji tarik baja HSLA berdasarkan standar ASTM.....	8
Tabel 2.2	Komposisi baja HSLA ASTM A572 Gr 50 (% Berat) berdasarkan standar ASTM.....	8
Tabel 3.1	Dimensi Sampel Uji Tarik.....	27
Tabel 4.1	Komposisi baja HSLA ASTM A572 Gr 50 (% Berat).....	29
Tabel 4.2	Sifat Mekanis baja HSLA ASTM A572 Gr 50.....	30
Tabel 4.3	Titik Luluh ( $\sigma_y$ ) pada Temperatur dan Laju Regangan tertentu.....	31
Tabel 4.4	Nilai % Elongasi.....	31
Tabel 4.5	Nilai Koefisien Pengerasan Regang (n).....	32
Tabel 4.6	Nilai Koefisien Sensitifitas Laju Regangan (m).....	33
Tabel 4.7	Nilai Energi Aktivasi (Q) Pada Temperatur 850 °C.....	34
Tabel 4.8	Perbandingan Besar Butir Ferit Terhadap Temperatur Penarikan.....	41

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Penelitian

Mampu bentuk (*formability*) material bukan hanya ditentukan oleh mikrostruktur dari material, temperatur, laju regangan (*strain rate*) dan regangan (*strain*), tetapi juga tahapan tegangan pada zona deformasi <sup>[1]</sup>. Dengan perkembangan teknik manufaktur dalam hal ini pengerjaan panas untuk produk *con-cast* (*wrought*) terutama baja dan paduan super (*super alloys*), dibutuhkan informasi yang dapat diandalkan mengenai karakteristik produk tersebut saat dilakukan pengerjaan panas.

Uji tarik panas merupakan salah satu metode pengujian yang dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanis dari material, memperoleh informasi plastisitas material dan sifat perpatahan (*fracture*)<sup>[1]</sup>. Pengujian ini dapat mengkondisikan keadaan proses pada pengerjaan metal yang menghasilkan perpatahan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan parameter dari persamaan konstitutif dimana tegangan alir merupakan fungsi dari regangan, laju regangan dan temperatur. Hal ini dapat menjelaskan karakteristik Rheologi dari material tersebut.

Secara umum yang melatarbelakangi penelitian karakteristik Rheologi dari paduan baja adalah sebagai berikut : mempelajari karakteristik Rheologi dengan menentukan parameter persamaan konstitutif yang dapat dipergunakan untuk memprediksikan dan atau memperhitungkan gaya deformasi yang diperlukan dalam proses pengubahan bentuk.

### 1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik Rheologi dari material baja HSLA (ASTM A572 Gr 50) dengan menentukan parameter persamaan konstitutif menggunakan uji tarik panas, dengan variabel temperatur 700 °C, 750 °C, 800 °C, dan 850 °C.

### 1.3. Perumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan persamaan konstitutif termasuk parameter : nilai  $n$  (koefisien pengerasan regangan),  $m$  (sensitivitas laju regangan), dan  $Q$  (energi aktivasi). Hal ini dapat menerangkan karakteristik Rheologi dari material baja HSLA (ASTM A572 Gr 50).

Sebelum dilakukan uji tarik panas dilakukan uji komposisi untuk memastikan komposisi material baja HSLA (ASTM A572 Gr 50).

Penelitian ini dilakukan dengan batasan :

- a. Dilakukan pada skala laboratorium
- b. Yang diteliti adalah hubungan tegangan alir ( $\sigma$ ), indeks sensitivitas laju regangan ( $m$ ) dengan laju regangan ( $\dot{\epsilon}$ ), indeks sensitivitas laju regangan ( $m$ ) dengan persen deformasi, dan hubungan persen deformasi dengan temperatur
- c. Dilakukan pada lembaran material baja HSLA (ASTM A572 Gr 50)
- d. Variabel yang dipergunakan adalah temperatur (700 °C, 750 °C, 800 °C dan 850 °C)

### 1.4 Metodologi Penelitian

Penelitian dilakukan dengan melakukan : (1) Studi literatur dan (2) Percobaan uji tarik yang dilakukan pada kondisi panas dan mengamati struktur makro dari sampel yang telah mengalami uji tarik panas.

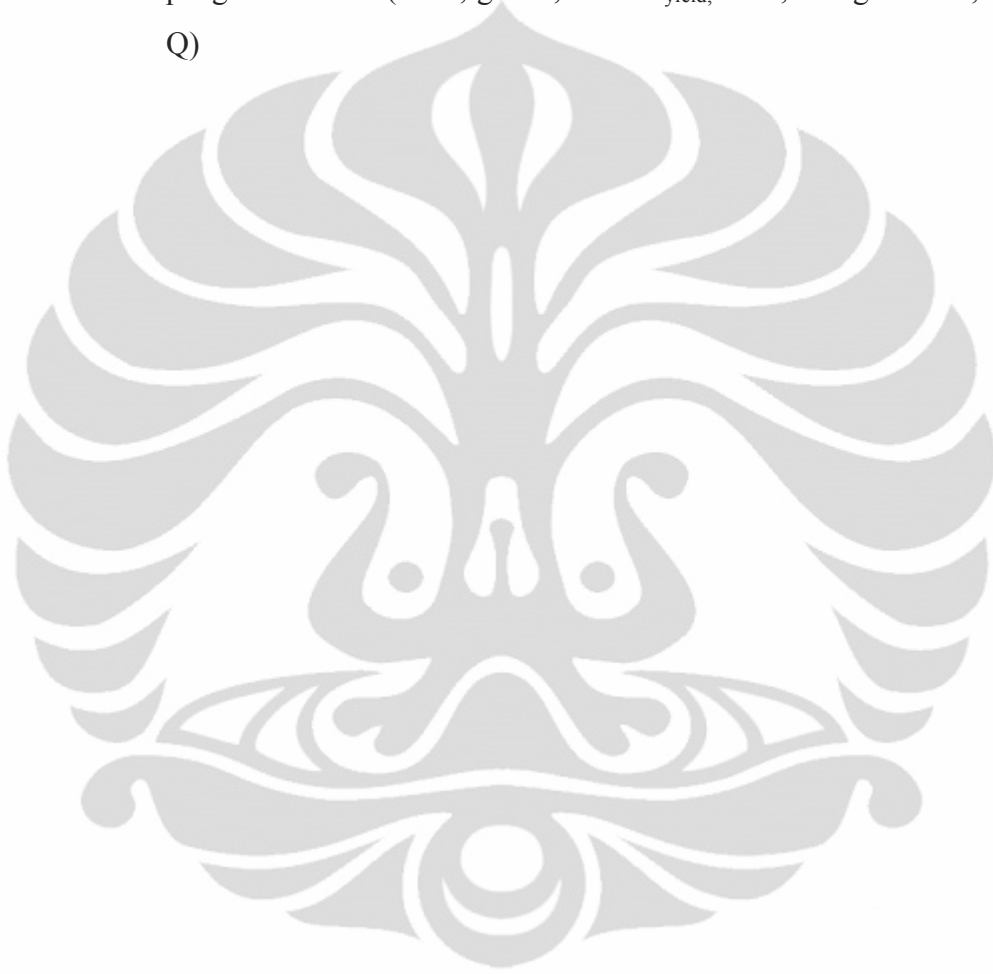
### 1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Material-material yang akan digunakan untuk melakukan pengujian tarik panas ini adalah material baja HSLA (ASTM A572 Gr 50) dengan bentuk dan dimensi sampel mengikuti standar JIS G 0202 spesifikasi 14B, bentuk sampel penelitian Kilfoil L. J., dan sampel penelitian *J.L. Dournaux et all* untuk uji tarik *plane strain* <sup>[8,9]</sup>.
- b. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah temperatur penarikan pada saat pengujian tarik panas, yaitu 700 °C, 750 °C, 800 °C, dan 850 °C



- c. Kecepatan penarikan adalah  $0.1 \text{ s}^{-1}$  untuk temperatur  $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dan di tambah  $0.01 \text{ s}^{-1}$  untuk temperatur  $850^{\circ}$ .
- d. Menentukan persamaan konstitutif yang dapat dipergunakan untuk memprediksikan dan atau memperhitungkan gaya deformasi yang diperlukan dalam proses pengubahan bentuk, dengan melakukan pengolahan data (tabel, grafik, nilai  $\sigma_{\text{yield}}$ , UTS, elongasi total, n, m, dan Q)



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Baja dan Klasifikasinya

Baja merupakan salah satu material logam yang sangat penting dan banyak dipakai hampir disemua bentuk industri besar maupun kecil terutama industri manufaktur, elektronik, otomotif, konstruksi, minyak dan gas. Baja adalah logam paduan dengan besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan karbon dalam baja berkisar antara 0.2% hingga 2.1% berat.<sup>[2]</sup> Baja banyak digunakan didunia industri dikarenakan memiliki beberapa kelebihan, antara lain :

1. Relatif Murah
2. Kekuatan dan keuletan memadai
3. Ketangguhan tinggi
4. Dapat dilas

Namun disamping memiliki kelebihan, baja juga memiliki beberapa kekurangan, antara lain :

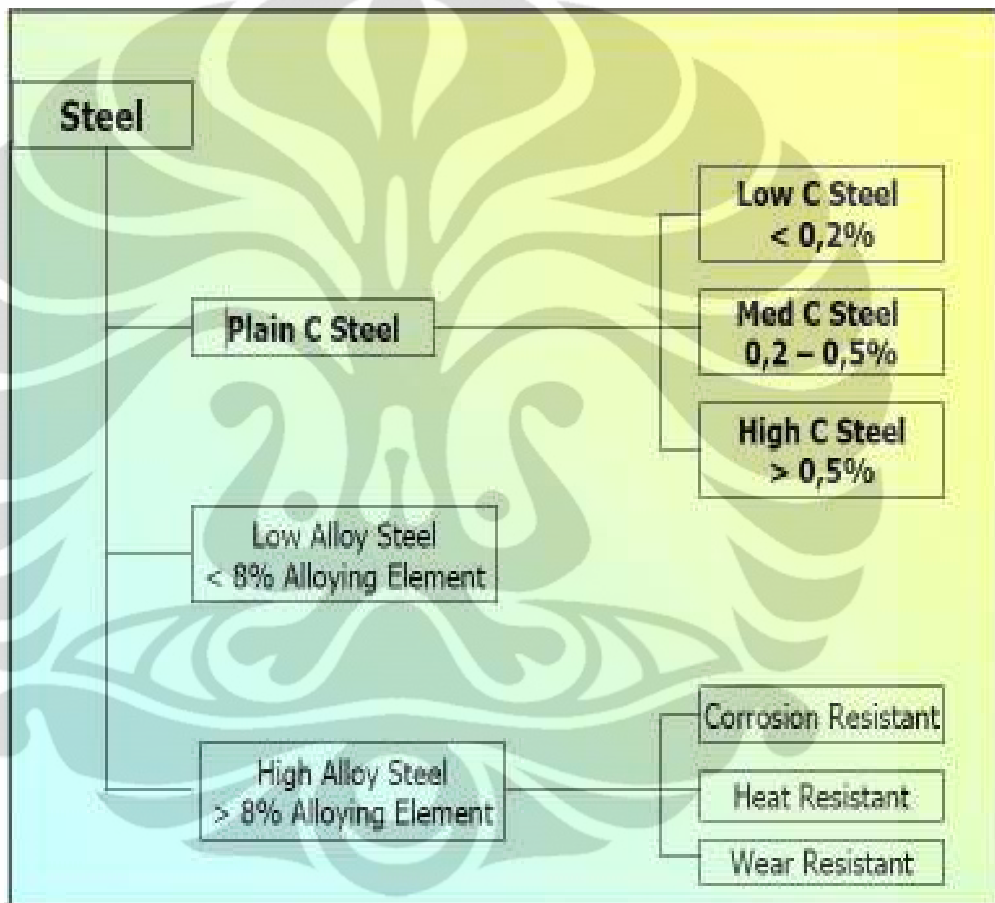
1. Berat jenis tinggi
2. Mudah berkarat
3. Tidak tahan temperatur tinggi
4. Tidak tahan aus

Beberapa kekurangan dari baja tersebut sebenarnya dapat dihindari dengan cara menambahkan unsur lain (*alloying*) yang berguna sebagai paduan. Sebagai contoh untuk menghasilkan baja yang tahan karat maka perlu adanya penambahan unsur paduan seperti Ni dan Cr.

Baja dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa hal, antara lain<sup>[2]</sup> :

1. Berdasarkan komposisinya, antara lain :
  - a) Baja karbon biasa (*Plain Carbon Steel*) → Baja karbon rendah ( $C < 0.2 \%$ ), Baja karbon menengah ( $0.2 \% < C < 0.5 \%$ ) dan Baja karbon tinggi ( $C > 0.5 \%$ )

- b) Baja paduan rendah (*Low Alloy Steel*) → Baja dengan penambahan unsur paduan  $< 8\%$ . Contohnya : baja HSLA (*High Strength Low Alloy*)
- c) Baja paduan tinggi (*High Alloy Steel*) → Baja dengan penambahan unsur paduan  $> 8\%$ . Contohnya : Baja tahan karat (*Corrosion Resistant Steel*), Baja tahan panas (*Heat Resistant Steel*) dan baja tahan aus (*Wear Resistant Steel*).



**Gambar 2.1** Klasifikasi Baja Berdasarkan Komposisinya<sup>[6]</sup>

## 2. Berdasarkan bentuk produk

- a) Pelat batangan (*billet, slab*)
- b) Tabung
- c) Lembaran (*strip*)
- d) Pita/gulungan (*Wire*)

3. Berdasarkan struktur mikro
  - a) Perlitik (didominasi oleh fasa perlit)
  - b) Martensitik (didominasi oleh fasa martensit)
  - c) Austenitik (didominasi oleh fasa austenit)
  - d) Feritik (didominasi oleh fasa ferit)

## 2.2 Baja HSLA

Baja HSLA (*High Strength Low Alloy*) merupakan baja paduan mikro berkadar karbon rendah (0.05-0.20 %C) dengan penambahan unsur paduan seperti mangan yang komposisinya dapat mencapai maksimum 2.0 wt % serta paduan lainnya seperti tembaga, nikel, niobium, nitrogen, vanadium, kromium, molibdenum, titanium ataupun zirkonium dalam jumlah kecil [4]. Paduan mikro tersebut efektif untuk membentuk karbida, nitrida atau karbonitrida. Adapun fungsi pokok elemen paduan mikro adalah :

1. Pembentukan presipitat yang kaya akan karbonitrida yang stabil pada temperatur tinggi
2. Pembentukan karbonitrida yang mengendap selama dan setelah temperatur transformasi
3. Pembentukan endapan dalam ferit acicular selama atau setelah pendinginan dipercepat
4. Pembentukan endapan pada transformasi martensit selama perlakuan temper untuk menghasilkan *secondary hardening*
5. Menghambat laju transformasi struktur austenit menjadi ferit dan mempromosikan pembentukan martensit

Baja HSLA tidak dibuat untuk mendapatkan komposisi kimia yang spesifik melainkan untuk mendapatkan sifat mekanik yang spesifik. Baja HSLA memiliki karakteristik khusus yaitu sifat kekuatan dan ketahanan terhadap korosi yang lebih baik daripada baja karbon biasa, memiliki *tensile strength* yang tinggi, anti bocor, tahan terhadap abrasi, mudah dibentuk, ulet, sifat mampu mesin yang baik dan sifat mampu las yang tinggi<sup>[1]</sup>. Sifat kekuatan yang baik dihasilkan dari mekanisme penghalusan butir oleh paduan

seperti niobium dan penguatan presipitat oleh paduan seperti titanium dan vanadium pada kondisi *hot rolled, cold rolled, anil, stress relieved, direct quenching* atau normalisasi<sup>[7]</sup>. Selain itu baja HSLA memiliki rasio perbandingan antara kekuatan dan berat yang lebih besar dan lebih baik dibandingkan dengan baja karbon biasa. Dengan komposisi karbon dan kekuatan yang sama, baja HSLA dapat memiliki ukuran berat sekitar 20-30% lebih ringan daripada baja karbon biasa. Dikarenakan baja HSLA memiliki rasio perbandingan antara kekuatan dan berat yang lebih baik maka baja HSLA banyak digunakan untuk aplikasi bidang industri yang membutuhkan reduksi ukuran berat yang besar atau dengan kata lain lebih ringan namun tetap kuat seperti dalam industri manufaktur, rangka mobil, jembatan dan pesawat.

Baja HSLA dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori<sup>[3]</sup>:

1. ***Weathering Steel***. Baja HSLA ini mengandung sejumlah kecil elemen paduan seperti Tembaga dan Fosfor yang berfungsi untuk meningkatkan ketahanan korosi atmosferik serta berfungsi sebagai penguat butir dengan penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*).
2. ***Microalloyed Ferrite-Pearlite Steel***. Baja HSLA ini mengandung elemen paduan pembentuk karbida atau karbon-nitrida (umumnya kurang dari 0,1%), seperti Niobium, Vanadium, dan/atau Titanium yang berfungsi sebagai penguat presipitat, penghalus butir, serta mengontrol temperatur transformasi.
3. ***As Rolled Pearlitic Steel***, yang merupakan baja karbon–mangan (C-Mn) dengan penambahan sejumlah kecil elemen paduan lain untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, mampu bentuk, serta mampu las.
4. ***Acicular Ferrite (Low Carbon Bainite) Steel***. Baja HSLA ini mempunyai kandungan karbon yang rendah (kurang dari 0,05 %C) dengan kombinasi sifat kekuatan luluh yang tinggi, mampu las, mampu bentuk, serta ketangguhan yang baik.
5. ***Dual Phase Steel***. Ciri baja HSLA jenis ini memiliki mikrostruktur pulau-pulau martensit yang tersebar dalam matriks ferit serta mempunyai kombinasi sifat yang baik antara keuletan dan kekuatan tarik yang tinggi.

6. ***Inclusion Shape Controlled Steel.*** Baja HSLA ini mempunyai keuletan serta ketangguhan yang baik dengan adanya penambahan sejumlah kecil Kalsium (Ca), Zirconium (Zr), Titanium (Ti) bahkan mungkin logam tanah jarang (*rare earth*) yang dapat mengubah bentuk inklusi sulfida dari bentuk balok pipih menjadi bentuk yang lebih kecil, tersebar, dan bulat (*globular*).

**Tabel 2.1** Karakteristik uji tarik baja HSLA berdasarkan standar ASTM<sup>[3]</sup>

ASTM Specification	Grade	Product Thickness		Minimum Tensile Strength		Minimum Yield Strength		Minimum elongation, %	
		mm	in	Mpa	ksi	Mpa	ksi	in 200mm (8 in)	in 50 mm (2 in)
HSLA A572	50	100	4	450	65	345	50	18	21

Untuk aplikasi baja HSLA meliputi penggunaan sebagai baja konstruksi, otomotif, bejana tekan, saluran pipa minyak dan gas dengan diameter besar, *automotive beams*, struktur lepas pantai dan *shipbuilding*.

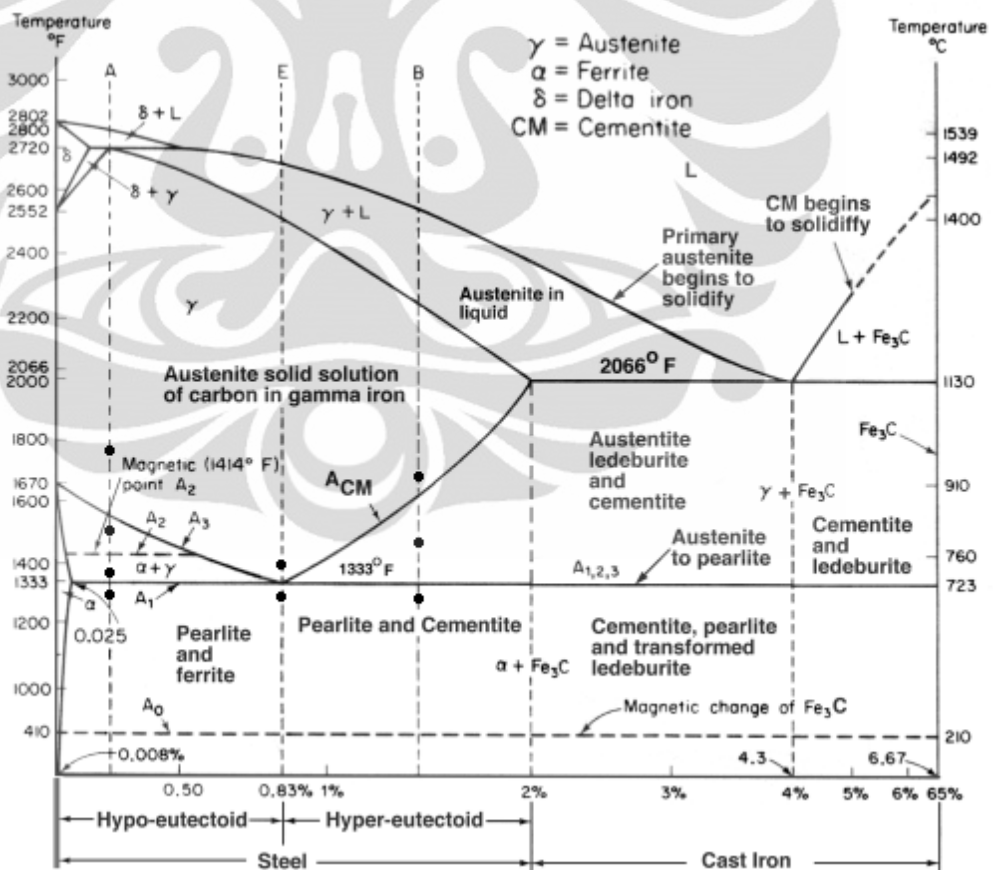
### 2.3 Pengaruh Unsur Paduan Pada Baja HSLA

Baja HSLA (*High Strength Low Alloy*) merupakan baja paduan mikro berkadar karbon rendah (0.05-0.25%C) dengan penambahan unsur paduan seperti mangan yang komposisinya dapat mencapai maksimum 2.0 wt % serta paduan lainnya seperti tembaga, nikel, niobium, nitrogen, vanadium, kromium, molibdenum, titanium ataupun zirkonium dalam jumlah kecil.

**Tabel 2.2** Komposisi baja HSLA ASTM A572 Gr 50 (% Berat) berdasarkan standar ASTM<sup>[3]</sup>

Unsur	%
C	0.23

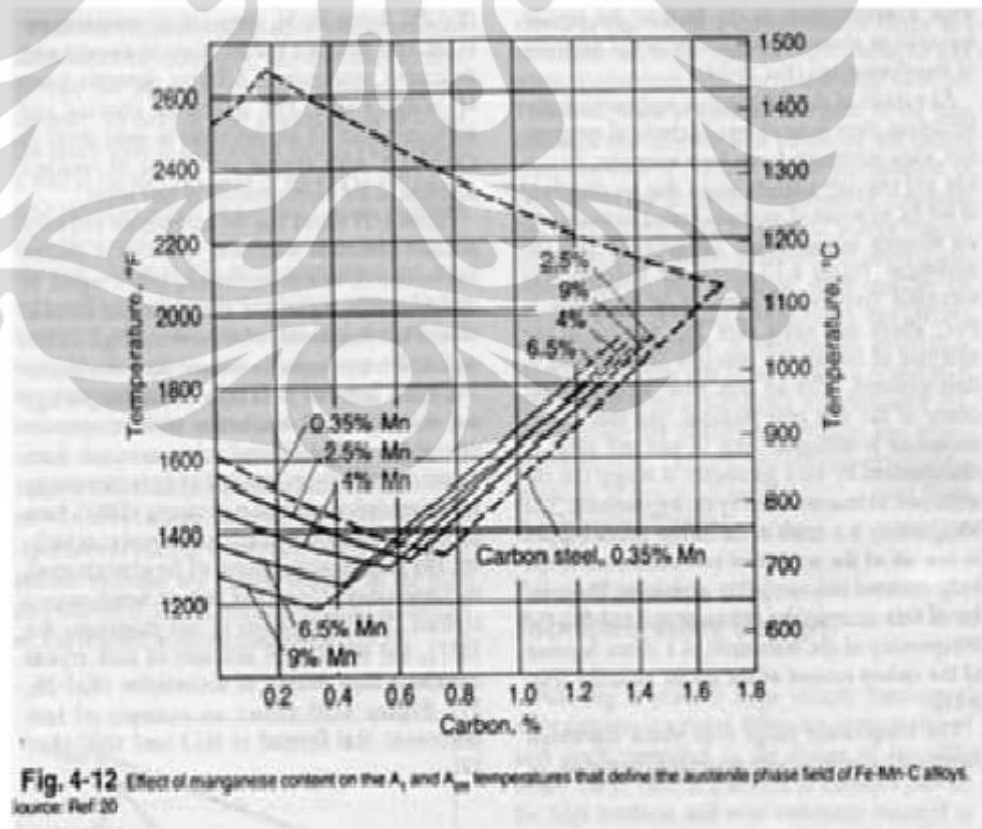
Si	0.30
Mn	1.35
P	0.04
S	0.05
Ni	<0.005
Al	0.049
Cu	0.20 min
Nb	0.005-0.05
V	<0.002
Ti	<0.002



Gambar 2.2 Diagram Binner Fe-Fe<sub>3</sub>C

Adanya unsur-unsur paduan tersebut dapat memberikan pengaruh tersendiri terhadap sifat dan karakteristik dari baja HSLA, antara lain<sup>[5]</sup>:

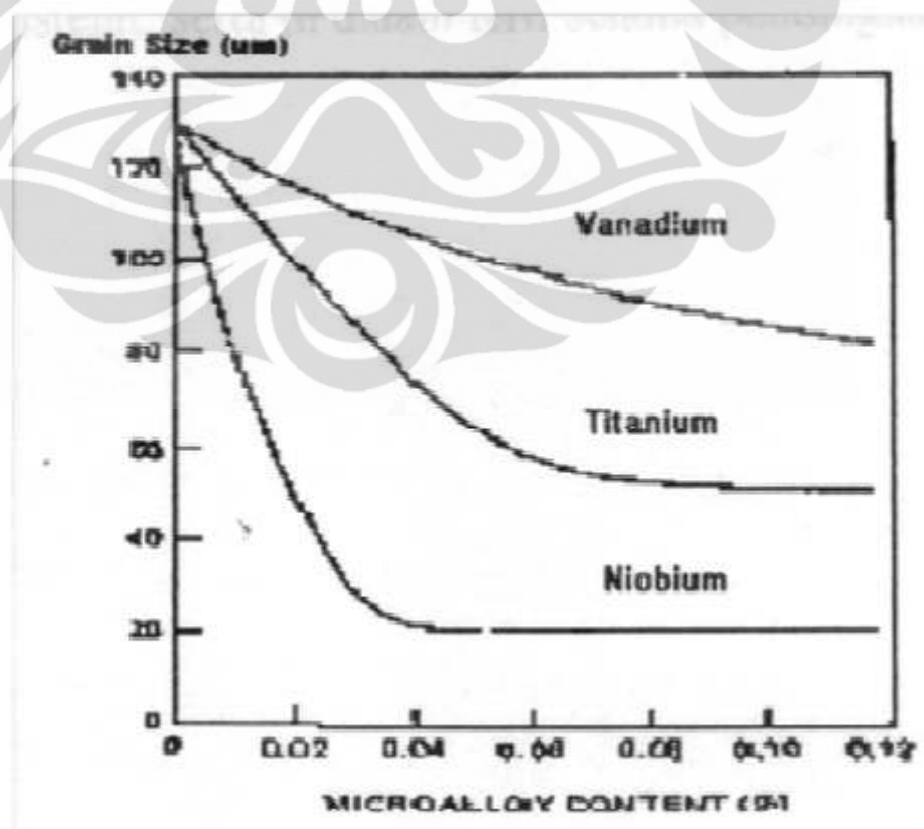
1. Karbon (C) → Merupakan elemen paduan yang sangat penting pada berbagai jenis baja. Kekuatan dan kekerasan meningkat dengan naiknya % C. Menunjang penguatan larutan padat dan pembentukan sementit (dan karbida lainnya), perlit, bainit. Peningkatan kadar karbon dapat menurunkan *weldability* dan ketangguhan impak pada baja.
2. Mangan (Mn) → Merupakan bahan *oxidizer* (mengurangi O dalam baja) yang dapat menurunkan kerentanan *hot shortness* pada aplikasi pengerjaan panas. Larut, membentuk *solid solution strength* dan meningkatkan efek penguatan presipitat pada baja niobium. Dengan Sulfur membentuk Mangan Sulfida, meningkatkan sifat permesinan (*machineability*). Sebagai penstabil fasa austenit yang dapat menurunkan temperatur transformasi austenit-ferit.



**Gambar 2.3** Pengaruh Mn Sebagai Penstabil Fasa Austenit <sup>[2]</sup>

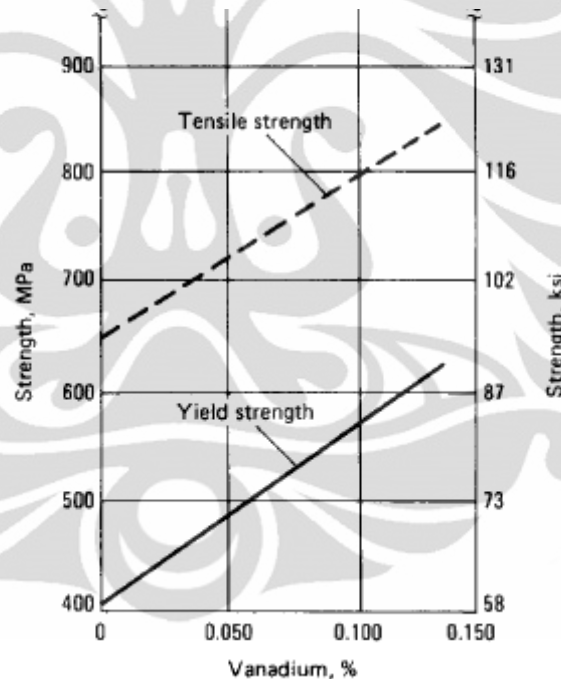


3. Tembaga (Cu) → Dapat meningkatkan kekuatan pada baja karbon rendah maupun sedang dengan sifatnya sebagai penguat ferit. Ketahanan korosi atmosferik dapat ditingkatkan dengan penambahan Fosfor, namun ketika sejumlah kecil Tembaga ditambahkan dalam baja, ketahanan terhadap korosi menjadi lebih besar.
4. Nikel (Ni) → Dengan Cr menghasilkan baja paduan dengan kemampuan kekerasan tinggi, ketahanan impak dan fatik yang tinggi. Paduan ini juga dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi atmosferik. Selain itu juga sebagai penstabil fasa austenit.
5. Niobium (Nb) → Sebagai penstabil fasa ferit. Dapat bersifat sebagai penghalus butir dan meningkatkan *yield strength* melalui penguatan presipitat. Niobium dapat membentuk karbida dimana karbida Niobium memiliki kelarutan yang rendah pada baja dan ditemukan dalam bentuk endapan atau presipitat. Partikel yang tidak larut membatasi pertumbuhan austenit sehingga dapat dihasilkan butir ferit yang lebih halus.



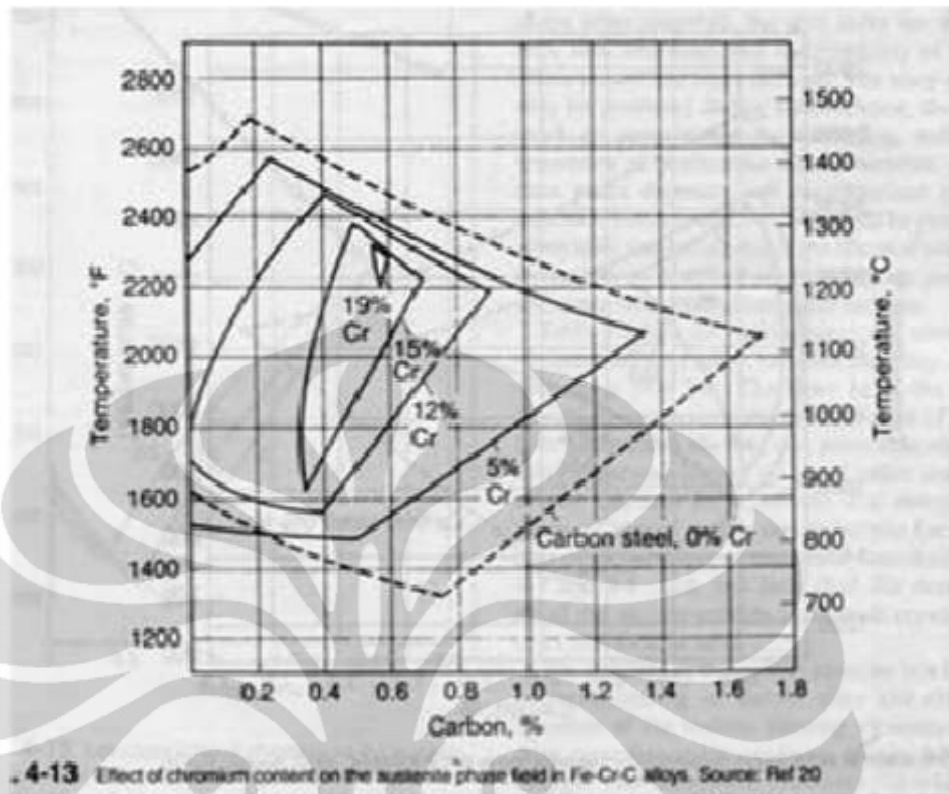
Gambar 2.4 Pengaruh Paduan Terhadap Ukuran Butir Pada Baja <sup>[6]</sup>

6. Nitrogen (N) → Sebagai penstabil fasa austenit. Ditambahkan pada baja HSLA yang mengandung Vanadium. Penambahan Nitrogen dibatasi hingga 0.005%. Paduan ini sangat penting karena dapat meningkatkan kekerasan melalui pengerasan presipitat. Presipitat Vanadium-Nitrida (VN) dapat memberikan efek penghalusan butir karena mempunyai kelarutan yang rendah dalam austenit<sup>[6]</sup>.
7. Vanadium (V) → Dapat mengontrol pertumbuhan butir (meningkatkan kekuatan dan ketangguhan). Dapat meningkatkan kemampukerasan baja. Dalam jumlah berlebih menurunkan *ductility* (pembentukan karbida berlebih). Sebagai penstabil fasa ferit.



**Gambar 2.5** Pengaruh Penambahan Vanadium Pada Sifat Uji Tarik<sup>[7]</sup>

8. Kromium (Cr) → Meningkatkan ketahanan korosi dan oksidasi. Meningkatkan kemampukerasan. Meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi. Meningkatkan ketahanan terhadap abrasi. Dapat membentuk karbida yang meningkatkan kekerasan. Sebagai penstabil fasa ferit yang memperluas daerah pembentukan fasa ferit pada diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C<sup>[6]</sup>.



Gambar 2.6 Pengaruh Kadar Cr Sebagai Penstabil Fasa Ferit <sup>[8]</sup>

9. Molibdenum (Mo) → Meningkatkan kemampukerasan. Menurunkan kerentanan terhadap *temper embrittlement* (450-550 °C). Dapat meningkatkan kekuatan tarik pada temperatur tinggi dan kekuatan *creep*.
10. Titanium dan Silikon (Ti & Si) → Titanium berfungsi sebagai deoksidiser dan pengontrol pertumbuhan butir. Penambahan Titanium meningkatkan *impact toughness* dengan penghalusan butir ferit. Silikon dalam jumlah besar, meningkatkan ketahanan baja terhadap efek *scaling*, tetapi mengalami kesulitan dalam pemrosesannya (*High-Silicon Steel*).
11. Fosfor (P) → Meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada baja karbon rendah, meningkatkan ketahanan korosi, serta meningkatkan *machinability* pada *free-cutting steels*.

12. Sulfur (S) → Umumnya merupakan pengotor pada baja. Penambahan pada baja dapat meningkatkan *machinability*.
13. Aluminium (Al) → Berfungsi sebagai deoksidiser, penstabil fasa ferit dan membantu dalam proses pengontrolan pertumbuhan butir.
14. Zirkonium (Zr) → Berfungsi sebagai penstabil fasa ferit dan dapat membentuk karbida keras yang dapat meningkatkan kekerasan.

## 2.4 Pengerjaan Panas (*Hot Working*)

Pengerjaan panas memanfaatkan turunnya aliran tegangan pada temperatur tinggi, sehingga alat dari segi ukuran dan energi yang dipakai lebih rendah. Pengerjaan panas didefinisikan sebagai kerja di atas temperatur rekristalisasi, sehingga benda kerja mengalami rekristalisasi saat dideformasi.

### 2.4.1. Proses Mekanik

Pada proses pembentukan komponen *engineering*, proses mekanik merupakan suatu tahap yang sangat esensial, dimana yang dibutuhkan tidak hanya keakurasian dimensi tetapi juga mikrostruktur dan sifat mekanis yang spesifik. Proses mekanik yang paling penting (tahap awal) adalah pengerolan, tempa dan ekstrusi, umumnya dilakukan pada kondisi temperatur tinggi untuk memperoleh regangan yang tinggi tanpa terjadi *fracture* (patah). Untuk tahap selanjutnya biasanya dilakukan dengan menggunakan pengerjaan dingin (*cold working*) sehingga diperoleh permukaan, toleransi dimensi dan kekuatan yang baik. Biasanya proses dilakukan dalam beberapa tahapan dengan anil untuk mendapatkan keuletan (*ductility*) kembali. Sebagai contoh antara lain : pembentukan lembaran logam (*sheet metal working*), tempa dingin (*cold forging*), *impact extrusion*, *coining*, *wire*, dan *tube drawing*.

Pada proses mekanik (*mechanical processing*) tahap awal adalah yang terpenting, hal ini didasarkan pada dua pertimbangan pokok, yaitu : (1) perubahan mikrostruktur terutama terjadi pada tahap ini dan ini penting untuk tahap proses selanjutnya, (2) dengan banyaknya material diproses pada tahap

ini, dengan adanya pengembangan teknik proses menimbulkan efek peningkatan pada produktifitas proses manufaktur.

#### 2.4.2 Mampu Bentuk (*Workability*)

Definisi dari mampu bentuk (*workability*) yaitu kemampuan material untuk dibentuk dengan aliran plastis tanpa adanya patah. Mampu bentuk tidak hanya dipengaruhi oleh mikrostruktur dari material, temperatur, kecepatan regangan (*strain rate*) dan regangan (*strain*), tetapi juga tahapan tegangan pada zona deformasi<sup>[8,9]</sup>.

#### 2.4.3 Uji Tarik Panas (*Hot Tensile*)

Untuk memperoleh data dari aliran tegangan sebagai fungsi dari kecepatan regangan dan regangan yang sesuai dengan kenyataan dan akurasi yang tinggi dapat dipakai beberapa teknik pengujian seperti : *hot tensile*, *hot torsion*, atau *hot compression*, dimana masing-masing memiliki kelebihan.

Uji tarik merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanis dari material<sup>[1]</sup>, memperoleh informasi plastisitas material dan sifat perpatahan (*fracture*). Keuntungan dari jenis pengujian ini : telah mapan (telah distandarisasi<sup>[10]</sup>), relatif mudah dan tidak mahal.

Perkembangan teknik manufaktur untuk produk *con-cast* (*wrought*) terutama baja dan paduan super (*super alloys*), dibutuhkan informasi yang dapat diandalkan mengenai karakteristik produk tersebut saat dilakukan pengerjaan panas, selang temperatur pengerjaan (temperatur maksimal-minimal), reduksi dari penampang melintang produk yang sesuai dengan batas regangan tarik (*tensile strain*) yang diperkenankan. Untuk menentukan parameter pengerjaan panas, keuletan (*ductility*) dan kekuatan (*strength*) dari material ditetapkan sebagai fungsi dari temperatur. Meskipun demikian proses pengerjaan dapat juga dianalisa dengan menggunakan terminologi keadaan tegangan-regangan sederhana, dan putusnya benda kerja disebabkan adanya lokalisasi regangan tarik. Keuntungan dari uji tarik panas adalah dapat mengkondisikan keadaan proses pada pengerjaan metal yang menghasilkan perpatahan.

Data eksperimen atau pengujian tersebut dapat menghasilkan peta proses untuk pengerjaan logam (*processing map*).

#### 2.4.4 Mekanisme Deformasi Temperatur Tinggi (*Hot Deformation*)

Pada saat deformasi temperatur tinggi terjadi proses mikrostruktural pada logam dan unsur paduannya. Beberapa mekanisme deformasi temperatur tinggi yang terjadi antara lain : dinamik rekristalisasi (DRX), deformasi superplastis, *dynamic recovery*, patah sisi (*wedge cracking*), *void formation*, *intercrystalline cracking*, *prior particle boundary* (PPB) *cracking*, dan ketidakstabilan aliran.

- Dinamik rekristalisasi (DRX), proses ini berhubungan dengan peristiwa rekristalisasi saat deformasi yang terjadi bersamaan dengan proses nukleasi dan pertumbuhan butir (*growth*). Proses DRX ditentukan oleh kecepatan nukleasi terhadap kecepatan pertumbuhan pada kondisi temperatur dan laju regangan tertentu. Sedangkan statis rekristalisasi ditentukan oleh perubahan energi akibat aktivitas termal perolehan kembali dislokasi dan perpindahan batas butir dan didefinisikan sebagai proses kinetik. DRX memberikan aliran yang stabil dan *workability* yang baik dengan adanya pelunakan, tetapi juga penyusunan kembali mikrostruktur.
- Deformasi superplastis, material dengan butir halus yang stabil ketika dideformasi pada kecepatan rendah dan temperatur tinggi menunjukkan elongasi yang tidak normal. Mekanismenya melibatkan pergeseran batas butir dan difusi yang memuat aliran pada persimpangan dari tiga batas butir memudahkan pembentukan retak sisi (*wedge*).
- *Dynamic recovery*, pemulihan termal dislokasi saat memanjat menyebabkan pemulihan dinamik, biasanya terjadi pada 0.4 – 0.6 temperatur *homologous* (perbandingan dengan temperatur lebur)
- Patah sisi (*wedge cracking*), pada kondisi laju regangan rendah dan temperatur tinggi di mana batas butir bergeser pada kondisi tegangan geser, dan menghasilkan tiga persimpangan untuk membebaskan

konsentrasi tegangan. Jika konsentrasi tegangan dikurangi karena bantuan difusi terjadi superplastis.

- *Void formation*, jika ada partikel keras dalam matriks lunak, deformasi menyebabkan retak pada *interface* dan matrik mengalir sedangkan partikel tidak terdeformasi. Dan ketika akumulasi tegangan semakin besar, antarmuka terpisah dari partikel atau partikel itu sendiri retak.
- *Intercrystalline cracking*, peningkatan retak sepanjang batas butir saat deformasi mungkin terjadi ketika paduan dengan titik lebur rendah terbentuk akibat segregasi dari beberapa penambahan unsur paduan.
- *Prior particle boundary (PPB) cracking*, pada permukaan partikel serbuk terdapat kotoran atau terbentuk oksida, hidroksida, nitrida, dan karbida yang sangat reaktif dan merupakan cacat PPB yang dapat dilihat jelas pada kompaksi serbuk. Hal ini pada proses kompaksi pada temperatur dan laju regangan rendah dapat menyebabkan retak.
- Ketidakstabilan aliran, yang paling umum adalah terjadinya *adiabatic shear band*. Pada laju regangan tinggi, panas menaikkan temperatur akibat deformasi plastik tidak menghantarkan panas ke bagian yang lebih rendah temperaturnya akibat waktu terlalu singkat. Aliran tegangan pada pita deformasi (*deformation band*) akan menjadi lebih rendah dan lebih lanjut timbul lokalisasi. Pita deformasi semakin meningkat dan ini mendekati kondisi adiabatik.

## 2.5. Karakteristik Rheologi

Rheologi merupakan ilmu yang mempelajari aliran material, karakteristik rheologi dari suatu material dapat dijelaskan dengan menggunakan persamaan konstitutif.

### 2.5.1. Persamaan Konstitutif

Persamaan konstitutif menggambarkan hubungan antara tegangan dan regangan sebagai fungsi variabel laju regangan dan temperatur. Konsep yang dipakai untuk menurunkan hubungan konstitutif adalah bahwa tegangan alir tergantung pada nilai regangan, laju regangan dan temperatur sesaat<sup>[11]</sup>.

Persamaan konstitutif dimanfaatkan untuk analisa tegangan dan regangan pada struktur maupun untuk proses deformasi plastis (pengerjaan logam dengan gaya mekanik). Secara umum persamaan konstitutif di ekspresikan dengan persamaan berikut :

$$f[\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, T] = 0 \dots (2.1)$$

Telah banyak persamaan diajukan persamaan diajukan oleh peneliti diantaranya adalah : persamaan perpangkatan dari Hollomon,

$$\sigma = K \varepsilon^n \dots (2.2)$$

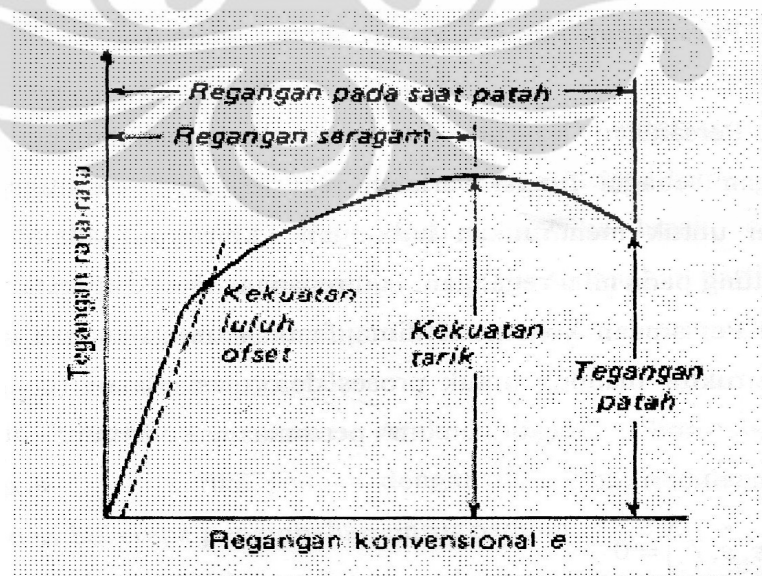
Krupkowski-Swift,

$$\sigma = K (\varepsilon_0 + \varepsilon^n) \dots (2.3)$$

Pada persamaan-persamaan di atas tidak memasukkan pengaruh temperatur dan laju regangan, sedangkan dalam perubahan bentuk logam (metal forming) sering ditemukan adanya variabel laju regangan dan temperatur. Di bawah ini akan dibahas mengenai pengaruh laju regangan dan temperatur pada aliran tegangan.

### 2.5.2. Pengaruh Regangan pada Aliran Tegangan

Hubungan antara regangan dan aliran tegangan dapat dilihat pada kurva tegangan regangan, di bawah ini :



Gambar 2.7 Kurva Tegangan – Regangan



### 2.5.3. Pengaruh Laju Regangan pada Sifat Aliran Tegangan

Sensitivitas laju regangan ( $m$ ) adalah kemampuan dari sebuah bahan untuk menahan ketidakstabilan plastis atau *necking*. Apabila nilai  $m$  rendah maka penambahan tegangan pada bagian leher (*neck*) akan menyebabkan semakin besarnya laju regangan pada lokasi tersebut akibatnya perpanjangan tidak seberapa sebelum akhirnya patah. Sebaliknya apabila  $m$  besar penambahan laju regangan pada bagian leher berjalan lambat dalam menanggapi penambahan tegangan dan karena itulah bagian leher akan terdeformasi secara gradual sehingga perpanjangan sangat besar sebelum akhirnya patah<sup>[12]</sup>.

Laju sensitivitas regangan  $m$  berubah dengan berubahnya parameter-parameter proses selama pembentukan itu sendiri. Oleh karena itu,  $m$  harus ditentukan sebagai fungsi dari regangan, laju regangan, temperatur dan mikrostruktur.

Laju regangan mempunyai pengaruh yang penting terhadap tegangan aliran. Laju regangan didefinisikan sebagai  $\dot{\epsilon} = d\epsilon / dt$ , dan secara konvensional dinyatakan dalam satuan “per detik”. Kenaikan laju regangan akan memperbesar kekuatan tarik, dan pengaruhnya bertambah besar dengan naiknya temperatur. Tegangan luluh dan tegangan aliran pada regangan plastis rendah sangat tergantung pada laju regangan dibandingkan tegangan tarik.

Terdapat hubungan antara tegangan alir dan laju regangan pada regangan dan temperatur konstan dapat digambarkan sebagai fungsi :

$$\sigma = C [\dot{\epsilon}]^m |\epsilon, T \dots \quad (2.4)$$

dimana  $m$  adalah sensitivitas laju regangan. Nilai dari  $m$  dapat diperoleh dari kemiringan gambar  $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$ .

Sensitivitas laju regangan merupakan indikator yang baik dalam hal perubahan perilaku deformasi dan pengukuran  $m$  memberikan penjelasan<sup>[5]</sup> antara konsep dislokasi deformasi dan pengukuran yang lebih bersifat makroskopik yang dilakukan pada uji tarik.

#### 2.5.4. Pengaruh Temperatur pada Sifat Aliran

Kurva tegangan-regangan, sifat aliran dan sifat perpatahan yang diperoleh pada uji tarik sangat tergantung pada temperatur pada saat dilakukan pengujian.<sup>[13]</sup> Pada umumnya dengan naiknya temperatur kekuatan mengecil dan terlihat bertambah besar, namun dengan adanya perubahan struktur, seperti: pengendapan, penyepuhan regang atau kristalisasi kembali dapat mengubah perilaku tersebut.

Ketergantungan tegangan alir terhadap suhu pada laju regangan dan tegangan konstan, dinyatakan oleh persamaan :

$$\sigma = C_2 e^{Q/RT} \dot{\epsilon}^n \quad (2.5)$$

dimana :

Q = energi aktivasi untuk aliran plastik kal/g mol

R = konstanta gas universal, 1.987 kal/derajat mol

T = suhu pengujian, °K

Jika persamaan tersebut dipenuhi, maka pemetaan antara  $\ln \sigma$  terhadap  $1/T$  akan menghasilkan suatu garis lurus, dengan kemiringan  $Q/R$ .

#### 2.5.5. Deformasi dan Dislokasi

Logam dapat terdeformasi secara elastik dan plastik. Deformasi elastik terjadi pada tegangan rendah dan memiliki tiga karakteristik utama, yaitu (1) bersifat mampu balik, (2) tegangan berbanding lurus dengan regangan sesuai Hukum Hooke, dan (3) Biasanya kecil (regangan elastik < 1%).

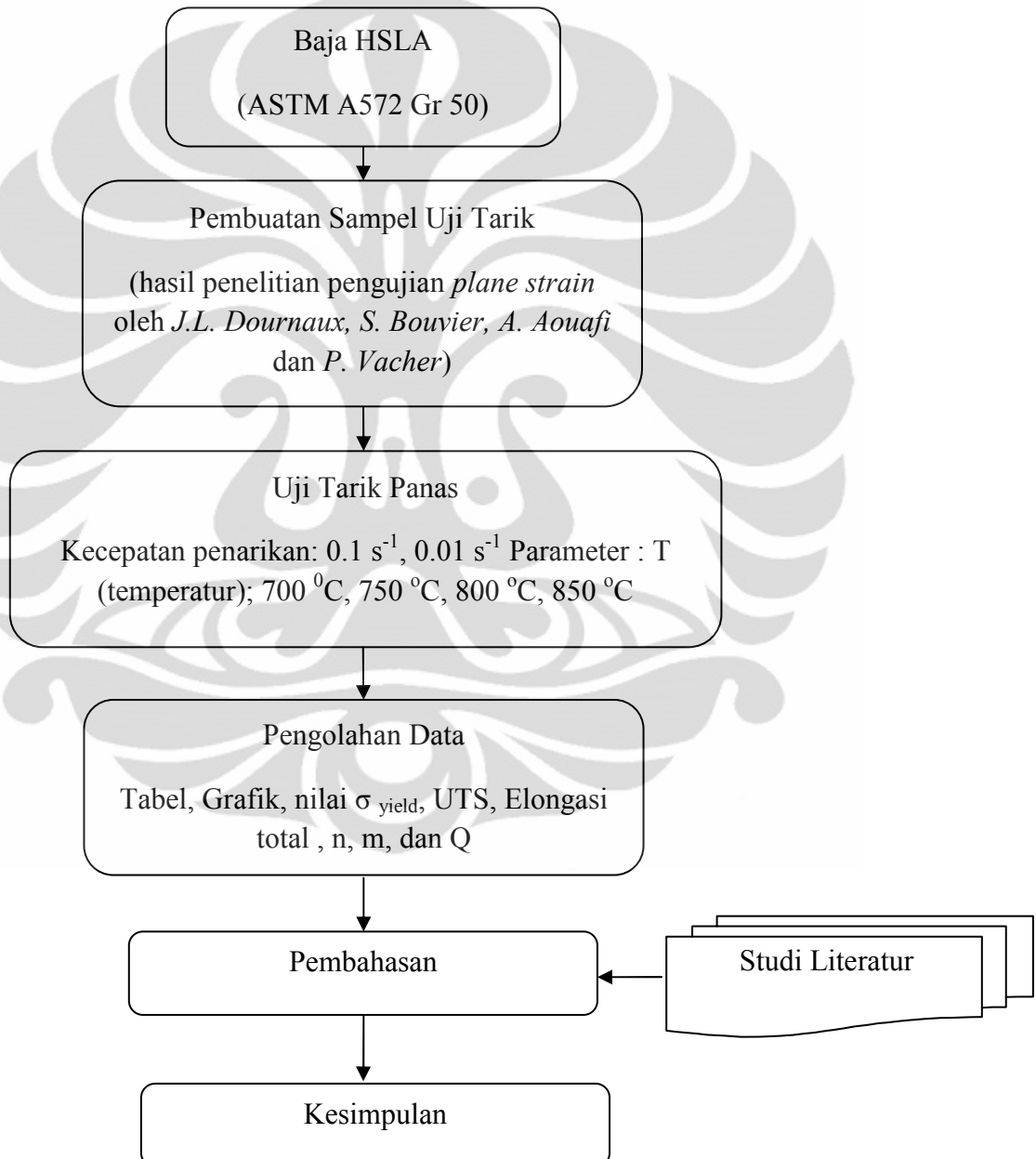
Limit atau batas daerah elastik sulit ditentukan secara pasti namun dapat ditetapkan suatu nilai sebagai batas. Jumlah deformasi elastik jauh lebih kecil dari deformasi plastik sehingga dapat diabaikan. Jika tegangan luluh (batas daerah deformasi elastik dan plastik) dilampaui, terjadi deformasi plastik atau deformasi permanen, dan ini berlangsung melalui suatu mekanisme, slip atau luncur dan kembaran.

Aliran plastik, khususnya pada temperatur tinggi, dapat dianggap sebagai proses aktivasi termal<sup>[14]</sup>. Pengukuran makroskopik dengan cara uji tarik pada suhu dan laju regangan tertentu menghasilkan tegangan aliran menggambarkan hubungannya dengan perilaku dislokasi.

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari proses pengujian tarik panas sampel baja HSLA (ASTM A 572 Gr 50) adalah sebagai berikut :



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1 Alat

1. *Universal Tensile Machine*–Merk Shimadzu, kapasitas 20 kN.
2. Cetakan mounting
3. Mesin amplas.
4. Mesin poles.
5. Mikroskop optik.
6. Jangka sorong.
7. Lain-lain : kantong plastik, label, spidol, tang penjepit, palu, penggaris, sarung tangan, kunci torsi.

### 3.2.2 Bahan

1. Baja HSLA lembaran (ASTM A572 Grade 50)
2. Resin
3. Hardener
4. Kertas amplas *grid* #200, #400, #600, #800, #1000, #1200, dan #1500
5. Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
6. Kain poles / beludru
7. 1 roll film
8. Kertas foto
9. Lilin

## 3.3 Prosedur Penelitian

Pertama sekali dilakukan studi literatur dan studi lapangan untuk melihat keterkinian dari topik penelitian ini. Dalam studi pustaka ini dilakukan pendalaman akan materi dari isi penelitian ini, dan untuk validasi keterkinian dari studi pustaka ini dilakukan studi lapangan pada industri baja. Hal ini diharapkan akan memberikan dasar dan landasan teori bagi peneliti untuk memahami mengenai pengujian tarik panas.

Pembuatan sampel uji tarik dibuat dari material baja HSLA (ASTM A572 Gr 50) yang merupakan hasil penelitian pengujian *plane strain* oleh *J.L. Dournaux, S. Bouvier, A. Aouafi* dan *P. Vacher*, lalu

sampel dilakukan pengujian tarik panas dengan variabel temperatur (700 °C, 750 °C, 800 °C dan 850 °C) dan kecepatan penarikan  $0.1 \text{ s}^{-1}$ . Data hasil pengujian tarik panas akan diolah untuk mendapatkan hubungan tegangan alir ( $\sigma$ ), indeks sensitivitas laju regangan ( $m$ ) dengan laju regangan ( $\dot{\epsilon}$ ), indeks sensitivitas laju regangan ( $m$ ) dengan persen deformasi, dan hubungan persen deformasi dengan temperatur dengan menentukan persamaan konstitutif dari hasil pengujian tarik panas.

### 3.3.1 Pengujian Tarik

Pada penelitian ini dilakukan 2 jenis pengujian tarik. Yang pertama adalah uji tarik panas standar yang bertujuan untuk mendapatkan standar nilai UTS dan rheologi dari spesimen baja HSLA lembaran (ASTM A572 Grade 50) yang digunakan. Pengujian tarik yang kedua adalah uji tarik panas dengan variabel perbedaan temperatur yang bertujuan untuk mengamati rheologi pada spesimen baja HSLA lembaran (ASTM A572 Grade 50) dalam penelitian ini.

Pengujian ini menggunakan Mesin Uji Tarik UTS merk Shimadzu Kapasitas 20 kN yang terlihat pada Gambar 3.2. Pengujian tarik pada penelitian ini mengacu pada 1 arah lembaran, yaitu arah sejajar canai ( $0^\circ$ ). Pengujian ini menggunakan Mesin Uji Tarik UTS merk Shimadzu Kapasitas 20 kN dan dapur pemanas yang dirancang untuk mendukung penelitian ini. Dapur pemanas dibuat dengan dimensi yang sesuai dengan desain *Jig* dan mesin uji tarik yang digunakan. Adapun desain dapur pemanas yang telah dibuat berdimensi  $\varnothing 25 \times h 25 \times t 10 \text{ cm}^3$  seperti yang terlihat pada Gambar 3.3. Dalam keadaan kosong dapur pemanas tersebut dapat mencapai temperatur  $1000^\circ\text{C}$ .



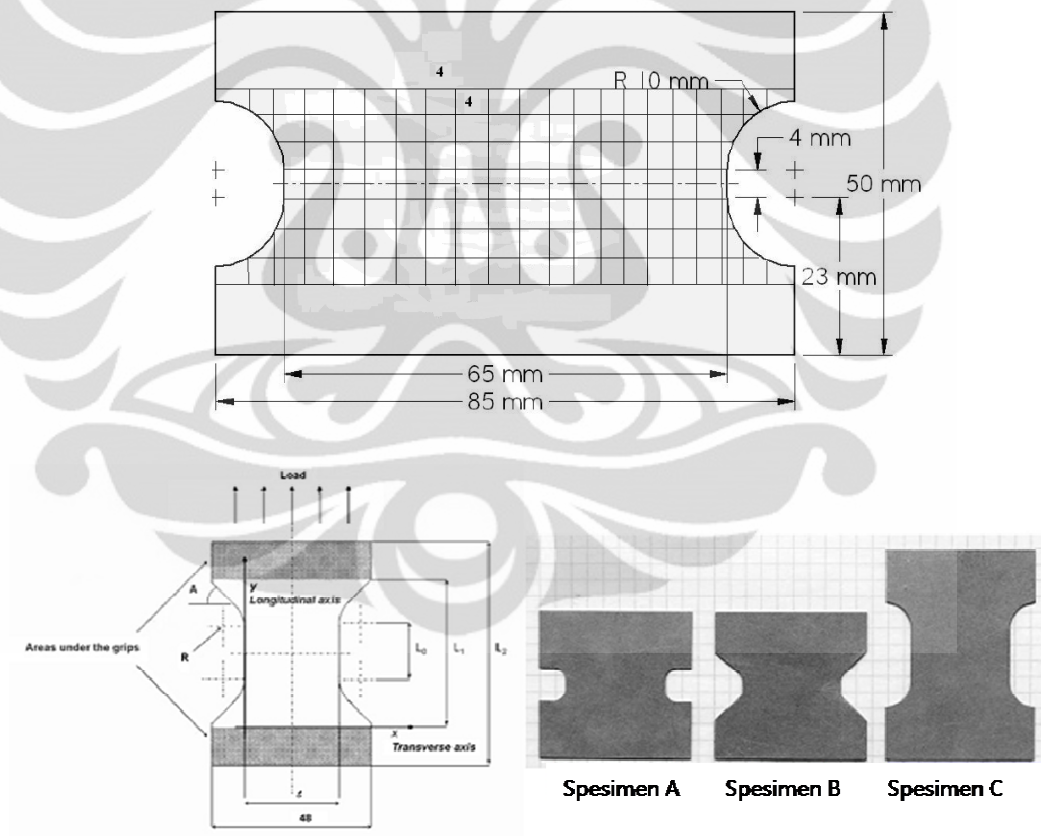
**Gambar 3.2.** Mesin Uji Tarik Shimadzu Kapasitas 20 kN



**Gambar 3.3.** Dapur Pemanas

### 3.3.2 Proses Pembuatan *Grid* Pada Spesimen

Proses pembuatan *grid* pada spesimen dilakukan secara manual dengan menggunakan *drawing pen* 0.5 dan penggaris. *Grid* dibuat berupa kotak-kotak kecil dengan ukuran 4 mm x 4 mm (*square grid*) di permukaan *gage length* dari spesimen. Kemudian, untuk menjaga agar *grid* tidak hilang ketika uji tarik panas uniaksial, spesimen dipanaskan dengan menggunakan nyala lilin. Spesimen yang telah diberi *square grid* kemudian dipasang pada jig. Sampel material baja HSLA (ASTM A572 Gr 50) mengikuti standar spesimen uji tarik JIS G 0202, hasil penelitian dari Kilfoil L. J., dan Dournaux J.L untuk bidang *plane strain*, seperti Gambar 3.4.



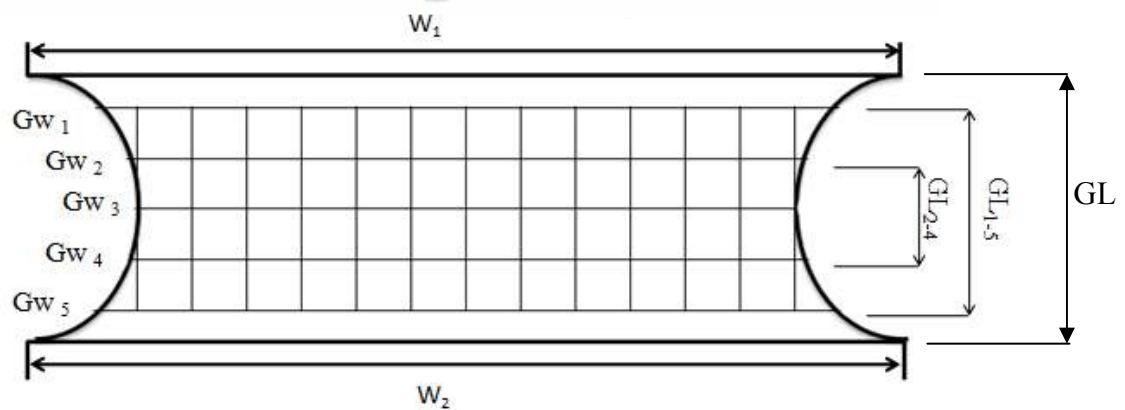
**Gambar 3.4.** Bentuk dan Dimensi Spesimen (JIS G 0202, Kilfoil L. J., dan Dournaux J.L.)<sup>[15,16]</sup>

### 3.3.3 Pengukuran Perubahan Dimensi

Pengamatan perubahan dimensi ini dilakukan sebagai tahap pengamatan analitis terhadap terbentuknya mekanisme *plane strain* pada spesimen yang diuji. Pengukuran perubahan dimensi ini dilakukan dengan menggunakan jangka sorong (*vernier caliper*) setelah pelepasan spesimen dari jig. Pengukuran ini meliputi perubahan *gage width* sebagai nilai regangan minor ( $Gw_1$ ,  $Gw_2$ ,  $Gw_3$ ,  $Gw_4$ , dan  $Gw_5$ ) dan *gage length* sebagai nilai regangan mayor ( $GL_1$ ,  $GL_2$ , dan  $GL_3$ ).

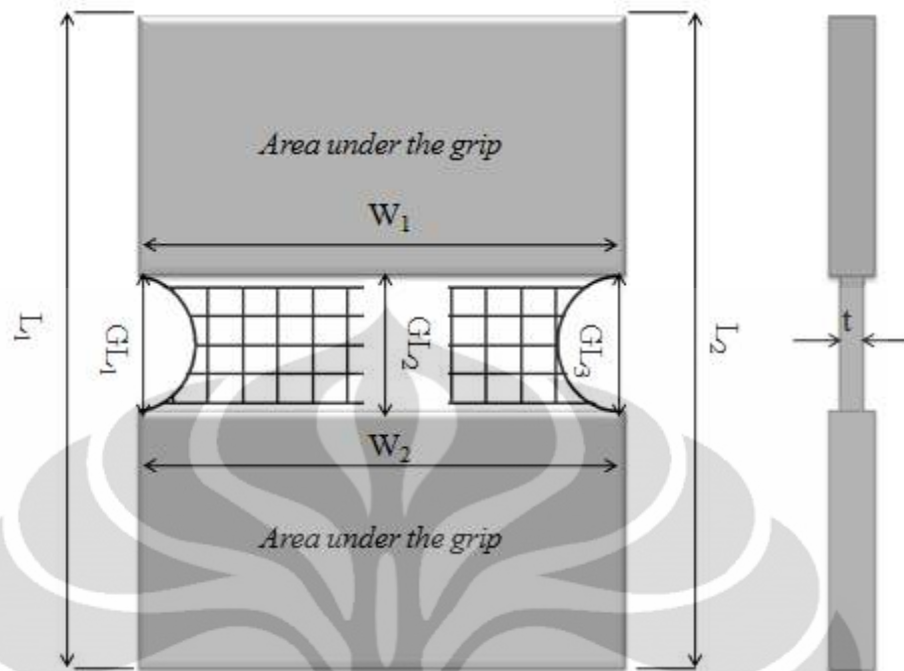


Gambar 3.5. Bekas/jejak *grid* dari spesimen yang dipanaskan



Gambar 3.6 *Square Grid* pada spesimen





Gambar 3.7 Bentuk spesimen uji

Tabel 3.1 Dimensi Sampel Uji Tarik

DEPAN									
Panjang (mm)	$L_1$	$L_2$	$W_1$	$W_2$	$GW_1$	$GW_2$	$GW_3$	$GW_4$	$GW_5$
	127,2	128,3	83,1	83,2	72,9	67	64,4	66,5	71,1

TENGAH				Kanan		Kiri	
Panjang (mm)	$GL_1$	$GL_2$	$GL_3$	$GL_{1-5}$	$GL_{2-4}$	$GL_{1-5}$	$GL_{2-4}$
	27	27,1	27,1	17,3	9,2	16,7	8,7

TEBAL (t)	Kanan	Kiri
Panjang (mm)	1,5	2,13



**Gambar 3.8** Jangka Sorong (*Vernier Caliper*)

### 3.3.4 Parameter Pengujian

Temperatur (700 °C, 750 °C, 800 °C, 850 °C)

### 3.3.5 Data

Data yang diperoleh :

- Grafik P – dl
- Panjang akhir sampel ( $\Delta l$  ukur =  $l_i - l_0$ )

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Komposisi Sampel

Dari uji komposisi didapat hasil sebagai berikut :

**Tabel 4.1** Komposisi baja HSLA ASTM A572 Gr 50 (% Berat)<sup>[17]</sup>

Unsur	%
C	0.0085
Si	0.222
Mn	1.45
P	<0.003
S	<0.003
Ni	<0.005
Al	0.049
Cu	0.0045
Nb	0.028
V	<0.002
Ti	<0.002
Cr	<0.003
Mo	<0.005
Fe	98.141

**Tabel 4.2** Sifat Mekanis baja HSLA ASTM A572 Gr 50<sup>[17]</sup>

Sampel						
Code	Cross Section (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Gauge Length	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
0,1/s	W = 12,8 T = 6,00	76,81	50	58	47	26,9

#### 4.2. Data Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dengan variabel temperatur dan kecepatan

Variabel temperatur : Sampel 1 (700 °C), Sampel 2 (750 °C), Sampel 3 (800 °C), Sampel 4 (850 °C)

Variabel kecepatan : 0.1 s<sup>-1</sup>, 0.01 s<sup>-1</sup>

Data yang diperoleh pada pengujian tarik panas dapat dilihat pada lampiran yang menunjukkan hubungan antara beban (P) dengan perubahan panjang (dl).

##### 4.2.1 Perhitungan Tegangan dan Regangan Sesungguhnya

Dari data beban (P) dan perubahan panjang (dl) dapat ditentukan tegangan sesungguhnya ( $\sigma$ ) dan regangan sesungguhnya ( $\epsilon$ ). Perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$s = \frac{P}{A} \quad \dots(4.1)$$

$$e = FK \frac{dl}{l_0} \quad \dots (4.2)$$

$$FK = \frac{dl \text{ ukur}}{dl \text{ mesin}} \quad \dots (4.3)$$

$$\epsilon = \ln (1+e) \quad \dots(4.4)$$

$$\sigma = s (1+e) \quad \dots(4.5)$$

Hasil perhitungan untuk setiap sampel dapat dilihat pada lampiran data uji tarik panas.

#### 4.2.2 Menentukan Titik Luluh ( $\sigma_y$ )

Penentuan titik luluh dilakukan dengan mencari titik potong garis sejajar kurva tegangan – regangan sesungguhnya pada regangan 0.1 – 0.2 %.

**Tabel 4.3.** Titik Luluh ( $\sigma_y$ ) pada Laju Regangan  $0.1 \text{ s}^{-1}$

Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\sigma_y$ ( $\text{Kg/mm}^2$ )
700	10.222
750	9.562
800	7.454
850	5.882

#### 4.2.3 Perhitungan Elongasi

Perhitungan % elongasi :

$$e_f = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad \dots(4.6)$$

Nilai % elongasi adalah sebagai berikut :

**Tabel 4.4.** Nilai % Elongasi pada laju regangan  $0.1 \text{ s}^{-1}$

Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	% Elongasi
700	37.897
750	36.492
800	27.969
850	41.102

#### 4.2.4 Perhitungan Koefisien Pengerasan Regang (n)

Nilai koefisien pengerasan regang (n) dapat ditentukan dengan :

$$\sigma = k \epsilon^n \dots(4.7)$$

di mana  $\sigma$  merupakan tegangan luluh (*yield point*) yang ditentukan dengan menarik garis 0.2 % pada kurva  $\sigma - \epsilon$ .

$$\log \sigma = \log k + n \log \epsilon \dots(4.8)$$

dengan metode kuadrat terkecil (*least square*) :

$$\bar{Y} = a + b \bar{X}$$

$$b = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum x^2 - n\bar{X}^2} \rightarrow \text{nilai n bisa di dapat}$$

$$a = \bar{Y} - b \bar{X}$$

Dari hasil perhitungan tersebut diperoleh nilai-nilai n sebagai berikut :

**Tabel 4.5.** Nilai Koefisien Pengerasan Regang (n)

Temperatur (°C)	n
700	0.287
750	0.174
800	0.151
850	0.261

#### 4.2.5 Perhitungan Koefisien Sensitivitas Laju Regangan (m)

Misalkan dua buah spesimen identik ditarik dengan kecepatan yang berbeda  $v_1$  dan  $v_2$ , dimana  $v_2 > v_1$ . Umumnya material sulit berdeformasi dengan kecepatan tinggi. Efek dari sensitivitas laju regangan dijelaskan oleh hukum tenaga yang analog dengan persamaan Hollomon :

$$\sigma = C. \dot{\epsilon}^m \quad \dots(4.9)$$

Indeks sensitivitas laju regangan ( $m$ ) dapat konstan atau tergantung dari laju regangan dan regangan. Jadi dapat diturunkan :

$$m = \frac{d \log \sigma}{d \log \dot{\epsilon}} \quad \dots (4.10)$$

Untuk mendapatkan nilai  $m$ , (2.7) digunakan untuk dua laju regangan

$$\sigma_2 = \sigma \text{ (pada } v_2) = C (\dot{\epsilon}_2)^m \quad \dots(4.11)$$

$$\sigma_1 = \sigma \text{ (pada } v_1) = C (\dot{\epsilon}_1)^m \quad \dots(4.12)$$

Dan selanjutnya

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left[ \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right]^m \rightarrow \log \left[ \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right] = m \log \left[ \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right] \rightarrow m = \frac{\log [\sigma_2/\sigma_1]}{\log [\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1]} \quad \dots (4.13)$$

Dengan metode kuadrat terkecil (*least square*) :

$$\bar{Y} = a + b \bar{X}$$

$$b = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum x^2 - n\bar{X}^2} \rightarrow \text{nilai } n \text{ bisa di dapat}$$

$$a = \bar{Y} - b \bar{X}$$

Dari hasil perhitungan tersebut diperoleh nilai-nilai koefisien sensitivitas laju regangan ( $m$ ) sebagai berikut :

**Tabel 4.6.** Nilai Koefisien Sensitivitas Laju Regangan ( $m$ )

Temperatur (°C)	750	850
$m$	0.037	0.981

#### 4.2.6 Perhitungan Energi Aktivasi (Q)

Nilai energi aktivasi (Q) dapat diperoleh dengan rumus :

$$\sigma = C_2 e^{Q/RT} \quad \dots(4.14)$$

$$\ln \sigma = \ln C_2 + Q \frac{1}{RT} \quad \dots(4.15)$$

dengan  $R = 1,987 \text{ kal /}^\circ\text{mol}$

dengan metode kuadrat terkecil (*least square*) :

$$\bar{Y} = a + b \bar{X}$$

$$b = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum x^2 - n\bar{X}^2} \rightarrow \text{nilai n bisa di dapat}$$

$$a = \bar{Y} - b \bar{X}$$

Dari hasil perhitungan tersebut diperoleh nilai – nilai Q sebagai berikut :

**Tabel 4.7.** Nilai Energi Aktivasi (Q) Pada Temperatur 850 °C

Laju regangan (s <sup>-1</sup> )	0.1	0.01
Q (kal/gr.mol)	583.49	598.47

#### 4.3 Pengaruh Temperatur terhadap Tegangan

Titik luluh merupakan batas dimana material akan terus mengalami deformasi tanpa adanya penambahan beban. Tegangan (*stress*) yang menyebabkan terjadinya mekanisme luluh ini disebut sebagai tegangan luluh (*yield stress*). Untuk jenis material yang tidak menunjukkan batas luluh yang jelas seperti baja kekuatan tinggi penentuannya dapat dengan metode Offset<sup>[2]</sup>.

Pada tabel 4.3 menunjukkan hubungan antara tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) dan temperatur penarikan, dengan meningkatnya temperatur dari 700 °C ke 850 °C mengakibatkan penurunan tegangan luluh sebesar 42 %.



Penurunan nilai tegangan luluh pada temperatur 700 °C ke 850 °C ini disebabkan karena gaya yang diperlukan untuk membebaskan dislokasi yang terkunci sangat peka terhadap temperatur<sup>[7]</sup>. Pada temperatur yang semakin tinggi, dislokasi yang terkunci semakin mudah bergerak melewati penghalangnya. Karena itu, tegangan luar yang dibutuhkan untuk deformasi lebih sedikit.

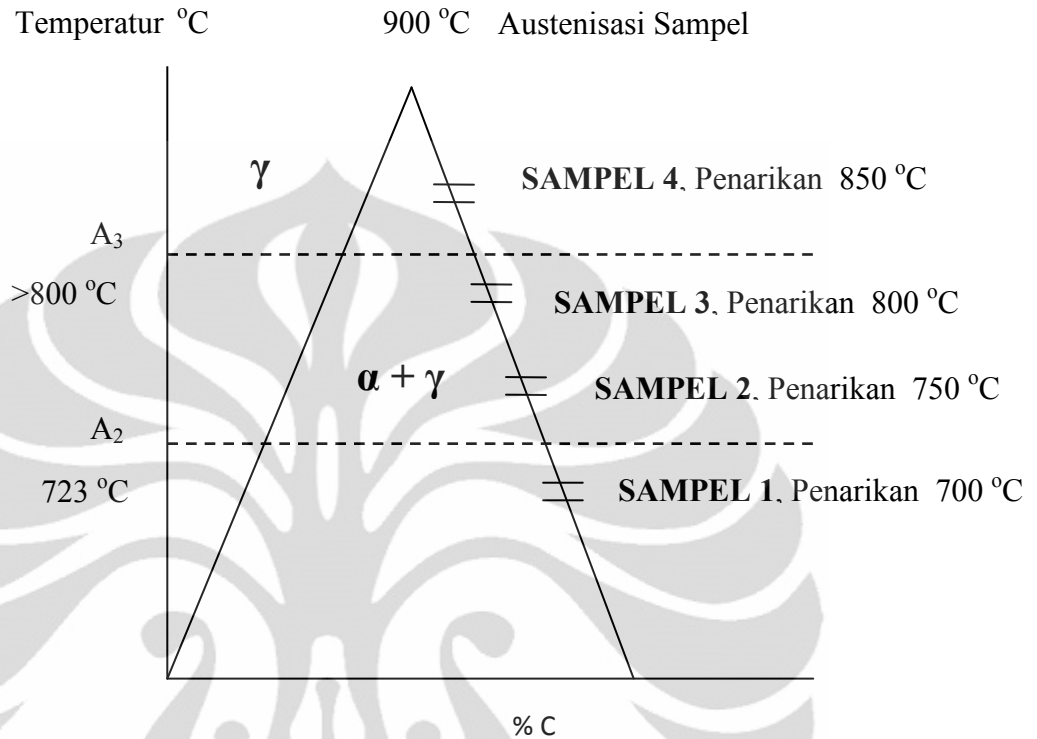
#### 4.4 Pengaruh Temperatur terhadap % Elongasi

Persentase elongasi merupakan perbandingan antara panjang awal sampel terhadap panjang sampel setelah diberikan perlakuan uji tarik. Pada tabel 4.4 menunjukkan dengan meningkatnya temperatur maka % elongasi baja HSLA semakin menurun, dimana dari temperatur 700 °C ke 800 °C terjadi penurunan sebesar 26%.

Penurunan % elongasi yang terjadi pada sampel 1 sampai sampel 3 (temperatur 700 °C ke 800 °C) karena naiknya temperatur disebabkan karena dislokasi yang bergerak tertahan oleh mekanisme penguatan kerja baja HSLA, unsur-unsur pembentuk karbida seperti V, Ti, Nb berikatan membentuk senyawa karbida yang dapat meningkatkan kekuatan dan menahan laju dislokasi, sehingga semakin meningkatnya temperatur senyawa karbida semakin banyak terbentuk dan semakin besar menghalangi pergerakan dislokasi, akibatnya % elongasi yang terjadi karena aliran plastis yang mengakibatkan dislokasi menjadi turun<sup>[7]</sup>.

Pada temperatur 800 °C ke 850 °C, terjadi peningkatan % elongasi sampel sebesar 32%. Hal ini disebabkan kondisi penarikan pada sampel 4 (850 °C) berbeda dengan tiga sampel yang lain. Penarikan pada sampel 4 (850 °C) berada pada fasa austenit ( $\gamma$ ) yang memiliki struktur FCC, struktur ini lebih lunak dibandingkan dengan fasa ferit ( $\alpha$ ) yang memiliki struktur BCC. Sehingga sampel 4 (850 °C) memiliki struktur yang lebih lunak jika dibandingkan dengan sampel 3 (800 °C) dan sampel 2 (750 °C) yang memiliki fasa ferit + austenit ( $\alpha + \gamma$ ), dan jauh lebih lunak dibandingkan dengan sampel 1 (700 °C) dengan struktur ferit ( $\alpha$ ) yang memiliki kekerasan

jauh lebih tinggi dibandingkan dengan austenit ( $\gamma$ ), hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.1 .



**Gambar 4.1** Kondisi Penarikan Sampel

Dengan kondisi penarikan sampel 4 (850 °C) pada fasa austenit ( $\gamma$ ) yang memiliki struktur lebih lunak dibandingkan fasa austenit+ferit ( $\gamma+\alpha$ ) ataupun fasa ferit ( $\alpha$ ), menyebabkan % elongasi sampel 4 jauh lebih tinggi dibandingkan ketiga sampel yang lain (sampel 1,2 dan 3). Hal ini disebabkan karena dislokasi lebih mudah bergerak pada temperatur tinggi, sehingga tidak terjadi penumpukan dislokasi di satu tempat. Dengan demikian deformasi yang terjadi lebih merata, sehingga deformasi yang mungkin terjadi semakin besar<sup>[18]</sup>.

#### 4.5 Pengaruh Temperatur terhadap Pengerasan Regang

Koefisien pengerasan regang ( $n$ ) didefinisikan sebagai proses peningkatan kekerasan pada suatu proses pengubahan bentuk plastis, sehingga tegangan yang diperlukan agar deformasi berjalan tetap dapat

meningkat. Proses pengerasan regang terjadi karena pergerakan dislokasi yang ada dihalangi. Halangan tersebut dapat berupa batas butir, interaksi dislokasi, atom larut, impuritis, dan partikel fasa kedua<sup>[19]</sup>.

Koefisien pengerasan regang ( $n$ ) berkisar antara  $n=0$  (material bersifat plastis) hingga  $n=1$  (material bersifat elastis). Untuk lembaran plat baja karbon rendah harga  $n$  berkisar antara 0.1-0.3. Harga  $n$  yang tinggi menandakan kemampuan mendistribusikan regangan lebih baik, sehingga dapat memperkecil terbentuknya penciutan lokal yang dapat menyebabkan perpatahan pada saat pembentukan. Sedangkan harga  $n$  yang rendah akan mengalami penciutan lokal pada saat dibentuk, yang dapat mencapai regangan kritis sehingga terjadi perpatahan<sup>[19]</sup>.

Pada tabel 4.5, menunjukkan dengan meningkatnya temperatur maka koefisien pengerasan regang ( $n$ ) semakin kecil, dimana dari temperatur 700 °C ke 800 °C terjadi penurunan sebesar 47%. Koefisien pengerasan regang yang tinggi menandakan adanya rintangan terhadap dislokasi<sup>[18]</sup>. Peningkatan temperatur membantu dislokasi melewati rintangan tersebut. Dengan demikian koefisien pengerasan regang menurun dengan meningkatnya temperatur.

Pada temperatur 850 °C yang dilakukan penarikan pada fasa austenit menunjukkan nilai  $n$  yang berbeda dibandingkan dengan ketiga sampel yang lain (sampel 1,2 dan 3). Peningkatan nilai  $n$  terjadi dari temperatur 800 °C ke temperatur 850 °C sebesar 42%. Hal ini disebabkan sampel 4 (850 °C) memiliki tebal yang jauh lebih tinggi di bandingkan ketiga sampel yang lain (sampel 1,2 dan 3), yaitu 2.7 mm. Sedangkan tebal dari sampel 1 adalah 1.9 mm, sampel 2 adalah 2.1 mm dan sampel 3 adalah 1.4 mm. Hal ini akan menyebabkan perubahan pada luas ( $A$ ) yang semakin besar dan menyebabkan perubahan nilai tegangan dan regangan. Karena pada sampel 4 (850 C) memiliki tebal dan luas area ( $A$ ) yang paling besar dibandingkan ketiga sampel yang lain, walaupun dikerjakan pada suhu tinggi dan pada fasa austenit akan memiliki nilai koefisien pengerasan regang ( $n$ ) yang tinggi.

#### 4.6 Pengaruh Temperatur terhadap Sensitivitas Laju Regangan

Sensitivitas laju regangan ( $m$ ) adalah kemampuan dari sebuah bahan untuk menahan ketidakstabilan plastis atau *necking*. Apabila nilai  $m$  rendah maka penambahan tegangan pada bagian leher (*neck*) akan menyebabkan semakin besarnya laju regangan pada lokasi tersebut akibatnya perpanjangan tidak seberapa sebelum akhirnya patah. Sebaliknya apabila  $m$  besar penambahan laju regangan pada bagian leher berjalan lambat dalam menanggapi penambahan tegangan dan karena itulah bagian leher akan terdeformasi secara gradual sehingga perpanjangan sangat besar sebelum akhirnya patah<sup>[12]</sup>.

Pada tabel 4.6, menunjukkan dengan meningkatnya temperatur mengakibatkan sensitivitas laju regangan bertambah. Nilai  $m$  untuk temperatur 750 °C adalah 0,037 sedangkan pada temperatur 850 °C adalah 0.981. Secara keseluruhan kenaikan nilai  $m$  dari temperatur 750 °C ke temperatur 850 °C adalah sebesar 96%. Nilai sensitivitas laju regangan yang semakin tinggi dengan kenaikan temperatur diakibatkan oleh meningkatnya pergerakan dislokasi karena adanya energi dari temperatur tinggi<sup>[20]</sup>.

#### 4.7 Pengaruh Laju Regangan terhadap Energi Aktivasi

Energi aktivasi ( $Q$ ) adalah energi kinetik minimum yang diperlukan oleh partikel-partikel peraksi untuk membentuk kompleks teraktivasi. Pada tabel 4.7, menunjukkan dengan meningkatnya laju regangan maka energi aktivasi akan berkurang. Pada laju regangan  $0.01 \text{ s}^{-1}$ , nilai  $Q$  adalah 598.47 kal/gr.mol dan pada laju regangan  $0.1 \text{ s}^{-1}$ , nilai  $Q$  turun sebesar 2% menjadi 583.49 kal/gr.mol.

Penurunan energi aktivasi menunjukkan berkurangnya peran aktivasi termal pada pergerakan dislokasi. Hal ini disebabkan atom terlarut tidak sempat berdifusi ke batas butir karena laju regangan yang semakin tinggi, sehingga pergerakan dislokasi menjadi lebih cepat. Pergerakan dislokasi lebih ditentukan oleh tegangan yang tinggi<sup>[7,20]</sup>. Hal ini ditunjukkan dengan

meningkatnya tegangan pada laju regangan yang semakin cepat nilai Q menjadi berkurang.

#### 4.8 Validasi Menggunakan Model Persamaan Empiris Besar Butir Ferit

Dari penelitian Richard A. M. Napitupulu, ST. MT, di dapatkan model persamaan empiris besar butir ferit yaitu sebagai berikut<sup>[17]</sup> :

$$d_{\alpha} = 28,1 \cdot d_{\gamma}^{-0.5} \cdot \exp(Q/RT)^{-0.07} \cdot \dot{\epsilon}^{-0.07} \cdot \epsilon^{-0.33} \cdot Rc^{-0.27} \quad \dots(4.16)$$

dimana :

$d_{\alpha}$  = besar butir ferit yang terbentuk [ $\mu\text{m}$ ]

$d_{\gamma}$  = besar butir austenite awal [ $\mu\text{m}$ ] = 5.37 [ $\mu\text{m}$ ]

Q = energy deformasi pada proses uji tarik = 195000 [J/mol]

R = Konstanta gas universal = 8,31 [J/mol.K]

T = Temperatur deformasi [K]

$\dot{\epsilon}$  = laju regangan [ $\text{s}^{-1}$ ]

$\epsilon$  = besar regangan yang dialami

Rc = laju pendinginan [ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ] = 2,8 [ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ]

##### 4.8.1 Validasi Sampel 1 (700 $^{\circ}\text{C}$ )

$$T = 700 + 273 = 973 \text{ K}$$

$$\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$$

$$\epsilon = 10.222$$

$$d_{\alpha} = 28,1 \cdot d_{\gamma}^{-0.5} \cdot \exp(Q/RT)^{-0.07} \cdot \dot{\epsilon}^{-0.07} \cdot \epsilon^{-0.33} \cdot Rc^{-0.27}$$

$$d_{\alpha} = 28,1 \cdot 5,37^{-0.5} \cdot \exp(195000/8,31 \cdot 973)^{-0.07} \cdot 0,1^{-0.07} \cdot 10,222^{-0.33} \cdot 2,8^{-0.27}$$

$$d_{\alpha} = 0.929 \mu\text{m}$$

Jadi, besar butir ferit yang dihasilkan pada sampel 1 kondisi penarikan temperatur 700 °C, dengan kecepatan penarikan 0.1 s<sup>-1</sup>, dan nilai regangan 10.222 adalah sebesar 0.929 μm.

#### 4.8.2 Validasi Sampel 2 (750 °C)

$$T = 750 + 273 = 1023 \text{ K}$$

$$\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$$

$$\epsilon = 9.562$$

$$d_{\alpha} = 28,1 \cdot d_{\gamma}^{-0.5} \cdot \exp(Q/RT)^{-0.07} \cdot \dot{\epsilon}^{-0.07} \cdot \epsilon^{-0.33} \cdot Z^{-0.27}$$

$$d_{\alpha} = 28,1 \cdot 5,37^{-0.5} \cdot \exp(195000/8,31 \cdot 1023)^{-0.07} \cdot 0,1^{-0.07} \cdot 9,562^{-0.33} \cdot 2,8^{-0.27}$$

$$d_{\alpha} = 1.032 \text{ } \mu\text{m}$$

Jadi, besar butir ferit yang dihasilkan pada sampel 2 kondisi penarikan temperatur 750 °C, dengan kecepatan penarikan 0.1 s<sup>-1</sup>, dan nilai regangan 9.562 adalah sebesar 1.032 μm.

#### 4.8.3 Validasi Sampel 3 (800 °C)

$$T = 800 + 273 = 1073 \text{ K}$$

$$\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$$

$$\epsilon = 7.454$$

$$d_{\alpha} = 28,1 \cdot d_{\gamma}^{-0.5} \cdot \exp(Q/RT)^{-0.07} \cdot \dot{\epsilon}^{-0.07} \cdot \epsilon^{-0.33} \cdot Z^{-0.27}$$

$$d_{\alpha} = 28,1 \cdot 5,37^{-0.5} \cdot \exp(195000/8,31 \cdot 1073)^{-0.07} \cdot 0,1^{-0.07} \cdot 7,454^{-0.33} \cdot 2,8^{-0.27}$$

$$d_{\alpha} = 1.207 \text{ } \mu\text{m}$$

Jadi, besar butir ferit yang dihasilkan pada sampel 3 kondisi penarikan temperatur 800 °C, dengan kecepatan penarikan 0.1 s<sup>-1</sup>, dan nilai regangan 7.454 adalah sebesar 1.207 μm.

#### 4.8.4 Validasi Sampel 4 (850 °C)

$$T = 850 + 273 = 1123 \text{ K}$$

$$\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$$

$$\epsilon = 5.882$$

$$d_{\alpha} = 28,1 \cdot d_{\gamma}^{-0.5} \cdot \exp(Q/RT)^{-0.07} \cdot \dot{\epsilon}^{-0.07} \cdot \epsilon^{-0.33} \cdot Z^{-0.27}$$

$$d_{\alpha} = 28,1 \cdot 1,5,37^{-0.5} \cdot \exp(195000/8,31 \cdot 1123)^{-0.07} \cdot 0,1^{-0.07} \cdot 5,882^{-0.33} \cdot 2,8^{-0.27}$$

$$d_{\alpha} = 1.397 \text{ }\mu\text{m}$$

Jadi, besar butir ferit yang dihasilkan pada sampel 4 kondisi penarikan temperatur 850 °C, dengan kecepatan penarikan 0.1 s<sup>-1</sup>, dan nilai regangan 5.882 adalah sebesar 1.397 μm.

**Tabel 4.8** Perbandingan Besar Butir Ferit Terhadap Temperatur Penarikan

T (°C)	700 °C	750 °C	800 °C	850 °C
d <sub>α</sub> (μm)	0.929	1.032	1.207	1.397

#### 4.8.5 Pembahasan

Pengontrolan dan prediksi dari evolusi mikrostruktur yang terkait dengan sifat mekanik dari baja karbon menjadi suatu hal yang penting dalam proses pembentukan panas. Oleh karena itu, pengukuran dan prediksi rekristalisasi, pertumbuhan butir dan transformasi fasa dari baja menjadi sangat penting. Mengingat perbedaan fasa, bentuk dan ukuran mikrostruktur sangat penting untuk menentukan sifat mekanik dari material.

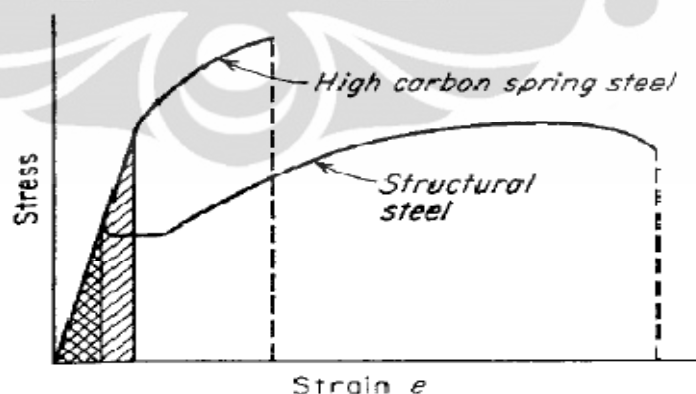
Pada validasi Sampel 1,2,3 dan 4, dengan mengambil regangan pada titik luluh, menunjukkan besar butir ferit yang berbeda-beda. Pada sampel 1 sampai sampel 4 besar butir ferit berurutan yaitu sebesar 0.929 μm, 1.032 μm, 1.207 μm, 1.397 μm. Dengan meningkatnya temperatur dari 700 °C ke 850 °C meningkatkan besar butir ferit sebesar 33%. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya temperatur maka butir akan mengalami pertumbuhan,

sehingga besar butir akan semakin meningkat<sup>[2]</sup>. Hal ini sesuai dengan menggunakan persamaan Hall-Petch, yaitu :

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad \dots (4.17)$$

Dapat kita lihat, besarnya tegangan luluh bergantung dengan besar butir. Dengan meningkatnya besar butir maka tegangan luluh akan semakin kecil. Hal ini sesuai pada kondisi penarikan temperatur 700 °C sampai 850 °C. Dengan meningkatnya temperatur penarikan dari 750 °C ke 850 °C menurunkan tegangan luluh sebesar 42%. Pada kondisi temperatur yang semakin meningkat, besar butir ferit juga meningkat dan akan menurunkan koefisien pengerasan regang (n). Hal ini sesuai dengan kondisi penarikan temperatur 700 °C ke 800 °C, dimana koefisien pengerasan regang turun sebesar 47%.

Besar butir ferit yang semakin besar akan menurunkan kekuatan tarik dan meningkatkan keuletan dari baja. Jika keuletan baja meningkat maka ketangguhan pada baja juga meningkat. Hal ini sesuai dengan kurva perbandingan tegangan-regangan untuk material baja dengan ketangguhan rendah dan tinggi, dapat dilihat pada Gambar 4.2.

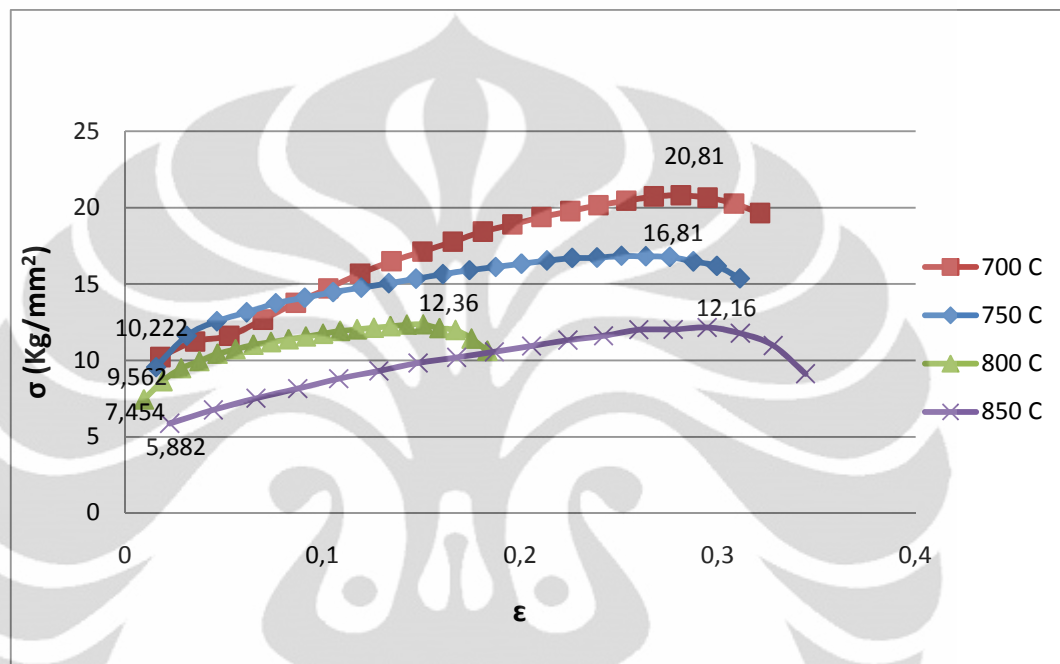


**Gambar 4.2** Kurva Tegangan-Regangan dengan Perbedaan Ketangguhan Material

Daerah yang di arsir pada gambar di atas menunjukkan nilai ketangguhan pada material sampai batas titik luluh. Dengan persamaan hall-petch, dapat dibuktikan dengan meningkatnya temperatur maka



ketangguhan pada titik luluh semakin kecil. Pada kondisi penarikan dengan temperatur yang semakin meningkat, maka ketangguhan dan kekuatan akan semakin menurun. Hal ini dilihat pada Gambar 4.3, kurva tegangan-regangan kondisi penarikan sampel 1 (700 °C), sampel 2 (750 °C), sampel 3 (800 °C), dan sampel 4 (850 °C).

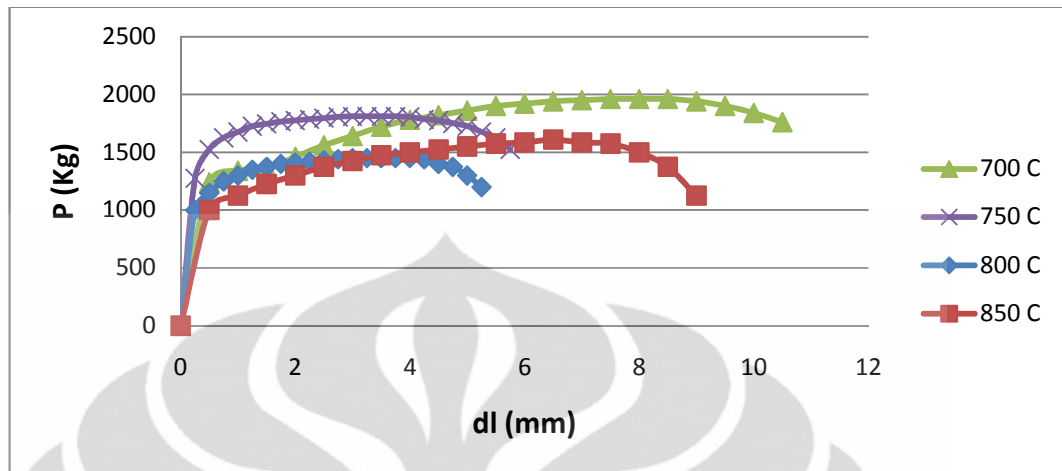


**Gambar 4.3** Kurva Tegangan-Regangan Sampel 1 (700 °C), Sampel 2 (750 °C), Sampel 3 (800 °C) dan Sampel 4 (850 °C)

#### 4.9 Analisa grafik

Berdasarkan hasil pengujian pada sampel 1 (700 °C), sampel 2 (750 °C), sampel 3 (800 °C) dan sampel 4 (850 °C) yang berhasil didapatkan, diperoleh suatu grafik hubungan antara :

#### 4.9.1 Grafik P - dl

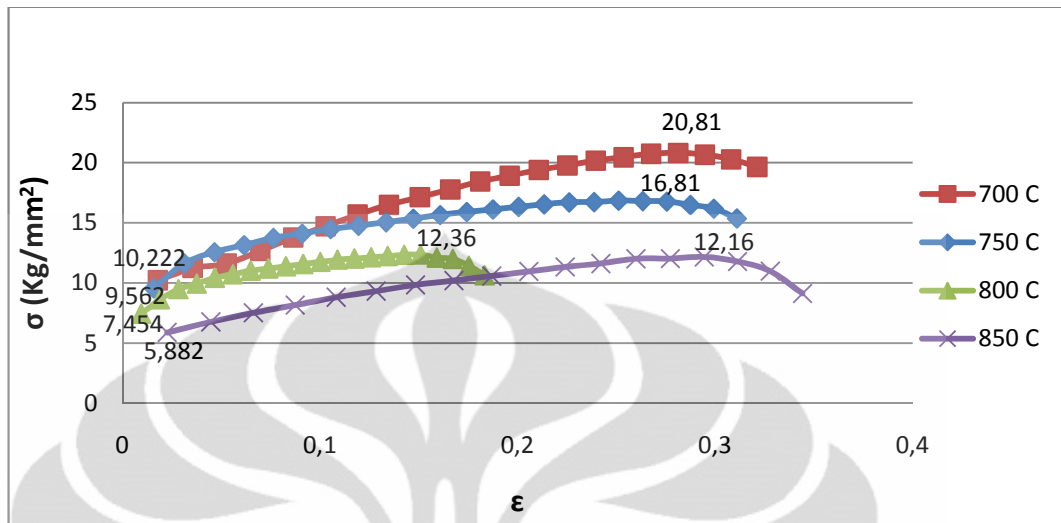


Gambar 4.4 Grafik P - dl

Pada Gambar 4.4 memberikan suatu hubungan antara gaya / beban yang diberikan pada sampel (kg) dengan besarnya pertambahan panjang/elongasi (dl) dari sampel 1 (700 °C), sampel 2 (750 °C), sampel 3 (800 °C) dan sampel 4 (850 °C). Grafik ini merupakan grafik yang diperoleh dari mesin uji tarik Shimadzu – data mentah – dengan adanya pensesuaian grafik antara *start* hingga *fracture point*, selain itu skala yang diambil hanya setiap 0,25 dan 0,5 mm

Sebagai suatu data mentah, grafik ini harus dikonversikan untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan sesungguhnya. Berdasarkan grafik di atas, terlihat bahwa pertambahan panjang sampel 1, 2, 3 dan 4. Grafik di atas memperlihatkan % elongasi grafik. Secara berurutan % elongasi grafik dari tinggi ke rendah yaitu, sampel 1, sampel 4, sampel 2 dan sampel 3. Hal ini akan berbeda dengan % elongasi sampel, karena perbedaan pengukuran  $\Delta l$  sampel dan  $\Delta l$  grafik.

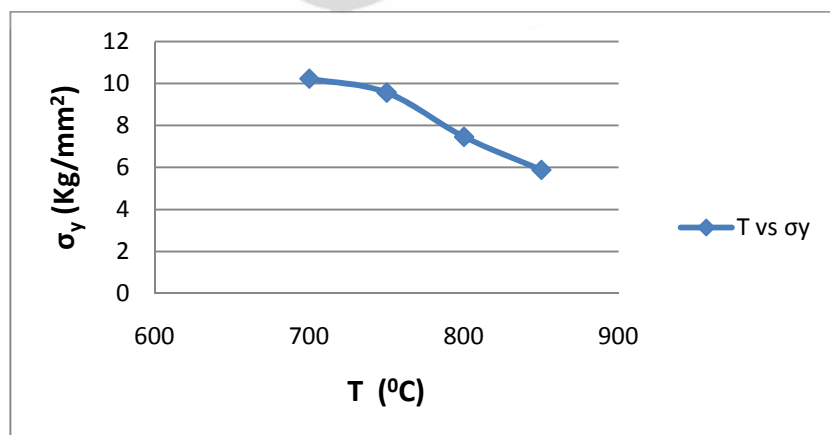
#### 4.9.2 Grafik Tegangan-Regangan Sesungguhnya



**Gambar 4.5** Grafik Tegangan-Regangan Sesungguhnya

Pada Gambar 4.5 adalah grafik tegangan-regangan sesungguhnya, memberikan hubungan antara tegangan yang diberikan pada benda uji dengan kondisi regangan real yang dialaminya. Dari grafik tegangan-regangan sesungguhnya, dapat disimpulkan bahwa material dengan keuletan terbaik untuk spesimen uji ini adalah sampel 4 ( $850^{\circ}\text{C}$ ). Hal ini karena sampel 4 ( $850^{\circ}\text{C}$ ) berada pada kondisi penarikan dengan fasa austenit yang memiliki kekerasan lebih lunak jika dibandingkan dengan sampel 1,2 dan 3 yang berada pada fasa ferit+austenit atau fasa ferit.

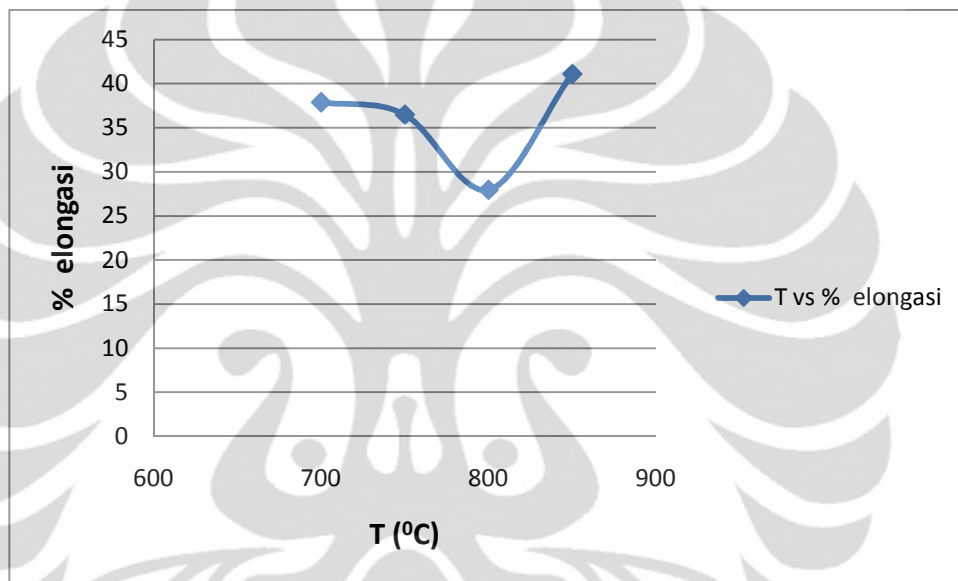
#### 4.9.3 Grafik Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) - Tegangan Luluh ( $\sigma_y$ )



**Gambar 4.6** Grafik Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) - Tegangan Luluh ( $\sigma_y$ )

Pada Gambar 4.6 menunjukkan hubungan antara tegangan luluh dengan temperatur. pada grafik, dapat dilihat tegangan luluh meningkat dari temperatur 700 °C ke temperatur 800 °C dan menurun dari temperatur 800 °C ke temperatur 850 °C. Hal ini disebabkan perbedaan daerah fasa pengerjaan dan mikrostruktur. Mekanisme pengerasan kerja dari baja HSLA juga mempengaruhi naik dan turunnya grafik.

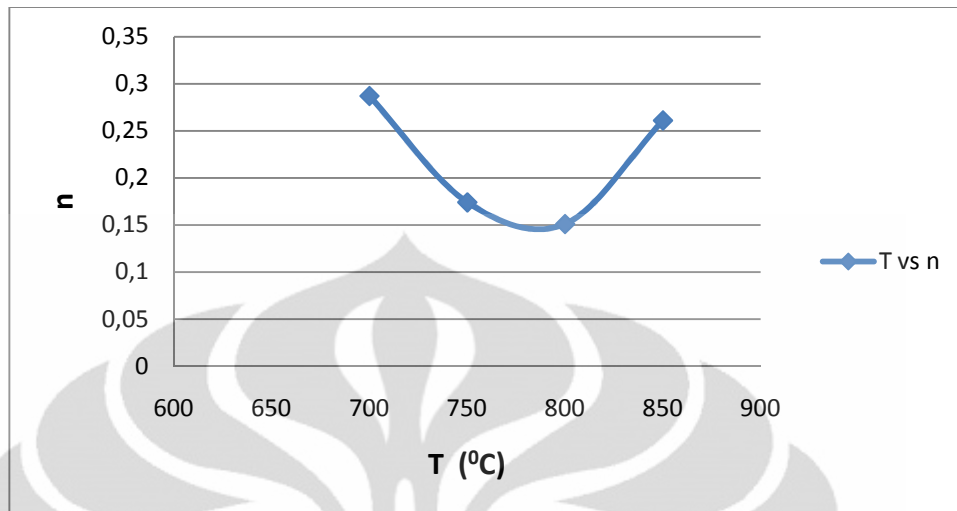
#### 4.9.4 Grafik Temperatur (°C) - % elongasi sampel



**Gambar 4.7** Grafik Temperatur (°C) - % elongasi sampel

Pada Gambar 4.7, terlihat bahwa % elongasi sampel yang dimiliki oleh sampel 4 (850 °C) hingga sebelum terjadinya perpatahan adalah lebih panjang dibandingkan dengan sampel 1 (700 °C), sampel 2 (750 °C) dan sampel 3 (800 °C). Dari sini dapat disimpulkan bahwa sampel 4, dapat dikategorikan suatu baja ulet karena memiliki % elongasi yang cukup tinggi (41.102). Hal ini disebabkan perbedaan fasa pada kondisi penarikan, sampel 4 dilakukan penarikan pada fasa austenit yang tergolong fasa yang lebih lunak jika dibandingkan kondisi penarikan sampel 1,2 dan 3 yang dilakukan penarikan pada fasa ferit+austenit atau fasa ferit yang tergolong fasa yang lebih kuat dibandingkan fasa austenit.

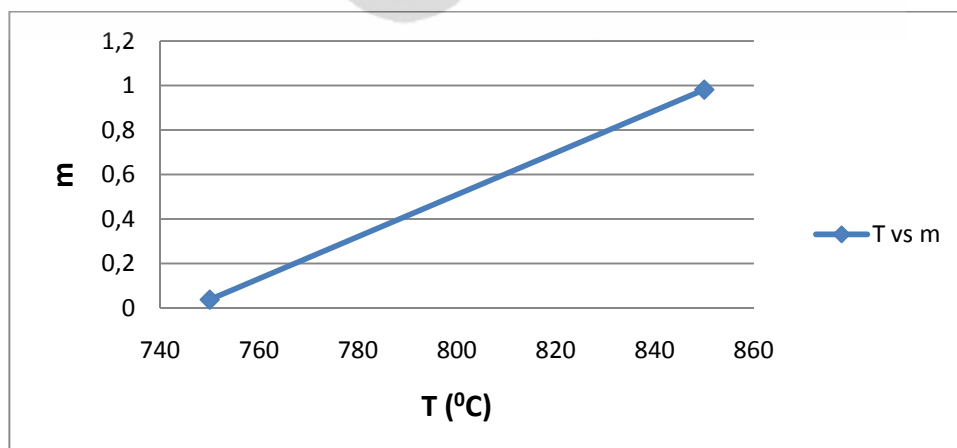
#### 4.9.5 Grafik Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) - Koefisien Pengerasan Regang ( $n$ )



**Gambar 4.8** Grafik Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) - Koefisien Pengerasan Regang ( $n$ )

Pada Gambar 4.8 menunjukkan hubungan temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) dengan koefisien pengerasan regang ( $n$ ). Penurunan nilai  $n$  terjadi dari temperatur  $700^{\circ}\text{C}$  ke temperatur  $800^{\circ}\text{C}$  sebesar 47%. Sedangkan pada temperatur  $800^{\circ}\text{C}$  ke temperatur  $850^{\circ}\text{C}$  nilai  $n$  mengalami peningkatan sebesar 42%. Peningkatan yang terjadi disebabkan karena sampel 4 ( $850^{\circ}\text{C}$ ) memiliki tebal yang jauh lebih tinggi di dibandingkan ketiga sampel yang lain. Hal ini akan menyebabkan perubahan pada luas ( $A$ ) yang semakin besar dan menyebabkan perubahan nilai tegangan dan regangan.

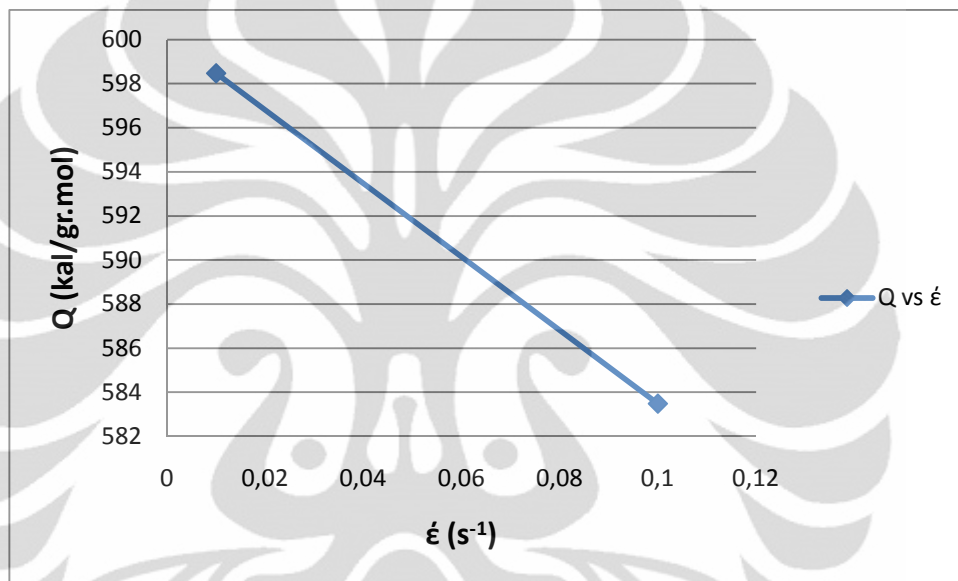
#### 4.9.6 Grafik Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) - Sensitivitas Laju regangan ( $m$ )



**Gambar 4.9** Grafik Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) - Sensitivitas Laju regangan ( $m$ )

Pada Gambar 4.9 menunjukkan hubungan antara temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan sensitivitas laju regangan ( $m$ ). Peningkatan nilai sensitivitas laju regangan terjadi dari temperatur  $750^{\circ}\text{C}$  ke temperatur  $850^{\circ}\text{C}$  sebesar 96 %. Nilai sensitivitas laju regangan yang semakin tinggi dengan kenaikan temperatur diakibatkan oleh meningkatnya pergerakan dislokasi karena adanya energi dari temperatur tinggi.

#### 4.9.7 Grafik Energi Aktivasi (Q) - Laju Regangan ( $\dot{\epsilon}$ )



**Gambar 4.10** Grafik Energi Aktivasi (Q) - Laju Regangan ( $\dot{\epsilon}$ )

Pada Gambar 4.10 menunjukkan hubungan antara energi aktivasi (Q) dan laju regangan ( $\dot{\epsilon}$ ). Penurunan nilai energi aktivasi terjadi pada laju regangan dari  $0.01 \text{ s}^{-1}$  ke  $0.1 \text{ s}^{-1}$  sebesar 2 %. Nilai sensitivitas laju regangan yang semakin tinggi dengan kenaikan temperatur diakibatkan oleh meningkatnya pergerakan dislokasi karena adanya energi dari temperatur tinggi. Penurunan energi aktivasi menunjukkan berkurangnya peran aktivasi termal pada pergerakan dislokasi.

#### 4.10 Analisa Hasil Perpatahan

Dari hasil pengamatan perpatahan sampel, terlihat bahwa sampel baja HSLA yang diuji memiliki tipe patahan yang ulet (*ductile*). Keuletan ini terlihat pada semua sampel uji dengan adanya bentuk patahan permukaan

patah yang berserabut (tidak rata) dan gelap.. Berdasarkan grafik terlihat bahwa keempat material uji tersebut mengalami deformasi plastis, terutama sampel 4 ( $850^{\circ}\text{C}$ ) dengan elongasi yang cukup panjang. Deformasi plastis ini tidak mungkin terjadi pada material getas.

Proses perpatahan ulet ini dapat dijelaskan secara teoritis, yaitu dimulai dengan munculnya *necking* pada material, dilanjutkan dengan munculnya rongga kecil (*cavity*), dimana *cavity-cavity* ini selanjutnya membesar, menyatu dan membentuk retak. Selanjutnya retak ini terus merambat sehingga pada akhirnya, perpatahan terjadi karena propagasi retak yang cepat oleh deformasi geser<sup>[2]</sup>.

Jika melihat bentuk patahan, spesimen mengalami pertambahan panjang (% elongasi) yang cukup besar. Terlihat bentuk ujung patahan yang berbentuk *fibrous* (beserabut) / tidak rata, gelap dan tumpul seperti pada material ulet.



**Gambar 4.11** Sampel 4 ( $850^{\circ}\text{C}$ ) Setelah Uji Tarik Panas



**Gambar 4.12** Tampak Atas Foto Makro Sampel 4 (850 °C)

Dari Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 diatas, dapat disimpulkan bahwa bahwa baja HSLA ASTM A 572 Gr 50 yang digunakan pada penelitian ini bersifat ulet.



## BAB 5

### KESIMPULAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari pengolahan data dan pengamatan terhadap grafik dan tabel yang diperoleh maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Persamaan konstitutif untuk paduan Baja HSLA (ASTM A572 Gr 50) yaitu :

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot e^{Q/RT}$$

nilai parameter konstitutif :

- Pada temperatur 700 °C dan laju regangan 0.1 s<sup>-1</sup> memiliki nilai koefisien pengerasan regang (n) yaitu 0.287
- Pada temperatur 750 °C dan laju regangan 0.1 s<sup>-1</sup> memiliki nilai koefisien pengerasan regang (n) yaitu 0.174 , koefisien sensitivitas laju regangan (m) yaitu 0.037 , energi aktivasi (Q) yaitu 353.54 , dan nilai konstanta (K) yaitu 17.977
- Pada temperatur 750 °C dan laju regangan 0.01 s<sup>-1</sup> memiliki nilai koefisien pengerasan regang (n) yaitu 0.229 , koefisien sensitivitas laju regangan (m) yaitu 0.037 , energi aktivasi (Q) yaitu 465.36 , dan nilai konstanta (K) yaitu 23.543
- Pada temperatur 800 °C dan laju regangan 0.1 s<sup>-1</sup> memiliki nilai koefisien pengerasan regang (n) yaitu 0.151
- Pada temperatur 850 °C dan laju regangan 0.1 s<sup>-1</sup> memiliki nilai koefisien pengerasan regang (n) yaitu 0.261 , koefisien sensitivitas laju regangan (m) yaitu 0.981 , energi aktivasi (Q) yaitu 583.49 , dan nilai konstanta (K) yaitu 116.19
- Pada temperatur 850 °C dan laju regangan 0.01 s<sup>-1</sup> memiliki nilai koefisien pengerasan regang (n) yaitu 0.268 , koefisien sensitivitas laju regangan (m) yaitu 0.981 , energi aktivasi (Q) yaitu 598.47 , dan nilai konstanta (K) yaitu 1850.26

2. Pada laju regangan  $0.1 \text{ s}^{-1}$  dengan meningkatnya temperatur dari  $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ke  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , akan menurunkan tegangan luluh ( $\sigma_y$ ). Pada laju regangan  $0.1 \text{ s}^{-1}$  dengan meningkatnya temperatur dari  $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ke  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , akan menurunkan nilai koefisien pengerasan regang ( $n$ ) dan % elongasi sampel. Pada laju regangan  $0.1 \text{ s}^{-1}$  dengan meningkatnya temperatur dari  $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ke  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , akan meningkatkan nilai koefisien sensitivitas laju regangan ( $m$ ). Pada temperatur konstan  $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dan  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , dengan meningkatnya laju regangan akan menurunkan nilai energi aktivasi.
3. Pada laju regangan  $0.1 \text{ s}^{-1}$  dengan meningkatnya temperatur dari  $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ke  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , akan meningkatkan besar butir ferit. Nilai besar butir sampel 1 ( $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) adalah  $0.929 \text{ }\mu\text{m}$ , sampel 2 ( $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) adalah  $1.032 \text{ }\mu\text{m}$ , sampel 3 ( $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) adalah  $1.207 \text{ }\mu\text{m}$ , sampel 4 ( $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) adalah  $1.397 \text{ }\mu\text{m}$ .

## DAFTAR REFERENSI

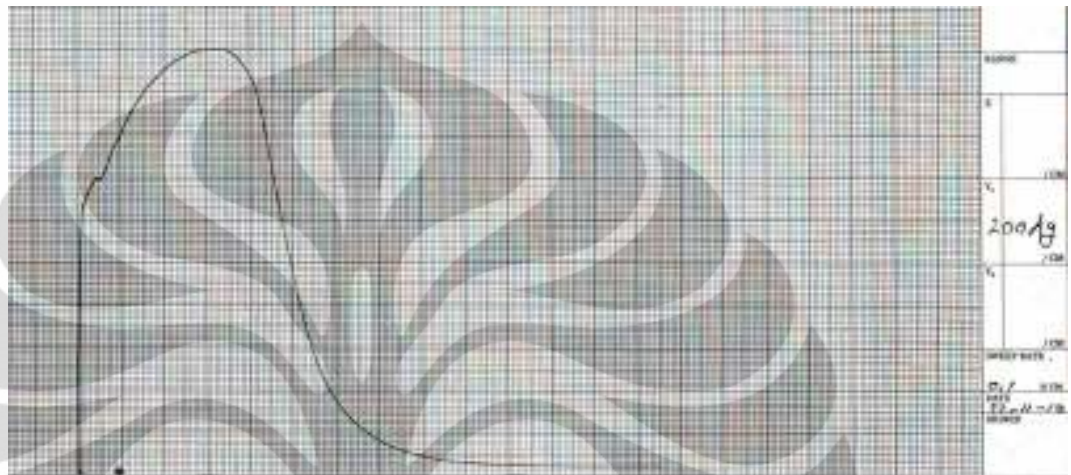
- [1] G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 2<sup>nd</sup> Ed., Mc Graw-Hill Book Co., 1976, Chap. 9.
- [2] Callister, William D.  
1985. "Material Science and Engineering, An Introduction ". John Wiley and Sons, Inc. Canada.
- [3] ASM Speciality Handbook, Carbon and Alloy Steels. Edited by J.R. Davis. ASM International.
- [4] Martua Raja, Anugrah. "Modifikasi Metode Etsa Terhadap Penampakan Batas Butir Austenit Pada Baja HSLA A572 Grade 50 Hasil Proses Canai Panas". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI Depok, 2010
- [5] Sidney Avner, *Introduction to Physical Metallurgy* (Singapore: McGraw- Hill International, 1974), hal 135;357
- [6] K.E Thelning, *Steel and Its Heat Treatment* (London: Butterworth, 1981)
- [7] R.E. Smallman dan R.J. Bishop  
2000. "Metalurgi Fisik Modern & Rekayasa Material". PT Erlangga. Jakarta.
- [8] G. E. Dieter, *Metals Handbook*, Vol. 14, ASM, Metal Park, OH (1987)
- [9] H. A. Kuhn, *Metals Handbook*, Vol. 14, ASM, Metal Park, OH (1987)
- [10] "Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials", ASTM Designation E 8, Annual Book of ASTM standards. (pada indeks untuk uji tarik untuk berbagai macam produk)
- [11] Legowo, Lili. "Studi Karakteristik *Rheologi* Paduan Aluminium (99.6% - ASTM 1350) Dengan Melakukan Uji Tarik Panas". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1998
- [12] Adiwijaya, Agung. " Perbandingan Solusi FEM Dengan Solusi Analitik Pada Uji Tarik Uniaxial Material Superplastis Dalam Kondisi Regangan Bidang (*Plane Strain*) ". Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1998

- [13] Teknik-teknik pengujian , ASTM E21-69, op. Cit., hal 265-270
- [14] H. Conrad. J . Metals., Jilid 16, hal 582-885, 1964; U. F. Kochs, A. S. Argon, dan M. F. Ashby, Thermodynamics and Kinetisc of Slip , “Progress in Materials Science”, jilid 19, Pergamon Pres, London, 1975.
- [15] Kilfoil L. J., Tesis: *In-Plane Plane Strain Testing To Evaluat Formability of Sheet Steels Used in Tubular Products*, Ontario, Canada, Queen’s University , September 2007
- [16] J.L. Dournaux, S. Bouviera, A. Aouafia, P. Vacher. *Materials Science and Engineering A* (2009) 500.
- [17] Dedi Priadi, Richard A. M. Napitupulu, Eddy S. Siradj, *Developing Uniaxial Tensile Test as an Alternate Method for Thermo Mechanical Process Evaluation*, Submitted, International Conference on Manufacturing Science and Technology - ICMST 2011, Singapore, 20<sup>th</sup> September 2011
- [18] Djaprie, Sriati. 1993. “Metalurgi Mekanik”, Jilid 1. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- [19] Sinaga, Ramli. “Pengaruh Temperatur dan Waktu Anil Terhadap Parameter Sifat Mampu Bentuk dan Tekstur Pada Lembaran Plat Baja Karbon Rendah”. Puslitbang KIM-LIPI. 1995
- [20] Hosford, William F. dan Robert M. Caddell. 1983. “Metal Forming, Mechanics and Mettallurgy” .Prentice-Hall International Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

## LAMPIRAN

### DATA HASIL UJI TARIK

#### 1. SAMPEL 1, Kondisi Penarikan $0.1 \text{ s}^{-1}$ pada $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$



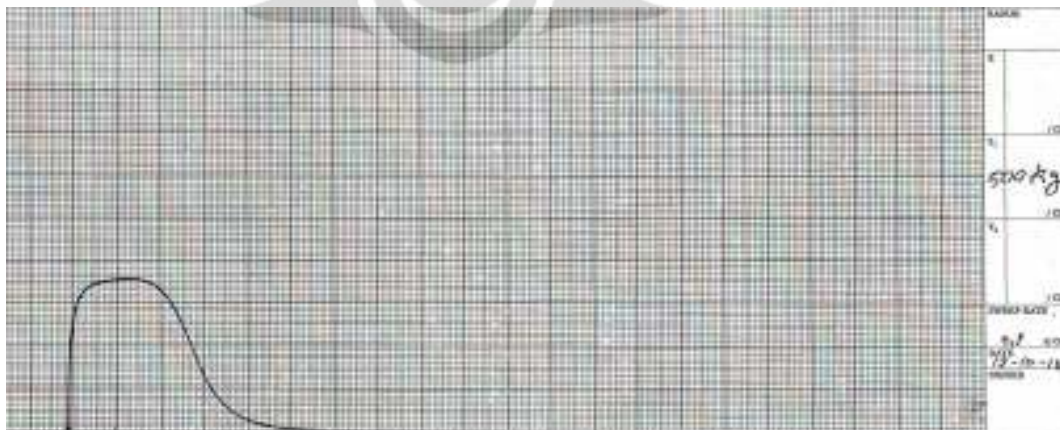
$$A_0 = 123.5 \text{ mm}^2$$

$$FK = 0.909524$$

P	dL	dL*FK	S	e	$\sigma$	$\epsilon$	$\log \sigma$	$\log \epsilon$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1240	0,5	0,454762	10,04049	0,018046	10,22168	0,017885	1,009522	-1,74751
1340	1,0	0,909524	10,8502	0,036092	11,24181	0,035456	1,050836	-1,45031
1360	1,5	1,364286	11,01215	0,054138	11,60832	0,052724	1,06477	-1,27799
1460	2,0	1,819048	11,82186	0,072184	12,67522	0,069698	1,102955	-1,15678
1560	2,5	2,27381	12,63158	0,090231	13,77133	0,086389	1,138976	-1,06354
1640	3,0	2,728571	13,27935	0,108277	14,7172	0,102806	1,167825	-0,98798
1720	3,5	3,183333	13,92713	0,126323	15,68644	0,118958	1,195524	-0,92461
1780	4,0	3,638095	14,41296	0,144369	16,49374	0,134853	1,217319	-0,87014
1820	4,5	4,092857	14,73684	0,162415	17,13033	0,1505	1,233766	-0,82246
1860	5,0	4,547619	15,06073	0,180461	17,7786	0,165905	1,249898	-0,78014
1900	5,5	5,002381	15,38462	0,198507	18,43857	0,181077	1,265727	-0,74214
1920	6,0	5,457143	15,54656	0,216553	18,91322	0,196022	1,276765	-0,7077
1940	6,5	5,911905	15,7085	0,234599	19,39371	0,210747	1,287661	-0,67624
1950	7,0	6,366667	15,78947	0,252646	19,77861	0,225258	1,296196	-0,64732
1960	7,5	6,821429	15,87045	0,270692	20,16644	0,239561	1,304629	-0,62058
1960	8,0	7,27619	15,87045	0,288738	20,45284	0,253663	1,310754	-0,59574
1960	8,5	7,730952	15,87045	0,306784	20,73924	0,267569	1,316793	-0,57256

1940	9,0	8,185714	15,7085	0,32483	20,81109	0,281284	1,318295	-0,55085
1900	9,5	8,640476	15,38462	0,342876	20,65963	0,294814	1,315123	-0,53045
1840	10,0	9,095238	14,89879	0,360922	20,27609	0,308163	1,306984	-0,51122
1760	10,5	9,55	14,25101	0,378968	19,65169	0,321336	1,2934	-0,49304

**2. SAMPEL 2, Kondisi Penarikan  $0.1 \text{ s}^{-1}$  pada  $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$**



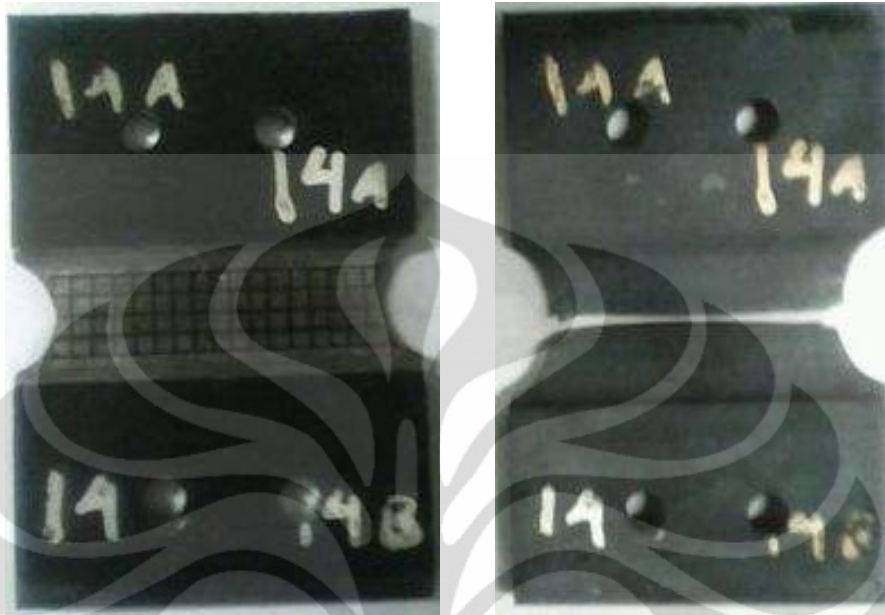
DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS  
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

$$A_0 = 135.45 \text{ mm}^2$$

$$FK = 1.573913$$

P	dL	dl*FK	S	e	$\sigma$	$\epsilon$	log $\sigma$	log $\epsilon$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1275	0,25	0,393478	9,413068	0,015866	9,562416	0,015742	0,980568	-1,80295
1525	0,50	0,786957	11,25877	0,031732	11,61603	0,031239	1,065058	-1,5053
1625	0,75	1,180435	11,99705	0,047598	12,56808	0,0465	1,099269	-1,33255
1675	1,00	1,573913	12,36619	0,063464	13,151	0,061532	1,118959	-1,2109
1725	1,25	1,967391	12,73533	0,07933	13,74562	0,076341	1,138164	-1,11724
1745	1,50	2,36087	12,88298	0,095196	14,1094	0,090934	1,149508	-1,04128
1765	1,75	2,754348	13,03064	0,111062	14,47785	0,105317	1,160704	-0,9775
1775	2,00	3,147826	13,10447	0,126928	14,7678	0,119496	1,169316	-0,92265
1785	2,25	3,541304	13,17829	0,142795	15,06008	0,133477	1,177827	-0,87459
1795	2,50	3,934783	13,25212	0,158661	15,35471	0,147265	1,186242	-0,8319
1805	2,75	4,328261	13,32595	0,174527	15,65168	0,160865	1,194561	-0,79354
1810	3,00	4,721739	13,36286	0,190393	15,90706	0,174283	1,20159	-0,75874
1810	3,25	5,115217	13,36286	0,206259	16,11907	0,187524	1,20734	-0,72694
1810	3,50	5,508696	13,36286	0,222125	16,33109	0,200591	1,213015	-0,69769
1810	3,75	5,902174	13,36286	0,237991	16,5431	0,21349	1,218617	-0,67062
1805	4,00	6,295652	13,32595	0,253857	16,70884	0,226224	1,222946	-0,64546
1785	4,25	6,68913	13,17829	0,269723	16,73278	0,238799	1,223568	-0,62197
1775	4,50	7,082609	13,10447	0,285589	16,84696	0,251217	1,226522	-0,59995
1750	4,75	7,476087	12,9199	0,301455	16,81467	0,263483	1,225688	-0,57925
1725	5,00	7,869565	12,73533	0,317321	16,77652	0,2756	1,224702	-0,55972
1675	5,25	8,263043	12,36619	0,333187	16,48644	0,287572	1,217127	-0,54125
1625	5,50	8,656522	11,99705	0,349053	16,18466	0,299403	1,209103	-0,52374
1525	5,75	9,05	11,25877	0,364919	15,36731	0,311095	1,186598	-0,50711

3. SAMPEL 3, Kondisi Penarikan  $0.1 \text{ s}^{-1}$  pada  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS  
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

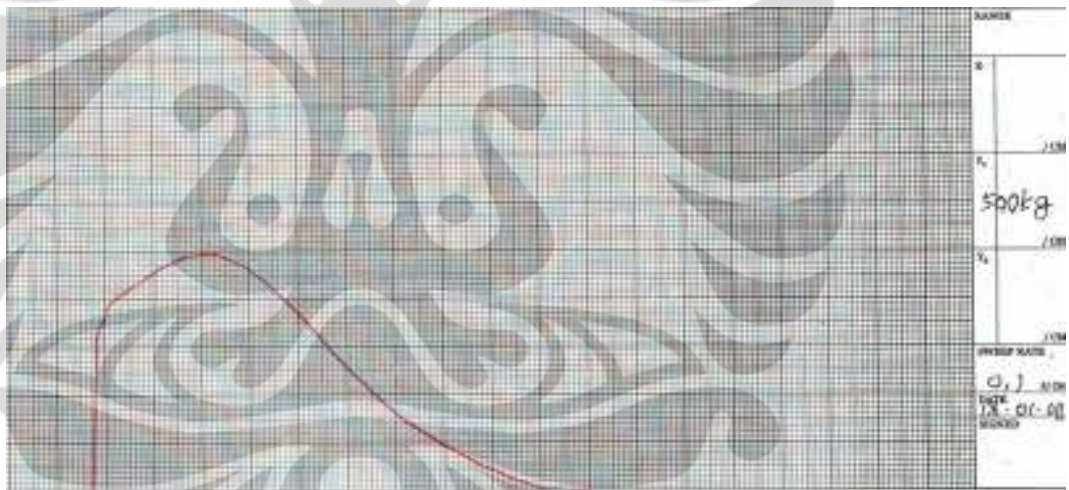
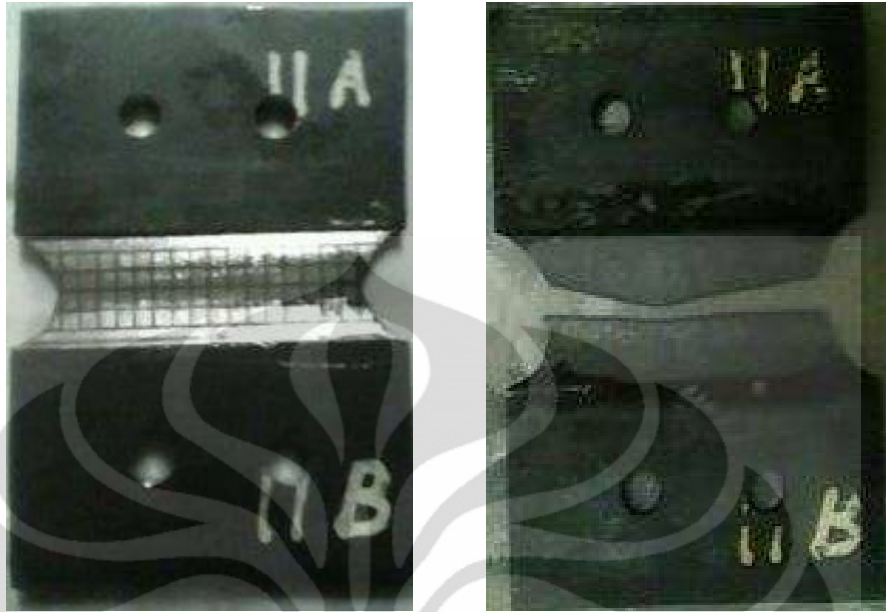


$$A_0 = 135.45 \text{ mm}^2$$

$$FK = 1.390476$$

P	dl	dl*Fk	S	e	$\sigma$	$\epsilon$	log $\sigma$	log $\epsilon$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0,25	0,347619	7,382798	0,013319	7,481128	0,013231	0,873967	-1,87841
1150	0,50	0,695238	8,490218	0,026637	8,716376	0,026289	0,940336	-1,58023
1250	0,75	1,042857	9,228498	0,039956	9,597233	0,039179	0,982146	-1,40695
1300	1,00	1,390476	9,597638	0,053275	10,10895	0,051904	1,004706	-1,2848
1350	1,25	1,738095	9,966777	0,066594	10,6305	0,06447	1,026554	-1,19064
1375	1,50	2,085714	10,15135	0,079912	10,96257	0,07688	1,039912	-1,11419
1400	1,75	2,433333	10,33592	0,093231	11,29955	0,089138	1,053061	-1,04994
1410	2,00	2,780952	10,40975	0,10655	11,5189	0,101247	1,061411	-0,99462
1420	2,25	3,128571	10,48357	0,119869	11,74022	0,113211	1,069676	-0,94611
1430	2,50	3,47619	10,5574	0,133187	11,96351	0,125034	1,077859	-0,90297
1440	2,75	3,82381	10,63123	0,146506	12,18877	0,136719	1,08596	-0,86417
1450	3,00	4,171429	10,70506	0,159825	12,41599	0,148269	1,093981	-0,82895
1450	3,25	4,519048	10,70506	0,173144	12,55857	0,159687	1,09894	-0,79673
1450	3,50	4,866667	10,70506	0,186462	12,70115	0,170976	1,103843	-0,76706
1450	3,75	5,214286	10,70506	0,199781	12,84372	0,182139	1,108691	-0,7396
1450	4,00	5,561905	10,70506	0,2131	12,9863	0,193179	1,113486	-0,71404
1440	4,25	5,909524	10,63123	0,226419	13,03834	0,204098	1,115222	-0,69016
1400	4,50	6,257143	10,33592	0,239737	12,81382	0,214899	1,107679	-0,66776
1375	4,75	6,604762	10,15135	0,253056	12,72021	0,225585	1,104494	-0,64669
1300	5,00	6,952381	9,597638	0,266375	12,15421	0,236158	1,084727	-0,6268
1200	5,25	7,3	8,859358	0,279693	11,33726	0,246621	1,054508	-0,60797

4. SAMPEL 4, Kondisi Penarikan 0.1 s<sup>-1</sup> pada 850 °C



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS  
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

$$A_0 = 173.88 \text{ mm}^2$$

$$FK = 1.077778$$

P	dL	dl*FK	S	e	$\sigma$	$\epsilon$	log $\sigma$	log $\epsilon$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0,5	0,538889	5,751093	0,022834	5,882415	0,022577	0,769556	-1,64632
1125	1,0	1,077778	6,469979	0,045669	6,765454	0,044656	0,830297	-1,35012
1225	1,5	1,616667	7,045089	0,068503	7,527697	0,066258	0,876662	-1,17876
1300	2,0	2,155556	7,476421	0,091337	8,159295	0,087404	0,911653	-1,05847
1375	2,5	2,694444	7,907752	0,114171	8,810591	0,108111	0,945005	-0,96613
1425	3,0	3,233333	8,195307	0,137006	9,31811	0,128398	0,969328	-0,89144
1475	3,5	3,772222	8,482862	0,15984	9,838762	0,148282	0,99294	-0,82891

1500	4,0	4,311111	8,626639	0,182674	10,2025	0,167778	1,008707	-0,77526
1525	4,5	4,85	8,770416	0,205508	10,57281	0,186901	1,02419	-0,72839
1550	5,0	5,388889	8,914194	0,228343	10,94969	0,205666	1,039402	-0,68684
1575	5,5	5,927778	9,057971	0,251177	11,33313	0,224085	1,05435	-0,64959
1585	6,0	6,466667	9,115482	0,274011	11,61323	0,24217	1,064953	-0,61588
1610	6,5	7,005556	9,259259	0,296846	12,00783	0,259935	1,079465	-0,58514
1585	7,0	7,544444	9,115482	0,31968	12,02952	0,277389	1,080248	-0,55691
1575	7,5	8,083333	9,057971	0,342514	12,16045	0,294544	1,08495	-0,53085
1500	8,0	8,622222	8,626639	0,365348	11,77837	0,31141	1,071085	-0,50667
1375	8,5	9,161111	7,907752	0,388183	10,9774	0,327995	1,0405	-0,48413
1125	9,0	9,7	6,469979	0,411017	9,12925	0,344311	0,960435	-0,46305

### 5. SAMPEL 5, Kondisi Penarikan $0.01 \text{ s}^{-1}$ pada $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$



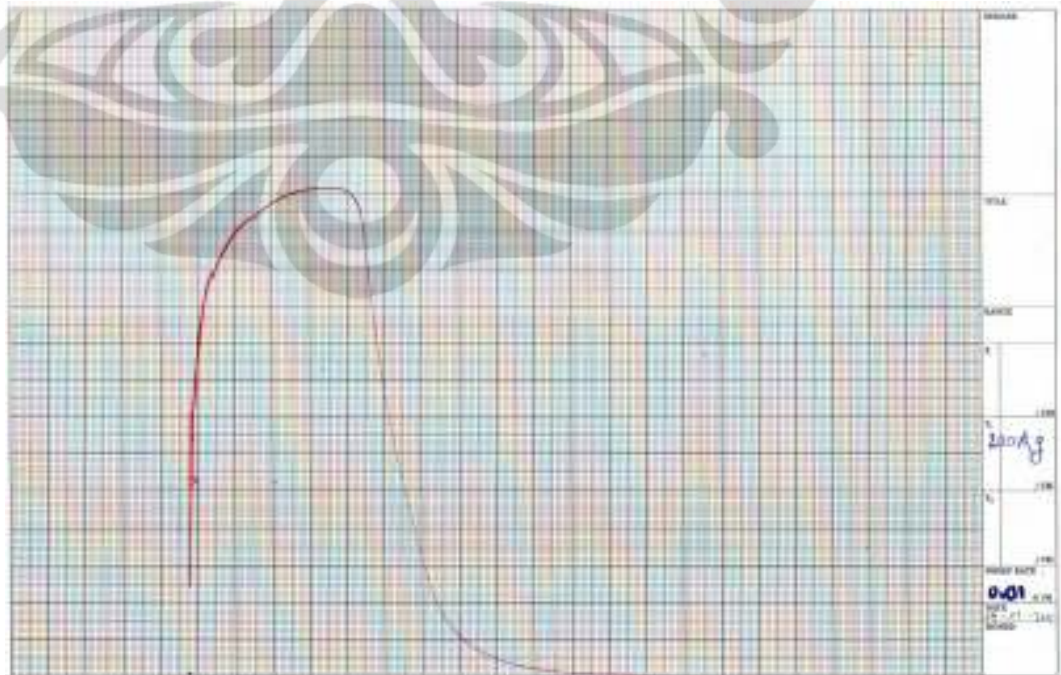
$$A_0 = 125.81 \text{ mm}^2$$

$$FK = 0.8$$

P	dL	dI*FK	S	e	$\sigma$	$\epsilon$	$\log \sigma$	$\log \epsilon$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0,25	0,2	7,948494	0,007722	8,009872	0,007692	0,903626	-2,11394
1300	0,50	0,4	10,33304	0,015444	10,49263	0,015326	1,020884	-1,81457
1360	0,75	0,6	10,80995	0,023166	11,06038	0,022902	1,04377	-1,64013
1420	1,00	0,8	11,28686	0,030888	11,63549	0,030421	1,065785	-1,51683
1480	1,25	1,0	11,76377	0,03861	12,21797	0,037883	1,086999	-1,42155
1530	1,50	1,2	12,1612	0,046332	12,72465	0,045291	1,104646	-1,34399
1570	1,75	1,4	12,47914	0,054054	13,15368	0,052644	1,119047	-1,27865
1600	2,00	1,6	12,71759	0,061776	13,50323	0,059943	1,130438	-1,22226
1630	2,25	1,8	12,95604	0,069498	13,85646	0,067189	1,141652	-1,1727
1650	2,50	2,0	13,11501	0,07722	14,12776	0,074384	1,150073	-1,12852

1670	2,75	2,2	13,27398	0,084942	14,4015	0,081527	1,158408	-1,0887
1680	3,00	2,4	13,35347	0,092664	14,59086	0,088619	1,164081	-1,05247

**6. SAMPEL 6, Kondisi Penarikan  $0.01 \text{ s}^{-1}$  pada  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$**



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS  
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

$$A_0 = 176.85 \text{ mm}^2$$

$$FK = 0.82$$

P	dL	dl*FK	S	e	$\sigma$	$\epsilon$	log $\sigma$	log $\epsilon$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1600	0,5	0,41	9,047215	0,017982	9,209906	0,017823	0,964255	-1,74903
1880	1,0	0,82	10,63048	0,035965	11,0128	0,035333	1,041898	-1,45182
2180	1,5	1,23	12,32683	0,053947	12,99183	0,052543	1,11367	-1,27949
2240	2,0	1,64	12,6661	0,07193	13,57717	0,069461	1,132809	-1,15826
2320	2,5	2,05	13,11846	0,089912	14,29797	0,086097	1,155274	-1,06501
2380	3,0	2,46	13,45773	0,107895	14,90975	0,102462	1,17347	-0,98944
2440	3,5	2,87	13,797	0,125877	15,53373	0,118562	1,191276	-0,92605
2470	4,0	3,28	13,96664	0,14386	15,97587	0,134408	1,203465	-0,87157
2500	4,5	3,69	14,13627	0,161842	16,42412	0,150007	1,215482	-0,82389
2520	5,0	4,10	14,24936	0,179825	16,81175	0,165366	1,225613	-0,78155
2560	5,5	4,51	14,47554	0,197807	17,33891	0,180492	1,239022	-0,74354
2580	6,0	4,92	14,58863	0,215789	17,73671	0,195394	1,248873	-0,70909
2590	6,5	5,33	14,64518	0,233772	18,06881	0,210076	1,25693	-0,67762
2610	7,0	5,74	14,75827	0,251754	18,47373	0,224546	1,266555	-0,64869
2620	7,5	6,15	14,81481	0,269737	18,81092	0,23881	1,27441	-0,62195
2625	8,0	6,56	14,84309	0,287719	19,11373	0,252873	1,281345	-0,5971
2630	8,5	6,97	14,87136	0,305702	19,41756	0,266741	1,288195	-0,57391
2630	9,0	7,38	14,87136	0,323684	19,68498	0,280419	1,294135	-0,55219
2630	9,5	7,79	14,87136	0,341667	19,95241	0,293913	1,299995	-0,53178
2630	10,0	8,20	14,87136	0,359649	20,21983	0,307227	1,305778	-0,51254
2620	10,5	8,61	14,81481	0,377632	20,40936	0,320366	1,309829	-0,49435
2580	11,0	9,02	14,58863	0,395614	20,3601	0,333334	1,30878	-0,47712
2500	11,5	9,43	14,13627	0,413596	19,98299	0,346137	1,30066	-0,46075