



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KELAYAKAN DESAIN SPESIMEN TERHADAP  
MEKANISME DEFORMASI REGANGAN BIDANG PADA UJI  
TARIK PANAS UNIAKSIAL BAJA ASTM A572 *GRADE 50***

**SKRIPSI**

**RIYAN NURYANTO**

**0706268865**

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



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KELAYAKAN DESAIN SPESIMEN TERHADAP  
MEKANISME DEFORMASI REGANGAN BIDANG PADA UJI  
TARIK PANAS UNIAKSIAL BAJA ASTM A572 *GRADE 50***

**SKRIPSI**

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

**RIYAN NURYANTO**

**0706268865**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

**JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama** : Riyan Nuryanto

**NPM** : 0706268865

**Tanda Tangan** : 

**Tanggal** : 30 Juni 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Riyan Nuryanto  
NPM : 0706268865  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Kelayakan Desain Spesimen Terhadap  
Mekanisme Deformasi Regangan Bidang pada Uji  
Tarik Panas Uniaksial Baja ASTM *grade* 50.

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA



Penguji 1 : Ir. Rini Riastuti, M.Sc

(  )

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

(  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

Segala Puji hanya bagi Allah, pemilik segala sesuatu yang ada di langit dan bumi, penguasa semesta alam, yang memasukkan siang ke dalam malam dan memasukkan malam ke dalam siang. karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Shalawat serta salam untuk manusia yang paling kucintai dalam hatiku, yang saya tidak mampu menahan diri untuk mengungkapkannya, adalah Nabi Muhammad SAW. Penulisan skripsi yang berjudul *Studi Kelayakan Desain Spesimen Terhadap Mekanisme Deformasi Regangan Bidang Pada Uji Tarik Panas Uniaksial Baja ASTM A572 Grade 50*, dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Bapak Dr. Ir. Dedi Priadi DEA, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, dorongan, serta kemudahan dalam menyelesaikan skripsi ini.
- (2) Seluruh dosen dan staff pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.
- (3) Bapak Richard A. M. Napitupulu yang telah menawarkan topik serta bantuan serta saran yang membangun selama penelitian.
- (4) Untuk Iswanto teman sekaligus sahabat seperjuangan yang begitu pantang menyerah untuk pengamatan struktur mikro, yang memberiku banyak *driving force* untuk skripsi ini. Terima kasih atas kerjasama dan bantuannya selama penelitian.
- (5) Untuk Ibuku yang setia mengiringiku dengan do'anya, juga untuk ayahku nomor satu di dunia yang semakin senja dan bertambah kerutan-kerutan di wajahnya karena memikirkan aku selama ini. Aku mencintai kalian berdua sebagaimana kalian mencintai dan memikirkanku selama ini. Skripsi ini kepersembahkan untuk kalian, yang mengajarkan arti hidup. Terlalu lelah dan terlalu hancur warasku jika mengerjakan skripsi ini tanpa ada kalian.

(6) Secara khusus, untuk asisten kimia baik juga *Kholilah Sa'adah*, Mukhsin, Fadli dan angkatan 2008 lain yang telah berpartisipasi dalam penyelesaian skripsi ini, terima kasih untuk bantuan kalian semua.

(7) Untuk Ardianto, Ahmad Zazali, Haris, Redian, Delvi, Rully, dan teman-teman Mahasiswa Departemen Metalurgi dan Material angkatan 2007 lainnya, tidak ada inspirasi tanpa kalian semua, dan terima kasih untuk kenangan indah yang tidak dapat dibeli . Saya banyak belajar dari kalian. Berkat bantuan kalianlah saya dapat mendobrak kemalasan yang bergelayutan di jiwa hingga akhirnya penulisan skripsi ini dapat rampung.

(8) Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu, menghargai dan mengoreksi penyelesaian skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap agar Allah swt. berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 30 Juni 2011

Penulis

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

---

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

Nama : Riyan Nuryanto  
NPM : 0706268865  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan 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 :

**Studi Kelayakan Desain Spesimen Terhadap Mekanisme Deformasi Regangan Bidang Pada Uji Tarik Panas Uniaksial Baja ASTM A572 Grade 50**

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 memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada Tanggal : 30 Juni 2011  
Yang menvatakan



(Riyan Nuryanto)

## ABSTRAK

Nama : Riyan Nuryanto  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Studi Kelayakan Desain Spesimen Terhadap Mekanisme  
Deformasi Regangan Bidang Pada Uji Tarik Panas Uniaksial  
Baja ASTM A572 *Grade 50*

Untuk mendapatkan kondisi regangan bidang pada uji tarik, modifikasi spesimen dilakukan. Modifikasi spesimen telah menunjukkan regangan minor yang bernilai nol untuk uji tarik yang dilakukan pada temperatur ruang sehingga kondisi regangan bidang dapat dicapai. Pengujian untuk kelayakan spesimen dilanjutkan dengan melakukan uji tarik panas pada temperatur tinggi, untuk mengetahui apakah kondisi regangan bidang masih dapat dipertahankan pada temperatur tinggi. Material yang digunakan adalah baja HSLA ASTM A 572 *grade 50*. Selanjutnya, dilakukan pula pengamatan metalografi untuk mengamati perubahan mikrostruktur setelah uji tarik panas, yang dalam hal ini adalah ukuran butir *ferrite*. Hasilnya, untuk uji tarik panas yang dilakukan sampai 1,15 *yield*, kondisi regangan bidang dapat dipertahankan. Terkait dengan deformasi yang terjadi, didapat pula bahwa semakin besar reduksi ketebalan yang terjadi semakin halus butir *ferrite*.

Kata kunci : regangan bidang, uji tarik panas uniaksial, kelayakan desain spesimen.

## ABSTRACT

Name : Riyan Nuryanto  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : Feasibility Study of Specimen Design Concern to Plane Strain Deformation Mechanism on Uniaxial Hot Tensile Test at ASTM A 572 Grade 50 HSLA Steel.

Modification of specimen have done to get plane strain condition in tensile test. Modification of the specimens has shown zero minor strain on tensile test conducted at room temperature. Feasibility study of specimens followed by hot tensile testing at high temperatures, to determine whether plane strain condition can be maintained at high temperatures. The material used is a HSLA steel ASTM A 572 grade 50. Furthermore, metallographic observation has been conducted to get microstructure after hot tensile test, which the scope is ferrite grain size. Results, on hot tensile test is carried out until 1,15 yield point, plane strain condition can be maintained. Related to the deformation, it has found that the greater thickness reduction the finer ferrite grains that formed.

Keywords : plane strain condition, uniaxial hot tensile test, feasibility study of specimen.

## 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 .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvi
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Ruang Lingkup Penelitian .....	3
1.5. Sistematika Penulisan .....	4
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Baja HSLA ( <i>High-Strength Low-Alloy</i> ) .....	5
2.2. Baja ASTM A 572 .....	9
2.3. Proses Termomekanik ( <i>Thermomechanical Process</i> ) .....	10
2.4. Sifat Mampu Bentuk ( <i>Formability</i> ) Lembaran Baja .....	15
2.5. Uji Tarik Regangan Bidang ( <i>Plane Strain Tensile Test</i> ) .....	17
2.6. Geometri Spesimen Uji Tarik Regangan Bidang .....	23
2.7. Pengaruh Laju Regangan pada Evolusi Mikrostruktur Canai Hangat .....	36
<b>3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>40</b>
3.1. Diagram Alir Penelitian .....	40
3.2. Alat dan Bahan .....	41
3.2.1. Alat .....	41
3.2.2. Bahan .....	41
3.3. Prosedur Penelitian .....	41
3.3.1. Proses Pembuatan <i>Grid</i> pada Spesimen .....	42
3.3.2. Uji Tarik Panas Uniaksial .....	42
3.3.2.1. Uji Tarik Panas sampai 1,15 <i>Yield</i> .....	42
3.3.2.2. Uji Tarik Panas sampai titik kegagalan .....	43
3.3.3. Pengamatan Perubahan Dimensi .....	43
3.3.3.1. Pembuktian Kondisi Regangan Bidang .....	43
3.3.3.2. Prediksi Deformasi Maksimum .....	44
3.3.4. Pengamatan Mikrostruktur .....	44
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>46</b>
4.1. Pengamatan Perubahan Dimensi .....	46

4.1.1. Pembuktian Kondisi Regangan Bidang.....	46
4.1.2. Prediksi Deformasi Maksimum .....	55
4.2. Pengamatan Mikrostruktur .....	56
<b>5. KESIMPULAN.....</b>	<b>59</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>60</b>



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Jenis-jenis Baja ASTM .....	9
<b>Tabel 2.2</b> Sifat Mekanis ASTM A 572 <i>grade</i> 42, 50 dan 60.....	10
<b>Tabel 2.3</b> Komposisi Kimia ASTM A 572 <i>grade</i> 42, 50 dan 60.....	10
<b>Tabel 2.4</b> Regangan pada arah x, y dan z yang dihasilkan dari tegangan dalam arah x, y dan z .....	21
<b>Tabel 2.5</b> Dimensi dari variasi geometri spesimen J. L. Dournaux.....	28
<b>Tabel 3.1</b> Komposisi Kimia Baja ASTM A 572 gr 50 hasil uji <i>spectrometer</i> .....	41
<b>Tabel 4.1</b> Dimensi awal spesimen 2, 3, 4 dan 5 pada arah lebar .....	48
<b>Tabel 4.2</b> Dimensi akhir spesimen 2, 3, 4 dan 5 pada arah lebar.....	48
<b>Tabel 4.3</b> Nilai Regangan Minor ( $\epsilon_{\text{minor}}$ ) spesimen 2, 3, 4 dan 5.....	48
<b>Tabel 4.4</b> Dimensi awal dan akhir spesimen 2, 3, 4 dan 5 pada arah panjang.....	48
<b>Tabel 4.5</b> Nilai Regangan Mayor ( $\epsilon_{\text{mayor}}$ ) spesimen 2, 3, 4 dan 5.....	48
<b>Tabel 4.6</b> Nilai FLD spesimen 2, 3, 4 dan 5 .....	49
<b>Tabel 4.7</b> Dimensi awal spesimen 6, 7 dan 8 pada arah lebar .....	50
<b>Tabel 4.8</b> Dimensi akhir spesimen 6, 7 dan 8 pada arah lebar .....	51
<b>Tabel 4.9</b> Nilai Regangan Minor ( $\epsilon_{\text{minor}}$ ) spesimen 6, 7 dan 8.....	51
<b>Tabel 4.10</b> Dimensi awal dan akhir spesimen spesimen 6, 7 dan 8 pada arah panjang .....	51
<b>Tabel 4.11</b> Nilai Regangan Mayor ( $\epsilon_{\text{mayor}}$ ) spesimen 6, 7 dan 8.....	51
<b>Tabel 4.12</b> Nilai FLD spesimen spesimen 6, 7 dan 8.....	51
<b>Tabel 4.13</b> Prediksi deformasi maksimum dari spesimen 7 dan 8.....	56
<b>Tabel 4.14</b> Data ukuran butir dan tingkat deformasi yang terjadi untuk semua spesimen .....	58

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Skematis ilustrasi proses TMCP pada Baja HSLA.....	6
<b>Gambar 2.2</b> Konsep Perubahan Mikrostruktur Selama TMCP .....	7
<b>Gambar 2.3</b> Mikrostruktur dari baja karbon rendah Mn-Mo-Nb ( <i>microalloyed line pipe steel</i> ). Pemanasan Awal ( <i>Reheating</i> ) 1100°C selama 5menit, selanjutnya ditahan pada 950°C selama 30 detik tanpa deformasi, dengan laju pendinginan (c) 2°C/s . (d) 0.2°C/s.....	8
<b>Gambar 2.4</b> Mikrostruktur Baja HSLA ASTM A 572. Pemanasan Awal 1000°C tanpa deformasi(a) waktu tahan 20 menit (b) waktu tahan 40 menit. Keduanya dilanjutkan Pendinginan Udara.....	9
<b>Gambar 2.5</b> Pengaruh ukuran butir terhadap kekuatan luluh pada baja C-Mn-Nb dan C-Mn .....	11
<b>Gambar 2.6</b> Variasi ukuran butir austenit dengan temperatur <i>reheating</i> dari Nb-V <i>microalloyed steel</i> .....	12
<b>Gambar 2.7</b> Kurva Kelarutan NbC pada baja dengan komposisi 0.15C-1.14Mn-0.04Nb wt%.....	13
<b>Gambar 2.8</b> Pengaruh <i>finish rolling temperature</i> pada ukuran butir <i>ferrite</i> baja HSLA .....	14
<b>Gambar 2.9</b> Pengaruh <i>Finish Cooling Temperature</i> terhadap kekuatan luluh dan kekuatan tarik Nb-Ti <i>Microalloyed Steel</i> .....	14
<b>Gambar 2.10</b> FLD yang memperlihatkan variasi lintasan regangan linear .....	16
<b>Gambar 2.11</b> Hubungan regangan mayor ketika kondisi regangan bidang (FLD(0)) dengan temperatur .....	17
<b>Gambar 2.12</b> <i>Plane Strain Tension test</i> spesimen.....	19
<b>Gambar 2.13</b> Karakteristik tegangan-regangan dalam batasan daerah elastis (a) Definisi dari $\sigma$ dan $\epsilon$ dalam bentuk panjang awal spesimen uji, $L$ , dan luas area awal, $A_0$ , sebelum diterapkan suatu gaya tarik, $F$ . (b) Kurva tegangan regangan untuk regangan yang kecil dalam batasan limit elastisitas (EL).....	20
<b>Gambar 2.14</b> Analisa Tegangan Regangan pada spesimen <i>plane strain tensile test</i> .....	22

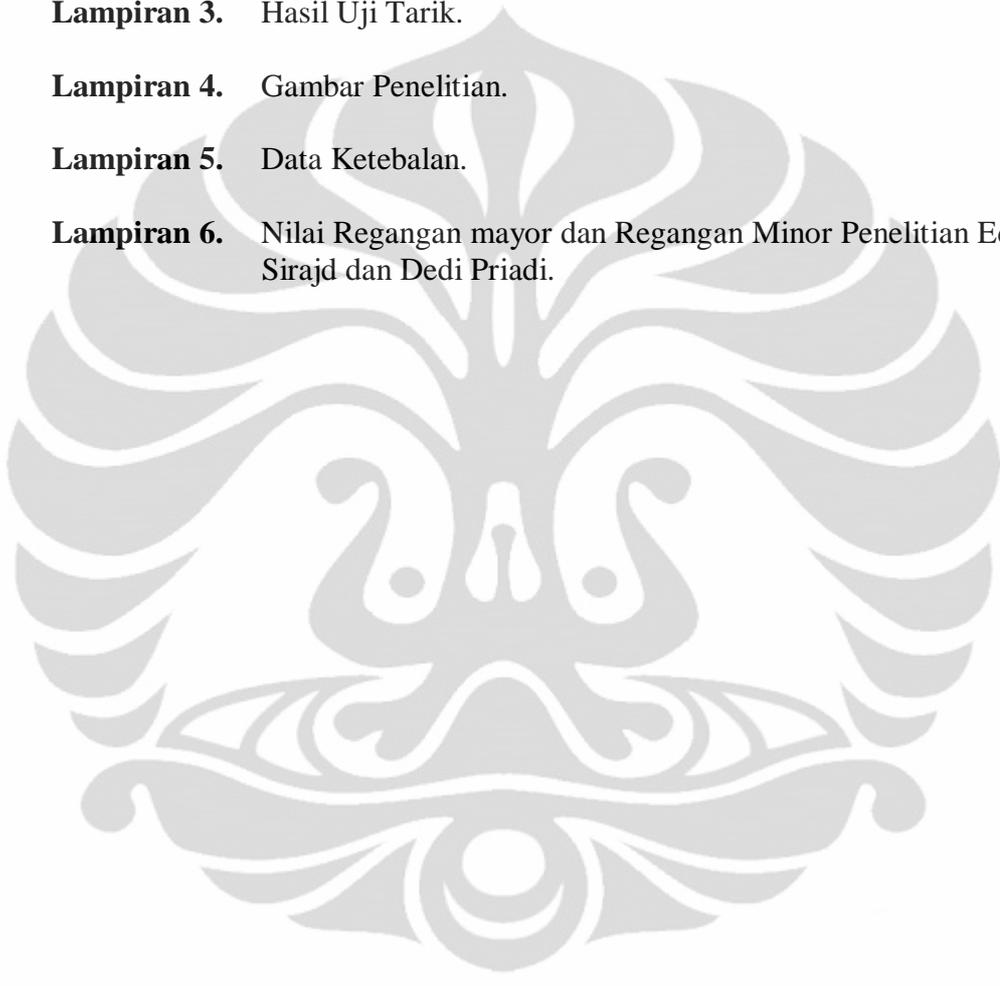
<b>Gambar 2.15</b> Desain Spesimen Wagoner dan Wang untuk uji tarik uniaksial mode regangan bidang. ....	24
<b>Gambar 2.16</b> Spesimen Holmberg dalam uji tarik Regangan Bidang, dimensi dalam milimeter, $h_0$ berkisar antara 6-12 mm, $w_1$ dan $w_2$ berkisar antara 16-76 mm.....	25
<b>Gambar 2.17</b> Pengaruh lebar dan panjang spesimen pada kondisi regangan ketika spesimen mengalami kegagalan pada uji tarik .....	26
<b>Gambar 2.18</b> Spesimen IPPS dari Valletta.....	26
<b>Gambar 2.19</b> Desain Spesimen Leo Joseph Kilfoil untuk pengujian tarik regangan bidang.....	27
<b>Gambar 2.20</b> <i>Forming Limit Diagram</i> Hasil Pengujian tarik regangan bidang L. J. Kilfoil (kiri) serta nilai $\beta$ dari berbagai material (kanan).....	27
<b>Gambar 2.21</b> Variasi bentuk spesimen pada penelitian J. L. Dournaux dkk.....	29
<b>Gambar 2.22</b> Model Pita ( <i>longitudinal</i> dan <i>transverse</i> ) pada spesimen J. L. Dournaux dkk .....	30
<b>Gambar 2.23</b> Efek geometri pada rasio $\epsilon_T/\epsilon_L$ untuk regangan longitudinal yang berbeda (a) $\epsilon_L=5\%$ (b) $\epsilon_L=10\%$ .....	30
<b>Gambar 2.24</b> <i>Tranverse strain</i> dan <i>longitudinal strain</i> pada rata-rata <i>longitudinal strain</i> (a) 9% (b) 11% di sepanjang $B_T$ .....	31
<b>Gambar 2.25</b> <i>Plane strain extensometer</i> dan skematis yang menunjukkan geometri dari spesimen untuk uji tarik regangan bidang. <i>Gage width</i> , $W$ , bervariasi dari mulai 47 sampai 77mm; (a) <i>extensometer</i> ; (b) geometri spesimen .....	32
<b>Gambar 2.26</b> Bentuk Variasi Spesimen pada penelitian R. Bagus Hendro Pramono.....	32
<b>Gambar 2.27</b> Grid-grid pada spesimen R. Bagus Hendro (a) spesimen A (b) spesimen B (c) spesimen C .....	32
<b>Gambar 2.28</b> <i>Forming Limit Diagram</i> Untuk Spesimen A. B dan C (R. Bagus Hendro).....	33
<b>Gambar 2.29</b> Kurva hubungan antara regangan mayor terhadap posisi <i>grid</i> pada 1,15 <i>yield</i> .....	34
<b>Gambar 2.30</b> Spesimen untuk <i>plane strain tensile test</i> dan titik pengukuran untuk memperlihatkan fenomena <i>necking</i> .....	34

<b>Gambar 2.31</b> Dimensi spesimen pada penelitian Takaaki Iguchi.....	35
<b>Gambar 2.32</b> Grid-grid yang terdapat pada spesimen 3.....	35
<b>Gambar 2.33</b> Grid-grid yang terdapat pada spesimen 4.....	35
<b>Gambar 2.34</b> FLD untuk spesimen 3 dan 4 penelitian Eddy S. Siradj dkk.....	36
<b>Gambar 2.35</b> Efek Laju regangan pada baja karbon rendah yang dideformasi di temperatur 700°C (a) mikrostruktur awal (b) $5 \times 10^{-4}$ /s (e) 0.1 /s (f) 1/s.....	38
<b>Gambar 2.36</b> Scanning Electron Microscope (SEM) hasil <i>plane strain compression test</i> dari spesimen pada temperatur 823 K dan laju regangan berbeda. (e) 1/s (f) 0.01 /s .....	38
<b>Gambar 2.37</b> <i>Boundary Map</i> mikrostruktur hasil ESBD. Efek laju regangan pada <i>plane strain compression test</i> pada temperatur berbeda. (c) 773 K. 1/s (d) 773 K. 0.01/s (e) 823 K. 1/s (f) 823 K. 0.01/s.....	39
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian.....	40
<b>Gambar 3.2</b> Dimensi Spesimen Eddy Siradj dkk.....	42
<b>Gambar 3.3</b> Titik pengukuran untuk regangan minor untuk mendapatkan nilai FLD. ....	43
<b>Gambar 3.4</b> Titik pengukuran untuk regangan mayor untuk mendapatkan nilai FLD. ....	44
<b>Gambar 3.5</b> Skematis Metode <i>Intercept</i> untuk perhitungan butir.....	45
<b>Gambar 4.1</b> Kurva beban-perpanjangan dan kurva tegangan-regangan rekayasa dari uji tarik panas uniaksial sampai titik 1,15 <i>yield</i> spesimen 2, 3, 4, dan 5.....	47
<b>Gambar 4.2</b> FLD dari spesimen 2, 3, 4 dan 5 pada beberapa variasi temperatur uji tarik panas uniaksial sampai titik 1,15 <i>yield</i> .....	49
<b>Gambar 4.3</b> Kurva beban-perpanjangan dan kurva tegangan-regangan rekayasa dari uji tarik panas uniaksial sampai titik kegagalan spesimen 6, 7 dan 8.....	50
<b>Gambar 4.3</b> FLD dari spesimen 2, 3, 4 dan 5 pada beberapa variasi temperatur	

uji tarik panas uniaksial sampai titik 1,15 <i>yield</i> .....	49
<b>Gambar 4.4</b> FLD untuk spesimen 6, 7 dan 8 pada beberapa variasi temperatur uji tarik sampai titik kegagalan .....	52
<b>Gambar 4.5</b> Hubungan Temperatur dengan regangan mayor yang terjadi pada kondisi regangan bidang (FLD (0)) hasil uji tarik panas uniaksial sampai titik 1,15 <i>yield</i> dan sampai titik kegagalan.....	54
<b>Gambar 4.6</b> Hubungan Temperatur dengan regangan minor hasil uji tarik panas uniaksial sampai titik 1,15 <i>yield</i> dan sampai titik kegagalan.. .....	55
<b>Gambar 4.7</b> Mikrostruktur dari (a) spesimen 2(600°C) dan (b) spesimen 3(690°C) yang terdiri dari fasa <i>ferrite</i> . Temperatur <i>Reheating</i> 750°C. Etsa <i>marshall's reagent</i> yang diikuti dengan nital 2%.....	57
<b>Gambar 4.8</b> Mikrostruktur dari (a) spesimen 4(700°C) dan (b) spesimen 5(750°C) yang terdiri dari fasa <i>ferrite</i> . Temperatur <i>Reheating</i> 750°C. Etsa <i>marshall's reagent</i> yang diikuti dengan nital 2%. .....	57
<b>Gambar 4.9</b> Mikrostruktur dari (a) spesimen 1(tanpa perlakuan deformasi panas) dan (b) spesimen 8 (800°C) (foto diambil disekitar patahan) yang terdiri dari fasa <i>ferrite</i> . Temperatur <i>Reheating</i> 900°C. Etsa <i>marshall's reagent</i> yang diikuti dengan nital 2%.....	57
<b>Gambar 4.10</b> Grafik Ukuran Butir-Regangan.....	58

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1.** Foto Mikro.
- Lampiran 2.** Perhitungan Butir.
- Lampiran 3.** Hasil Uji Tarik.
- Lampiran 4.** Gambar Penelitian.
- Lampiran 5.** Data Ketebalan.
- Lampiran 6.** Nilai Regangan mayor dan Regangan Minor Penelitian Eddy Sirajd dan Dedi Priadi.



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

*Thermo-mechanical control process (TMCP)* adalah sebuah teknik pengontrolan struktur mikro yang mengkombinasikan pendinginan dan pencanaian terkontrol. TMCP digunakan untuk mencapai berbagai sifat pada lembaran baja, seperti kekuatan yang tinggi, ketangguhan dan sifat mampu-las yang baik. Pada TMCP, struktur yang bertransformasi dihaluskan dengan kombinasi yang baik antara pencanaian terkontrol (*controlled rolling*) dan pendinginan yang dipercepat (*accelerated cooling*). Untuk meningkatkan situs nukleasi (*nucleation site*) dari *ferrite* selama pendinginan, pencanaian terkontrol dilakukan dengan menghaluskan dan meregangkan *austenite*. Selanjutnya, struktur yang bertransformasi dihaluskan dengan pendinginan yang dipercepat, yaitu pendinginan untuk mereduksi temperatur transformasi dimana difusi atom dibatasi sedangkan gaya dorong (*driving force*) transformasi diberikan. TMCP tidak hanya memberikan sifat yang sangat baik dengan mekanisme penghalusan butir namun juga dapat mengurangi unsur paduan yang dapat meningkatkan sifat mampu las.<sup>[1]</sup>

Pengontrolan dan prediksi dari evolusi mikrostruktur yang terkait dengan sifat mekanik dari baja HSLA menjadi suatu hal yang penting dalam proses pembentukan panas melalui TMCP khususnya bagi pengembangan teknologi industri baja. Untuk mencapai tujuan tersebut, pengukuran dan prediksi rekristalisasi, pertumbuhan butir dan transformasi fasa dari baja menjadi sangat dibutuhkan.

Banyak penelitian yang telah dilakukan dalam menemukan model yang sesuai bagi pembentukan mikrostruktur tersebut, diantaranya dengan memprediksi keadaan mikrostruktur selama proses anil, deformasi, dan setelah deformasi. Pada penelitian-penelitian tersebut, pengujian yang dilakukan umumnya menggunakan deformasi dengan menggunakan metode kompresi, torsi, dan bending. Adapun metode deformasi akibat gaya tarik sulit ditemukan.

Hal ini menjadi suatu tantangan dalam pengembangan pengujian TMCP, karena pada uji tarik uniaksial tidak terjadi regangan bidang (*plane strain*) sebagaimana yang terjadi pada material yang mengalami TMCP. Salah satu alternatif yang memungkinkan adalah dengan mengembangkan model spesimen dan *jig* (pemegang) yang sesuai bagi uji tarik uniaksial sehingga kondisi regangan bidang dapat dicapai, baik pada temperatur ruang maupun temperatur tinggi. Dengan diperolehnya model spesimen uji tarik dan *jig* yang sesuai untuk digunakan pada mesin uji tarik uniaksial, sebagai salah satu alternatif pengujian dalam proses TMCP diharapkan prediksi mekanisme dan evolusi mikrostruktur yang terjadi pada proses canai panas dapat dilakukan di laboratorium-laboratorium perguruan tinggi di Indonesia yang memiliki mesin uji tarik.

Dalam penelitian sebelumnya<sup>[2]</sup>, modifikasi spesimen telah berhasil menunjukkan kondisi regangan bidang pada uji tarik uniaksial sampai 1,15 *yield* di temperatur ruang. Masih dengan geometri spesimen yang sama, dilakukan pengujian kelayakan spesimen dengan uji tarik panas uniaksial pada variasi temperatur penarikan berkisar antara 600-800°C untuk memperlihatkan pola regangan yang terjadi pada spesimen, dimana diharapkan kondisi regangan bidang dapat dipertahankan pada temperatur tinggi.

## 1.2. Perumusan Masalah

Pada penelitian ini akan dilakukan studi kelayakan desain spesimen pada uji tarik panas uniaksial dengan variasi temperatur penarikan berkisar antara 600°C dan 800°C. Penelitian dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik panas yang didukung dengan dapur pemanas yang telah dirancang sesuai dengan bentuk *jig* dan mesin uji tarik yang digunakan. Pembuktian mekanisme deformasi dalam kondisi regangan bidang selanjutnya dilakukan dengan pengamatan perubahan dimensi. Selanjutnya diamati pula perubahan mikrostruktur setelah deformasi (uji tarik panas), yang dalam hal ini adalah besar butir *ferrite*.

### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh temperatur penarikan terhadap deformasi dalam kondisi regangan bidang baja lembaran ASTM A572 *grade* 50.
2. Mengetahui dan menganalisis kelayakan desain spesimen pada temperatur tinggi dalam pengembangan model uji tarik uniaksial sebagai alternatif metode pengujian TMCP.
3. Memprediksi deformasi maksimum yang dihasilkan pada uji tarik panas uniaksial.
4. Mengamati perubahan mikrostruktur yang terjadi setelah uji tarik panas untuk mengetahui pengaruh tingkat deformasi pada ukuran butir.

### 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material yang akan digunakan dalam uji tarik panas uniaksial ini adalah baja lembaran ASTM A572 *grade* 50 dengan desain yang telah ditentukan pada penelitian sebelumnya.
2. Pengujian tarik panas uniaksial hanya arah lembaran 0° (*Rolling Direction*).
3. Variasi temperatur penarikan yang dilakukan dalam penelitian ini berkisar antara 600°C dan 800°C.
4. Pengujian tarik panas uniaksial meliputi pengujian tarik panas sampai titik kegagalan dan pengujian titik panas sampai 1.15 *yield* yang dilakukan untuk mengamati mekanisme deformasi regangan bidang.
5. Prediksi deformasi maksimum hanya meliputi uji tarik panas uniaksial sampai titik kegagalan untuk temperatur penarikan di atas A<sub>1</sub>.
6. Pengamatan struktur mikro untuk mengetahui ukuran butir *ferrite* setelah uji tarik panas untuk mengetahui pengaruh tingkat deformasi.

#### **1.4. Sistematika Penulisan**

Penelitian studi kelayakan desain spesimen ini akan ditulis dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

##### **Bab 1 Pendahuluan**

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

##### **Bab 2 Tinjauan Pustaka**

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

##### **Bab 3 Metodologi Penelitian**

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

##### **Bab 4 Hasil dan Pembahasan**

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

##### **Bab 5 Kesimpulan**

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

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

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

Sebelum perang dunia kedua, kekuatan pada *hot-rolled low-alloy steel* dicapai dengan peningkatan kadar karbon sampai 0.4 wt% dan mangan sampai 1.5 wt%, yang memberikan kekuatan luluh (*yield stress*) dalam kisaran 350-400 MPa. Namun, baja ini cenderung tidak cukup tangguh untuk aplikasi saat itu. Kandungan karbon yang tinggi juga memicu masalah yang serius yaitu *cracking* pada pengelasan yang menjadi teknik penyambungan utama. Hal tersebut hanya dapat diatasi dengan penggunaan baja dengan kandungan karbon yang rendah. Hal ini memicu produksi baja dengan ukuran ferit yang sangat halus, dimana pencanaan terkendali (*controlled rolling*) pada kondisi austenit, perlahan-lahan mulai dikenal untuk mencapai hasil ini. Penghalusan butir dimudahkan dengan unsur Nb, Ti dan V yang memungkinkan produksi baja dengan kekuatan luluh 450-550 MPa, dengan *Ductile-Brittle Transition Temperature* (DBTT) sampai  $-70^{\circ}\text{C}$ , yang kemudian lebih dikenal dengan baja HSLA<sup>[3]</sup>.

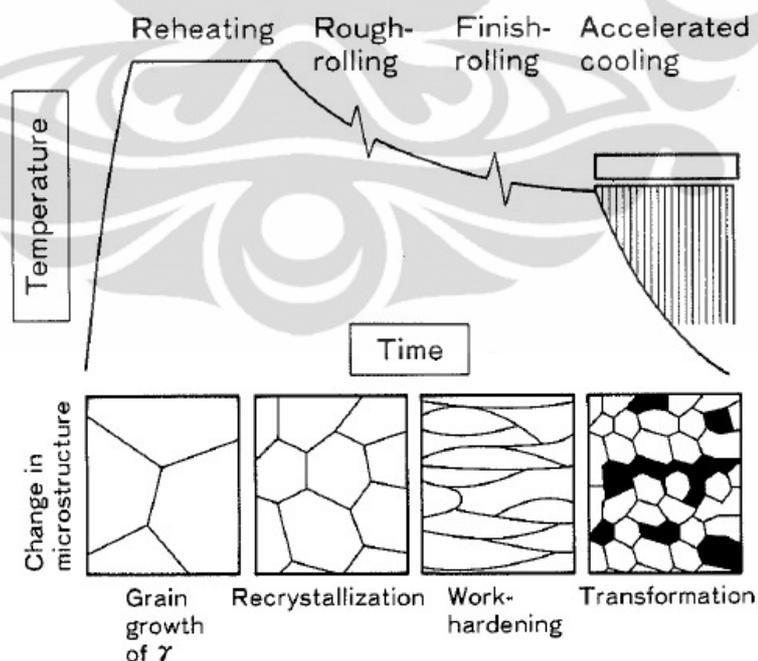
*The American Iron and Steel Institute* menyatakan bahwa *high-strength, low-alloy* (HSLA) *steel* terdiri dari kelompok baja dengan komposisi kimia yang secara khusus dikembangkan untuk mendapatkan nilai sifat mekanik yang tinggi. Beberapa jenis dari baja ini memiliki ketahanan terhadap korosi atmosfer lebih baik dari baja karbon konvensional. Baja HSLA, secara umum diproduksi dengan menitik-beratkan perhatian pada persyaratan sifat mekanik dari pada batasan komposisi kimia. Baja HSLA dapat diproduksi dalam kondisi *as-hot rolled*, dengan kekuatan luluh berkisar antara 290-550 MPa dan kekuatan tarik 415-700 MPa. Kandungan karbon yang rendah dari baja ini, membuatnya lebih mudah di las<sup>[4]</sup>.

Mekanisme penguatan ferit dalam baja HSLA antara lain melalui penghalusan butir (*grain refinement*), penguatan presipitat (*precipitation hardening*) dan

penguatan *solid-solution*. Mekanisme penguatan pada baja HSLA, khususnya penguatan pada fasa ferit, diantaranya meliputi<sup>[5]</sup>:

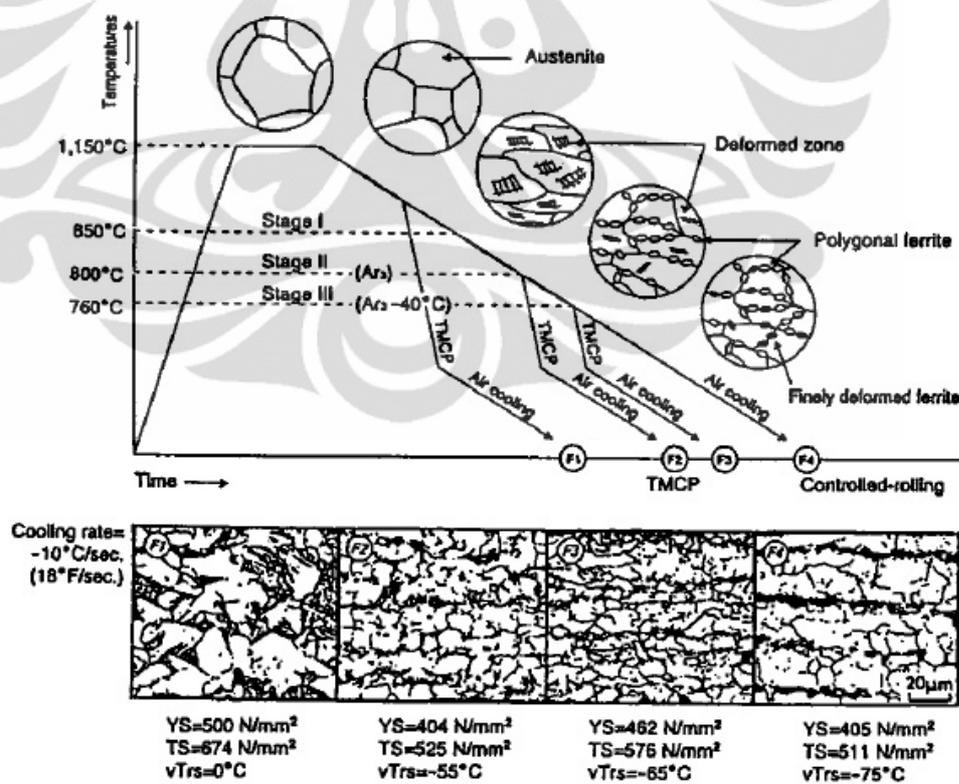
1. Penghalusan butir (*grain refinement*), mekanisme ini dicapai *controlled rolling* dan *accelerated cooling*. Penambahan unsur-unsur tertentu juga berkontribusi terhadap penghalusan butir ferit pada HSLA yang menahan pertumbuhan butir austenit ketika *reheating* untuk deformasi panas dilakukan. Penghalusan butir adalah mekanisme penguatan yang paling diinginkan.
2. Pengerasan endapan (*precipitation hardening*), adanya unsur pembentuk karbida dan/atau nitrida menjadi pemicu terbentuknya mekanisme pengerasan endapan.
3. Penguatan *solid solution*, unsur yang berkontribusi dalam mekanisme penguatan ini, diantaranya adalah mangan dan fosfor.

Perbaikan sifat pada baja HSLA tidak terlepas dari penghalusan butir sebagai mekanisme penguatan utama. Penghalusan butir memberikan peningkatan kekuatan dan ketangguhan pada waktu yang bersamaan. Untuk dapat menghaluskan butir ferit dibutuhkan optimalisasi luas area batas butir austenit per unit volum<sup>[6]</sup>.



**Gambar 2.1** Skematis ilustrasi proses TMCP pada Baja HSLA<sup>[7]</sup>.

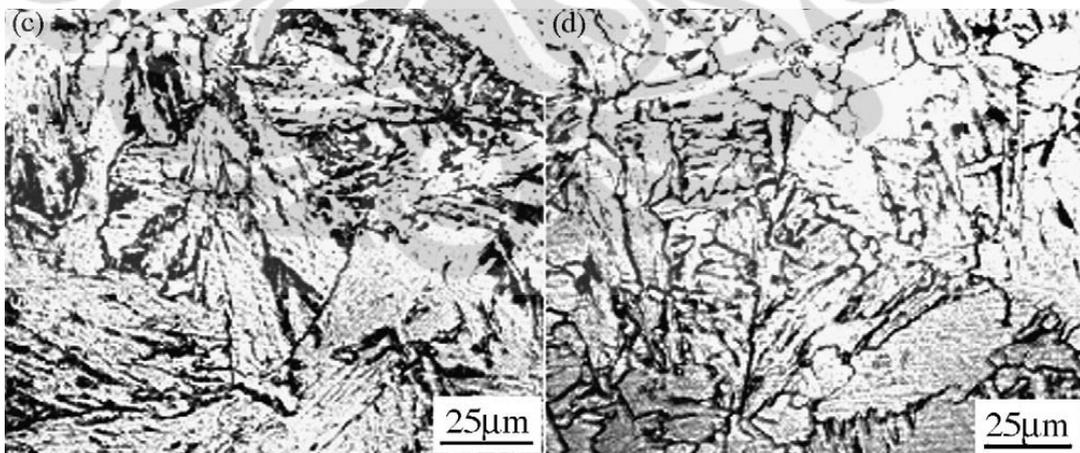
Skematis ilustrasi siklus termal dan evolusi mikrostruktur pada tiap tahapan TMCP ditunjukkan pada Gambar 2.1. Mula-mula *slab* dipanaskan (*reheating*) pada temperatur yang relatif rendah untuk menjaga ukuran butir austenit. Kemudian tahapan pertama dilakukan pencanaian (*rough-rolling*) pada daerah dimana austenit mengalami rekristalisasi (*recrystallized austenite region*) sehingga ukuran butir dapat direduksi. Proses canai (*finish-rolling*) berlanjut pada temperatur yang cukup rendah di atas  $A_{r3}$  pada daerah dimana austenit tidak terkrystalisasi (*non-recrystallized austenite region*) untuk menghasilkan *work-hardened austenite*. Fenomena metalurgi yang paling penting terjadi dalam tahapan ini, yaitu transformasi dari *work-hardened austenite*. *Work-hardened austenite* mengandung sejumlah cacat seperti dislokasi, pita deformasi (*deformation band*), *deformed annealing twin* dan lain-lain. Adanya cacat-cacat tersebut memungkinkan tempat nukleasi (*nucleation site*) ferit pada cacat tersebut sebagaimana batas butir austenit yang terelongasi (*elongated austenite grain*) atau *pancake-like austenite grain*) yang berfungsi sebagai tempat nukleasi ferit<sup>[7,8]</sup>.



Gambar 2.2 Konsep Perubahan Mikrostruktur Selama TMCP<sup>[9]</sup>.

Shiro Imai menjelaskan konsep pengendalian mikrostruktur dalam TMCP sebagaimana Gambar 2.2. Pengendalian mikrostruktur dimulai dengan tahapan *reheating*. Dalam tahapan ini, ukuran butir austenit prior dikendalikan dengan hati-hati. Tahapan selanjutnya adalah proses canai. Dengan pencanaan terkendali dalam *non-recrystallization region*, terbentuk *work-hardened austenite* yang halus. Austenit ini kemudian mengalami transformasi menjadi ferit *acicular* atau *upper bainite* yang halus setelah proses *accelerated cooling*. Dalam hal ini shiro imai mengemukakan bahwa tujuan TMCP adalah untuk menghasilkan ferit *acicular* yang halus dan seragam, berbeda dengan *ferrite/pearlite band* yang dihasilkan dalam proses canai konvensional. Oleh karena itu, TMCP memiliki kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik dibanding proses canai konvensional<sup>[9]</sup>.

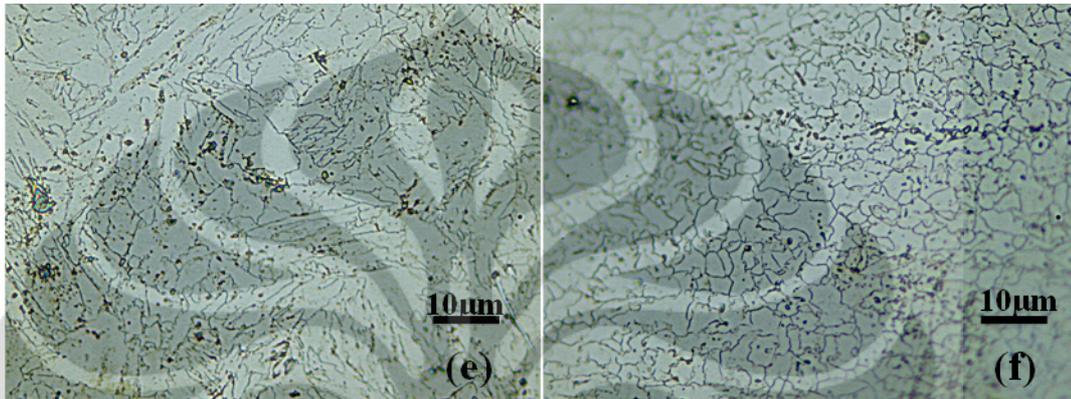
Furen Xiao yang mengkonstruksi kurva CCT (*Continuous Cooling Transformation*) tanpa deformasi, menemukan bahwa pada laju pendinginan yang lebih lambat dihasilkan ferit *acicular* (0.2- 5°C/s), sedangkan untuk pendinginan yang lebih cepat 10-100°C/s dihasilkan bainit. Gambar 2.3 memperlihatkan mikrostruktur *acicular* ferit dari baja karbon rendah Mn-Mo-Nb hasil penelitian Furen Xiao<sup>[12]</sup>.



**Gambar 2.3** Mikrostruktur dari baja karbon rendah Mn-Mo-Nb (*microalloyed line pipe steel*). Pemanasan Awal (*Reheating*) 1100°C selama 5menit, selanjutnya ditahan pada 950°C selama 30 detik tanpa deformasi, dengan laju pendinginan (c) 2°C/s . (d) 0.2°C/s<sup>[12]</sup>.

Iswanto juga mendapati mikrostruktur ferit *acicular*, dengan pemanasan awal 1000°C tanpa perlakuan deformasi. Ia mendapati ferit *acicular* pada waktu tahan pemanasan

awal (*reheating*) selama 20 menit yang dilanjutkan dengan pendinginan udara, sedangkan untuk perlakuan yang sama dengan waktu tahan berbeda (40 menit) didapatkan ferit poligonal sebagaimana yang terlihat pada Gambar 2.4. Ia mengemukakan bahwa terjadinya ferit *acicular* tidak begitu dimengerti<sup>[10]</sup>.



**Gambar 2.4** Mikrostruktur Baja HSLA ASTM A 572. Pemanasan Awal 1000°C tanpa deformasi (a) waktu tahan 20 menit (b) waktu tahan 40 menit. Keduanya dilanjutkan Pendinginan Udara<sup>[10]</sup>.

## 2.2 Baja ASTM A 572

Tabel 2.1 memperlihatkan jenis-jenis dari baja HSLA dengan sistem penamaan dari ASTM. Baja ASTM A 572, tergolong dalam baja struktural Nb-V. Komposisi kimia dapat dilihat pada Tabel 2.3.

**Tabel 2.1** Jenis-jenis Baja ASTM<sup>[11]</sup>.

<i>ASTM designation</i>	<i>Type of steel</i>
A 242	<i>HSLA structural steel</i>
A 572	<i>HSLA columbium (niobium)-vanadium structural steel</i>
A 588	<i>HSLA structural steel with 345 Mpa (50ksi) minimum yield point</i>
A 656	<i>HSLA hot-rolled structural V-Al-N and titanium-aluminum steels</i>
A 714	<i>HSLA welded and seamless steel pipe</i>
A 715	<i>HSLA, hot-rolled sheet and strip, and sheet steel, cold-rolled, high-strength, low-alloy, with improved formability</i>
A 808	<i>HSLA with improved notch toughness</i>
A 871	<i>HSLA steel with atmospheric corrosion resistance</i>

Baja ASTM A572 adalah baja HSLA yang digunakan dalam berbagai aplikasi struktural. Baja ini memiliki kisaran kekuatan luluh 290 sampai 450 MPa (42 – 65 ksi) yang diproduksi dalam 6 *grade*, meliputi *grade* 42, 45, 50, 55, 60, dan 65 (*grade*

mewakili kekuatan luluh minimum). Sedangkan untuk nilai elongasi sangat beragam, bergantung pada ketebalan dan lebar plat<sup>[5,14]</sup>.

**Tabel 2.2** Sifat Mekanis ASTM A 572 *grade* 42, 50 dan 60<sup>[14]</sup>.

Sifat Mekanis	A572 gr 50	A572 gr 60	A572 gr 42
Kekuatan tarik	65 ksi min	75 ksi min	60 ksi min
Kekuatan luluh	50 ksi min	60 ksi min	42 ksi min
Elongasi	16% min in 8"	16% min in 8"	18% min in 8"
	19% min in 2"	15% min in 2"	22% min in 2"

**Tabel 2.3** Komposisi Kimia ASTM A 572 *grade* 42, 50 dan 60<sup>[14]</sup>.

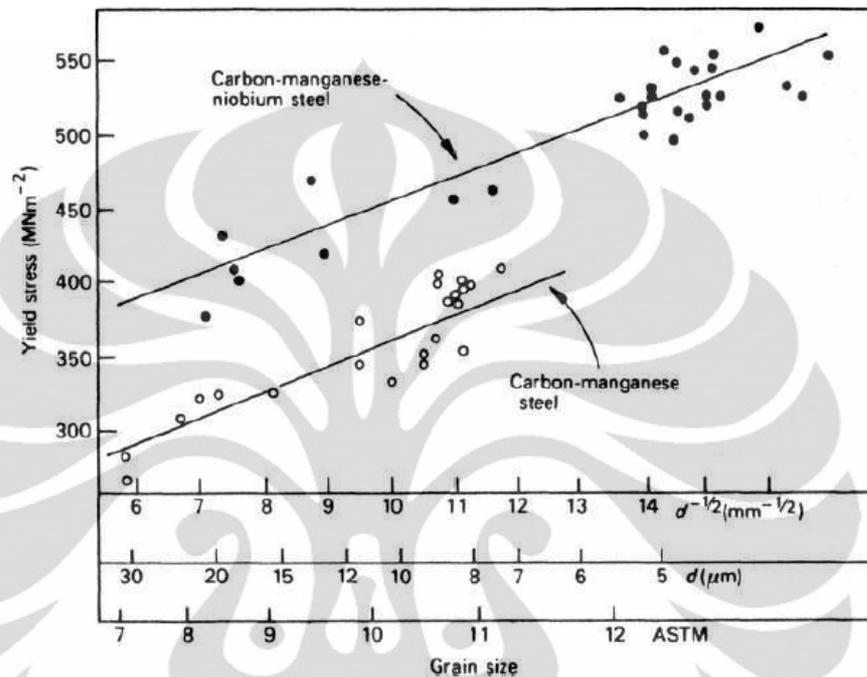
ASTM A 572	Komposisi Kimia (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Cu	Nb	V
Gr 50	0.23	1.35	0.04	0.05	0.30	0.2min	0.01-0.15	-
Gr 60	0.26	1.35	0.04	0.05	0.30	0.2min	0.05	0.02-0.15
Gr 42	0.21	1.35	0.04	0.05	0.30	0.2min	0.005-0.05	-

Dalam komposisi kimia diatas, nilai mangan dan silikon sangat bervariasi, bergantung pada dimensi produk. Sedangkan, penambahan unsur tembaga hanya merupakan pilihan ketika dibutuhkan. Pengaruh unsur niobium dan vanadium yang ditambahkan sebagai unsur minor meningkatkan kekuatan luluh dengan kombinasi penghalusan butir dan mekanisme penguatan endapan. Sebagai unsur penghalus butir, niobium lebih efektif dibanding vanadium karena karbida niobium lebih stabil pada austenit dibanding karbida vanadium pada tipikal temperatur canai panas. Kelarutan yang rendah dari karbida niobium pada austenit juga memberikan pengendapan yang lebih stabil yang efektif menahan pertumbuhan butir austenit<sup>[5]</sup>.

### 2.3 TMCP (*Thermo-Mechanical Control Process*)

*Thermo-mechanical control process* (TMCP) adalah sebuah teknik pengontrolan struktur mikro yang mengkombinasikan pencanaian terkontrol (*controlled rolling*) dan pendinginan terkendali (*accelerated cooling*). TMCP digunakan untuk mengkombinasikan berbagai sifat pada lembaran baja, seperti kekuatan yang tinggi, ketangguhan dan sifat mampu-las yang baik<sup>[1]</sup>. Perbaikan sifat pada baja HSLA tidak terlepas dari penghalusan butir sebagai mekanisme penguatan utama. Penghalusan butir memberikan peningkatan kekuatan dan ketangguhan pada

waktu yang bersamaan<sup>[6]</sup>. Hubungan ukuran butir ferit dengan kekuatan luluh pada Baja C-Mn dan C-Mn-Nb dapat dilihat pada Gambar 2.5. Semakin halus butir semakin besar nilai kekuatan luluh.

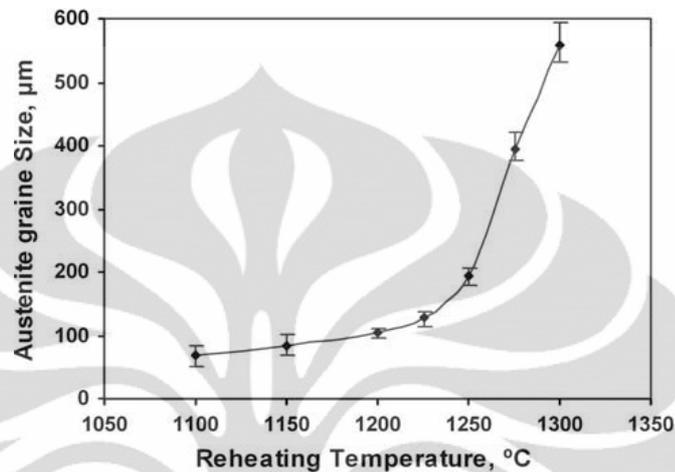


Gambar 2.5 Pengaruh ukuran butir terhadap kekuatan luluh pada baja C-Mn-Nb dan C-Mn<sup>[3]</sup>.

Tahapan pertama dari proses TMCP adalah *reheating* sampai temperatur dimana unsur paduan (*microalloyed element*) menjadi *solid-solution* dalam austenit. Pengaruh dari temperatur *reheating* sebelum deformasi dilakukan pada austenit diilustrasikan pada Gambar 2.6. Pertumbuhan austenit akan terjadi pada *trend* yang normal sampai temperatur tertentu<sup>[15]</sup>.

Dalam Gambar 2.6 *trend* yang normal terjadi sampai temperatur  $\pm 1240^{\circ}\text{C}$ , diatas temperatur tersebut pertumbuhan austenit menjadi sangat cepat. Pada  $1100^{\circ}\text{C}$  ukuran butir austenit hanya  $68\mu\text{m}$ , sedangkan pada temperatur  $1300^{\circ}\text{C}$  mencapai  $558\mu\text{m}$  sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.5. Hal tersebut berkaitan dengan adanya pelarutan dari presipitat sehingga tidak ada lagi yang menahan migrasi batas butir<sup>[15]</sup>. Pengontrolan ukuran butir pada temperatur austenisasi yang sangat tinggi mengharuskan adanya presipitasi pada batas butir yang tidak mudah larut, bahkan pada temperatur pecanaan yang sangat tinggi ( $1200\text{-}1300^{\circ}\text{C}$ ), contohnya adalah

*strong carbide former* atau *nitride former*, seperti Nb, Ti dan V<sup>[3]</sup>. Gambar 2.7 menggambarkan bagaimana pengaruh temperatur terhadap fraksi volum dari presipitat NbC.

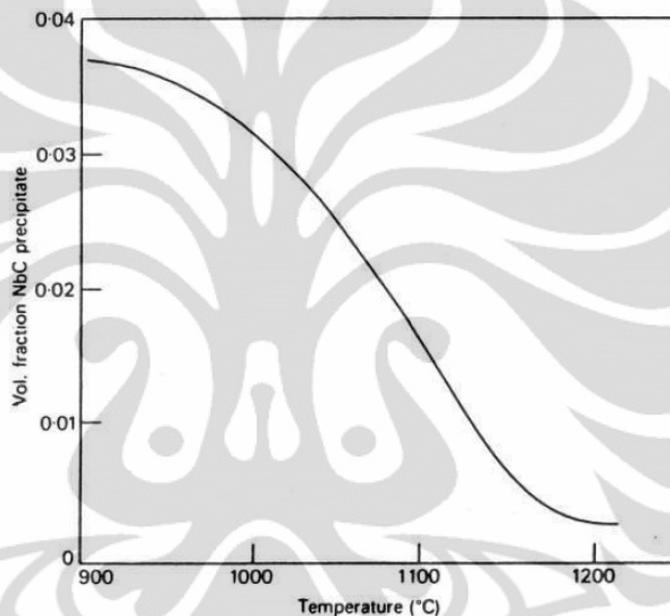


**Gambar 2.6** Variasi ukuran butir austenit dengan temperatur reheating dari Nb-V microalloyed steel<sup>[15]</sup>.

Kemudian, proses selanjutnya adalah *rough rolling* yang dilakukan pada temperatur di bawah temperatur *reheating*, namun masih di atas temperatur rekristalisasi austenit. Proses ini dilakukan untuk menghaluskan butir austenit dengan deformasi dan rekristalisasi statis yang berulang-ulang<sup>[16]</sup>. Dengan temperatur *rough rolling* yang lebih rendah Furen Xiao mendapati bahwa kekuatan dan ketangguhan akan meningkat seiring dengan penghalusan butir yang terjadi<sup>[12]</sup>.

Proses selanjutnya, yaitu *finish rolling* untuk menghasilkan tempat nukleasi (*nucleation site*) yang tinggi untuk ferit dalam butir austenit. Temperatur yang rendah dari *finish rolling* memicu penghalusan butir austenit, karena tidak adanya lagi *driving force* untuk pertumbuhan butir yang terekristalisasi (*recrystallized austenite grain*). *Finish rolling* dilakukan pada *non-recrystallization austenite region*, dimana pembentukan *deformation band* dan peningkatan area batas butir austenit per unit volum berperan untuk meningkatkan tempat nukleasi (*nucleation site*). Pengaruh temperatur dari *finish rolling* terhadap ukuran butir ferit diilustrasikan pada Gambar 2.8<sup>[16]</sup>. Proses selanjutnya adalah *accelerated cooling*, M. C. Zhao yang meneliti parameter TMCP pada *microalloyed Nb-V pipeline steel* mengemukakan peran dari

*finish cooling temperature* dan laju pendinginan (*cooling rate*) yang mungkin berpartisipasi untuk pengendalian karbonitrida selama proses ini berlangsung. Parameter ini mempengaruhi penguatan endapan (*precipitation strengthening*) dan penghalusan butir dari mikrostruktur. Pada *finish cooling temperature* sedikit di atas 500°C,  $V_3C_4$  sebagai karbida utama yang mempunyai laju nukleasi yang tinggi, mempunyai peranan yang sangat menonjol dalam penguatan endapan<sup>[8]</sup>.

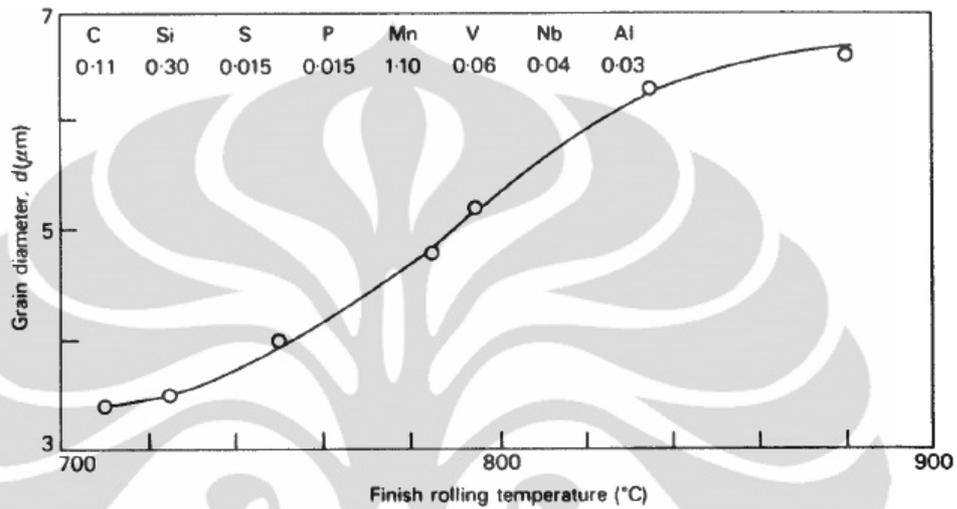


**Gambar 2.7** Kurva Kelarutan NbC pada baja dengan komposisi 0.15C–1.14Mn–0.04Nb wt%<sup>[3]</sup>.

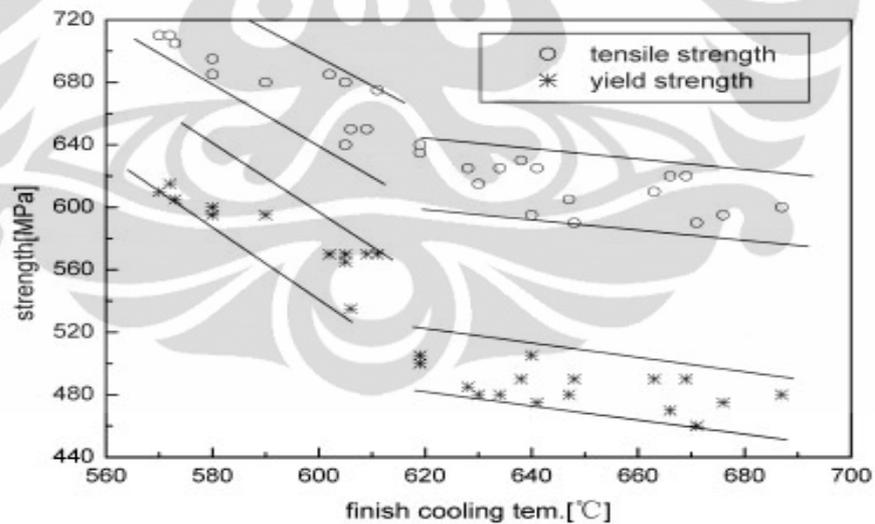
Yanchun Liu mendapati bahwa ketika *finish cooling temperature* direduksi dari 690°C menjadi 620°C, kekuatan luluh dan kekuatan tarik sedikit meningkat, dan meningkat cukup tajam ketika *finish cooling temperature* diturunkan dari 610°C sampai 570°C. Untuk evolusi mikrostruktur, dengan *finish cooling temperature* 620–690°C didapatkan mikrostruktur ferit dan perlit, juga ditemukan ferit *acicular* pada *finish cooling temperature* 620°C. Untuk *finish cooling temperature* 610–570°C, ditemukan adanya *granular bainite* dengan ferit dan perlit dalam jumlah kecil<sup>[6]</sup>. Pengaruh *finish cooling temperatur* terhadap kekuatan diilustrasikan pada Gambar 2.9.

Liang-yun yang meneliti evolusi mikrostruktur pada proses canai yang berbeda-beda mengungkapkan bahwa ketika *finish rolling temperature* dan *finish cooling temperature* relatif rendah, ferit *acicular* terbentuk sebagai mikrostruktur

yang dominan pada *Nb-Ti microalloyed pipeline steel*. Adanya dominasi mikrostruktur tersebut memperbaiki kekuatan dengan menjaga *yield ratio* (perbandingan kekuatan luluh dengan kekuatan tarik maksimum) tetap rendah<sup>[17]</sup>.



**Gambar 2.8** Pengaruh *finish rolling temperature* pada ukuran butir *ferrite* baja HSLA<sup>[3]</sup>.



**Gambar 2.9** Pengaruh *Finish Cooling Temperature* terhadap kekuatan luluh dan kekuatan tarik *Nb-Ti Microalloyed Steel*<sup>[6]</sup>

## 2.4 Sifat Mampu Bentuk (*Formability*) lembaran baja

Karakteristik sifat mampu bentuk lembaran baja dinyatakan oleh regangan utama yang dihasilkan pada lembaran akibat berbagai proses pembentukan. Regangan mayor utama dan minor utama sering kali dihubungkan dengan arah canai, meliputi searah canai (*rolling direction*) dan tegak lurus arah canai (*transverse direction*). Pendekatan standar untuk pengukuran atau perhitungan dari sifat mampu bentuk material lembaran diberikan dalam sebuah *Forming Limit Diagram* (FLD) yang dihasilkan dari besarnya regangan major dengan regangan minor dalam bidang regangan dua dimensi. Regangan ini dapat berupa regangan rekayasa ataupun regangan sesungguhnya<sup>[19]</sup>. Konsep dari *forming limit diagram* (FLD) diperkenalkan oleh Keeler dan Goodwin yang mewakili kriteria aman (*safety criterion*) untuk operasi penarikan dalam (*deep drawing*)<sup>[24]</sup>.

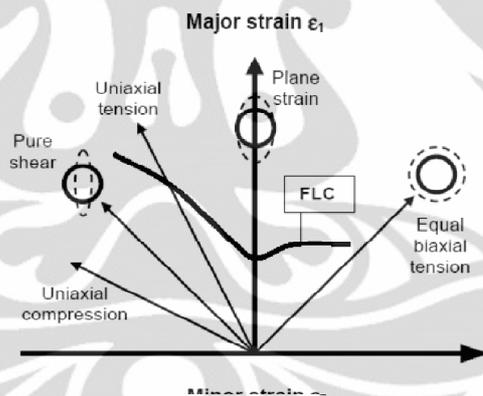
Batas regangan sebuah FLD membentuk ambang batas (*threshold*) yang dikenal dengan nama *forming limit curve* (FLC). FLC menyatakan suatu batasan antara daerah pembentukan aman (*safe forming region*) dan daerah gagal dalam pembentukan (*failed forming region*). *Safe region* direpresentasikan dengan wilayah dibawah kurva FLC, dimana material tidak memperlihatkan *visible necking*. Sedangkan, *failed region* merupakan wilayah di atas kurva FLC dimana material mulai membentuk *visible (local) necking*; karenanya material mulai kehilangan kekuatannya<sup>[19]</sup>.

FLC pada sebuah FLD mewakili jangkauan yang luas dari batasan regangan pembentukan (*forming limit strain*) yang diprediksi ketika suatu lembaran di deformasi disepanjang pola regangan linear. Pola regangan ini mempunyai jangkauan dari *uniaxial tension* ke *plane strain* sampai *equi-biaxial tension*, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.10. Pola regangan ini dapat dijelaskan sebagai rasio dari regangan minor sebenarnya ( $\epsilon_2$ ) terhadap regangan major sebenarnya ( $\epsilon_1$ ) dimana:

$$\beta = \epsilon_1 / \epsilon_2 \quad (2.1)$$

dimana pada  $-0,5 < \beta < 0$  menyatakan proses *drawing* dari lembaran baja,  $\beta \approx 0$  menyatakan suatu kondisi regangan bidang (*plane strain*) dan  $0 < \beta < 1$  menyatakan suatu penarikan secara *biaxial tension*<sup>[19]</sup>.

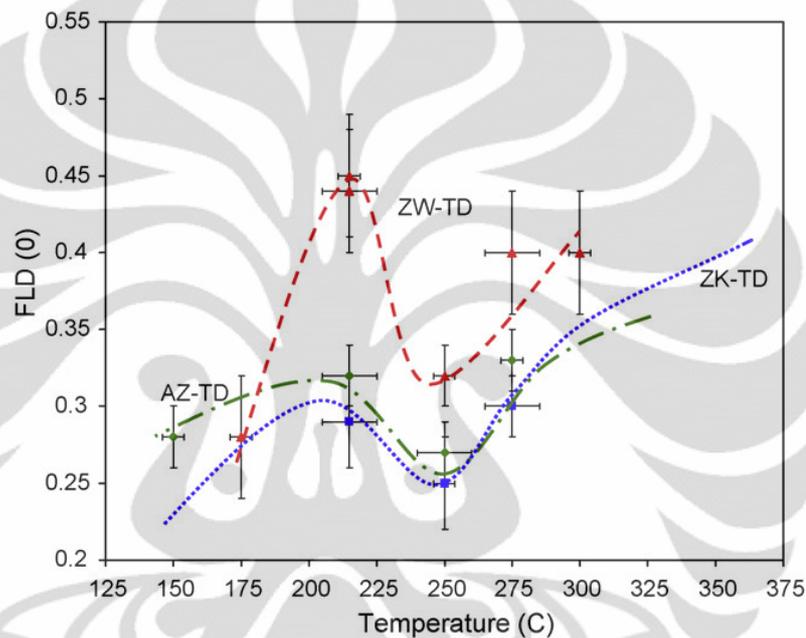
Batasan dari regangan pada FLD dapat ditentukan baik secara analisis matematis ataupun secara eksperimental. Secara eksperimental, suatu FLD dapat ditentukan dari suatu *grid* baik itu berbentuk lingkaran, garis maupun titik yang diletakkan pada permukaan lembaran yang akan diuji. *Grid-grid* ini menyediakan suatu dasar untuk pengukuran dari regangan setempat. *Grid-grid* yang telah terdeformasi diukur dan kemudian dibandingkan dengan ukuran semula *grid* untuk menyatakan tingkatan regangan utama yang digunakan untuk memperoleh  $\beta$ . Dengan memvariasikan dimensi spesimen dan besar deformasi yang dialami diharapkan akan diperoleh  $\beta \approx 0$ , sehingga analisa regangan bidang pada proses termomekanik dapat dimodelkan dengan menggunakan mesin uji tarik<sup>[19]</sup>.



**Gambar 2.10** FLD yang memperlihatkan berbagai pola regangan linear<sup>[19]</sup>.

Dreyer meneliti sifat mampu bentuk paduan magnesium AZ31, ZK10, and ZW41 dalam temperatur elevasi (*warm formability*) di bawah kondisi isothermal dengan *Ohio State University Formability Test (OSUFT)*. OSUFT diperkenalkan oleh Miles (1991) dan dikembangkan oleh Narasimhan (1995) untuk menciptakan *plane-strain tension* dan pada saat yang sama juga mensimulasikan interaksi *die* dengan lembaran logam. Tujuan penelitiannya adalah untuk menentukan apakah OSUFT potensial untuk mengkarakterisasi sifat mampu bentuk logam pada temperatur elevasi

karena ada beberapa *high strength material* yang memiliki sifat mampu bentuk yang buruk dalam temperatur ruang sehingga mengharuskan pengerjaan hangat (*warm working*). Dalam salah satu hasil penelitiannya, ia menggambarkan bagaimana hubungan FLD (0) dan temperatur pengerjaan. FLD (0) adalah regangan mayor yang dapat dicapai pada kondisi regangan bidang. Dalam hal ini, ia mengemukakan bahwa *trend* yang cukup rumit dihasilkan sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.11<sup>[18]</sup>.



**Gambar 2.11** Hubungan regangan mayor ketika kondisi regangan bidang (FLD(0)) dengan temperatur<sup>[18]</sup>.

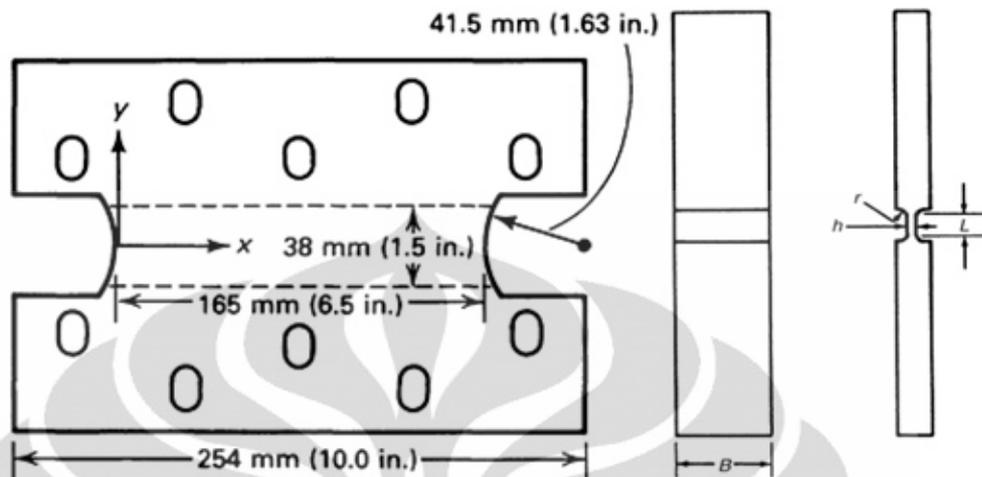
## 2.5 Uji Tarik Regangan Bidang (*Plane Strain Tensile Test*)

Pengujian tarik uniaksial adalah pengujian sifat mampu bentuk logam non-simulatif, dimana pengujian ini tidak sensitif terhadap tebal dan kondisi permukaan logam. Data yang didapat secara umum adalah kurva tegangan-regangan rekayasa. Kurva tegangan regangan rekayasa dapat dengan mudah dikonstruksi dari data-data Beban dan Perubahan Panjang. Dari hasil pengujian tarik tersebut kita dapat memperoleh sifat-sifat kuantitatif material yang dapat kita gunakan untuk memprediksi bagaimana perilaku lembaran logam pada proses pembentukannya. Sifat-sifat tersebut sering disebut sebagai sifat-sifat intrinsik dari material, yaitu

karakteristik dasar yang telah dimiliki oleh material. Terdapat beberapa nilai yang didapatkan dari pengujian tarik uniaksial. Nilai-nilai tersebut dapat digunakan untuk mengetahui berbagai aspek mampu bentuk logam. Nilai-nilai tersebut antara lain, kekuatan tarik (*tensile strength*), keuletan (*ductility*) dan nilai perpanjangan (*elongation*)<sup>[20]</sup>.

Dalam uji tarik uniaxial konvensional, spesimen diregangkan dalam wilayah *drawing* pada FLD, dimana regangan minor atau regangan dalam arah lebar bernilai negatif. Pengujian ini tidak memberikan informasi respon material lembaran dalam kondisi regangan bidang, dimana regangan minor bernilai nol. Namun, ini dapat dimodifikasi untuk memperoleh kondisi regangan bidang pada uji tarik uniaksial. Modifikasi meliputi penggunaan spesimen yang sangat lebar dengan *gage length* yang pendek (*short sample*) yang dikenal dengan *wide sample method* atau penggunaan *knife-edge* untuk mencegah regangan dalam arah lebar (tegak lurus beban) yang dikenal dengan nama *wide constrain method*. Contoh modifikasi spesimen untuk mendapatkan kondisi regangan bidang diilustrasikan Gambar 2.12.

Untuk *Wide sample method* penambahan lebar dari spesimen dan reduksi *gage length* akan mengubah regangan minor yang bernilai negatif menjadi kondisi regangan bidang, dimana regangan minor bernilai nol untuk spesimen. Dalam *rectangular sheet* untuk pengujian tarik, spesimen dengan rasio panjang terhadap lebar (*length-to-width ratio*) 1:1, 1:2 atau 1:4 digunakan sebagai pendekatan untuk mencapai kondisi regangan bidang. Regangan minor yang minimum dapat dicapai dengan rasio *length-to-width* 1:4 sebesar 0.05% dari regangan major yang terjadi, dimana kondisi ini mendekati kondisi regangan bidang<sup>[21]</sup>.



Gambar 2.12 Plane Strain Tension test spesimen<sup>[21]</sup>.

Regangan dapat didefinisikan dalam suatu persamaan matematika, baik itu untuk regangan teknik (nominal),  $e$ , dan regangan sebenarnya ( $\epsilon$ ), dimana<sup>[22]</sup> :

$$e = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0 = A_0 / A \quad (2.2)$$

dan

$$\epsilon = \int L / L \cdot dl / l = \ln (L / L_0) = \ln A_0 / A = 2 \cdot \ln D_0 / D \quad (2.3)$$

dan hubungan diantara keduanya dinyatakan sebagai :

$$\epsilon = \ln (1 + e) \quad (2.4)$$

Ketika suatu gaya menarik suatu spesimen uji, luas area melintang dari spesimen akan mengecil karena volume keseluruhan dari spesimen adalah tetap. Oleh sebab luas area melintang semakin mengecil selama pengujian, nilai dari tegangan dapat dinyatakan sebagai :

$$s = F / A_0 \quad \text{dan} \quad \sigma = F / A_i \quad (2.5)$$

Selama proses deformasi, volume dari material adalah konstan ( $A_i L_i = A_0 L_0$ ), sehingga hubungan antara luas area permukaan sebelum dan sesudah dikenakan gaya dapat dinyatakan dengan :

$$A = A_0 \exp \{-\epsilon\} = A_0 / (1 + e) \quad (2.6)$$

dan hubungan antara tegangan nominal dan sebenarnya dapat dinyatakan sebagai :

$$\sigma = s \exp \{\epsilon\} = s (1 + e) \quad (2.7)$$

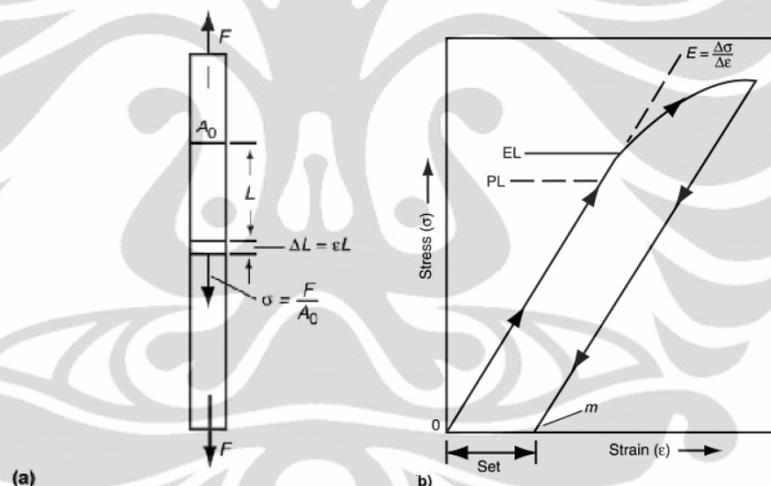
Persamaan (2.2) sampai (2.7) diatas berlaku untuk deformasi yang homogen yaitu sebelum beban mencapai nilai maksimum. Hal ini juga sesuai dengan TMCP yang menginginkan terjadinya deformasi homogen selama proses pembentukan material. Dalam kondisi tersebut, untuk material isotropik berbentuk plat, reduksi yang terjadi pada material dapat diukur dalam satu arah saja dimana  $b/b_0 = t/t_0$ , sehingga luas permukaan yang mengalami uji tarik axial dapat dinyatakan dengan :

$$A = b^2 \cdot t_0 / b_0 \quad (2.8)$$

Sampai batas beban maksimum, regangan yang terjadi masih seragam, sehingga regangan sebenarnya dapat dinyatakan sebagai :

$$\epsilon = \ln(b_0/b \cdot t_0/t) = 2 \ln(b_0/b) \quad (2.9)$$

dimana  $b$  menyatakan lebar dan  $t$  menyatakan tebal spesimen.



**Gambar 2.13** Karakteristik tegangan-regangan dalam daerah elastis (a) Definisi dari  $\sigma$  dan  $\epsilon$  dalam bentuk panjang awal spesimen uji,  $L$ , and luas area awal,  $A_0$ , sebelum diterapkan suatu gaya tarik,  $F$ . (b) Kurva tegangan regangan untuk regangan yang kecil dalam batasan limit elastisitas (EL)<sup>[22]</sup>.

Dalam mempertimbangkan pengaruh kombinasi tegangan dalam desain, persamaan konstitutif diharuskan untuk memberikan hubungan antara tegangan dan regangan *multiple*. Contoh hubungan konstitutif satu dimensi adalah kombinasi persamaan 2.10 dan 2.11.

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.10)$$

Dalam kisaran deformasi elastis, tegangan aksial akan sebanding dengan regangan yang terjadi dengan  $E$  sebagai faktor proporsionalitas (*proportionality factor*) sebagaimana tergambar pada Persamaan 2.10.

$$\nu = -\varepsilon_t/\varepsilon_l \quad (2.11)$$

dimana  $\varepsilon_t$  adalah *transverse strain* dan  $\varepsilon_l$  adalah *longitudinal strain* yang diukur selama daerah elastis uji tarik. Nilai  $\nu$  berkisar dari 0.25 sampai 0.40 untuk kebanyakan material struktural, dan pendekatan nilai 0.5 untuk material yang mengalami deformasi plastis. Selanjutnya, untuk perilaku tegangan tiga dimensi, jika  $\sigma_x$  diaplikasikan pada arah  $x$ , regangan  $\varepsilon_x = \sigma_x/E$  terjadi, dan tegangan yang sama akan menghasilkan regangan dalam arah  $y$  dan  $z$  sebagaimana diilustrasikan Tabel 2.4.

**Tabel 2.4** Regangan pada arah  $x$ ,  $y$  dan  $z$  yang dihasilkan dari tegangan dalam arah  $x$ ,  $y$  dan  $z$ <sup>[23]</sup>.

Stress	Strain in the x direction	Strain in the Y direction	Strain in the Z direction
$\sigma_x$	$\varepsilon_x = \sigma_x/E$	$\varepsilon_x = -\nu\sigma_x/E$	$\varepsilon_x = -\nu\sigma_x/E$
$\sigma_y$	$\varepsilon_y = -\nu\sigma_y/E$	$\varepsilon_y = \sigma_y/E$	$\varepsilon_y = -\nu\sigma_y/E$
$\sigma_z$	$\varepsilon_z = -\nu\sigma_z/E$	$\varepsilon_z = -\nu\sigma_z/E$	$\varepsilon_z = \sigma_z/E$

Dengan superposisi masing-masing komponen regangan dari arah  $x$ ,  $y$  dan  $z$  didapatkan<sup>[22]</sup>:

$$\varepsilon_x = (\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z)/E \quad (2.12)$$

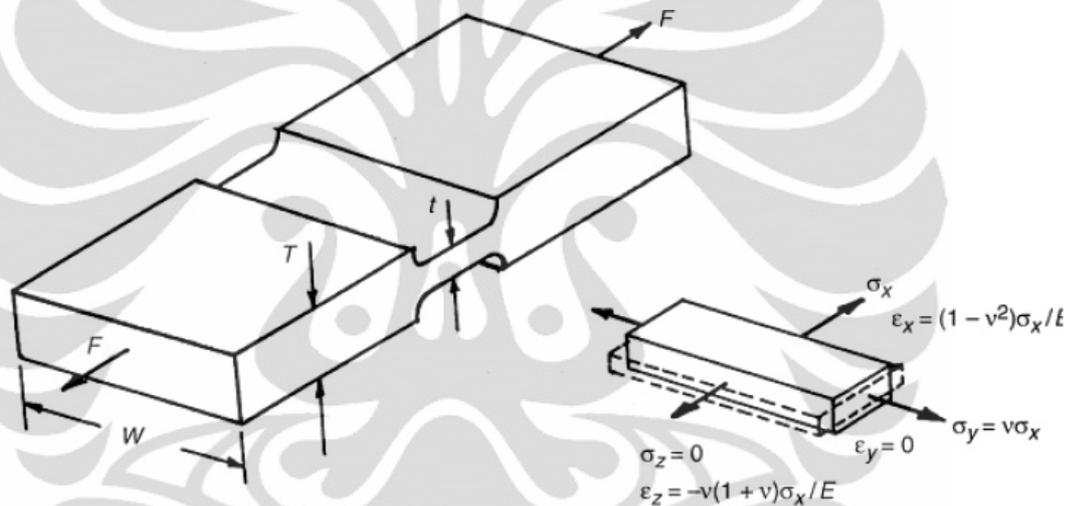
$$\varepsilon_y = (\sigma_y - \nu\sigma_z - \nu\sigma_x)/E \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_z = (\sigma_z - \nu\sigma_x - \nu\sigma_y)/E \quad (2.14)$$

Untuk tiga dimensi, kriteria yang biasa digunakan adalah kriteria von mises (persamaan 2.15) yang melibatkan semua tegangan yang berperan di material, dimana  $\sigma_0$  adalah kekuatan luluh dari material. Persamaan 2.15 Menghubungkan semua tegangan yang berperan di material terhadap kekuatan luluhnya. Persamaan 2.12 sampai 2.15 adalah hubungan konstitutif untuk deformasi elastis dan *yielding* dari material isotropik<sup>[22]</sup>.

$$[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2]^{1/2}/\sqrt{2} = \sigma_0^2 \quad (2.15)$$

Sebagai contoh, pada uji tarik uniaksial mode regangan bidang untuk spesimen PADA Gambar 2.14,  $\sigma_x = F/(t.W)$ . F adalah besar beban, W adalah lebar spesimen dan t adalah ketebalan dari groove. Pada tegangan ini, material groove akan mengalami kontraksi (penyusutan) dalam arah tebal (*thickness direction*) z dan arah lebar (*width direction*) y. Disebabkan tidak ada yang menghalangi material untuk berkontraksi dalam arah tebal, maka  $\sigma_z = 0$ <sup>[22]</sup>.



**Gambar 2.14** Analisa Tegangan Regangan pada spesimen *plane strain tensile test*<sup>[22]</sup>.

Pada arah lebar, dimana material *under grip area* lebih tebal dari *gage section* (tebal T jauh lebih besar dari pada t), akan menyebabkan dalam arah y material terhalangi untuk mengalami kontraksi, sehingga  $\epsilon_y = 0$ , seperti pada Gambar 2.43.

Kemudian dari persamaan 2.12 sampai 2.14:

$$\epsilon_y = 0 = (\sigma_y - \nu \sigma_x)/E \quad (2.14)$$

atau

$$\sigma_y = \nu \sigma_x \quad (2.15)$$

yaitu, suatu tegangan yang dihasilkan pada arah-y yang terjadi karena kecenderungan alami material untuk dihalangi ketika berkontraksi. Regangan dalam arah tebal diberikan dengan persamaan:

$$\varepsilon_z = -v(\sigma_x + \sigma_y)/E = -v(1 + v)\sigma_x/E \quad (2.16)$$

yang sedikit lebih besar dari pada regangan yang terjadi tanpa adanya hambatan dalam arah-y. Interaksi yang lebih rumit terjadi antara tegangan dan regangan tiga dimensi dalam geometri yang lebih rumit, dan interaksi ini sangat dipengaruhi oleh *Poisson ratio*,  $v$ <sup>[22]</sup>.

Tegangan yang diberikan,  $\sigma_x$ , dikombinasikan dengan hambatan regangan dalam arah-y, menghasilkan suatu tegangan dalam arah-y yang diberikan dengan persamaan  $\varepsilon_y = 0 = (\sigma_y - v \sigma_x)/E$  atau  $\sigma_y = v\sigma_x$ . Tegangan  $\sigma_x$  yang diharuskan untuk menyebabkan kegagalan dengan peluluhan dapat ditemukan dengan substitusi tegangan  $\sigma_y = v\sigma_x$  dan  $\sigma_z = 0$  ke dalam persamaan von mises:

$$(\sigma_x - v\sigma_x)^2 + (v\sigma_x)^2 + (-\sigma_x)^2 = 2\sigma_0^2 \quad (2.17)$$

atau

$$\sigma_x = \sigma_0/(1 - v + v^2)^{1/2} \quad (2.18)$$

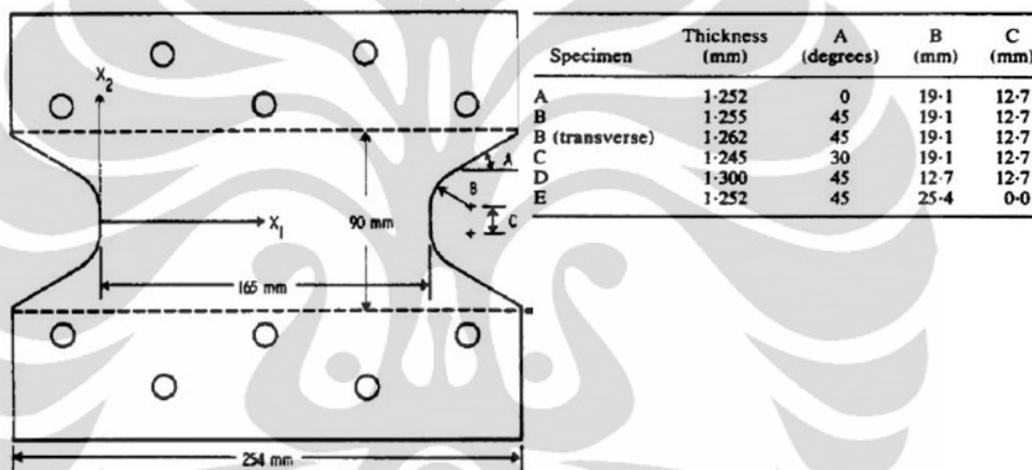
Dengan memasukkan nilai *poisson ratio*  $v = 0,5$  sebagai pendekatan material yang mengalami deformasi plastis, diperoleh  $\sigma_x = 1,15\sigma_0$ ; hal tersebut terjadi karena adanya penghalang bagi material untuk mengalami kontraksi dalam arah y, sebagaimana yang terlihat pada Gambar 2.14 sehingga tegangan yang dibutuhkan material untuk mengalami *yield* lebih besar 15% pada uji tarik ini dibandingkan dengan tegangan yang dibutuhkan agar material mengalami *yield* pada *simple tension*<sup>[22]</sup>.

## 2.6 Geometri Spesimen Uji Tarik Uniaksial Regangan Bidang

Uji tarik dengan pendekatan regangan bidang pertama kali dikembangkan oleh Wagoner dan Wang yang menghasilkan pola regangan diantara *uniaxial tension* dan *plane strain* pada Forming Limit Diagram (FLD). Dengan *grip* sepanjang 254 mm yang mengandalkan baut pada sejumlah titik di *grip area* pada spesimen (2036-T4 aluminium), deformasi dengan kondisi regangan bidang dapat dimaksimalkan. Selain itu, sebagai bentuk usaha untuk memaksimalkan regangan bidang pada sampel, dilakukan variasi geometri. Dalam hal ini, mereka menginvestigasi enam geometri takik (*notch profile*) yang diberi label A sampai E. Selanjutnya, prosedur

pengujian mereka dikenal dengan nama *in-plane plane strain (IPPS) test*<sup>[19]</sup>. Spesimen Wagoner dan Wang diilustrasikan pada Gambar 2.15.

Holmberg mengembangkan uji tarik untuk mengevaluasi sifat mampu bentuk lembaran logam, evaluasi dan simulasi dari pembentukan lembaran logam yang cepat dan murah diperlukan, terutama dalam menguji-cobakan model bodi mobil terbaru. Holmberg menemukan bahwa untuk mendapatkan kondisi regangan bidang, spesimen harus selebar mungkin, yang pada akhirnya lebar spesimen dibatasi oleh peralatan pengujian. Dimensi spesimen holmberg dapat dilihat pada Gambar 2.16<sup>[24]</sup>.

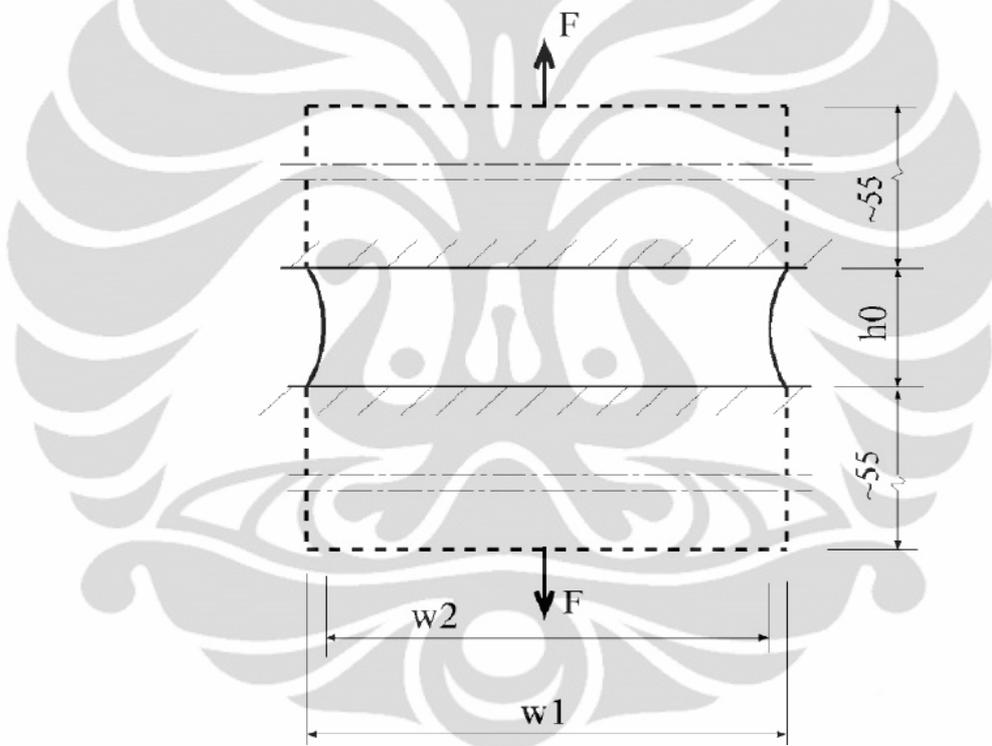


**Gambar 2.15** Desain Spesimen Wagoner dan Wang untuk uji tarik uniaksial mode regangan bidang<sup>[19]</sup>.

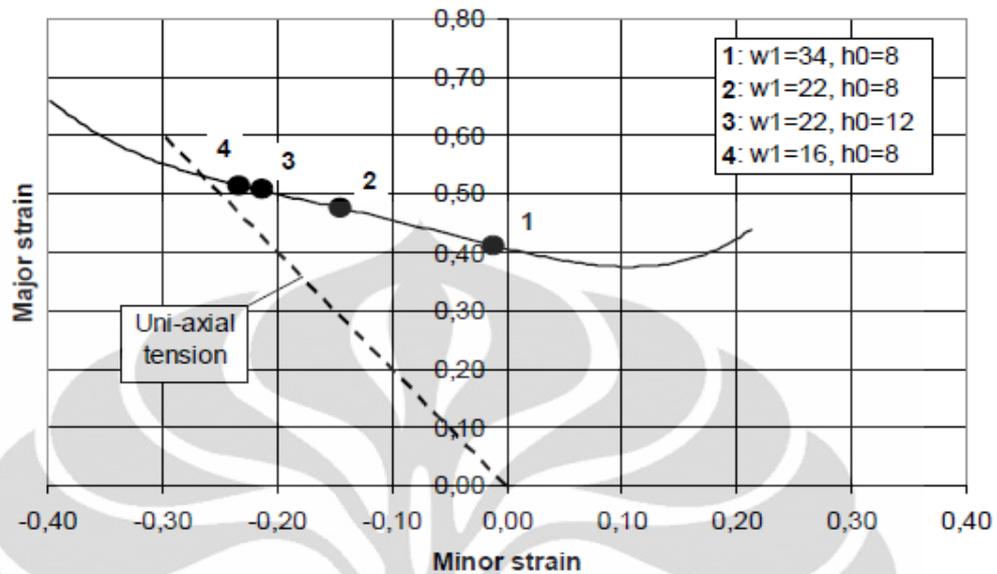
Semakin lebar spesimen, semakin besar gaya tarik (*tensile force*) dan gaya jepit (*clamping force*) yang dibutuhkan. Dalam penelitian ini, lebar maksimum spesimen adalah 76 mm. Cara lain untuk mengurangi regangan dalam arah lebar agar didapat kondisi regangan bidang adalah dengan mereduksi panjang *gage section* dari spesimen. Rasio antara lebar dan panjang spesimen harus setinggi mungkin agar didapatkan regangan dalam arah lebar yang kecil. Dengan mengurangi panjang *gage section* dari 8 ke 6 mm, regangan dalam arah lebar berkurang dari 4 sampai sekitar 1 % untuk *mild steel*<sup>[24]</sup>. Ia juga menggambarkan bagaimana pengaruh lebar sampel terhadap pola regangan yang terbentuk sebagaimana Gambar 2.17.

Valletta melakukan studi IPPS *tensile testing* dengan menggunakan LS-DYNA *Finite Element Method (FEM) software* untuk memprediksi perilaku deformasi dari

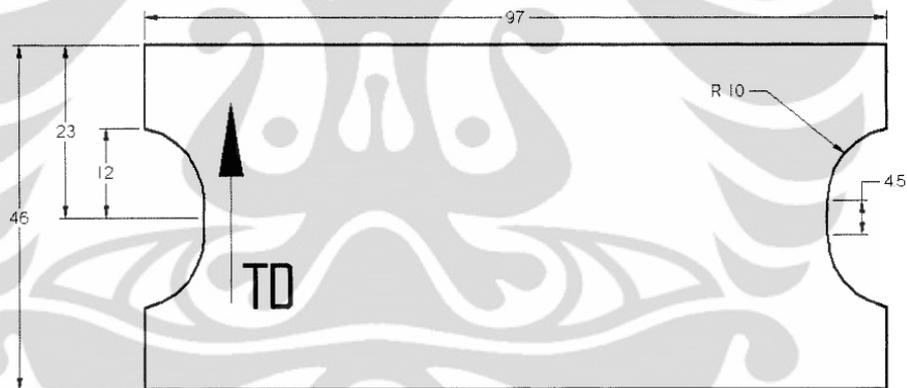
baja lembaran DQ dan DP600 untuk berbagai geometri spesimen di bawah kondisi beban tarik. Simulasi menunjukkan bahwa spesimen lebar (*wide sample*) dengan *notch profile* yang sesuai dapat digunakan untuk menghasilkan pola regangan yang berada diantara kondisi regangan bidang dan *uniaxial tension* pada baja DQ dan DP600. Gambar 2.18 adalah salah satu bentuk spesimen yang memperlihatkan kondisi regangan bidang dengan nilai  $\beta=0.04$ . Valletta menyimpulkan bahwa spesimen lebar dengan *gage length* yang pendek dibutuhkan untuk menghasilkan kondisi regangan bidang pada bagian tengah spesimen<sup>[19]</sup>.



**Gambar 2.16** Spesimen Holmberg dalam uji tarik Regangan Bidang, dimensi dalam milimeter,  $h_0$  berkisar antara 6-12 mm,  $w_1$  dan  $w_2$  berkisar antara 16-76 mm<sup>[24]</sup>.

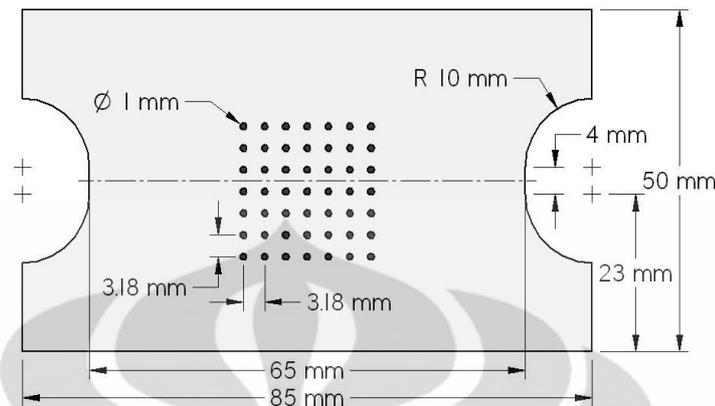


**Gambar 2.17.** Pengaruh lebar dan panjang spesimen pada kondisi regangan ketika spesimen mengalami kegagalan pada uji tarik<sup>[24]</sup>.



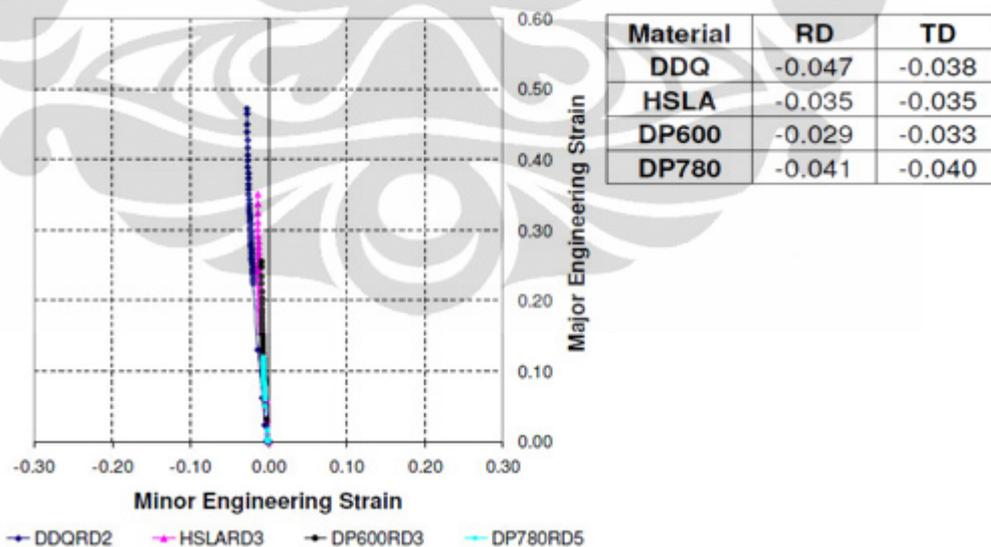
**Gambar 2.18** Spesimen IPPS dari Valletta<sup>[19]</sup>.

Leo Joseph Kilfoil menerapkan *In-Plane Plane Strain Testing* tersebut untuk mengevaluasi sifat mampu bentuk logam lembaran yang digunakan dalam pembuatan komponen otomotif. Geometri spesimen (Gambar 2.19) didesain sehingga pola regangan pada sampel mendekati kondisi regangan bidang. Untuk menghitung pola regangan yang terbentuk, *square grid* sebanyak 36 buah dibuat dalam bentuk titik-titik berdiameter 1mm dengan jarak antar titik sebesar 3.18 mm.<sup>[19]</sup>



**Gambar 2.19** Desain Spesimen Leo Joseph Kilfoil untuk pengujian tarik regangan bidang<sup>[19]</sup>.

1 buah *square grid* diwakili oleh empat buah titik yang berdekatan. Perubahan posisi titik-titik sebagai fungsi waktu menggambarkan regangan yang terjadi pada spesimen. Hasil yang dicapai dari empat jenis spesimen meliputi, baja *deep drawing quality* (DDQ), baja *high strength low alloy* (HSLA) serta baja fasa ganda (*dual phase steel*) 600 dan 780 dapat dilihat pada gambar 2.20 untuk penarikan searah dengan arah canai (RD atau *Rolling Direction*). Nilai  $\beta$  dari empat jenis material juga dapat dilihat pada gambar tersebut<sup>[19]</sup>.

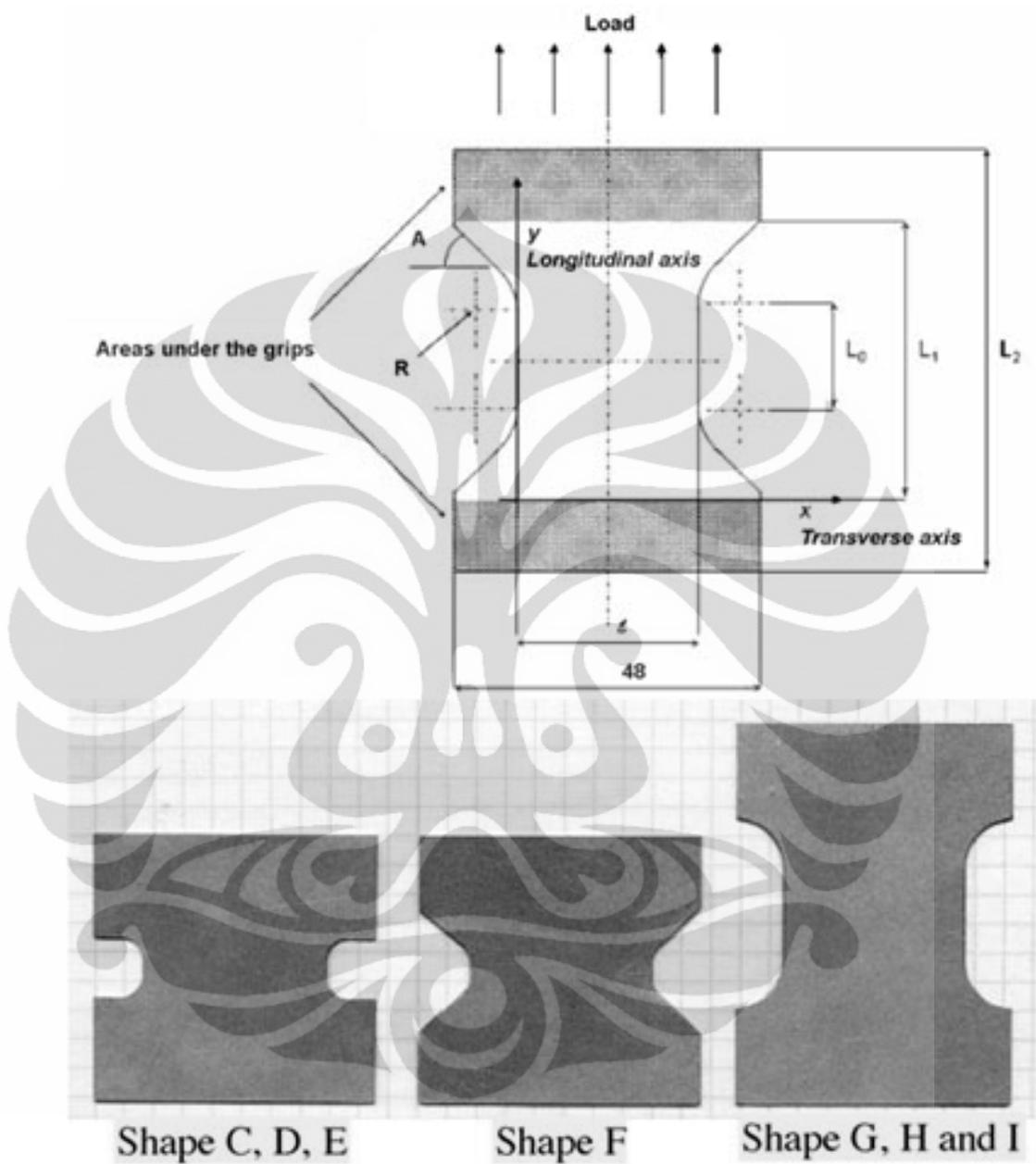


**Gambar 2.20** *Forming Limit Diagram* Hasil Pengujian tarik regangan bidang (arah  $0^\circ$ ) L. J. Kilfoil (kiri) serta nilai  $\beta$  dari berbagai material dalam *transverse direction* (TD) dan *Rolling Direction* (RD) (kanan)<sup>[19]</sup>.

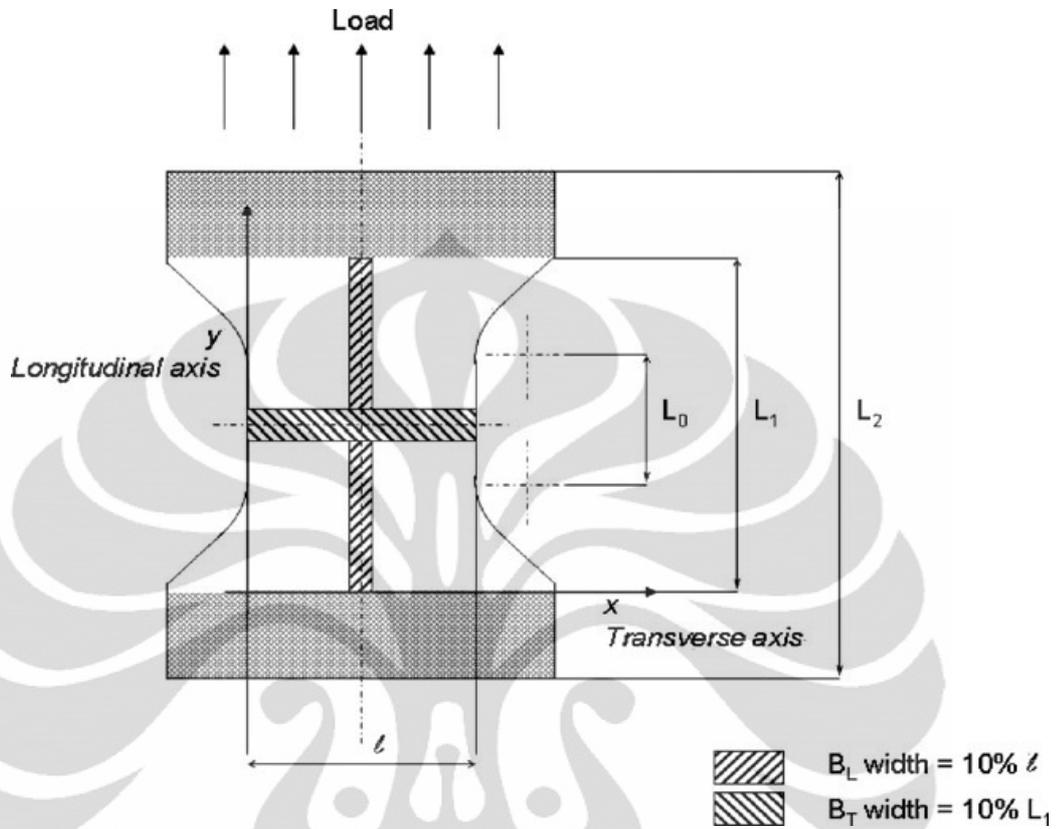
Modifikasi spesimen untuk mendapatkan uji tarik dengan kondisi regangan bidang dilakukan oleh J. L. Dournaux dkk. J. L. Dournaux memvariasikan bentuk dan ukuran geometri spesimen masing-masing dari A sampai I. Dimensi dari spesimen diilustrasikan pada Gambar 2.21 dan Tabel 2.5. Dalam hal ini, ia tidak menggunakan *grid* untuk menghitung pola regangan yang terjadi. Namun, penghitungan pola regangan dilakukan dengan pembuatan pita-pita (*band*) yang searah dengan beban tarik (*longitudinal band*) dan tegak lurus (*transverse band*) sebagaimana yang terlihat pada gambar 2.22. Hasilnya, dengan asumsi mode regangan bidang terjadi ketika  $\varepsilon_T/\varepsilon_L < 0.2$ , spesimen D dan E mencapai kondisi mendekati kondisi regangan bidang (untuk beberapa material). Nilai  $\varepsilon_T/\varepsilon_L$  hasil penelitian terangkum pada gambar 2.23. Dalam hal ini ia juga menggambarkan hubungan luas *under grip area* terhadap distribusi regangan di sepanjang pita yang tegak lurus dengan pembebanan (*transverse band*)<sup>[25]</sup>. Gambar 2.24 menggambarkan bagaimana spesimen B memiliki distribusi regangan yang seragam dibandingkan dengan spesimen A. Spesimen B memiliki luas *under grip area* dan *gage section* yang lebih besar dari pada spesimen A<sup>[25]</sup>.

**Tabel 2.5** Dimensi dari variasi geometri spesimen J. L. Dournaux<sup>[25]</sup>.

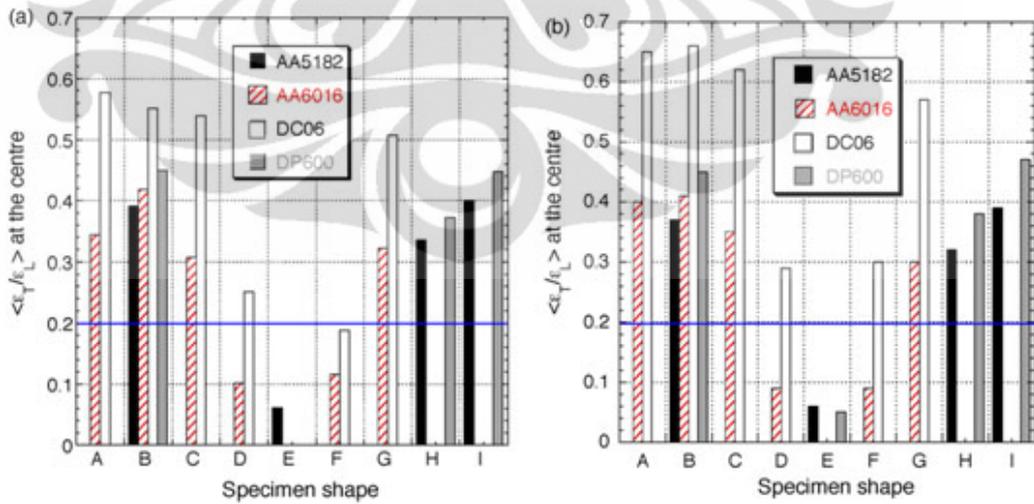
Spesimen	$\updownarrow$	L <sub>0</sub>	L1	L2	R	A
<b>A</b>	48	0	16	46	0	0
<b>B</b>	48	0	20	140	0	0
<b>C</b>	46	0	16	46	4	0
<b>D</b>	31,2	2,4	16	46	4	0
<b>E</b>	31,2	2,4	20	140	4	0
<b>F</b>	31,2	2,4	16	46	4	45
<b>G</b>	31,2	15,7	35	65,5	8,5	
<b>H</b>	31,2	15,7	35	155	8,5	
<b>I</b>	31,2	20,7	40	160	8,5	0



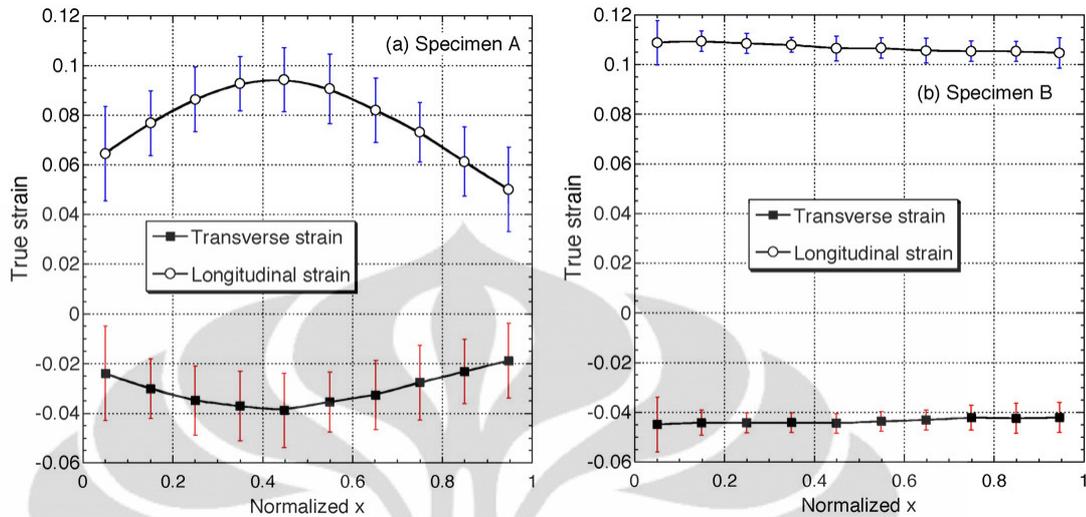
Gambar 2.21 Variasi bentuk spesimen pada penelitian J. L. Dournaux dkk<sup>[50]</sup>.



Gambar 2.22 Model Pita (longitudinal dan transverse) pada spesimen J. L. Dournaux dkk<sup>[25]</sup>.



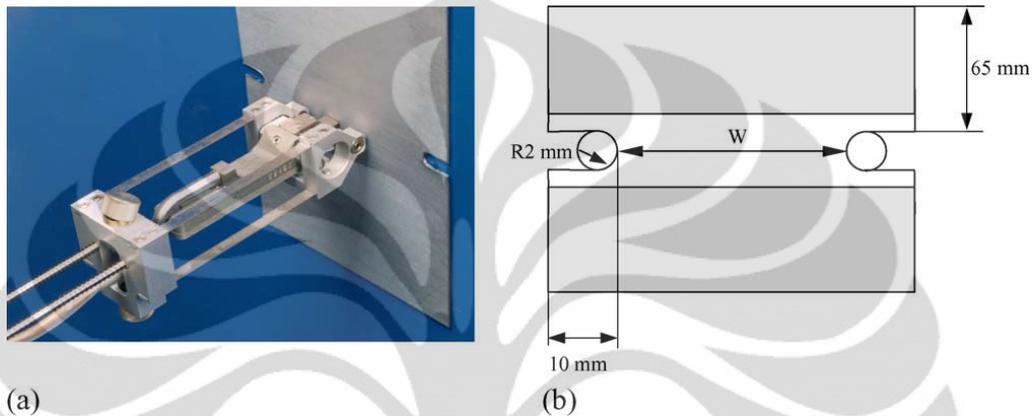
Gambar 2.23 Efek geometri pada rasio  $\epsilon_T / \epsilon_L$  untuk regangan longitudinal yang berbeda (a)  $\epsilon_L = 5\%$  (b)  $\epsilon_L = 10\%$ <sup>[25]</sup>.



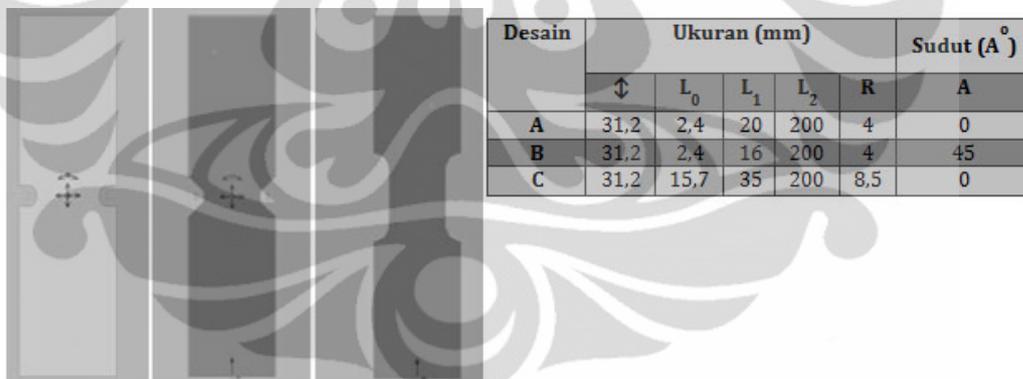
**Gambar 2.24** Transverse strain dan longitudinal strain pada rata-rata longitudinal strain (a) 9% (b) 11% di sepanjang  $B_T$ <sup>[25]</sup>.

Yu Gou An menggunakan uji tarik regangan bidang untuk mengukur *plane strain work hardening*. Sejumlah metode pengujian tersedia untuk melakukan pengukuran *plane strain work hardening*. *Plane strain compression test* cukup terkenal dan secara luas digunakan, namun data yang digunakan tidak cukup akurat untuk mendefinisikan model material dalam proses pembentukan logam lembaran sebagaimana banyaknya ketidakpastian eksperimen seperti gaya gesek dan ketidakhomogenan selama deformasi. Geometri spesimen *plane strain test* terlihat pada gambar, dengan variasi *gage width* dari mulai 47 mm sampai 77 mm sementara dimensi lainnya dibuat tetap<sup>[21]</sup>. Gambar 2.25 memperlihatkan bentuk spesimen dari Yu Gou An untuk menghasilkan uji tarik dalam kondisi regangan bidang<sup>[26]</sup>. Selanjutnya, modifikasi spesimen dilakukan oleh R. Bagus sebagai pendekatan untuk mendapatkan kondisi regangan bidang dalam uji tarik uniaksial. Penelitian yang ia lakukan bertujuan untuk mendapatkan bentuk spesimen yang sesuai dalam menciptakan deformasi dalam kondisi regangan bidang pada uji tarik uniaksial baja C-Mn lembaran hasil proses TMP. Spesimen divariasikan dalam 3 geometri sebagaimana terangkum dalam Gambar 2.26<sup>[27]</sup>. Perhitungan pola regangan yang terjadi pada spesimen diukur dengan pengukuran perubahan *grids* (4 mm x 4 mm) sebelum dan sesudah penarikan sampai 1,15 *yield*. Proses perekaman ini menggunakan alat *Digital Video Camera Sony Handycam DCR-DVD650* dengan

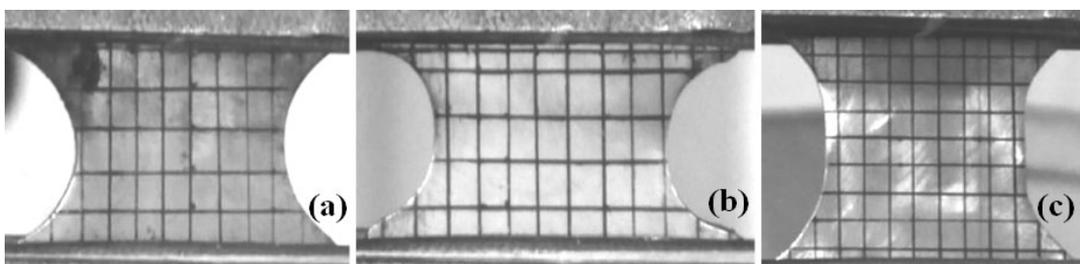
kemampuan rekam 25 fps. Pola regangan yang dihasilkan dari masing-masing geometri spesimen dapat dilihat pada *Forming Limit Diagram* (FLD) gambar 2.28<sup>[27]</sup>. Gambar 2.27 memperlihatkan *grid-grid* pada spesimen yang dibuat secara manual menggunakan *drawing pen*.



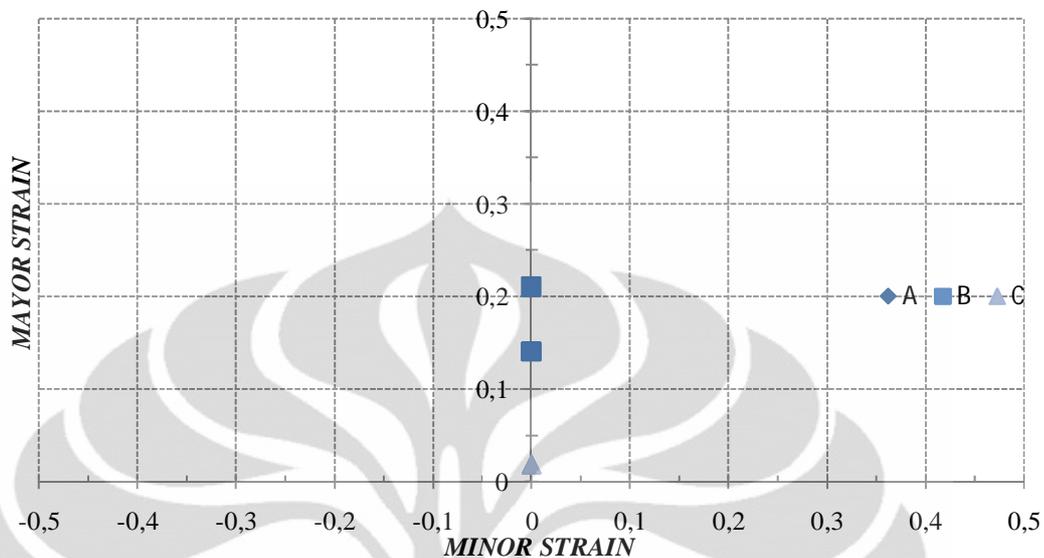
**Gambar 2.25** *Plane strain extensometer* dan skematis yang menunjukkan geometri dari spesimen untuk uji tarik regangan bidang. *Gauge width*, *W*, bervariasi dari mulai 47 sampai 77mm; (a) *extensometer*; (b) geometri spesimen<sup>[26]</sup>.



**Gambar 2.26** Bentuk Variasi Spesimen pada penelitian R. Bagus Hendro Pramono<sup>[27]</sup>.



**Gambar 2.27** Grid-grid pada spesimen R. Bagus Hendro (a) spesimen A (b) spesimen B (c) spesimen C<sup>[27]</sup>.

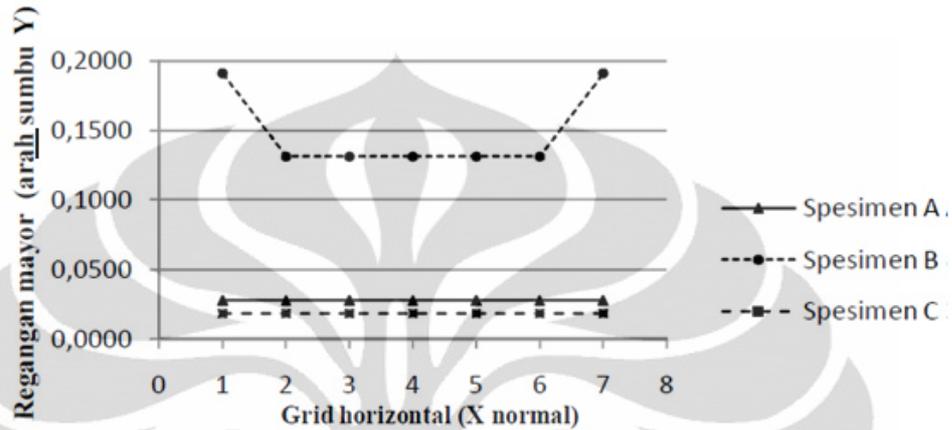


**Gambar 2.28** Forming Limit Diagram Untuk Spesimen A, B dan C (R. Bagus Hendro)<sup>[27]</sup>.

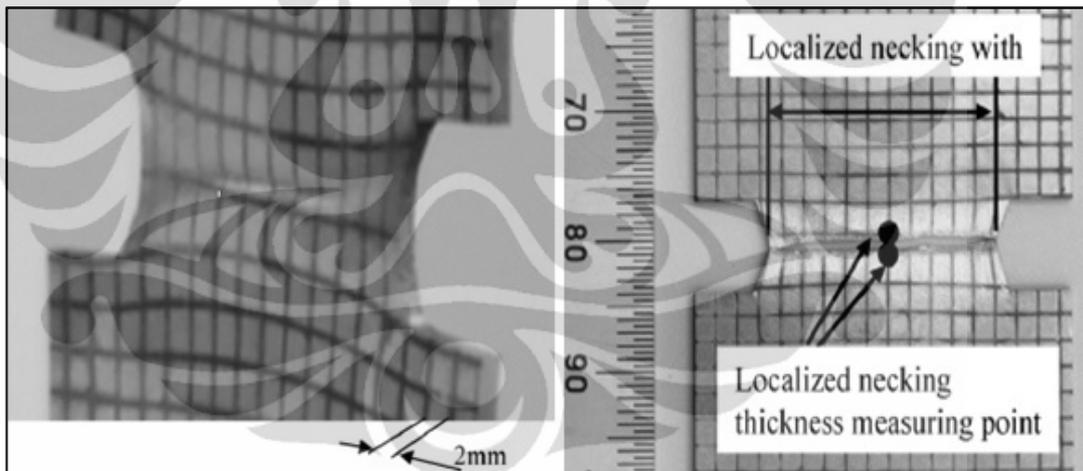
Gambar 2.29 memperlihatkan distribusi regangan yang terjadi pada setiap *grid* untuk setiap spesimen. Spesimen A dan C memiliki distribusi regangan yang seragam, berbeda dengan spesimen B yang cenderung memiliki distribusi regangan yang tidak merata. Konsentrasi regangan mayor terjadi pada bagian tepi dari spesimen. Hal ini terjadi karena pada spesimen B, secara geometri pada bagian *gage area* dan *under grip area* dihubungkan dengan *root radius* sebesar 4 mm dan *fillet* bersudut 45°, hal ini menjadikan terjadinya konsentrasi tegangan pada daerah sudut tersebut dan dengan begitu meningkatkan nilai regangan pada daerah sudut tersebut<sup>[27]</sup>.

Takaaki Iguchi dari *JFE Steel Corporation* melakukan uji tarik regangan bidang untuk mengamati fenomena *necking* pada sebuah spesimen yang telah ia rancang untuk mendekati kondisi regangan bidang. Dimensi spesimen diperlihatkan pada Gambar 2.30 dan 2.31<sup>[28]</sup>. Modifikasi spesimen untuk mendapatkan kondisi regangan bidang pada uji tarik uniaksial juga dilakukan oleh Eddy S. Siradj dan Dedi Priadi, DEA, dimana bentuk spesimen merupakan modifikasi dari spesimen L. J Kilfoil. Pengujian melibatkan dua buah spesimen, yaitu spesimen 3 dan 4. Pengamatan dilakukan dengan memfokuskan pada perubahan dimensi dari tiap *grid* spesimen untuk mendapatkan nilai elongasi pada arah vertikal dan horizontal untuk

mendapatkan nilai FLD (*Forming Limit Diagram*) pada enam titik proses uji tarik (dari titik *yield* hingga *rupture*). FLD untuk kedua spesimen diilustrasikan pada Gambar 2.34. Nilai regangan mayor dan minor dapat dilihat di Lampiran 6.

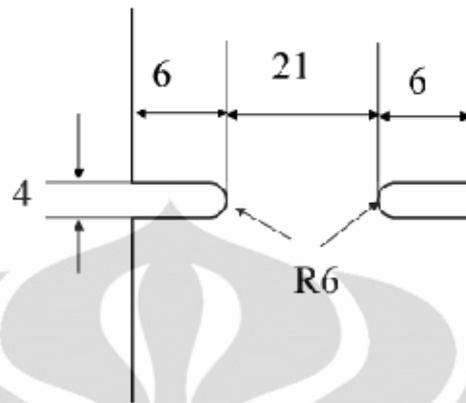


**Gambar 2.29** Kurva hubungan antara regangan mayor terhadap posisi *grid* pada 1,15 *yield*<sup>[27]</sup>.



**Gambar 2.30** Spesimen untuk *plane strain tensile test* dan titik pengukuran untuk memperlihatkan fenomena *necking*<sup>[28]</sup>.

Gambar dari setiap *grid* di tiap spesimen dapat dilihat dari Gambar 2.32 dan Gambar 2.33, dimana pada setiap gambar terdapat angka-angka. Angka putih menunjukkan posisi *grid* berdasarkan kolom dan angka berwarna hitam menunjukkan posisi *grid* berdasarkan baris. Pembuatan *grid* juga dilakukan secara manual dengan menggunakan *drawing pen*<sup>[2]</sup>.



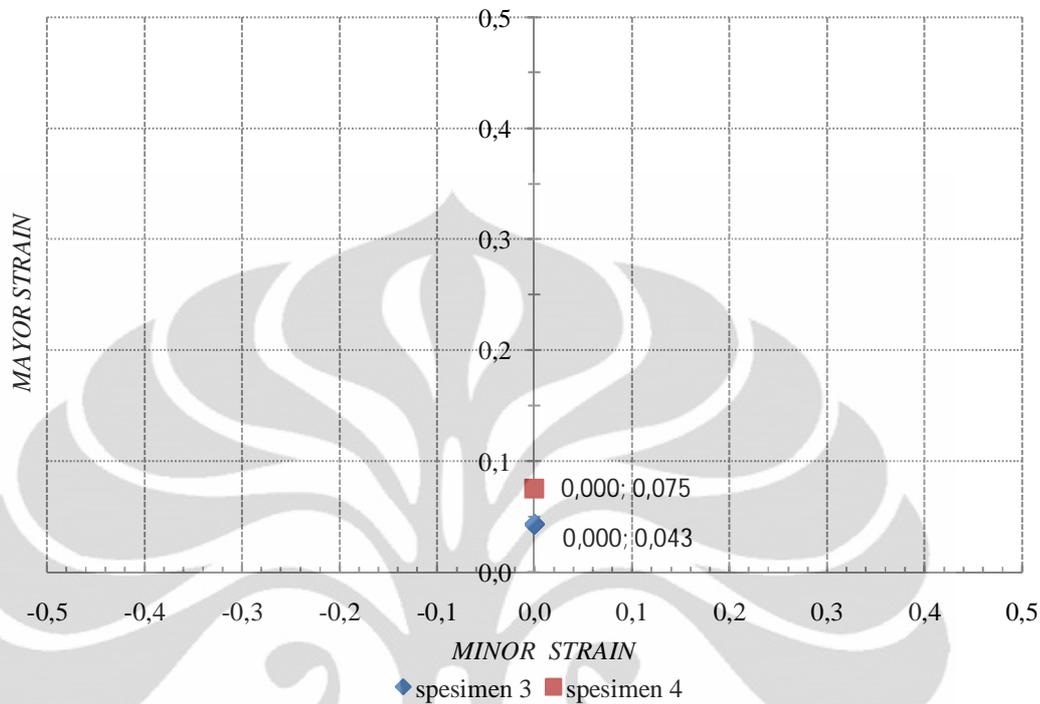
**Gambar 2.31** Dimensi spesimen pada penelitian Takaaki Iguchi<sup>[28]</sup>.



**Gambar 2.32** Grid-grid yang terdapat pada spesimen 3<sup>[2]</sup>.



**Gambar 2.33** Grid-grid yang terdapat pada spesimen 4<sup>[2]</sup>.



Gambar 2.34 FLD untuk spesimen 3 dan 4 penelitian Eddy S. Siradj dkk<sup>[2]</sup>.

## 2.7 Pengaruh Laju Regangan pada Evolusi Mikrostruktur Canai Hangat

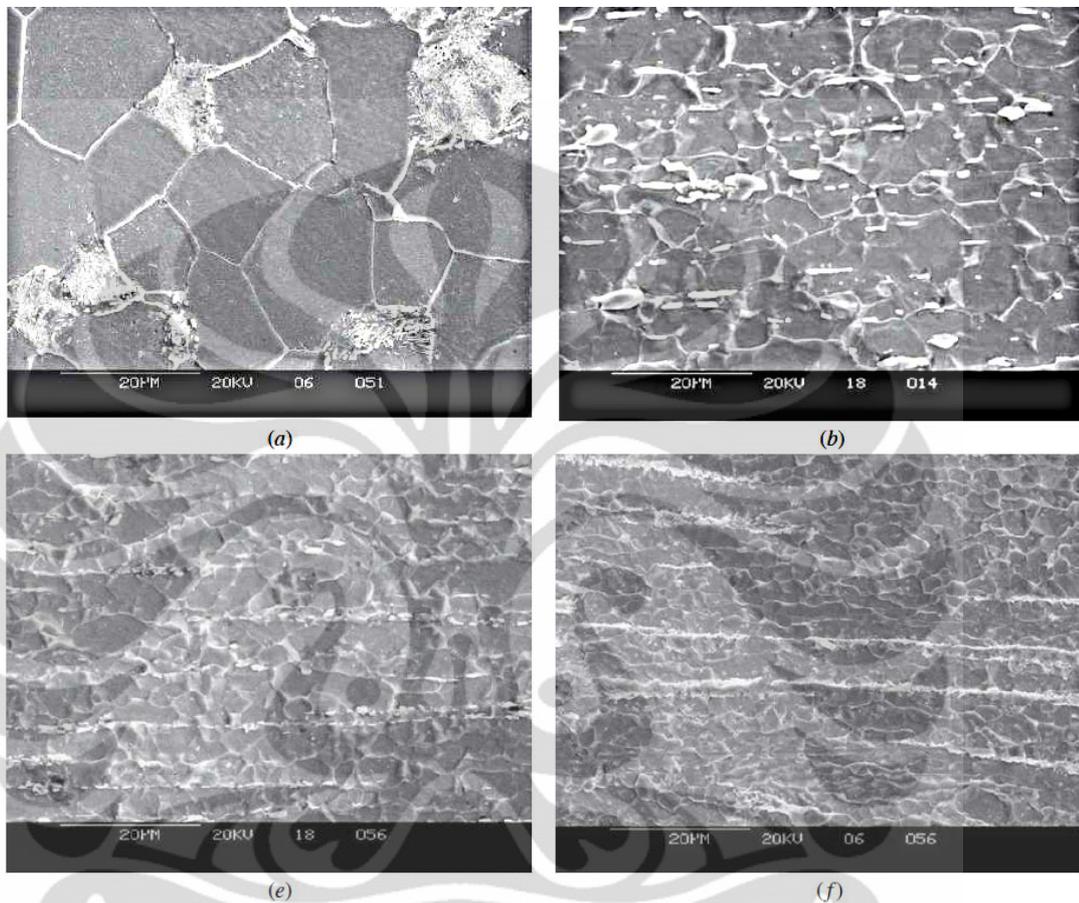
Akhir-akhir ini, canai hangat atau *warm rolling* (*ferritic rolling*) dari baja karbon rendah telah menarik banyak perhatian karena sangat potensial digunakan untuk berbagai produk dan mengurangi biaya produksi<sup>[29]</sup>. *Warm rolling* pada baja karbon rendah, dimana dilakukan pada high temperature ferrite phase, memiliki banyak keuntungan dibanding teknologi canai panas (*hot rolling*) konvensional<sup>[30]</sup>.

Long Fei meneliti bagaimana pengaruh laju regangan terhadap evolusi mikrostruktur. Gambar 2.35 membandingkan mikrostruktur awal yang terdiri atas fasa ferit dengan koloni perlit di bagian *triple point* dengan mikrostruktur yang telah dideformasi pada temperatur 700°C dengan laju regangan yang berbeda. Ia mengemukakan bahwa seiring dengan peningkatan laju regangan ukuran butir akan semakin halus sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.35<sup>[29]</sup>. Dalam hal ini penghalusan butir diperkirakan terjadi akibat *dynamic recrystallization*<sup>[29]</sup>.

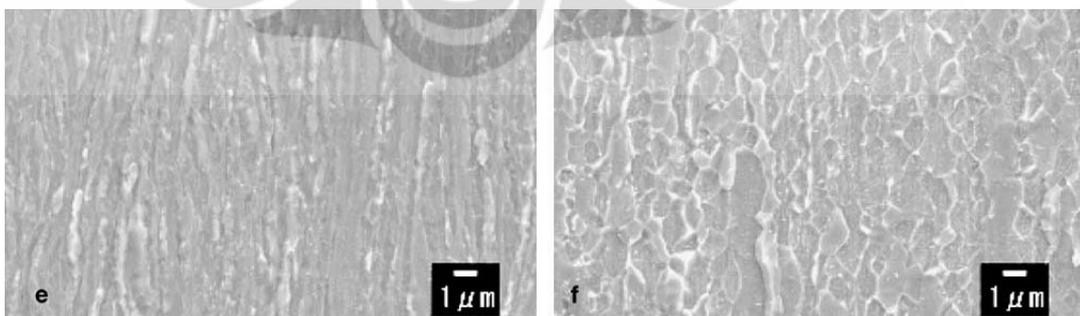
Narayana membandingkan bagaimana pengaruh laju regangan pada evolusi mikrostruktur yang terjadi, dimana ia menggunakan metode *Electron Back Scattered Diffraction* (EBSD) untuk mengetahui *high angle grain boundary* dan *low angle grain boundary* (Gambar 2.37). Garis merah mewakili *high angle grain boundary* ( $\theta \geq 15^\circ$ ), sedangkan garis biru tua dan biru muda mewakili *low angle grain boundary* dengan masing-masing sudut adalah  $5^\circ \leq \theta < 15^\circ$  dan  $1.5^\circ \leq \theta < 5^\circ$ . Dari penelitiannya ia juga mengemukakan ketika deformasi dilakukan pada temperatur rendah dan laju regangan yang tinggi akan terjadi *dynamic recovery*. Sedangkan, ketika deformasi dilakukan pada temperatur tinggi dan laju regangan yang rendah berlaku *dynamic recrystallization*. Karakteristik terjadinya *dynamic recrystallization* adalah *equiaxed grain* yang dikelilingi *high angle grain boundary* sebagaimana terlihat pada Gambar 2.37. Dari Gambar 2.37 juga terlihat perubahan morfologi butir ketika laju regangan direduksi. Pada laju regangan yang tinggi, mikrostruktur yang dihasilkan adalah *pancake-like grain* atau *elongated grain*, sedangkan untuk laju regangan yang lebih rendah dihasilkan *equiaxed grain*. Mekanisme yang terjadi untuk menghasilkan *equiaxed grain* adalah *dynamic recovery* atau *dynamic recrystallization* bergantung pada kondisi deformasi (temperatur dan laju regangan). Gambar 2.36 juga menggambarkan bagaimana hubungan laju regangan terhadap morfologi regangan. Gambar 2.36 (f) memperlihatkan ketika laju regangan direduksi dengan tingkat dan temperatur deformasi yang sama, morfologi butir cenderung berbeda. Butir menjadi lebih terelongasi menghasilkan *elongated* atau *pancake-like grain* ketika laju regangan ditingkatkan. Hubungan regangan yang diberikan dengan ketebalan butir yang terelongasi (*pancake-like grain*), dengan persamaan:

$$TH\alpha = d_o \exp(-\epsilon) \quad (2.19)$$

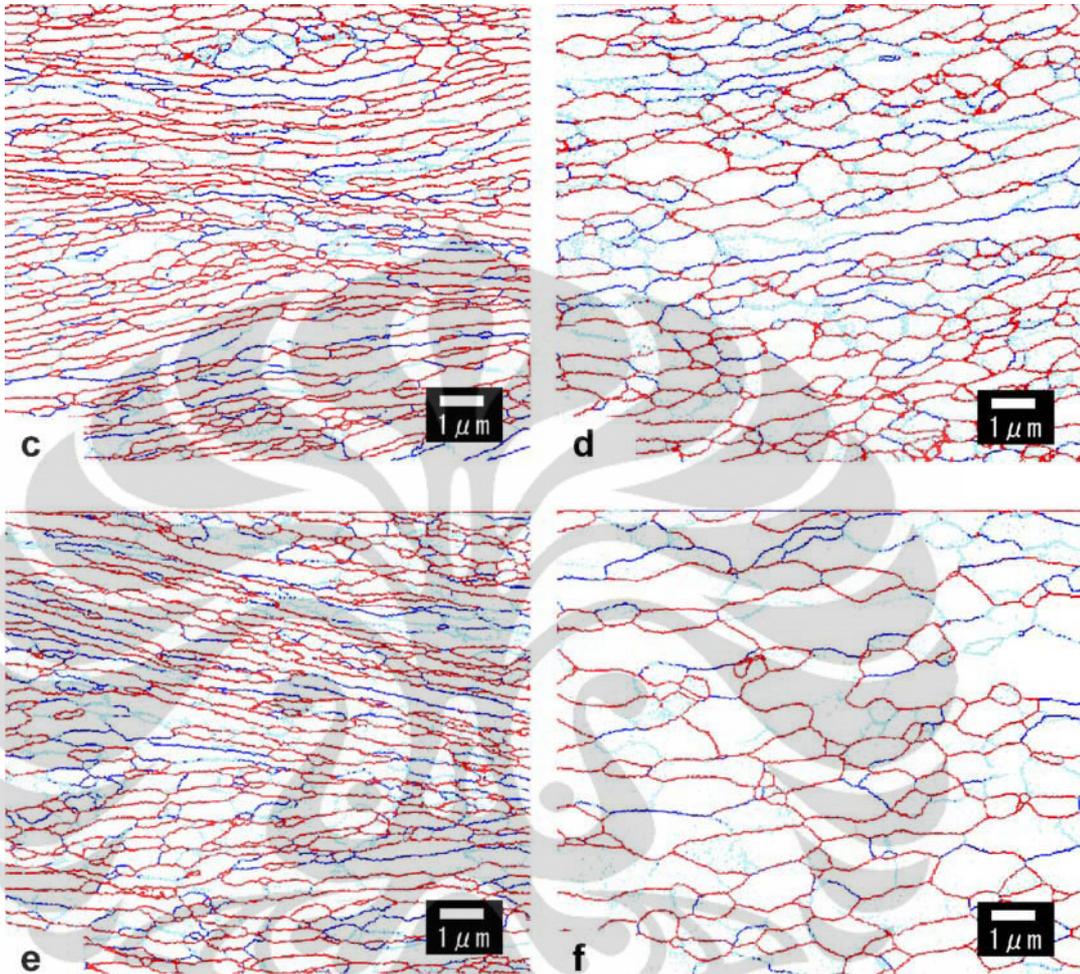
Dimana  $TH\alpha$  adalah ketebalan *pancake-like grain* setelah deformasi,  $d_o$  adalah ukuran butir ferit sebelum deformasi, dan  $\epsilon$  adalah regangan yang diberikan<sup>[31]</sup>.



**Gambar 2.35** Efek Laju regangan pada baja karbon rendah yang dideformasi di temperatur 700°C (a) mikrostruktur awal (b)  $5 \times 10^{-4}$  /s (e) 0.1 /s (f) 1/s<sup>[29]</sup>.



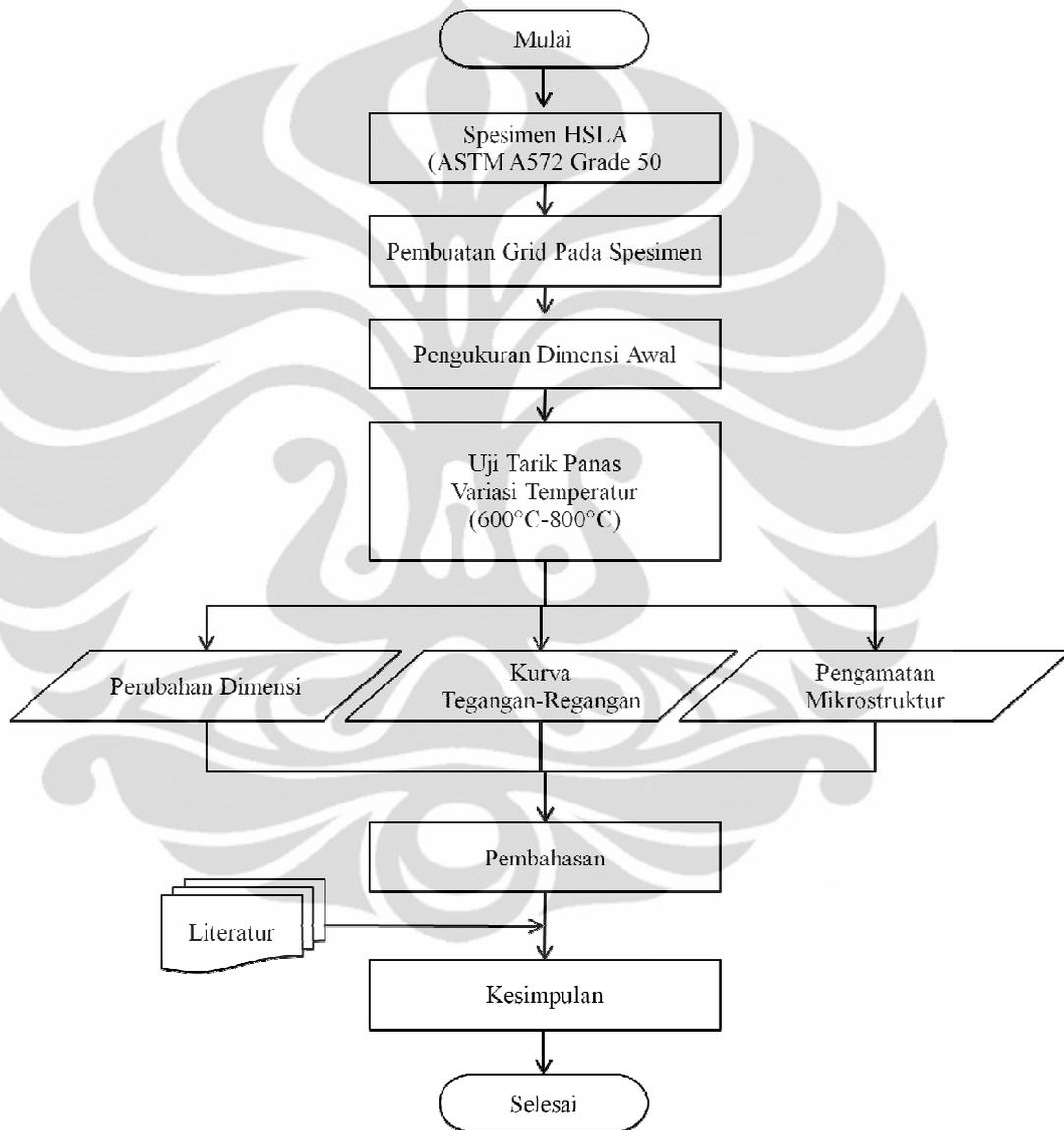
**Gambar 2.36** Scanning Electron Microscope (SEM) hasil *plane strain compression test* dari spesimen pada temperatur 823 K dan laju Regangan berbeda. (e) 1/s (f) 0.01 /s<sup>[31]</sup>.



**Gambar 2.37** Boundary Map mikrostruktur hasil ESBD. Efek laju regangan pada *plane strain compression test* pada temperatur berbeda. (c) 773 K, 1/s (d) 773 K, 0.01/s (e) 823 K, 1/s (f) 823 K, 0.01/s<sup>[31]</sup>.

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1 Alat

Peralatan Uji Tarik Panas: 1) *Universal Tensile Machine*—Merk Shimadzu, kapasitas 20 kN, dapur pemanas, jangka sorong, kunci torsi, *drawing pen* dan penggaris.

Peralatan Pengamatan Mikro (Metalografi): Mesin *Polishing* dan *Grinding*, Labu ukur, gelas ukur, pipet, kaca arloji, cetakan *mounting* dan *stopwatch*.

### 3.2.2 Bahan

1. Baja HSLA (ASTM A572 Grade 50)
2. Etsa ( *Modified Marshall's reagent*, *Marshall's reagent* dan nital 2%)
3. Resin dan *Hardener*
4. Kertas amplas grid #600, #800, #1000, #1200, dan #1500
5. Serbuk TiO<sub>2</sub> dan Kain poles.

**Tabel 3.1** Komposisi Kimia Baja ASTM A 572 grade 50 hasil uji *spectrometer*.

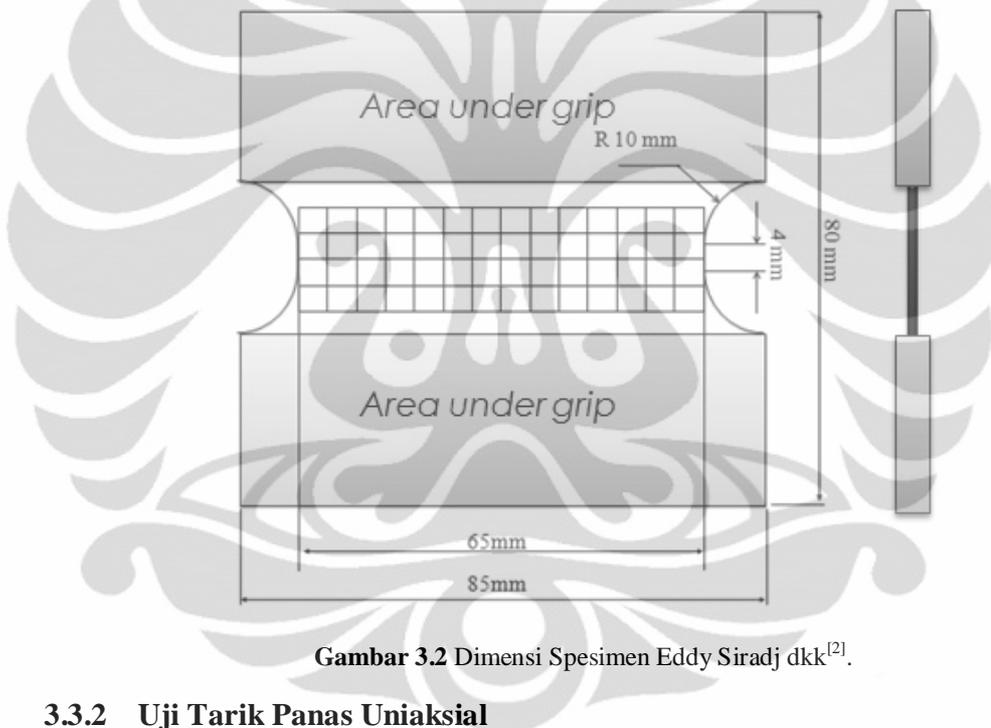
C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Mo	Fe
0.008	0.22	1.45	<0.003	<0.003	<0.005	0.049	0.045	0.028	<0.002	<0.002	<0.003	<0.005	98.14

## 3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini berfokus pada uji tarik uniaksial yang dilakukan untuk mengetahui apakah pendekatan modifikasi spesimen yang dilakukan dapat mempertahankan kondisi regangan bidang pada temperatur tinggi, setelah sebelumnya berhasil dibuktikan bahwa pada uji tarik uniaksial di temperatur ruang kondisi regangan bidang dapat dicapai. Selain itu, juga dilakukan prediksi deformasi maksimum dan pengamatan mikrostruktur untuk beberapa spesimen. 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  $\varnothing 25 \times h25 \times t10 \text{ cm}^3$ . Semua penelitian dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

### 3.3.1 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 section* 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*.



Gambar 3.2 Dimensi Spesimen Eddy Siradj dkk<sup>[2]</sup>.

### 3.3.2 Uji Tarik Panas Uniaksial

#### 3.3.2.1 Uji Tarik Panas Uniaksial sampai 1,15 *yield*

Pada penelitian ini dilakukan dua jenis pengujian tarik panas, yang pertama pengujian tarik dilakukan sampai 1.15 *yield* yang meliputi spesimen 2, 3, 4 dan 5, dengan masing-masing variasi temperatur penarikan 600°C, 690°C, 700°C, dan 750°C. Adapun pengujian tarik mode regangan bidang pada penelitian ini mengacu pada 1 arah lembaran, yaitu arah sejajar canai (0°). Hal ini dilakukan karena mekanisme regangan bidang yang terjadi pada proses canai adalah sejajar arah canai.

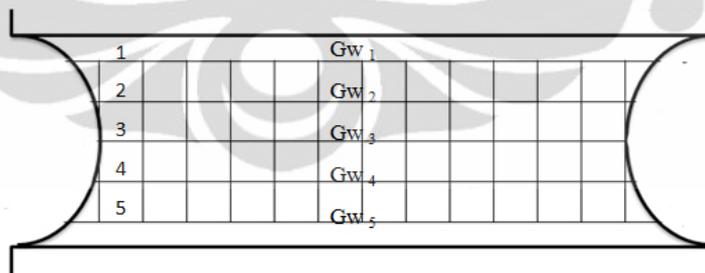
### 3.3.2 Uji Tarik Panas sampai titik kegagalan

Uji tarik ini dilakukan untuk memprediksi deformasi maksimum yang dihasilkan dan sejauh mana kondisi regangan bidang oleh spesimen dapat dipertahankan ketika beban atau tegangan ditingkatkan hingga spesimen mengalami kegagalan. Uji Tarik Panas ini dilakukan pada spesimen 6, 7 dan 8, dengan temperatur penarikan masing-masing 700°C, 750°C dan 800°C. Pengujian Tarik ini juga dilakukan hanya pada arah lembaran 0° (*Rolling direction*)

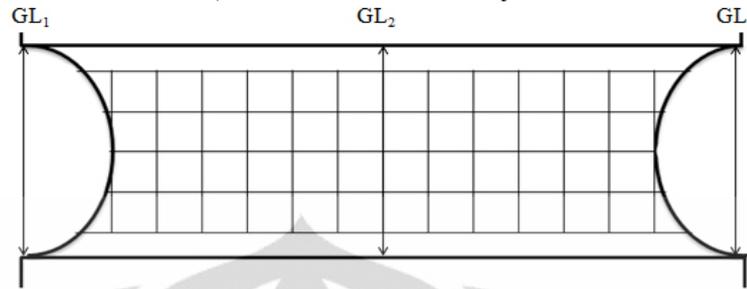
### 3.3.3 Pengamatan Perubahan Dimensi

#### 3.3.3.1 Pengamatan Kondisi Regangan Bidang

Pengamatan perubahan dimensi ini dilakukan sebagai tahap pengamatan analitis terhadap terbentuknya kondisi regangan bidang 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  $GL_3$ ). Dari hasil perhitungan regangan minor dan mayor akan didapat nilai FLD ( $\beta$ ), sesuai dengan persamaan (2.1). Kondisi *plane strain* terjadi ketika nilai FLD ( $\beta$ ) mendekati nol.



**Gambar 3.3** Titik pengukuran untuk regangan minor untuk mendapatkan nilai FLD.



Gambar 3.4 Titik pengukuran untuk regangan mayor untuk mendapatkan nilai FLD.

### 3.3.3.2 Prediksi Deformasi Maksimum

Selanjutnya, deformasi maksimum diprediksi dari reduksi ketebalan yang terjadi di sekitar patahan pada spesimen dimana uji tarik sampai titik kegagalan dilakukan. Untuk memprediksi deformasi maksimum yang dapat dicapai dari spesimen ini, dilakukan pengukuran reduksi ketebalan spesimen 7 dan 8, dimana temperatur penarikan masing-masing dilakukan pada temperatur 750°C dan 800°C. Pengukuran ketebalan dilakukan pada jarak 3 mm penampang melintang dari ujung patahan.

### 3.3.4 Pengamatan mikrostruktur

Untuk mengamati perubahan mikrostruktur yang terjadi setelah deformasi panas berupa uji tarik, dilakukan perhitungan ukuran butir dengan menggunakan prosedur *intercept* menurut ASTM E 112-96. Pengamatan dilakukan pada penampang melintang *gage section*. Untuk melihat deformasi maksimum, pengamatan dilakukan pada daerah di sekitar ujung patahan (spesimen hasil uji tarik sampai titik kegagalan). Sedangkan, untuk spesimen hasil uji tarik sampai titik 1,15 yield, pengamatan dilakukan pada bagian tengah *gage section*. Untuk mendapatkan batas butir *ferrite* yang diinginkan, dalam hal ini dilakukan dua kali proses pengetsaan, yang pertama dengan *marshall's reagent* kemudian diikuti oleh nital 2%. Namun, untuk beberapa sampel, digunakan etsa *modified marshall's reagent* ( ditambah HF 0.5% sebanyak 4 tetes) yang diikuti dengan nital 2%.

Teknik Penghitungan dilakukan sebagai berikut:

$$N_L = \frac{N_i}{L/M} \quad (3.1)$$

$N_L$  = number of intercepts per unit length of test line

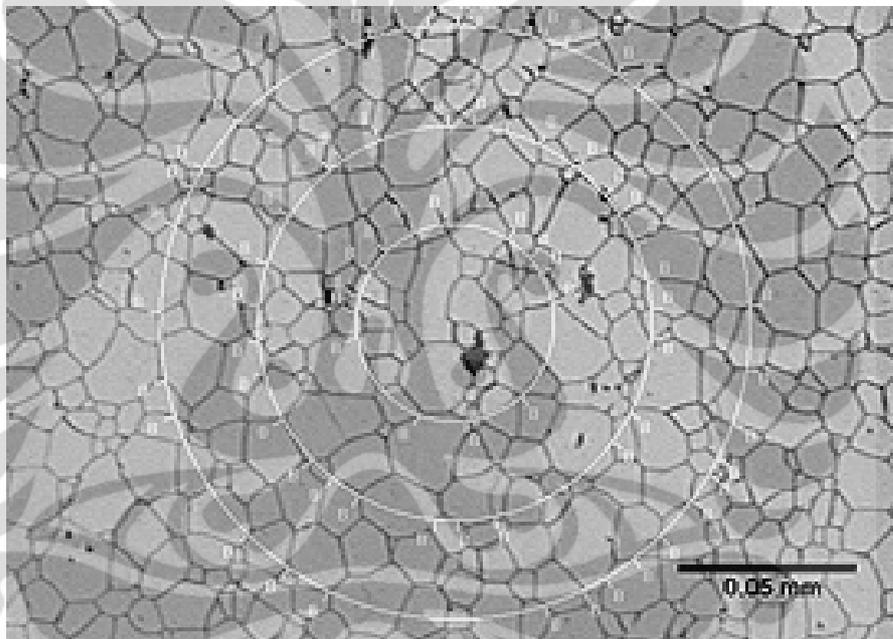
$N_i$  = number of intercepts with a test line

$L$  = 500mm (length of a test line)

$M$  = 1000X (magnification)

Nilai  $N_L$  kemudian dimasukkan dalam persamaan:

$$G = (6.643856 \log N_L) - 3.288 \quad (3.2)$$



**Gambar 3.5** Skematis Metode *Intercept* untuk perhitungan butir.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

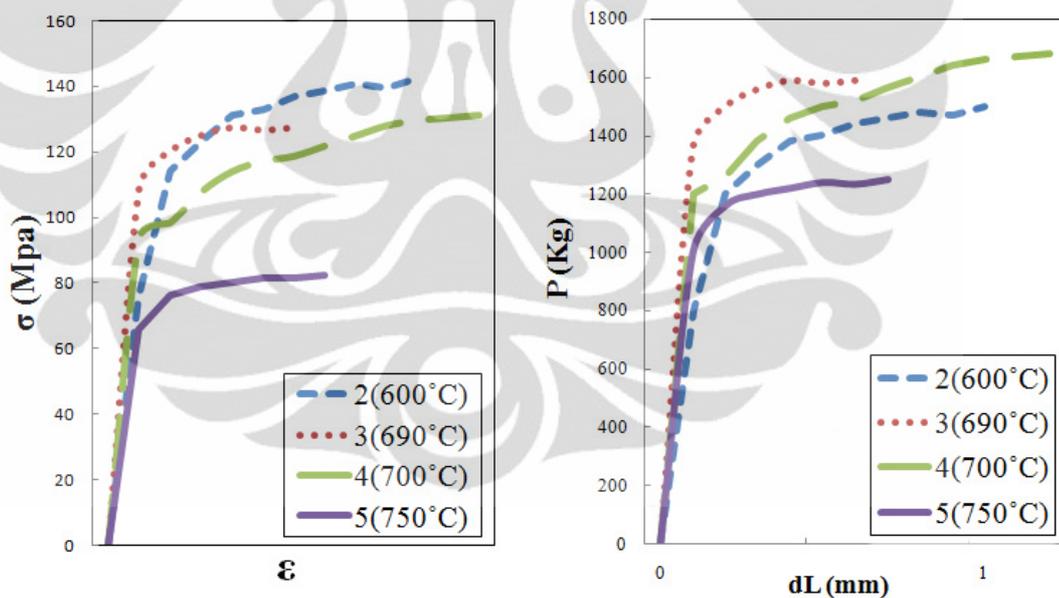
#### 4.1 Pengamatan Perubahan Dimensi

##### 4.1.1 Pengamatan Kondisi Regangan Bidang

Pengamatan perubahan dimensi dilakukan sebagai bentuk pengamatan kondisi regangan bidang pada spesimen uji. Pengamatan dilakukan dengan memfokuskan pada perubahan dimensi panjang dan lebar dari tiap spesimen pada *gage section* untuk mengukur nilai elongasi pada arah vertikal dan horizontal sehingga didapatkan nilai FLD ( $\beta$ ). Pada titik bekas/jejak *grid* tersebut, dihitung nilai regangan mayor dan minor pada setiap spesimen untuk melihat pola regangan yang terjadi. Uji tarik dilakukan sampai  $\pm 1,15$  *yield*, dimana material mulai terdeformasi pada titik tersebut. Hal ini berkaitan dengan adanya penghalang bagi material untuk mengalami kontraksi dalam arah *y*, sebagaimana yang terlihat pada gambar 2.14 sehingga tegangan yang dibutuhkan material untuk mengalami *yield* pada uji tarik regangan bidang lebih besar 15% dibandingkan dengan tegangan aksial yang dibutuhkan agar material mengalami *yield* pada *simple tension*<sup>[22]</sup>. Gambar 4.1 memperlihatkan sejauh mana beban diberikan pada masing-masing spesimen 2, 3, 4 dan 5. Dalam hal ini, tegangan yang diberikan telah mencapai 1,15 *yield*. Adanya deformasi yang terjadi menandakan tegangan yang diberikan telah sama atau lebih besar dari 1,15 *yield*.

Tabel 4.1 sampai 4.2 memperlihatkan dimensi awal dan akhir dari spesimen 2, 3, 4 dan 5 dalam arah lebar (tegak lurus beban) dengan temperatur penarikan masing-masing sebesar 600°C, 690°C, 700°C dan 750°C. Untuk semua spesimen, dari tabel dapat terlihat bahwa penyusutan lebar *gage section* tetap terjadi yang dibuktikan dengan nilai regangan minor yang negatif. Namun, penyusutan lebar terjadi sangat kecil, nilainya hampir mendekati nol. Nilai regangan minor untuk spesimen 2, 3, 4 dan 5 berturut-turut adalah -0.0061, -0.0029, -0.0059 dan -0.0035 sebagaimana yang tercantum pada Tabel 4.3.

Untuk perubahan dimensi spesimen dalam arah panjang dan nilai regangan mayor yang terjadi dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan 4.5. Nilai FLD ( $\beta$ ) didapat dengan memasukkan nilai regangan minor dan nilai regangan mayor dalam Persamaan (2.1). Kondisi regangan bidang dikatakan terjadi pada uji tarik panas uniaksial ketika FLD bernilai nol atau mendekati nol. Tabel 4.6 memperlihatkan nilai FLD dari keempat spesimen, dimana nilai FLD mendekati nilai nol untuk semua spesimen. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi regangan bidang dapat dicapai pada uji tarik panas uniaksial pada titik  $\pm 1,15$  yield. *Forming Limit Diagram* (Gambar 4.3) memperjelas pola regangan dari keempat spesimen yang membuktikan bahwa pada uji tarik panas uniaksial kondisi regangan bidang dapat dicapai. Sebagaimana yang terlihat pada Gambar 4.3, pola regangan kondisi regangan bidang terjadi bilamana deformasi yang dilakukan hanya memberikan regangan mayor positif, sedangkan nilai regangan minor tidak terjadi (bernilai nol).



**Gambar 4.1** Kurva tegangan-regangan rekayasa dan kurva beban-perpanjangan uji tarik panas uniaksial sampai titik 1,15 *yield* dari spesimen 2, 3, 4 dan 5.

**Tabel 4.1** Dimensi awal spesimen 2, 3, 4 dan 5 pada arah lebar .

Sampel	T <sub>tarik</sub> (°C)	F (kg)	Gage Width awal				
			Gw <sub>1</sub>	Gw <sub>2</sub>	Gw <sub>3</sub>	Gw <sub>4</sub>	Gw <sub>5</sub>
2	600	1480	71.6	66.3	64.6	66.4	69.3
3	690	1600	72.7	66.9	64.5	66.5	72.4
4	700	1680	71.4	66.4	64.5	66.3	71.0
5	750	1240	72.3	67.6	65.2	67.0	71.0

**Tabel 4.2** Dimensi akhir spesimen pada arah lebar spesimen 2, 3, 4 dan 5.

Sampel	T <sub>tarik</sub> (°C)	F (kg)	Gage Width akhir				
			Gw <sub>1</sub>	Gw <sub>2</sub>	Gw <sub>3</sub>	Gw <sub>4</sub>	Gw <sub>5</sub>
2	600	1480	71.3	65.8	64.8	65.9	68.9
3	690	1600	72.5	66.6	64.3	66.3	72.3
4	700	1680	71.1	66.0	63.6	66.2	70.7
5	750	1240	72.3	67.1	64.5	67.0	71.0

**Tabel 4.3** Nilai Regangan Minor ( $\epsilon$ ) spesimen 2, 3, 4 dan 5.

Sampel	Regangan Minor (sumbu-X)					
	Gw <sub>1</sub>	Gw <sub>2</sub>	Gw <sub>3</sub>	Gw <sub>4</sub>	Gw <sub>5</sub>	Rata-rata
2	-0.0042	-0.0075	-0.0031	-0.0075	-0.0086	-0.0061
3	-0.0027	-0.0044	-0.0031	-0.0030	-0.0014	-0.0029
4	-0.0042	0.0060	-0.014	-0.0015	-0.0042	-0.0059
5	-0.000	0.0074	-0.011	-0.000	-0.000	-0.0035

**Tabel 4.4** Dimensi awal dan akhir spesimen 2, 3, 4 dan 5 pada arah panjang.

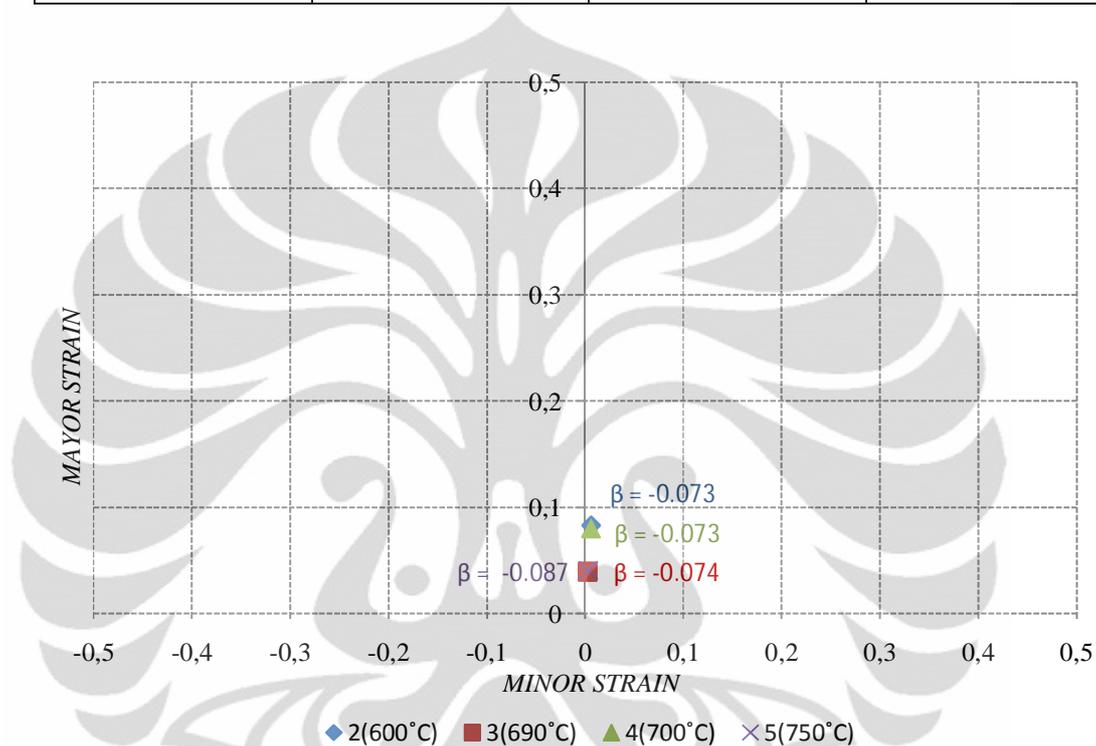
Sampel	Gage Length awal			Gage length akhir		
	GL <sub>1</sub>	GL <sub>2</sub>	GL <sub>3</sub>	GL <sub>1</sub>	GL <sub>2</sub>	GL <sub>3</sub>
2	25.6	25.7	25.6	27.6	27.9	27.9
3	25.7	25.8	25.7	27	26.9	26.4
4	25.8	26	25.9	28.2	28.1	27.7
5	24.4	24.5	24.4	25.4	25.4	25.5

**Tabel 4.5** Nilai Regangan Mayor ( $\epsilon$ ) spesimen 2, 3, 4 dan 5.

Sampel	Regangan Mayor (sumbu-y)			
	GL <sub>1</sub>	GL <sub>2</sub>	GL <sub>3</sub>	Rata-rata
2	0.078	0.085	0.089	0.083
3	0.050	0.042	0.027	0.039
4	0.093	0.080	0.069	0.080
5	0.040	0.036	0.045	0.040

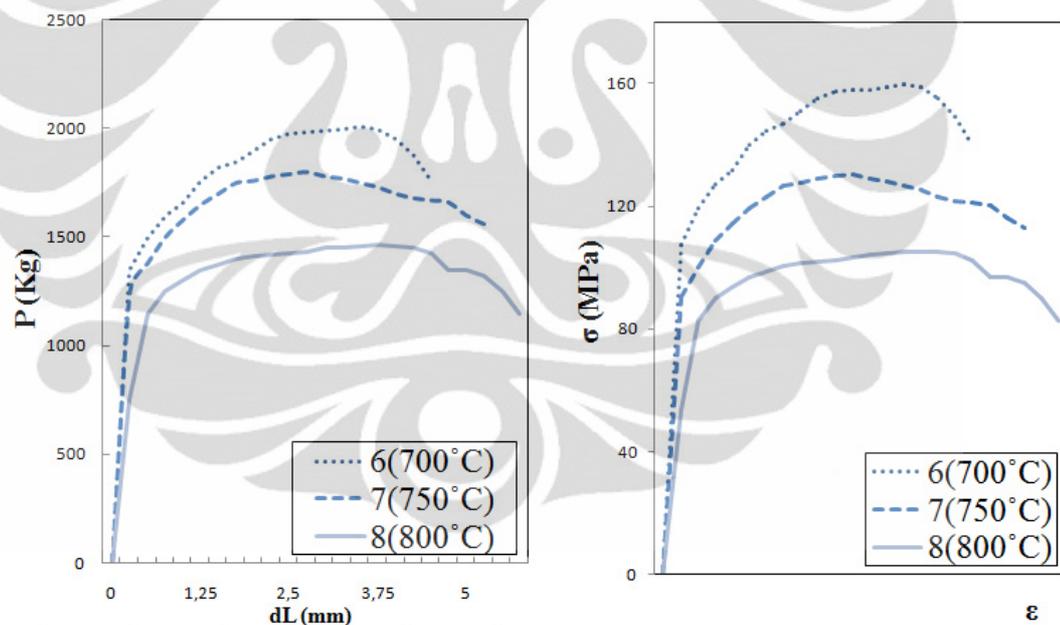
**Tabel 4.6** Nilai FLD spesimen 2, 3, 4 dan 5.

Sampel	Rata-rata $\epsilon_{\text{minor}}$	Rata-rata $\epsilon_{\text{mayor}}$	Nilai FLD ( $\beta$ )
2	-0.0061	0.083	<b>-0.073</b>
3	-0.0029	0.039	<b>-0.074</b>
4	-0.0059	0.080	<b>-0.073</b>
5	-0.0035	0.040	<b>-0.087</b>

**Gambar 4.2** FLD dari spesimen 2, 3, 4 dan 5 pada beberapa variasi temperatur uji tarik panas uniaksial sampai titik 1.15 *yield*.

Selanjutnya, pengamatan kondisi regangan bidang juga dilakukan pada spesimen 6, 7 dan 8 dimana pada ketiganya dilakukan uji tarik panas uniaksial sampai titik kegagalan. Gambar 4.2 memperlihatkan grafik tegangan-regangan rekayasa dari ketiga spesimen. Uji tarik dilakukan untuk melihat sejauh mana kondisi regangan bidang dapat dipertahankan ketika beban diberikan terus-menerus hingga material mengalami kegagalan. Tabel 4.7 sampai 4.11 memperlihatkan perubahan dimensi yang terjadi dalam arah lebar dan arah panjang serta nilai regangan mayor dan minor yang terjadi. Untuk spesimen 6, 7 dan 8, temperatur penarikan berturut-turut adalah 700°C, 750°C dan 800°C. Dari tabel dapat dilihat bahwa perubahan dimensi yang terjadi, baik dalam arah lebar maupun arah panjang, memiliki nilai yang lebih besar

dari pada uji tarik panas uniaksial sampai titik 1,15 *yield*. Hal tersebut juga digambarkan pada nilai regangan minor dan mayor, masing-masing dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan 4.11. Pada uji tarik sampai titik kegagalan, regangan minor cenderung lebih negatif yang menandakan bahwa pada *gage section* spesimen terjadi penyusutan yang terjadi lebih besar daripada uji tarik yang hanya dilakukan sampai 1.15 *yield*. Hal yang sama juga berlaku untuk regangan mayor, dimana dihasilkan nilai yang lebih positif, yang menandakan bahwa perubahan dimensi dalam arah panjang lebih besar dari pada uji tarik yang dilakukan sampai 1.15 *yield*. *Forming Limit Diagram* dari spesimen 6, 7 dan 8 dapat dilihat pada Gambar 4.4, dimana pola regangan yang berada di antara kondisi *uniaxial tension* dan regangan bidang (Gambar 2.10). Dapat dilihat bahwa, untuk ketiga spesimen ini pola regangan yang dihasilkan cenderung sedikit bergeser dari kondisi regangan bidang.



**Gambar 4.2** Kurva beban-perpanjangan dan tegangan-regangan rekayasa spesimen 6, 7 dan 8 uji tarik sampai titik kegagalan pada beberapa variasi temperatur.

**Tabel 4.7** Dimensi awal spesimen pada arah lebar pada spesimen 6, 7 dan 8.

Sampel	T <sub>tarik</sub> (°C)	Gage Width awal				
		Gw <sub>1</sub>	Gw <sub>2</sub>	Gw <sub>3</sub>	Gw <sub>4</sub>	Gw <sub>5</sub>
6	700	72.3	67	65	67.5	73.2
7	750	73.5	67.8	64.5	66	70
8	800	73	67.9	64.6	66.9	72.4

**Tabel 4.8** Dimensi akhir spesimen 5, 6, dan 7 pada arah lebar.

Sampel	T <sub>tarik</sub> (°C)	Gage Width akhir				
		Gw <sub>1</sub>	Gw <sub>2</sub>	Gw <sub>3</sub>	Gw <sub>4</sub>	Gw <sub>5</sub>
6	700	70.8	65.4	64.2	66.7	72.9
7	750	70.5	64	60.75	65.1	69.1
8	800	73	67.3	63.8	66.3	72.3

**Tabel 4.9** Nilai Regangan Minor ( $\epsilon$ ) spesimen 5, 6 dan 7.

Sampel	Regangan Minor (sumbu-X)					
	Gw <sub>1</sub>	Gw <sub>2</sub>	Gw <sub>3</sub>	Gw <sub>4</sub>	Gw <sub>5</sub>	Rata-rata
6	-0.0207	-0.0224	-0.0123	-0.0119	-0.0041	-0.01428
7	-0.0408	-0.0560	-0.0581	-0.0136	-0.0128	-0.03626
8	-0.0000	-0.0088	-0.0123	-0.0089	-0.0014	-0.02330

**Tabel 4.10** Dimensi awal dan akhir spesimen 5, 6 dan 7 pada arah panjang.

Sampel	Gage Length awal			Gage length akhir		
	GL <sub>1</sub>	GL <sub>2</sub>	GL <sub>3</sub>	GL <sub>1</sub>	GL <sub>2</sub>	GL <sub>3</sub>
6	25.3	25.2	25.2	34.6	34.75	33.9
7	25.7	24.9	25.7	33.4	33.3	34.85
8	24.8	24.8	24.8	31.7	31	31

**Tabel 4.11** Nilai Regangan Mayor ( $\epsilon$ ) spesimen 5, 6 dan 7.

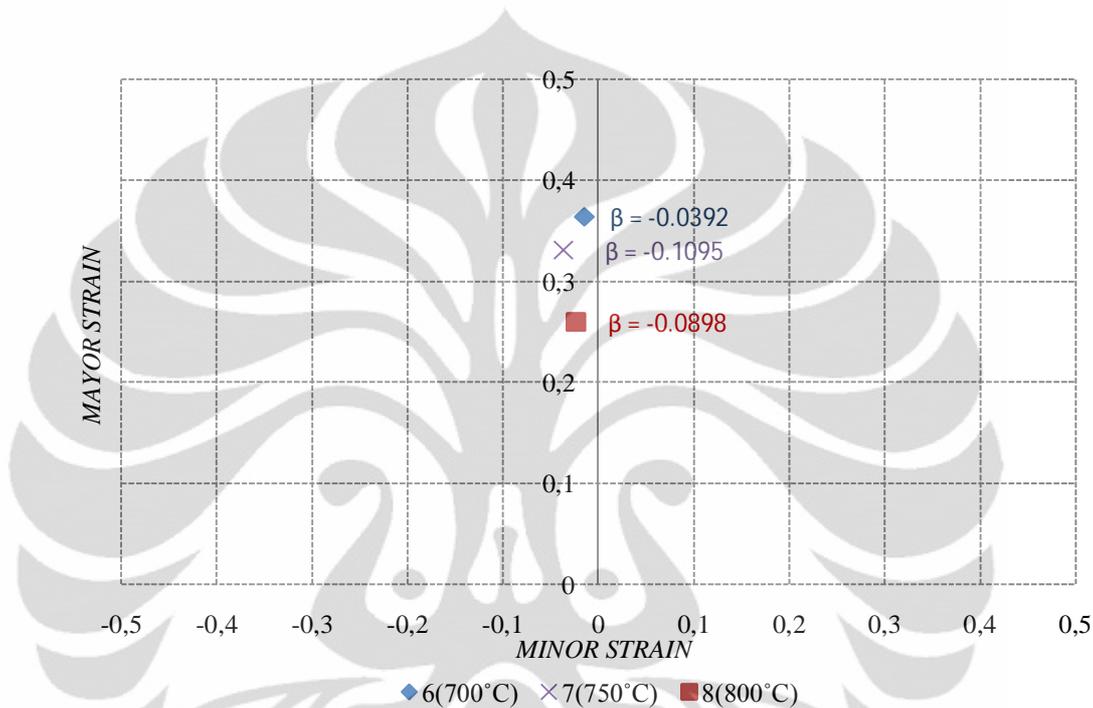
Sampel	Regangan Mayor (sumbu-y)			
	GL <sub>1</sub>	GL <sub>2</sub>	GL <sub>3</sub>	Rata-rata
6	0.3675	0.3789	0.3452	0.3638
7	0.2996	0.3373	0.3560	0.3309
8	0.2782	0.2500	0.2500	0.2594

**Tabel 4.12** Nilai FLD spesimen 5, 6 dan 7.

Sampel	Rata-rata $\epsilon_{minor}$	Rata-rata $\epsilon_{mayor}$	Nilai FLD ( $\beta$ )
<b>6</b>	-0.01428	0.3638	<b>-0.0392</b>
<b>7</b>	-0.03626	0.3309	<b>-0.1095</b>
<b>8</b>	-0.02330	0.2594	<b>-0.0898</b>

Hal ini membuktikan bahwa modifikasi spesimen untuk memperoleh kondisi regangan bidang pada uji tarik panas uniaksial dapat dikatakan berhasil. Modifikasi meliputi penggunaan spesimen yang sangat lebar dengan *gage length* yang pendek (*short sample*) yang dikenal dengan *wide sample method*. Penambahan lebar dari spesimen dan reduksi *gage length* akan mengubah regangan minor yang bernilai negatif menjadi kondisi regangan bidang, dimana regangan minor bernilai nol untuk spesimen. Dalam *rectangular sheet spesimen* untuk pengujian tarik, spesimen dengan

rasio panjang terhadap lebar (*length-to-width ratio*) 1:1, 1:2 atau 1:4 digunakan sebagai pendekatan untuk mencapai kondisi regangan bidang. Regangan minor yang minimum dapat dicapai dengan rasio *length-to-width* 1:4 sebesar 0.05% dari regangan major yang terjadi, dimana kondisi ini mendekati kondisi regangan bidang<sup>[21]</sup>.



**Gambar 4.4** FLD untuk spesimen 6, 7 dan 8 pada beberapa variasi temperatur uji tarik panas uniaksial sampai titik kegagalan.

Untuk geometri spesimen dalam penelitian ini, dimana besarnya *gage length* dan *gage width* masing-masing adalah 25 cm dan 65 cm, didapatkan rasio panjang terhadap lebar dari spesimen 1:2,6. Rasio panjang terhadap lebar didapatkan dengan membagi nilai *gage length* dengan nilai *gage width* pada bagian tengah *gage section* ( $Gw_3$ ). Pendekatan kondisi regangan bidang pada geometri spesimen juga didukung dengan perbedaan ketebalan antara *under grip area* dan *gage section*. Adanya perbedaan ketebalan menyebabkan penyusutan lebar pada spesimen dapat dicegah. Pada arah lebar, material akan terhalangi untuk mengalami kontraksi, sehingga  $\epsilon_y = 0$ , seperti pada Gambar 2.14.  $\sigma_y$  dalam arah lebar yang timbul dari perbedaan ketebalan *under grip area* dengan *gage section* menyebabkan  $\epsilon_y = 0$  (Gambar 2.14) sehingga dalam arah lebar regangan tidak terjadi. Sedangkan dalam

arah tebal, Disebabkan tidak ada yang menghalangi material untuk berkontraksi dalam arah tebal, maka  $\sigma_z = 0$ . Deformasi yang terjadi dalam arah tebal yang terjadi pada spesimen adalah reduksi ketebalan<sup>[22]</sup>.

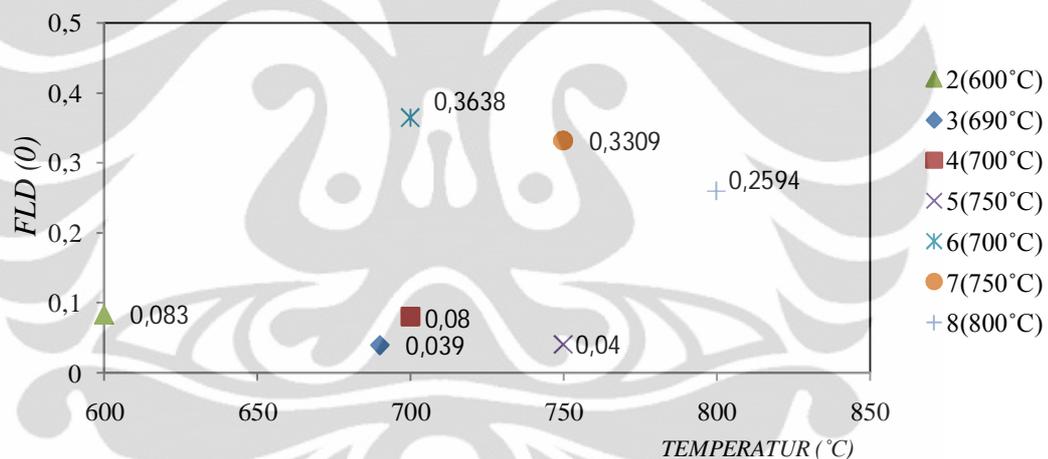
Teori ini berlaku untuk temperatur tinggi, dimana dalam penelitian ini berkisar antara 600 dan 800°C kondisi regangan bidang tetap terjadi. Hal tersebut menandakan bahwa, temperatur tidak mempengaruhi nilai regangan minor yang terjadi, dimana nilai regangan minor tetap mendekati kondisi regangan bidang walaupun temperatur penarikan ditingkatkan terutama untuk uji tarik yang dilakukan sampai 1.15 *yield*. Sedangkan, untuk uji tarik panas yang dilakukan sampai titik kegagalan, pola regangan yang dihasilkan tetap berada di antara *uniaxial tension* dan regangan bidang dengan kenaikan temperatur. Namun jika mengacu pada FLD (Gambar 4.4) dapat dikatakan bahwa pola regangan yang dihasilkan dari uji tarik sampai titik kegagalan cenderung lebih mengarah pada kondisi regangan bidang.

Dreyer menjelaskan bagaimana hubungan regangan mayor pada kondisi regangan bidang dengan temperatur pembentukan, dimana regangan mayor pada kondisi tersebut didenotasikan dengan FLD(0). Ia mengungkapkan bagaimana *trend* yang kompleks tercipta dari hubungan temperatur dengan regangan mayor pada kondisi regangan bidang (regangan minor mendekati nol). Dalam meneliti sifat mampu bentuk dalam temperatur elevasi (*warm formability*) dari paduan magnesium, ia menemukan bahwa regangan minor yang mendekati nilai nol tetap dapat tercapai pada kisaran temperatur 160 - 350°C<sup>[18]</sup>.

Dalam kaitannya dengan penelitian ini, terlihat pada gambar 4.6 bahwa pada kondisi temperatur tinggi dalam kisaran 600 -750°C regangan minor tetap mendekati nilai 0 pada uji tarik uniaksial sampai titik 1,15 *yield* sehingga dihasilkan kondisi regangan minor. Sedangkan, untuk regangan minor pada uji tarik sampai titik kegagalan, didapatkan bahwa penyusutan lebar yang terjadi cukup besar. Hasilnya, didapatkan regangan minor yang lebih negatif dari nilai pada uji tarik 1,15 *yield*. Regangan minor yang cenderung lebih negatif cenderung menggeser pola regangan spesimen 6, 7 dan 8 ke arah *uniaxial tension*. Sehingga, pada FLD spesimen uji tarik

panas uniaksial sampai titik kegagalan, pola regangan sedikit bergeser dari kondisi regangan bidang.

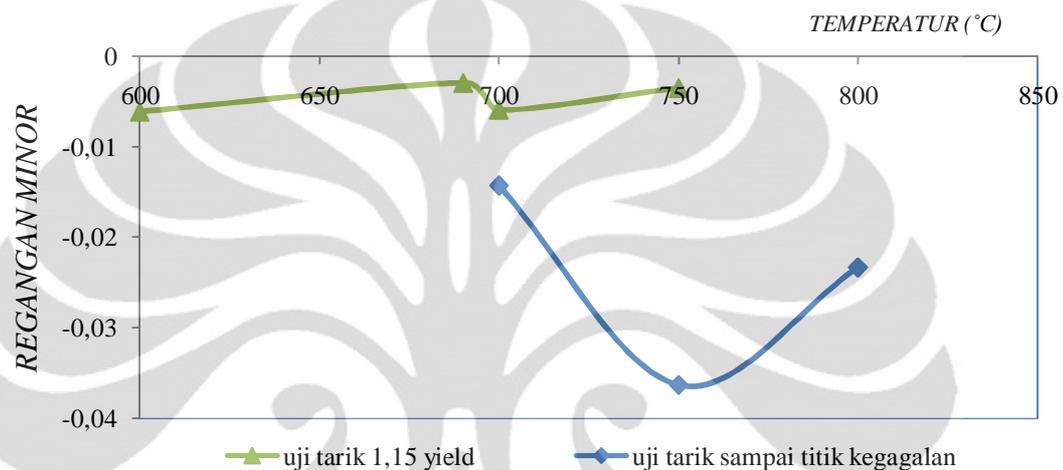
Seadangkan, pada regangan mayor dimana pada Gambar 4.5 didenotasikan dengan FLD(0). Regangan mayor yang dihasilkan dari uji tarik sampai titik kegagalan cenderung memiliki nilai yang lebih positif dari nilai regangan mayor pada uji tarik 1,15 *yield*. Sebagaimana beban yang diberikan, regangan mayor pada spesimen 2, 3, 4 dan 5 memiliki nilai yang sangat kecil, dimana nilai regangan mayor terbesar hanya mencapai angka 0.083. Untuk spesimen 6, 7 dan 8, dimana uji tarik dilakukan sampai spesimen mengalami kegagalan, didapatkan regangan mayor yang lebih besar, dimana regangan mayor terbesar terjadi pada spesimen 6 dengan temperatur penarikan 700°C.



**Gambar 4.5** Hubungan Temperatur dengan regangan mayor yang terjadi pada kondisi regangan bidang (FLD (0)) hasil uji tarik panas uniaksial sampai titik 1,15 *yield* dan sampai titik kegagalan.

Regangan mayor secara langsung berbanding lurus dengan beban atau tegangan yang diberikan pada saat uji tarik panas uniaksial. Hal tersebut dapat dijelaskan dengan analisa tegangan pada sumbu-x dan geometri spesimen, dimana geometri spesimen tidak dirancang untuk menghambat terjadinya regangan dalam arah panjang (searah pembebanan). Dalam hal ini, tidak diketahui penyebab terbentuknya *trend* yang kompleks pada hubungan temperatur dengan regangan mayor dan minor. Namun, adanya perbedaan panjang, lebar ataupun ketebalan pada *gage section* diketahui yang paling bertanggung jawab untuk regangan minor dan

mayor yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, tiap spesimen cenderung memiliki ketebalan yang tidak sama, berkisar antara 1.8 -2.4 mm. Perbedaan nilai *gage length* dan *gage section* tiap spesimen juga turut andil dalam terciptanya *trend* yang kompleks dari hubungan regangan minor dan temperatur pada uji tarik panas uniaksial.



**Gambar 4.6** Hubungan Temperatur dengan regangan minor hasil uji tarik panas uniaksial sampai titik 1,15 *yield* dan sampai titik kegagalan.

#### 4.2 Prediksi Deformasi Maksimum

Untuk memprediksi deformasi maksimum yang dapat dicapai dari pengujian ini, dilakukan pengukuran reduksi ketebalan pada spesimen 7 dan 8. Pengukuran ketebalan dilakukan pada penampang melintang di sekitar ujung patahan. Hasil pengukuran ketebalan awal dan ketebalan akhir dapat dilihat pada Tabel 4.13. Pengukuran ketebalan akhir dilakukan pada jarak 3 mm dari ujung patahan berkaitan dengan luas daerah penampang melintang untuk pengamatan mikrostruktur. Pada jarak 3 mm dari ujung patahan, dengan luas wilayah penampang melintang yang dihasilkan, pengamatan mikrostruktur masih mungkin dilakukan. Pengamatan mikrostruktur disekitar ujung patahan dilakukan untuk mengetahui perubahan ukuran butir akibat tingkat deformasi yang terjadi.

**Tabel 4.13** Prediksi Deformasi maksimum dari spesimen 7 dan 8

Sampel	Tebal Awal	Tebal pada jarak 3 mm dari ujung patahan	%Deformasi maksimum
7	1,561	0,886	43,24
8	2,446	1,656	32,39

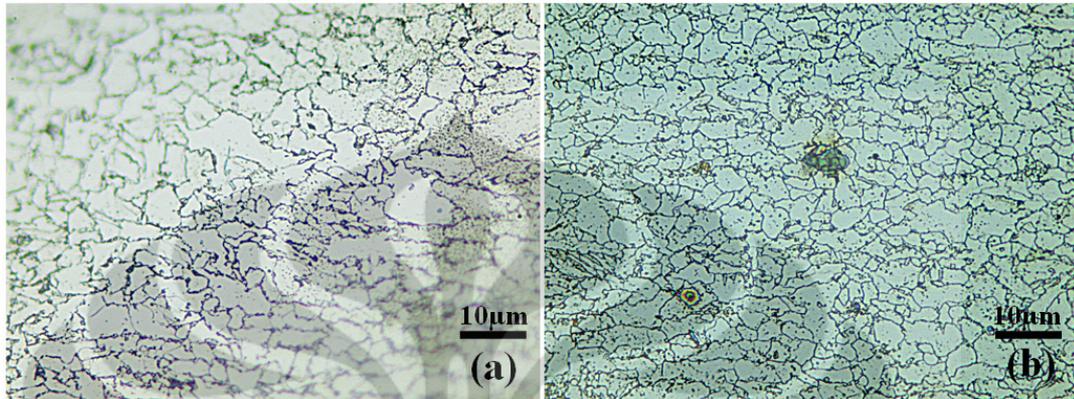
## 4.2 Pengamatan Mikrostruktur

Pada pemanasan awal, pertumbuhan butir tidak terjadi pada suhu rendah karena pergerakan batas butir tertahan oleh partikel karbida yang belum larut. Partikel karbida, nitrida dan karbonitrida kelarutannya tergantung pada temperatur, waktu tahan dan konsentrasi pembentuk karbida itu sendiri. Dalam hal ini, dapat dipastikan bahwa pada temperatur 900°C pada baja ASTM A 572 *grade* 50 belum terjadi kelarutan dari presipitat sebagaimana yang dipaparkan oleh iswanto<sup>[10]</sup>. Dalam penelitian ini, temperatur pemanasan awal hanya berkisar di temperatur 750 - 900°C dan untuk keseluruhan spesimen tidak dilakukan penahanan (*holding time*) pada pemanasan awal. Selanjutnya temperatur diturunkan sampai temperatur penarikan.

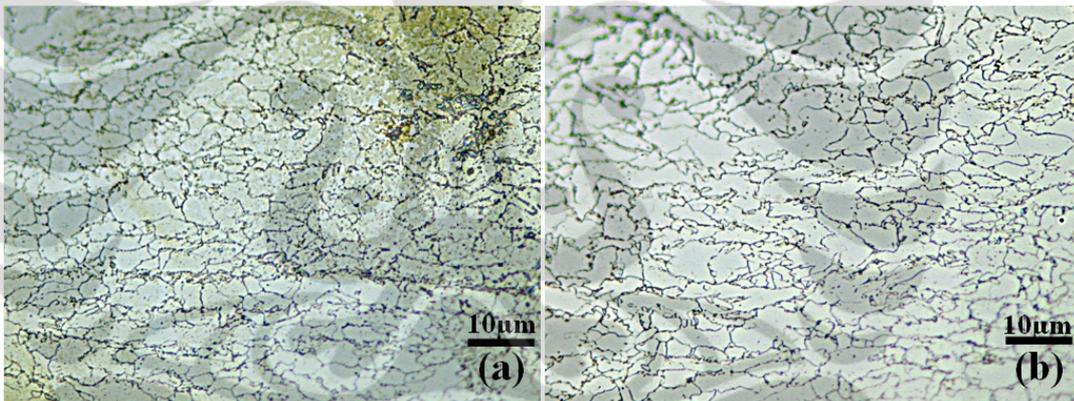
Untuk spesimen 2, 4 dan 5 dimana tingkat deformasi sangat kecil dengan laju regangan 0.01/s menyebabkan tidak terjadi perubahan yang berarti, baik terhadap ukuran butir maupun morfologinya. Laju regangan akan berpengaruh terhadap morfologi butir sebagaimana yang diungkapkan Narayana Murty<sup>[31]</sup>. Dalam hal ini, tidak ada morfologi butir yang menunjukkan adanya *elongated* atau *pancake-like grain*. Sedangkan, untuk spesimen 3 dan 8 dimana tingkat deformasi cukup besar terlihat bahwa penghalusan butir *ferrite* terjadi. Ukuran butir untuk kedua spesimen tersebut masing-masing adalah  $4.8455 \pm 0.194 \mu\text{m}$  dan  $2.3720 \pm 0.072 \mu\text{m}$ . Untuk spesimen 3 deformasi dilakukan di bawah temperatur  $A_1(690^\circ\text{C})$ , sedangkan spesimen 8 deformasi dilakukan pada temperatur di atas  $A_1(800^\circ\text{C})$ .

Untuk spesimen 8 dimana tingkat deformasi cukup tinggi, terjadi efek penghalusan butir yang cukup signifikan. Selain itu, dari mikrostruktur dapat dilihat bahwa ada sebagian butir yang terlongasi. Pada temperatur pencanaan tinggi (untuk kondisi canai hangat) yang berkisar antara 780°C dan 850°C *static recrystallization* sering terjadi yang memicu terbentuknya butir baru bebas tegangan. Deformasi

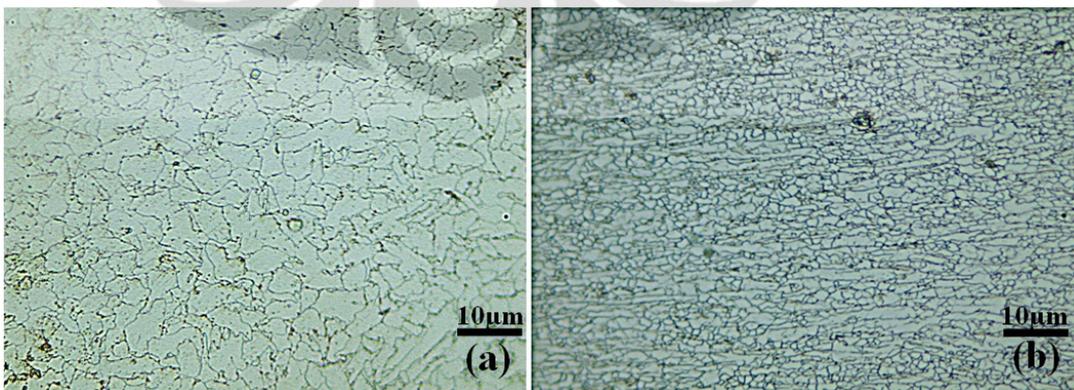
dilakukan pada temperatur dua fasa (*two-phase region*) juga menghasilkan *deformed austenite* yang akan bertransformasi menjadi ferit selama pendinginan<sup>[30]</sup>.



**Gambar 4.7** Mikrostruktur dari (a) spesimen 2(600°C) dan (b) spesimen 3(690°C) yang terdiri dari fasa *ferrite*. Temperatur *Reheating* 750°C. Etsa *marshall's reagent* yang diikuti dengan nital 2%.



**Gambar 4.8** Mikrostruktur dari (a) spesimen 4(700°C) dan (b) spesimen 5(750°C) yang terdiri dari fasa *ferrite*. Temperatur *Reheating* 820°C. Etsa *marshall's reagent* yang diikuti dengan nital 2%.

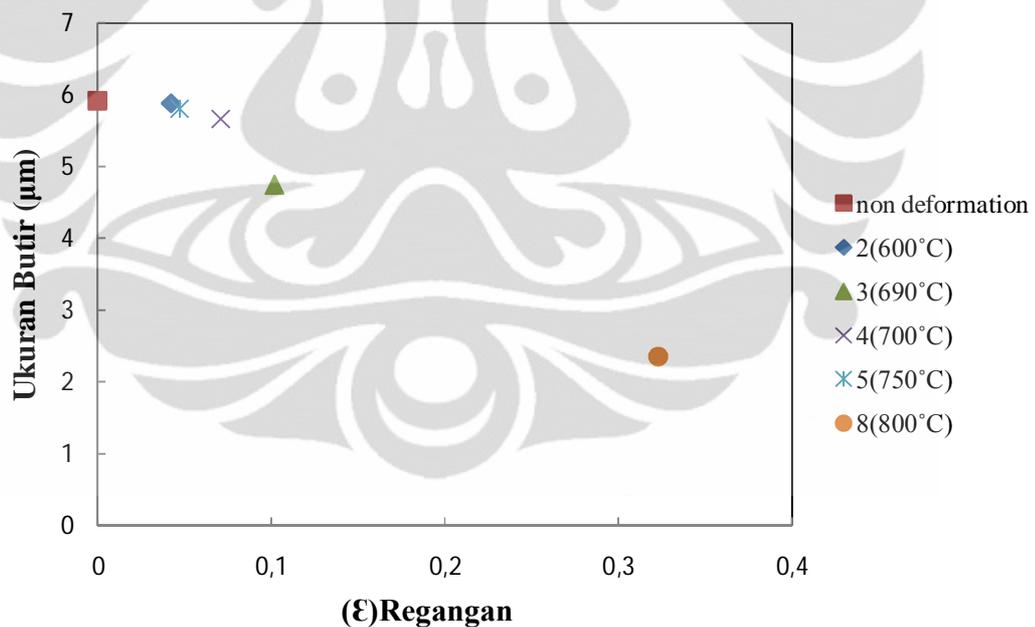


**Gambar 4.9** Mikrostruktur dari (a) spesimen 1 (tanpa deformasi dan perlakuan panas) dan (b) spesimen 8 (800°C) (foto diambil di sekitar patahan) yang terdiri dari fasa *ferrite*. Etsa *marshall's reagent* yang diikuti dengan nital 2%.

**Tabel 4.14** Data ukuran butir dan tingkat deformasi yang terjadi untuk semua spesimen.

Sampel	$\epsilon$ (regangan)	%deformasi	$d_{average}$ ( $\mu m$ )	$T_{penarikan}$ ( $^{\circ}C$ )
1	-	-	$5,988 \pm 0,141$	-
2	0.04235	4.235	$5,663 \pm 0,187$	600 $^{\circ}C$
3	0.10172	10.172	$4,748 \pm 0,205$	690 $^{\circ}C$
4	0.07118	7.111	$5,810 \pm 0,142$	700 $^{\circ}C$
5	0.04712	4.712	$5,924 \pm 0,191$	750 $^{\circ}C$
8	0.3229	32.29	2.441	800 $^{\circ}C$

Gambar 4.10 memperlihatkan bagaimana hubungan ukuran butir yang terjadi dengan tingkat deformasi. Dalam hal ini deformasi digolongkan sebagai pengerjaan hangat (*warm working*). Dari Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa semakin besar regangan yang diberikan, semakin halus butir ferit yang dihasilkan. Masing-masing mikrostruktur dapat dilihat pada Gambar 4.7 sampai 4.9.

**Gambar 4.10** Grafik Ukuran butir versus Regangan.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

1. Temperatur tidak mempengaruhi kondisi regangan bidang, pada temperatur tinggi maupun rendah, kondisi regangan bidang tetap terjadi.
2. Dari hasil perhitungan nilai regangan minor dan regangan mayor, baik untuk uji tarik sampai titik 1,15 *yield* maupun uji tarik didapatkan bahwa nilai FLD mendekati nol. Sehingga kondisi regangan bidang dapat dicapai pada uji tarik panas uniaksial.
3. Dengan pembuktian kondisi regangan bidang pada temperatur tinggi, desain spesimen dapat dinyatakan layak untuk dijadikan spesimen uji tarik uniaksial sebagai metode pengujian TMCP.
4. Deformasi maksimum yang dapat dicapai dari spesimen dengan ketebalan awal 1,561 dan 2,446 masing-masing sebesar 43,24% dan 32,29%.
5. Dari hasil pengamatan mikrostruktur, didapatkan bahwa bagian yang mengalami deformasi lebih tinggi memiliki ukuran butir yang lebih halus.

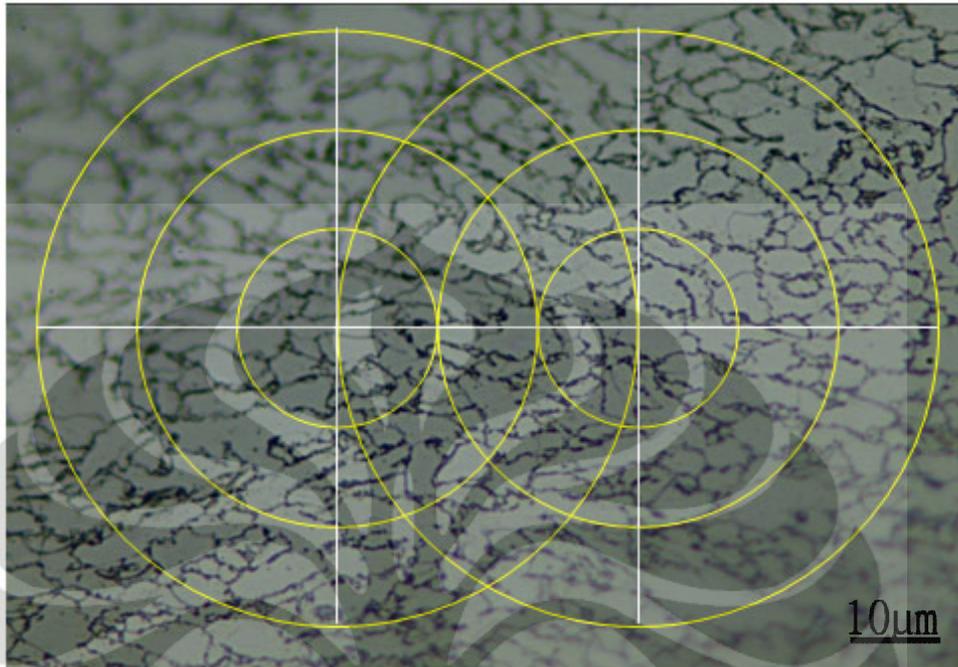
## DAFTAR REFERENSI

- [1] Nobuo, Shikanai. Et al., *Recent Development in Microstructural Control Technologies through the Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) with JFE Steel's High-Performance Plates*. JFE Technical Report No. 11: 2008.
- [2] Eddy S. Siradj dan Dedi Priadi, DEA. *Pengembangan Model Uji Tarik Uniaksial Sebagai Alternatif Metode Pengujian TMCP Baja C-Mn*. Laporan Hibah Bersaing. Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Desember 2010
- [3] Bhadeshia & Sir Robert Honeycombe. *Steels Microstructure and Properties. Third edition. Published by Elsevier*. 2006
- [4] Leslie, William C. *Physical Metallurgy of Steel*. McGraw-Hill International Book Company.1982.
- [5] ASM Metal Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. Electronic File ASM International. 2000.
- [6] Liu, yanchun et al. *Effect of TMCP Parameter on the Microstructure and Properties of an Nb-Ti Microalloyed Steel*. ISIJ International. 2005
- [7] Yoshie, Atsuhiko. *Modelling of Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Steel Plates Produced by TMCP*. ISIJ International. 1992.
- [8] Zhao, Ming-Chun. *The Effect of Thermo-mechanical Control Process on Microstructures and Mechanical properties of a Commercial Pipeline Steel*. Elsevier. 2001
- [9] Imai, Shiro. *General Properties of TMCP Steels. Plate Technical Dept., Nippon Steel Corporation*. Tokyo, Japan.. The International Society of Offshore and Polar Engineers. 2002.
- [10] Iswanto. *Pengaruh Waktu Tahan dan Temperatur Austenisasi Terhadap Perubahan Ukuran Butir dan Nilai Kekerasan Baja HSLA ASTM A 572 gr 50*. Skripsi S1 Reguler. Departemen Metalurgi dan Material FT UI. 2011
- [11] L. Bramfitt & Arlan O. Bescoter. *Metallographer's Guide. Practices and Procedures for Irons and Steels*. ASM International 2002.

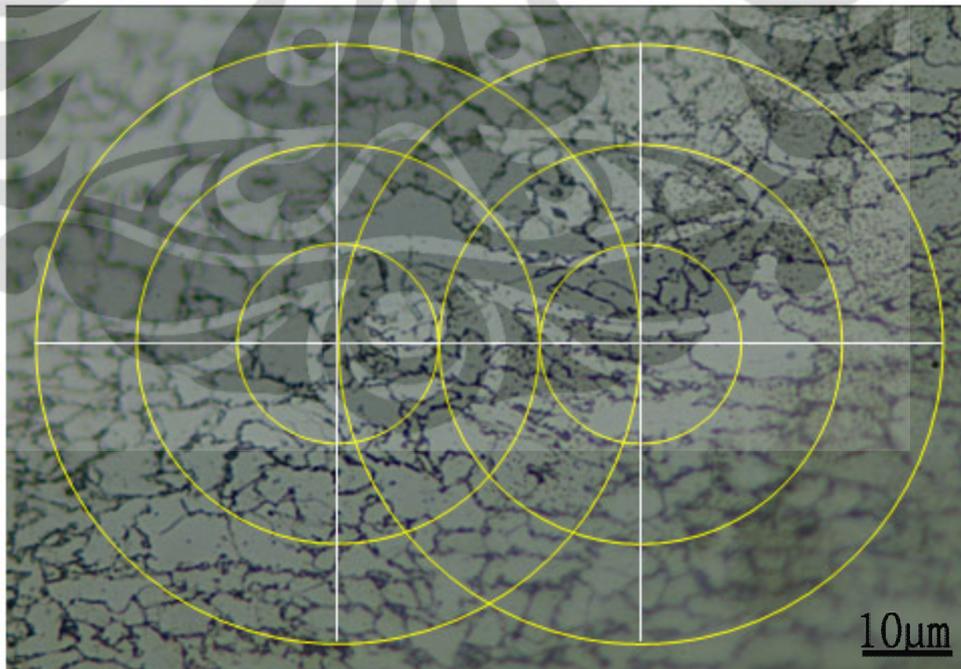
- [12] Xiao, Furen et al. *Challenge of mechanical properties of an acicular ferrite pipeline steel*. Elsevier. 2006
- [13] Xiao, Furen et al. *Acicular ferritic microstructure of a low-carbon Mn–Mo–Nb microalloyed pipeline steel*. Elsevier. 2004
- [14] <http://www.chapelsteel.com/A572.html> diakses pada 21 april 2011 pukul 20.23 WIB.
- [15] Mirzakhani, Bahman et al. *Investigation of Dynamic and Static Recrystallization Behaviour During Thermo-mechanical Processing in a API-X70 Microalloyed Steel*. ASM International. 2008.
- [16] Biglou, Jajal dan Lenard, John G., *A Study of Dynamic Recrystallization During Hot Rolling of Microalloyed Steels*. University of Waterloo. Canada, 1996.
- [17] Liang Yun. *Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Nb–Ti Microalloyed Pipeline Steel*. Journal of Iron and Steel Research, International. Sciences Direct. 2011
- [18] Dreyer, C.E.,. *Formability of a more randomly textured magnesium alloy sheet: Application of an improved warm sheet formability test*. Journal of Materials Processing Technology Elsevier. 2010.
- [19] Kilfoil, L. J., Tesis: *In-Plane Plane Strain Testing To Evaluate Formability of Sheet Steels Used in Tubular Products, Ontario, Canada, Queen's University*, September 2007.
- [20] Saptono, Rahmat. *Diktat Kuliah Pertama Pembentukan Logam*. Universitas Indonesia 2005.
- [21] ASM Metal Handbook Volume 14: Metal Working. Electronic File. ASM International. 2000.
- [22] ASM Metal Handbool Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation. Electronic File ASM International. 2000.
- [23] Dieter, George. *Mechanical Metallurgy*. Third Edition. McGraw Hill Book Company. 1988.
- [24] Holmberg, Stefan et al. *Evaluation of sheet metal formability by tensile tests*. Department of Structural Mechanics, Chalmers University of

- Technology, Sweden.. Journal of Materials Processing Technology* 145 (2004) 72–83
- [25] Dournaux, J.L. et al. *Full-field measurement technique and its application to the analysis of materials behaviour under plane strain mode. Materials Science and Engineering A* 500. Elsevier. 2009.
- [26] An, Y.G. et al. *A novel and simple method for the measurement of plane strain work hardening. Corus Research, Development & Technology, The Netherlands. Journal of Materials Processing Technology* 155–156 1616–1622. 2004.
- [27] Hendero Pramono, Bagus. *Pengaruh Bentuk Spesimen terhadap Pembentukan Mekanisme Plane Strain pada Uji Tarik Baja C-Mn SS400 Lembaran*. Skripsi S1 Reguler Teknik Metalurgi & Material FT UI. 2010
- [28] Iguchi, Takaaki. *Ductile Forming Limit Stress in Sheet Forming Processes with Nonlinear Strain Path Involving Out-of-plane Forming. Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, Japan*. 2007.
- [29] Longfei, Li et al. *Dynamic Recrystallization of Ferrite in a Low-Carbon Steel*. 2006.
- [30] Liu, Dongsheng et al. *The Deformation Microstructure and Recrystallization Behavior of Warm Rolled Steel*. ISIJ International. 2002.
- [31] Murty, Narayana et al. *Dynamic recrystallization of ferrite during warm deformation of ultrafine grained ultra-low carbon steel*. Elsevier. 2005.
- [32] ASTM E112-96. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. 2003.

## Lampiran 1: Foto Mikro

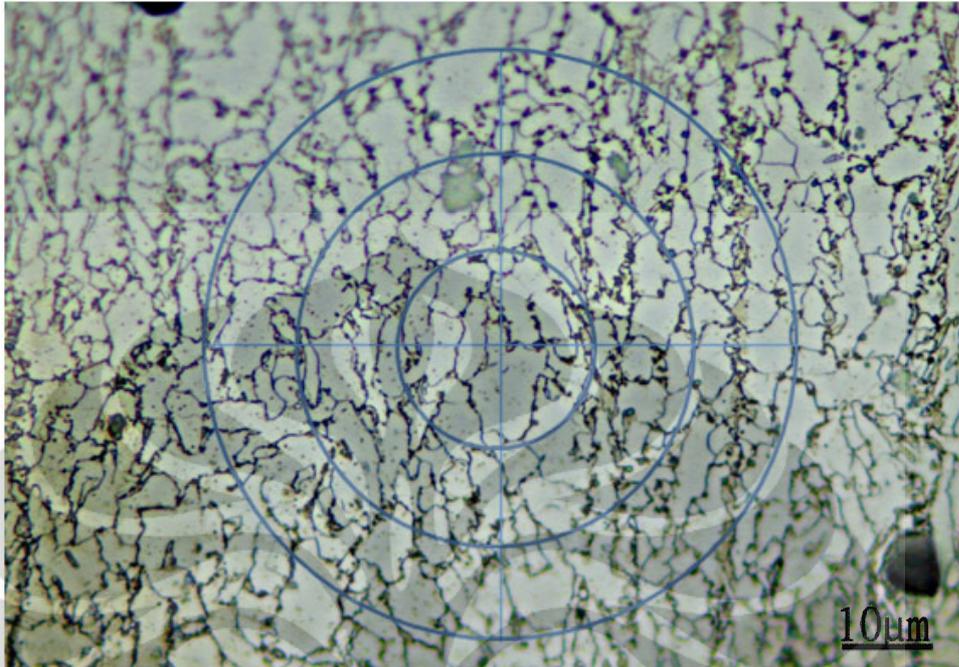


**Gambar L1.1** Mikrostruktur spesimen 2 (temperatur penarikan 600°C) 1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

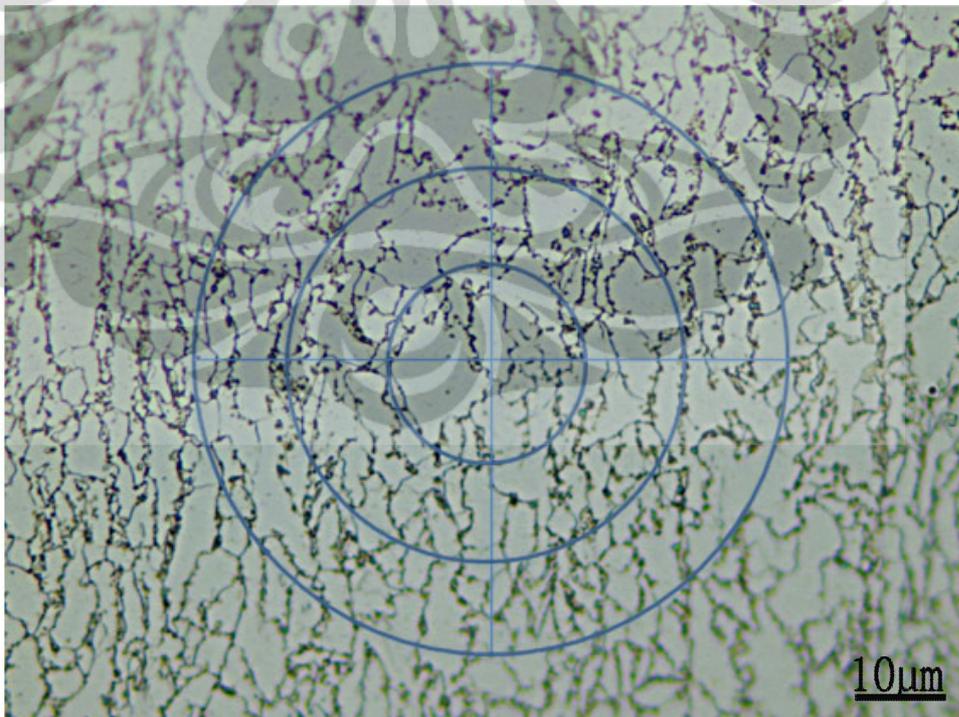


**Gambar L1.2** Mikrostruktur spesimen 2 (temperatur penarikan 600°C) 1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

(lanjutan)

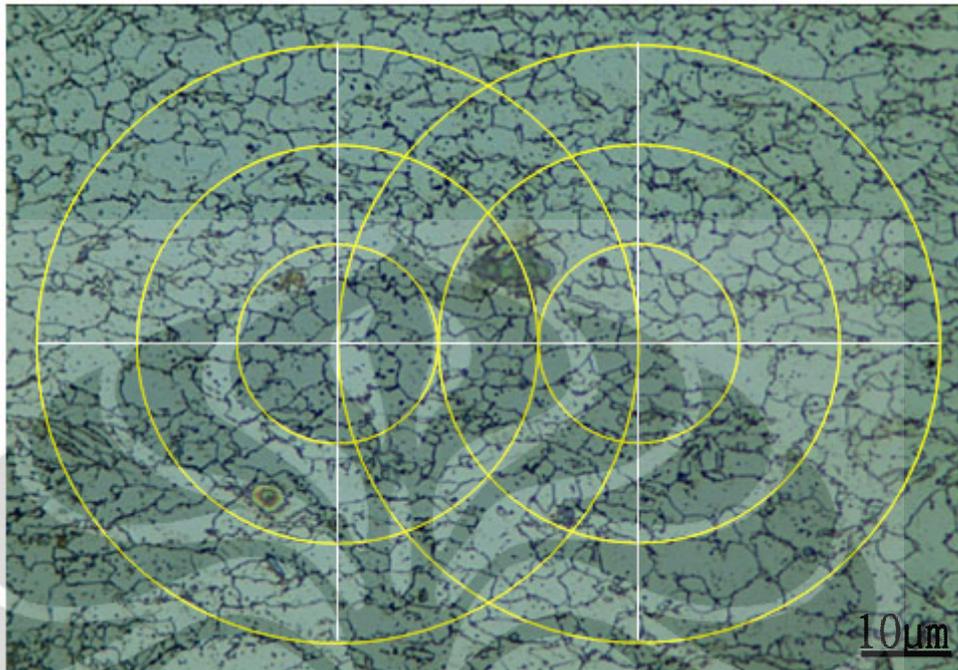


**Gambar L3.2** Mikrostruktur spesimen 2 (temperatur penarikan 600°C) 1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

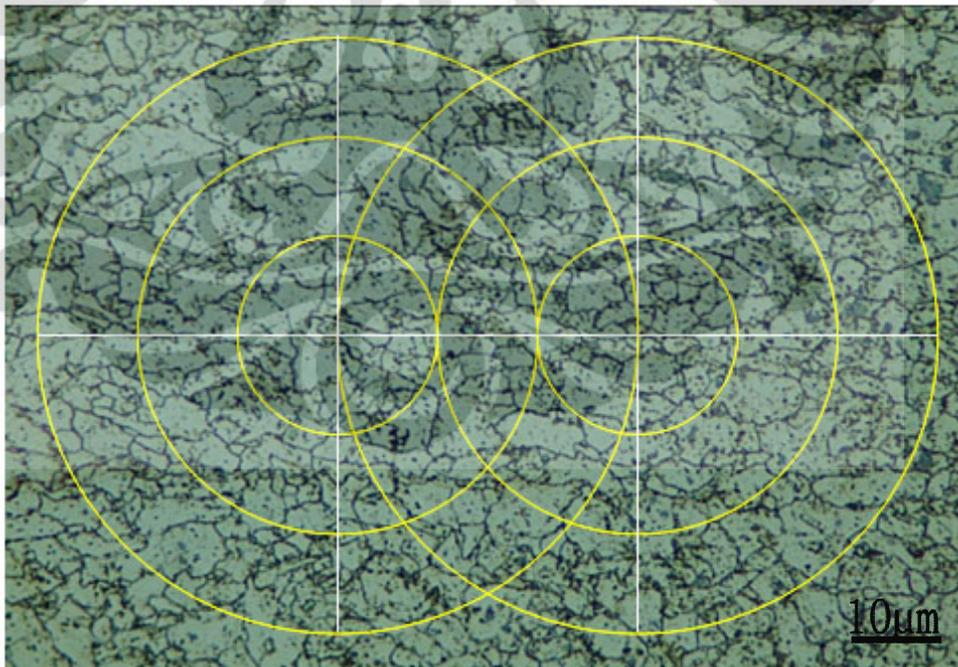


**Gambar L1.3** Mikrostruktur spesimen 2 (temperatur penarikan 600°C) 1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

(lanjutan)

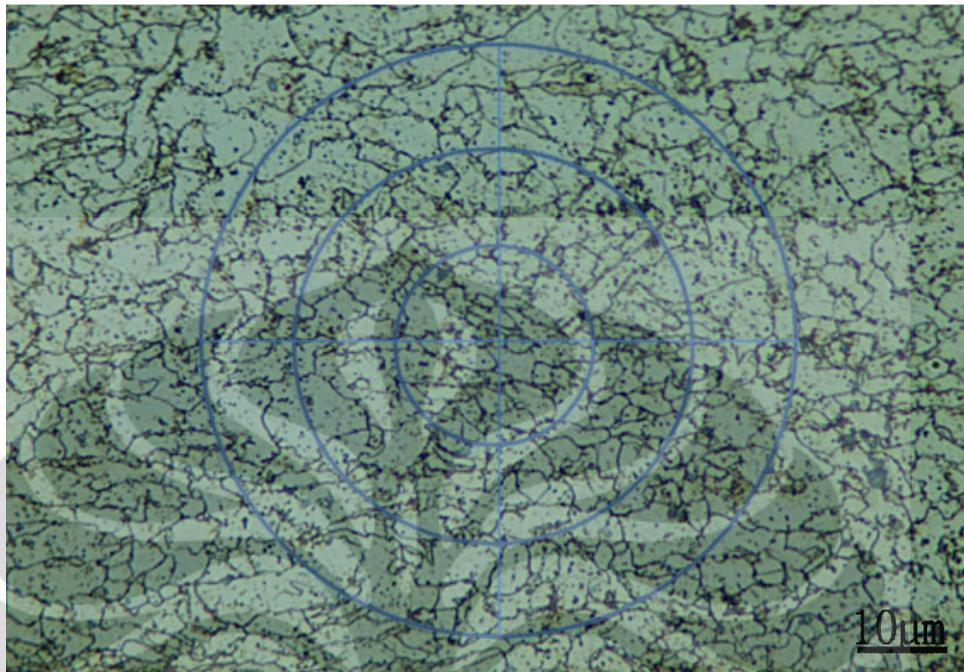


**Gambar L1.5** Mikrostruktur spesimen 3 (temperatur penarikan 650°C)1000X. Etsa Nital 2% yang diikuti dengan *Marshall's reagent*.

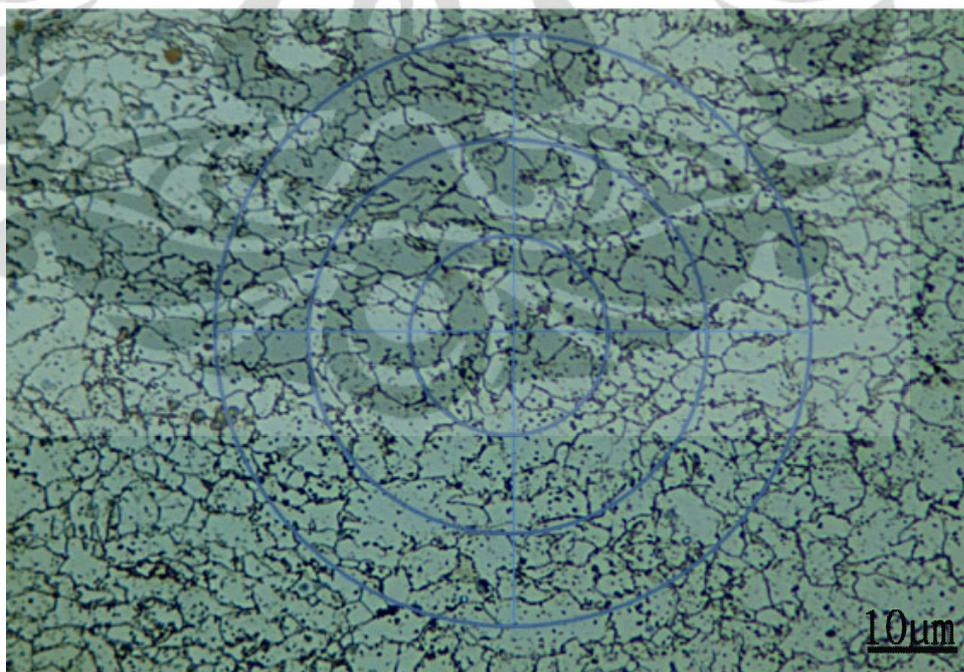


**Gambar L1.6** Mikrostruktur spesimen 3 (temperatur penarikan 650°C)1000X. Etsa Nital 2% yang diikuti dengan *Marshall's reagent*.

(lanjutan)



**Gambar L1.7** Mikrostruktur spesimen 3 (temperatur penarikan 650°C)1000X. Etsa Nital 2% yang diikuti dengan *Marshall's reagent*.

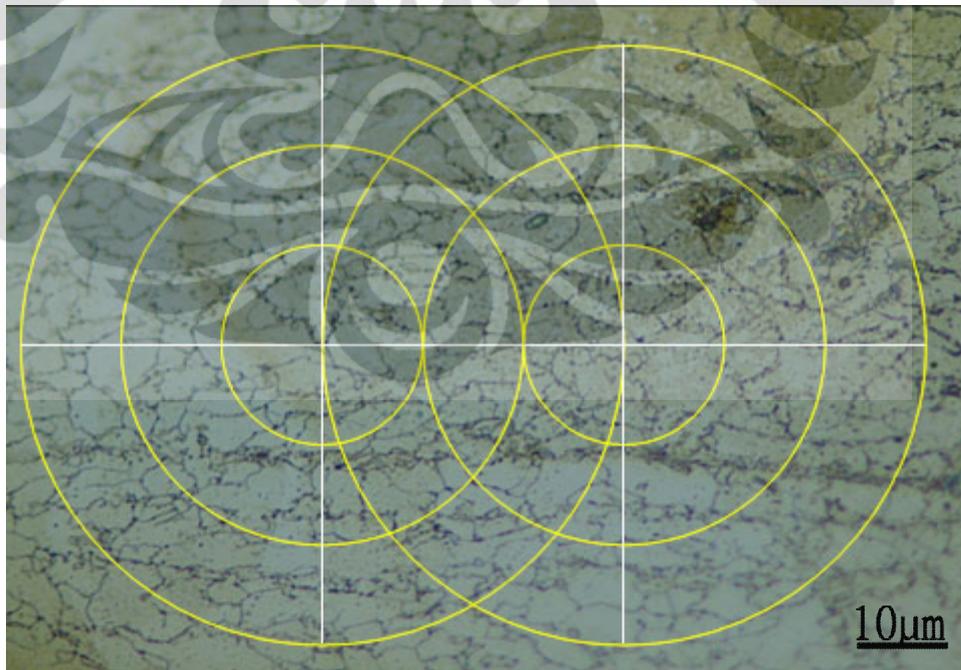


**Gambar L1.8** Mikrostruktur spesimen 3 (temperatur penarikan 650°C)1000X. Etsa Nital 2% yang diikuti dengan *Marshall's reagent*.

(lanjutan)

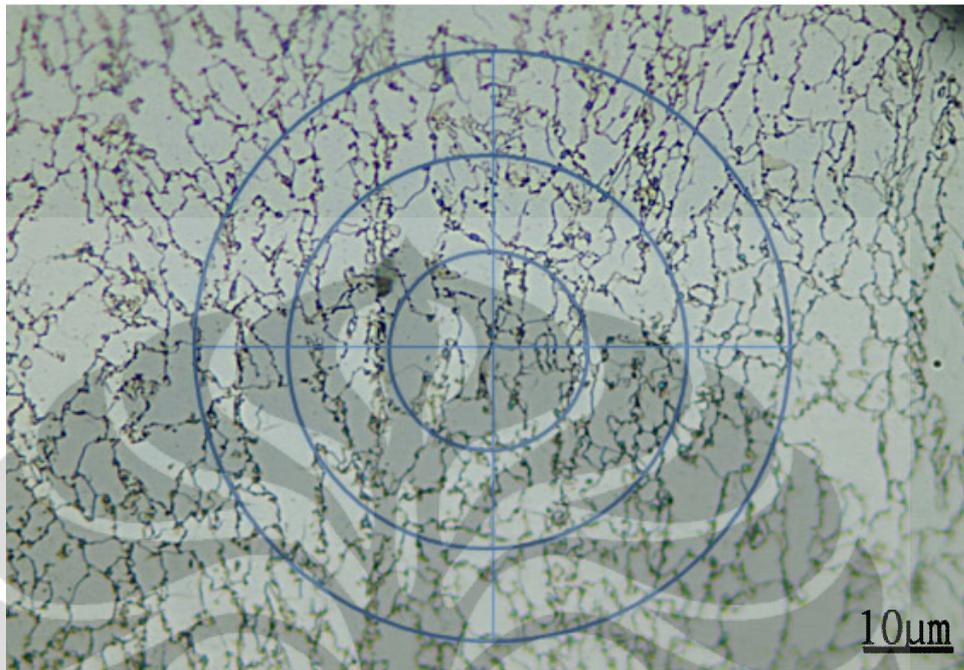


**Gambar L1.9** Mikrostruktur spesimen 4 (temperatur penarikan 700°C) 1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.



**Gambar L1.10** Mikrostruktur spesimen 4 (temperatur penarikan 600°C) 1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

(lanjutan)



**Gambar L1.11** Mikrostruktur spesimen 4 (temperatur penarikan 600°C) 1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

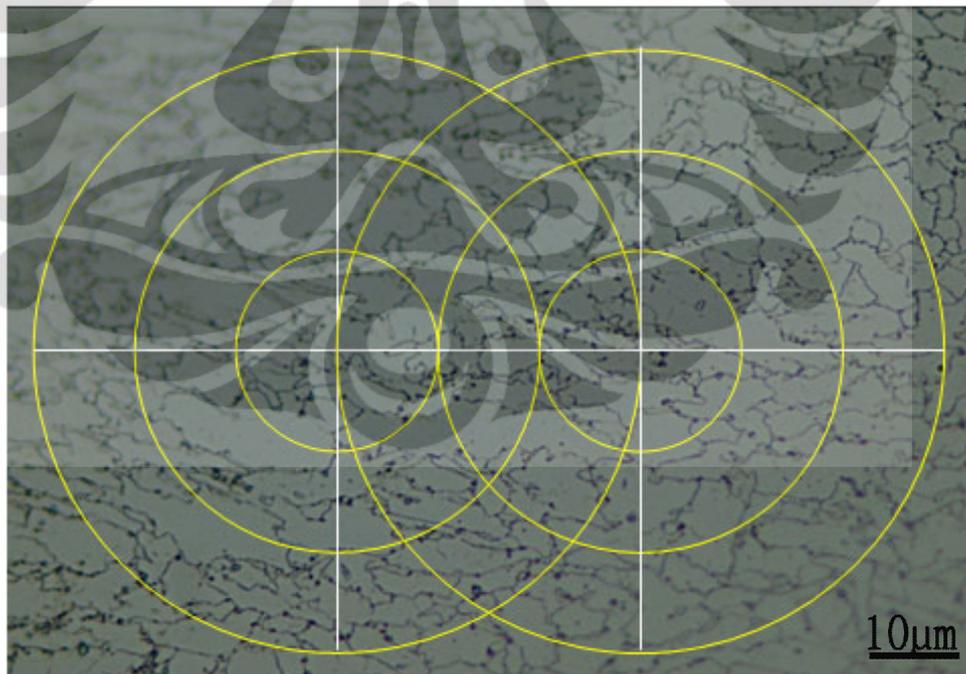


**Gambar L1.12** Mikrostruktur spesimen 4 (temperatur penarikan 600°C) 1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

(lanjutan)

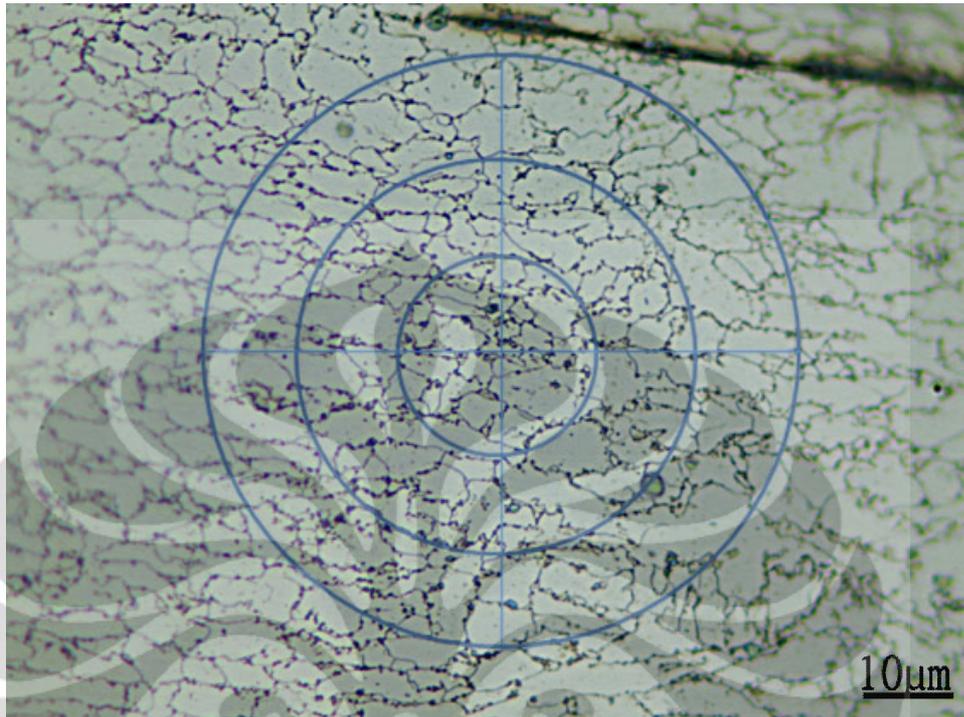


**Gambar L1.13** Mikrostruktur spesimen 5 (temperatur penarikan 750°C)1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

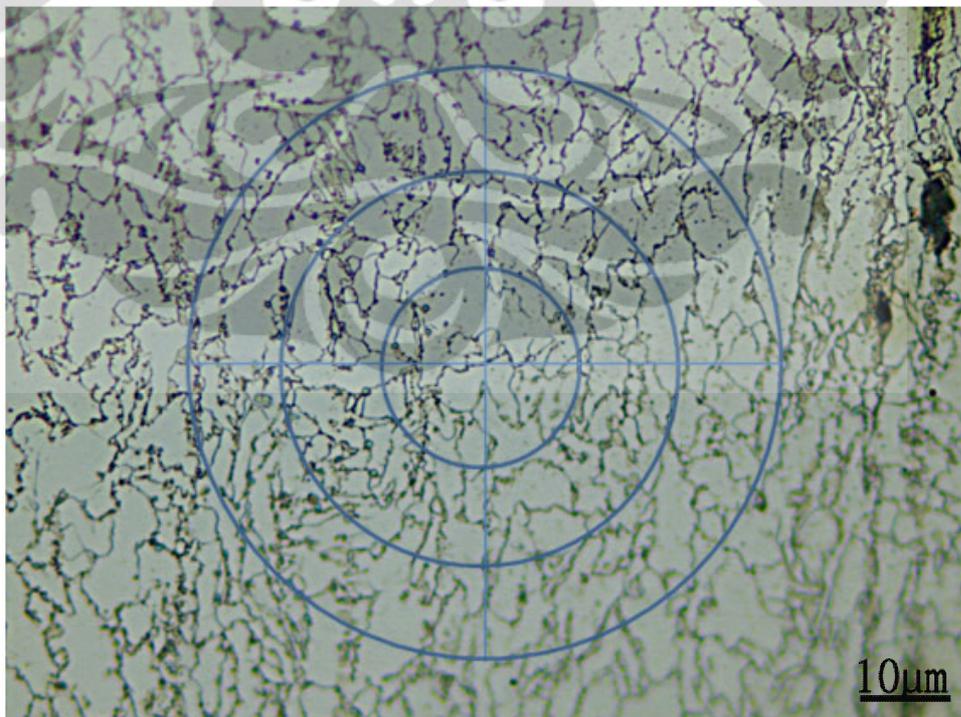


**Gambar L1.14** Mikrostruktur spesimen 5 (temperatur penarikan 750°C)1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

(lanjutan)

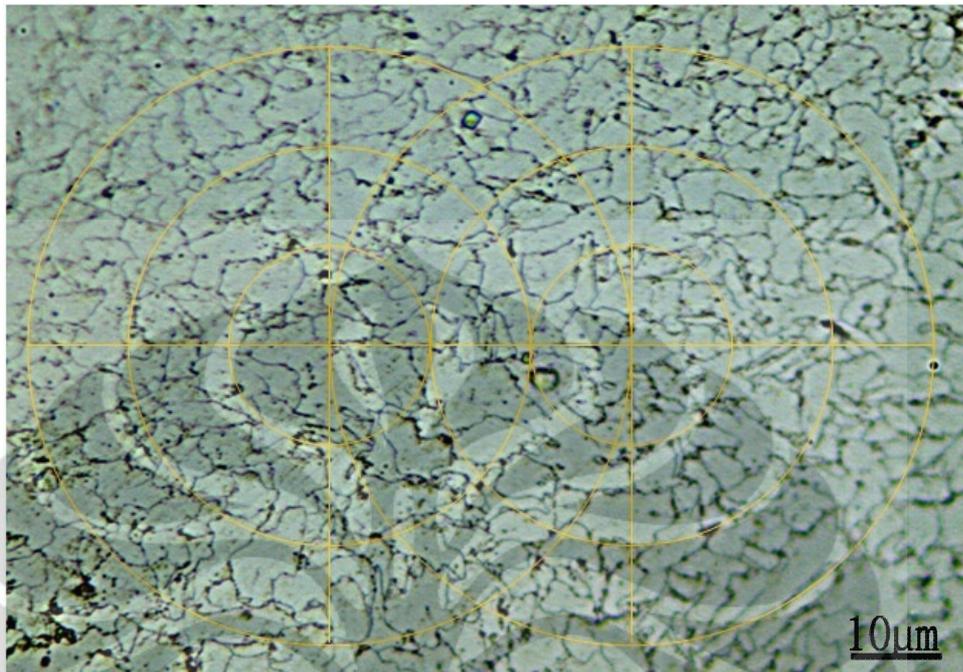


**Gambar L1.15** Mikrostruktur spesimen 5 (temperatur penarikan 750°C) 1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

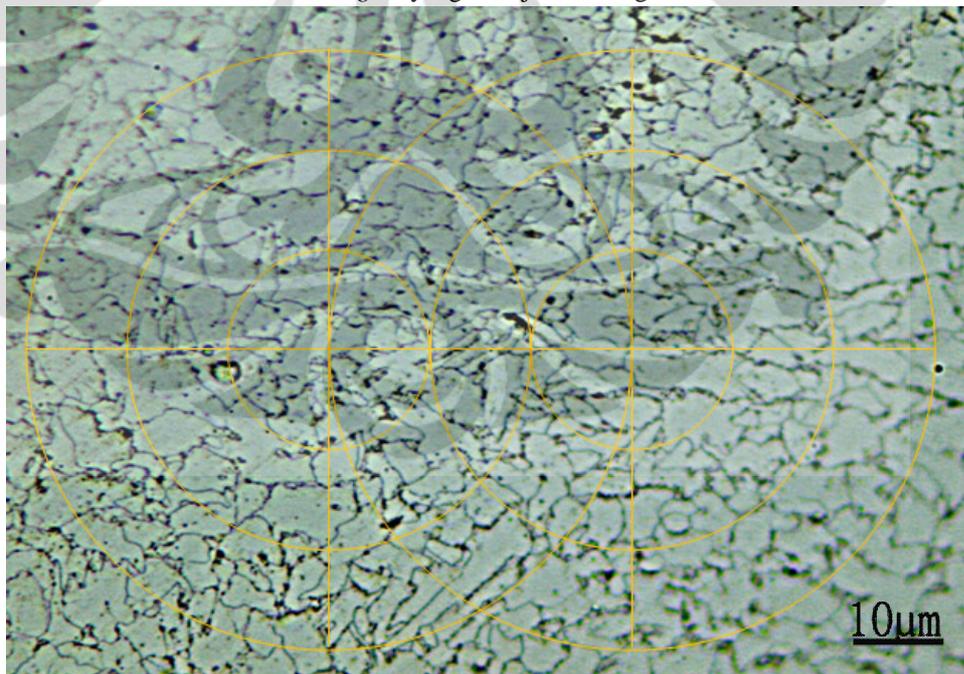


**Gambar L1.16** Mikrostruktur spesimen 5 (temperatur penarikan 750°C) 1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

(lanjutan)

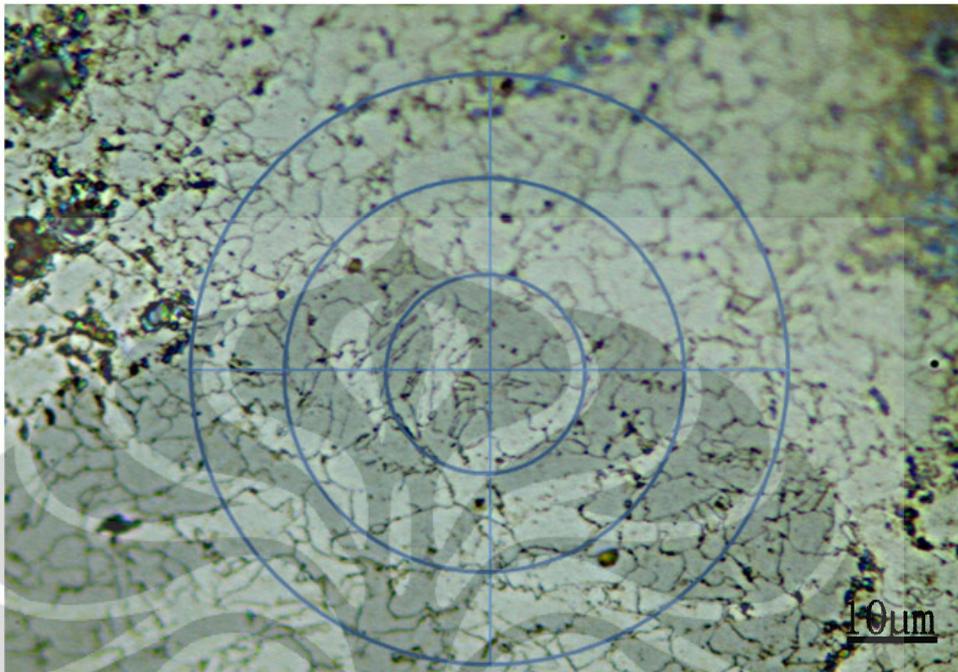


**Gambar L1.17** Mikrostruktur spesimen 1 (tanpa pelakuan deformasi pana) 1000X. Etsa *Modified Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.



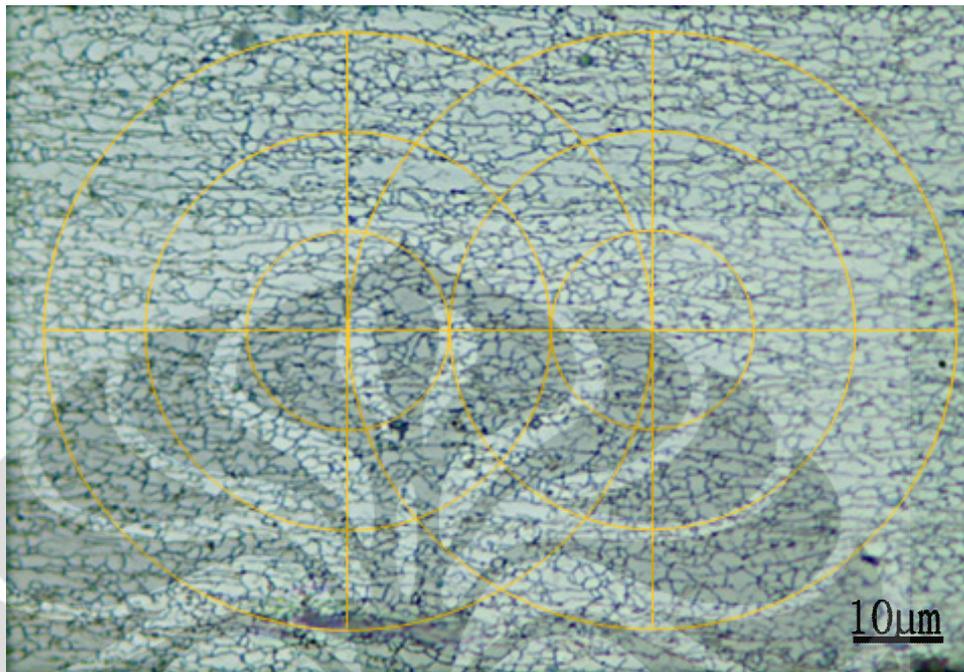
**Gambar L1.18** Mikrostruktur spesimen 1 (tanpa perlakuan deformasi panas) 1000X. Etsa *Modified Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

(lanjutan)

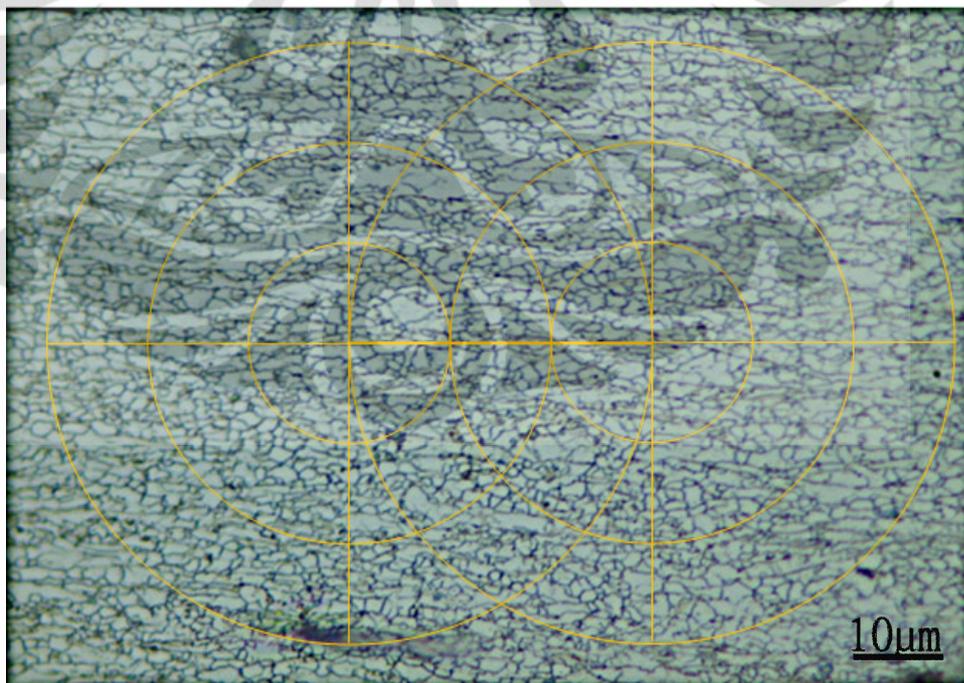


**Gambar L1.19** Mikrostruktur spesimen 1 (tanpa perlakuan deformasi panas) 1000X. Etsa *Modified Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

(lanjutan)



**Gambar L1.20** Mikrostruktur spesimen 8 (temperatur penarikan 800°C)1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.



**Gambar L1.21** Mikrostruktur spesimen 8 (temperatur penarikan 800°C)1000X. Etsa *Marshall's reagent* yang dilanjutkan dengan nital 2%.

## Lampiran 2: Perhitungan Butir

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

$$\bar{N}_L = \frac{N_i}{L/M}$$

$N_L$  = number of intercepts per unit length of test line

$N_i$  = number of intercepts with a test line

$L$  = 500mm (length of a test line)

$M$  = Perbesaran 1000X

Nilai  $N_L$  kemudian dimasukkan dalam persamaan:

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

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

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

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

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

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

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

**Tabel L2.1** Data Jumlah Perpotongan Intercept Line dengan Batas Butir

Sampel	$T_{\text{penarikan}}$	$Ni_1$	$Ni_2$	$Ni_3$	$Ni_4$	$Ni_5$
2	600°C	97	98	95	92.5	95
3	650°C	123	120	111.5	118	120
4	700°C	101	94	99.5	100	103
5	750°C	97	99	95	94	98.5
1	-	100	95	94	93	93
9	800°C	232	240	243	237	

(lanjutan)

**Tabel L2.2** Data Nilai G

Sampel	T <sub>penarikan</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	G <sub>4</sub>	G <sub>5</sub>
2	600°C	11,911	11,941	11,851	11,774	11,851
3	650°C	12,596	12,535	12,313	12,477	12,525
4	700°C	12,028	11,821	11,985	11,999	12,0848
5	750°C	11,911	11,97	11,851	11,821	11,955
1	-	11,999	11,851	11,823	11,79	11,79
9	800°C	14,427	14,402	14,501	14,489	

**Tabel L2.3** Data Diameter Butir Rata-rata

Sampel	d <sub>average 1</sub>	d <sub>average 2</sub>	d <sub>average 3</sub>	d <sub>average 4</sub>	d <sub>average 5</sub>
2	5,79	5,724	5,922	6,091	5,922
3	4,557	4,656	5,085	4,788	4,656
4	5,603	5,988	5,627	5,597	5,501
5	5,79	5,66	5,922	5,988	5,93
1	5,597	5,922	5,988	6,057	6,057
9	2,372	2,772	2,309	2,311	-

**Tabel L2.4** Diameter Butir

Sampel	Diameter Butir Rata-rata
2	5,988 ± 0,141
3	4,748 ± 0,205
4	5,663 ± 0,187
5	5,810 ± 0,142
1	5,924 ± 0,191
9	2,3485

Data kemudian dimasukkan dalam tabel 4 atau gambar 6 pada ASTM E 112-96 sehingga didapatkan ukuran butir sebagai seperti Tabel L3.1 berikut:

(lanjutan)

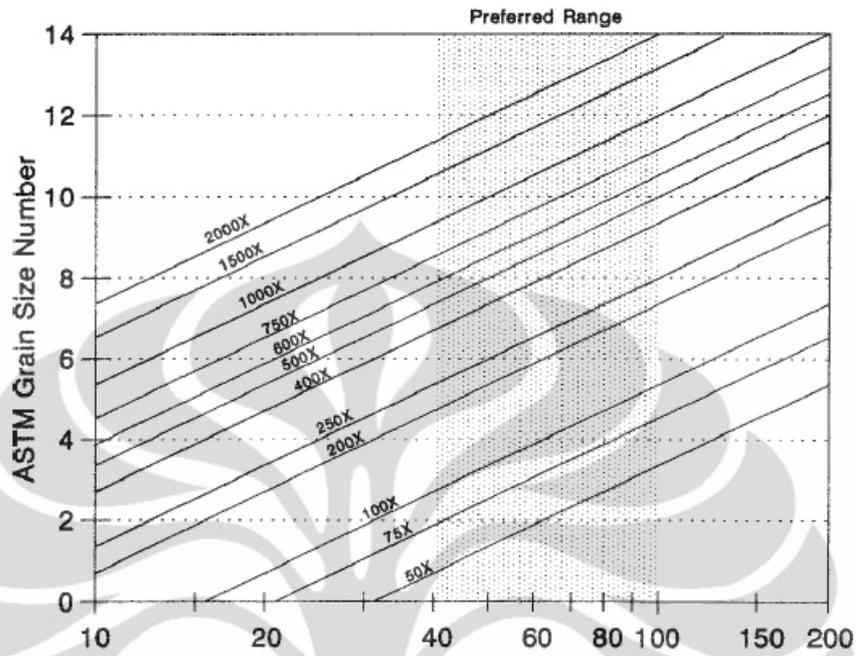
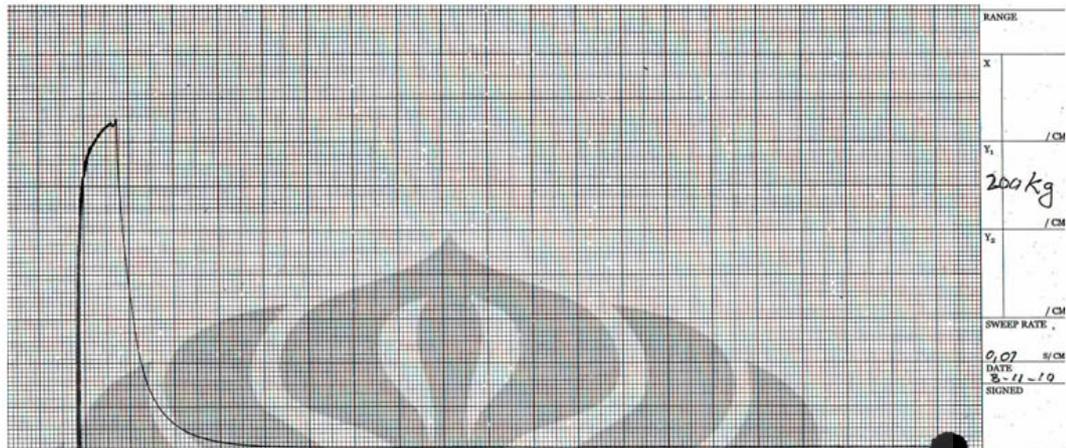


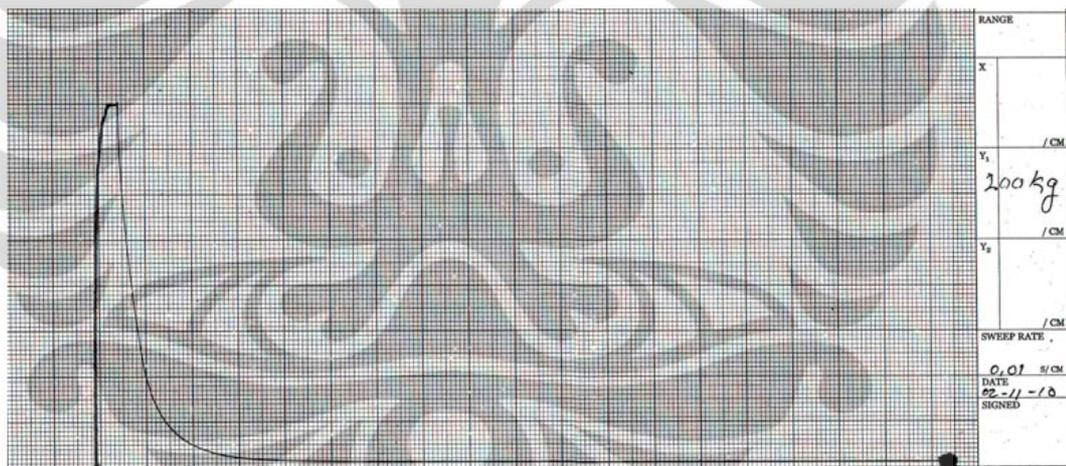
TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		A Average Grain Area		$\bar{D}$ Average Diameter		$\bar{T}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$ No./mm
	No./in. <sup>2</sup> at 100X	No./mm <sup>2</sup> at 1X	mm <sup>2</sup>	μm <sup>2</sup>	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

### Lampiran 3. Hasil grafik uji tarik

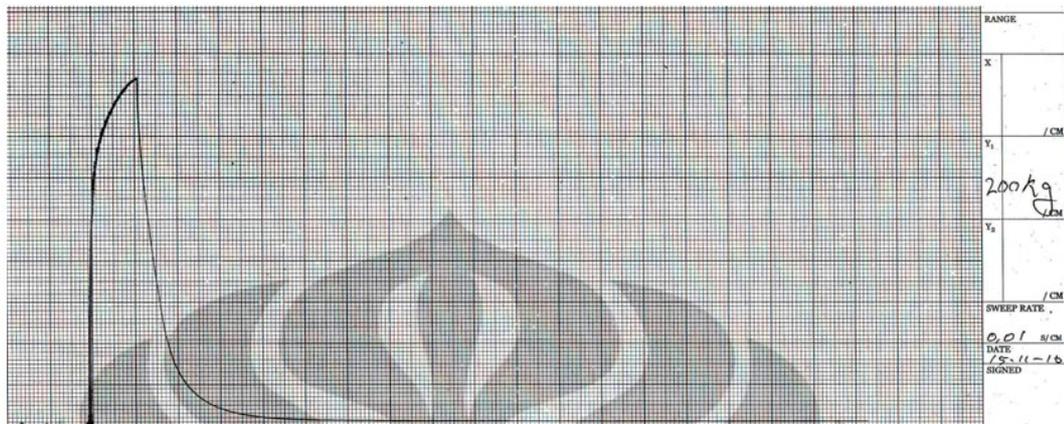


**Gambar L3.1** Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen 2 Temperatur Reheating 750°C; Temperatur Uji Tarik 600°C; Laju regangan 0,01 s/cm.



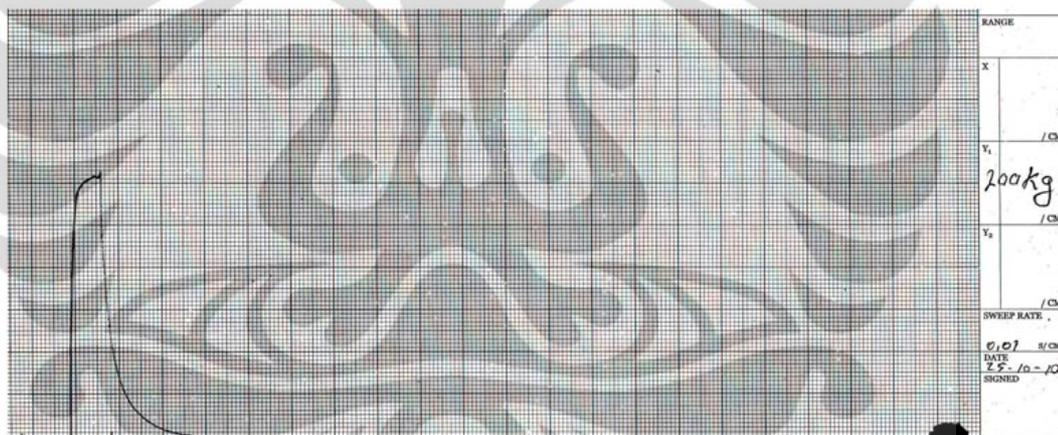
**Gambar L3.2** Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen 3 Temperatur Reheating 750°C, Temperatur Tarik 690°C, Laju regangan 0,01 s/cm.

(lanjutan)



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS  
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

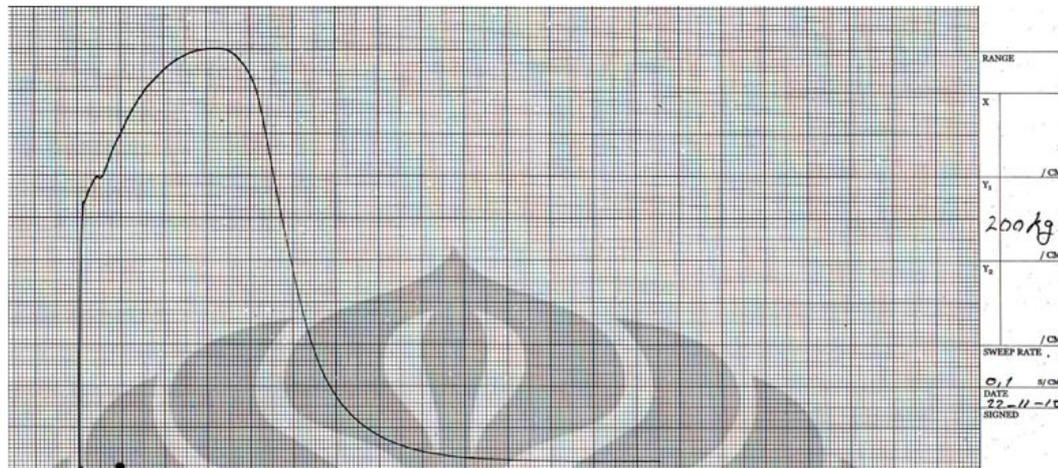
**Gambar L3.3** Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen 4 Temperatur *Reheating* 820°C; Temperatur Tarik 750°C, Laju regangan 0,01 s/cm.



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS  
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

**Gambar L3.4** Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen 5 Temperatur *Reheating* 820°C, Temperatur Tarik 750°C, Laju regangan 0,01 s/cm.

(lanjutan)



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS  
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

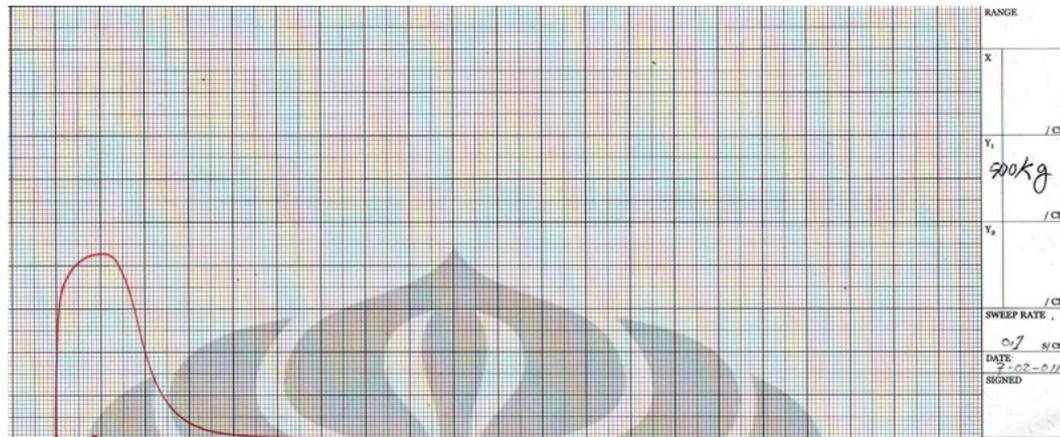
**Gambar L3.5** Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen 6 Temperatur *reheating* 820°C, Temperatur Tarik 700°C, Laju Regangan 0,1 s/cm.



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS  
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

**Gambar L3.6** Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen 7 Temperatur *Reheating* 820°C, Temperatur Tarik 750°C, Laju regangan 0,1 s/cm.

(lanjutan)



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS  
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

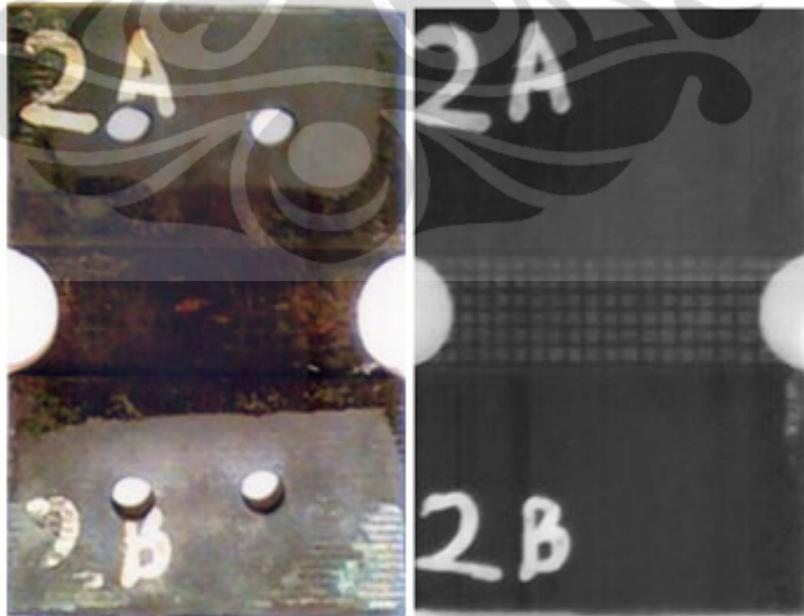
**Gambar L3.7** Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen 8 Temperatur *Reheating* 905°C, Temperatur Tarik 800°C, Laju Regangan 0,1 s/cm.

**Lampiran 4: Gambar Penelitian**

**Gambar L4.1** Spesimen yang sudah dipasangkan pada Jig.



**Gambar L4.2** Proses Uji Tarik Panas yang sedang berlangsung.



**Gambar L4.3** Kondisi spesimen 2 sesudah dan sebelum pengujian tarik panas.

(lanjutan)

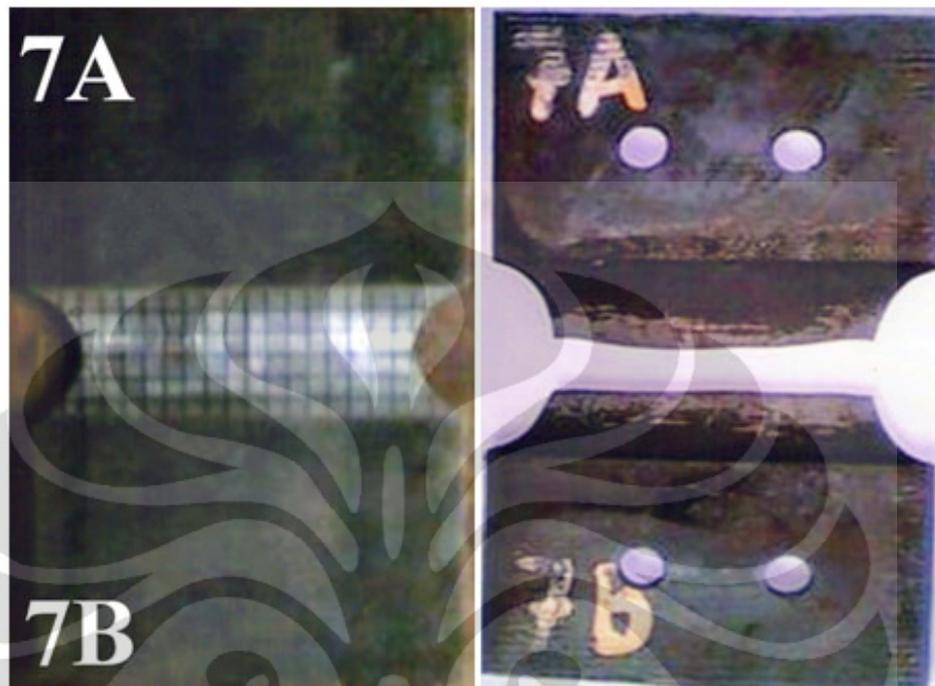


**Gambar L4.4** Kondisi spesimen 3 sebelum dan sesudah pengujian tarik panas.

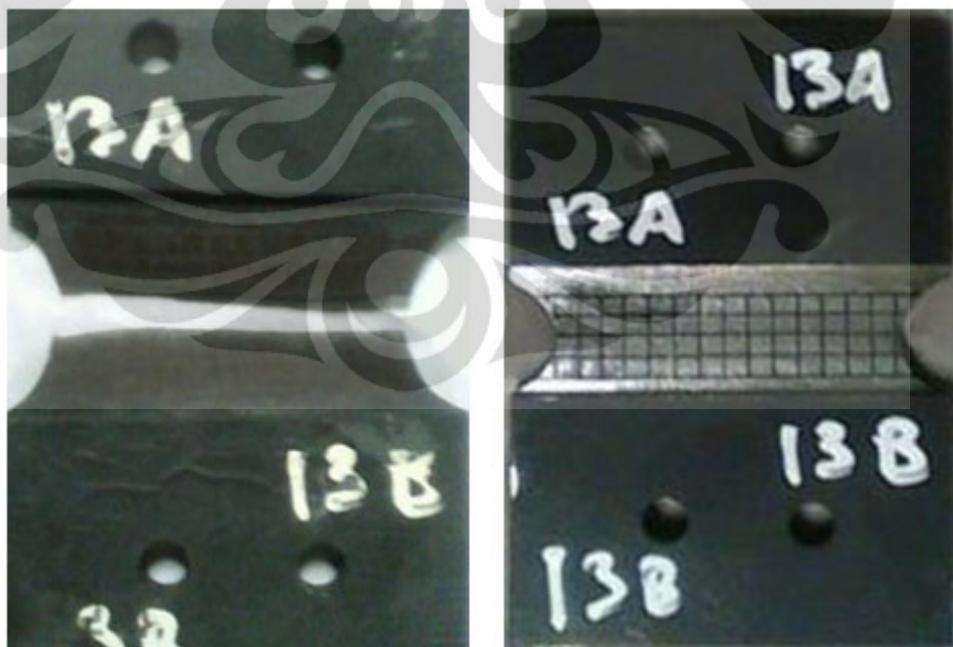


**Gambar L4.5** Kondisi spesimen 5 sebelum dan sesudah pengujian tarik panas.

(lanjutan)



**Gambar L4.6** Kondisi spesimen 7 sebelum dan sesudah pengujian tarik panas.



**Gambar L4.7** Kondisi spesimen 8 sesudah dan sebelum pengujian tarik panas.

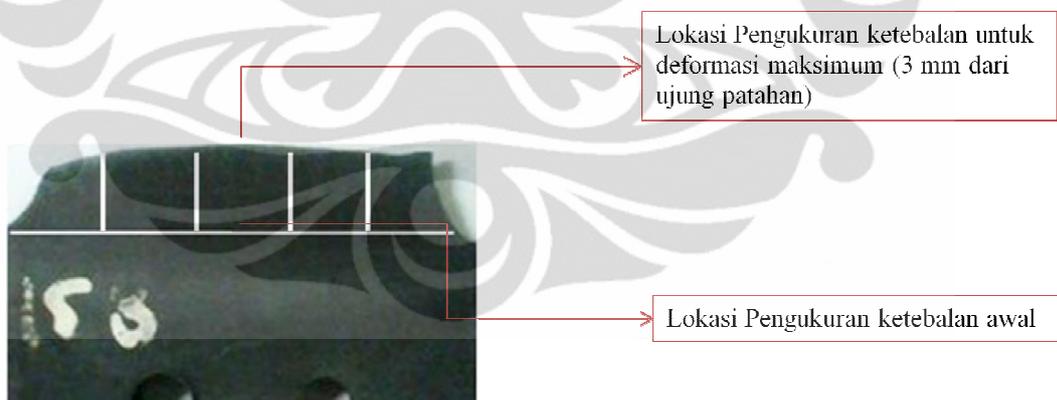
(lanjutan)



**Gambar L4.8** Lokasi pemotongan spesimen (uji tarik tidak sampai putus) di-mounting.

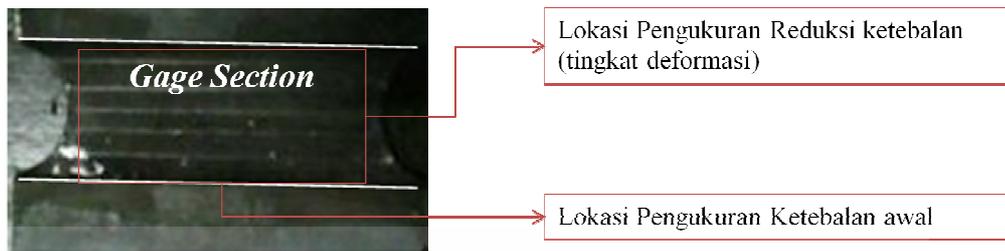


**Gambar L4.9** Lokasi pemotongan spesimen (uji tarik sampai putus) di-mounting.

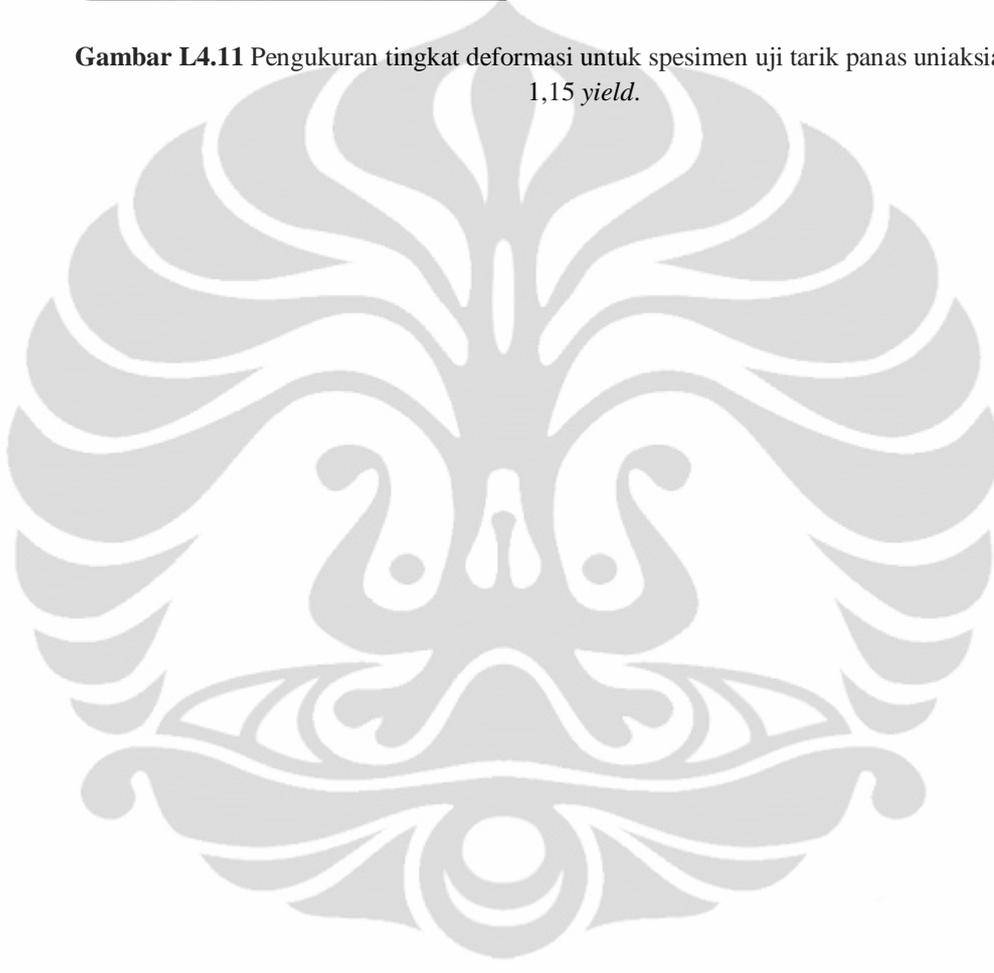


**Gambar L4.10** Teknik Pengukuran tingkat deformasi maksimum untuk spesimen uji tarik panas uniaksial sampai titik kegagalan.

(lanjutan)



**Gambar L4.11** Pengukuran tingkat deformasi untuk spesimen uji tarik panas uniaksial sampai 1,15 *yield*.



### Lampiran 5: Data Ketebalan Spesimen

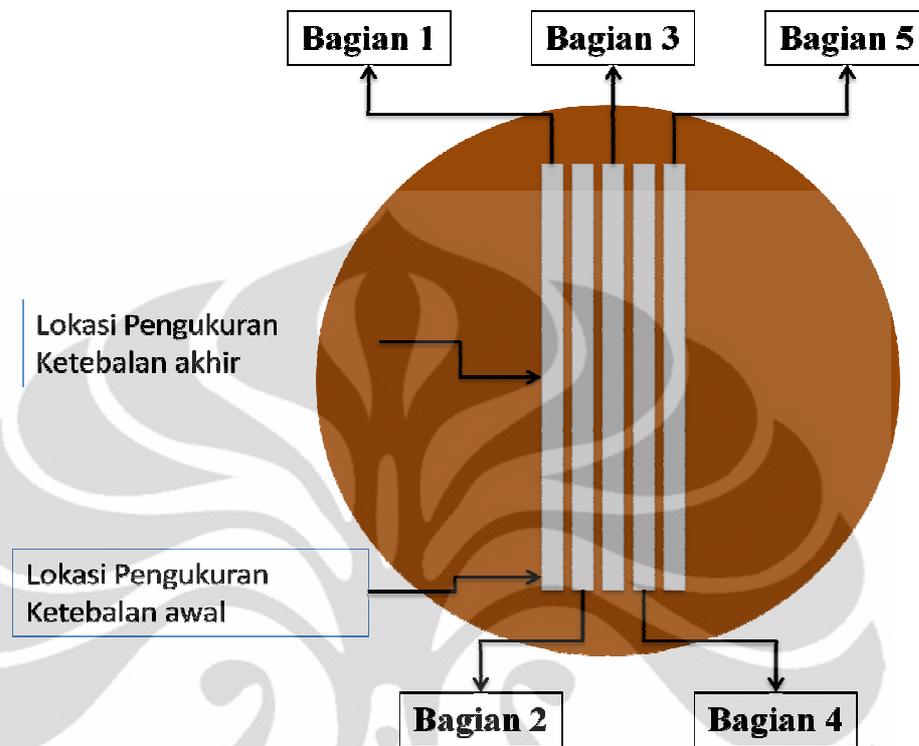
Uji tarik sampai titik 1,15 *yield*. Pengukuran ketebalan dilakukan pada lima titik berbeda *gage width* dengan measuring microscope. Pengukuran tebal awal dilakukan pada daerah perbatasan *under grip area* dan *gage section*. Sedangkan, untuk pengukuran reduksi ketebalan maksimum dilakukan pada daerah di sekitar dibagian tengah *gage length*. *Gage section* dipotong menjadi 5 bagian searah *gage length*.

<b>Spesimen 2</b>	Bagian 1	Bagian2	Bagian 3	Bagian 4	Bagian 5
Tebal awal (mm)	0.823	1.126	1.462	1.704	1.748
Tebal akhir (mm)	0.776	0.8	1.430	1.505	1.673
<b>Spesimen 3</b>	Bagian 1	Bagian2	Bagian 3	Bagian 4	Bagian 5
Tebal awal (mm)	1.801	1.778	1.727	1.732	1.798
Tebal akhir (mm)	1.608	1.509	1.457	1.502	1.542
<b>Spesimen 4</b>	Bagian 1	Bagian2	Bagian 3	Bagian 4	Bagian 5
Tebal awal (mm)	1.802	1.657	1.678	1.585	1.608
Tebal akhir (mm)	1.689	1.552	1.647	1.542	1.516
<b>Spesimen 5</b>	Bagian 1	Bagian2	Bagian 3	Bagian 4	Bagian 5
Tebal awal (mm)	1.904	1.919	1.911	1.920	1.915
Tebal akhir (mm)	1.889	1.897	1.789	1.846	1.876

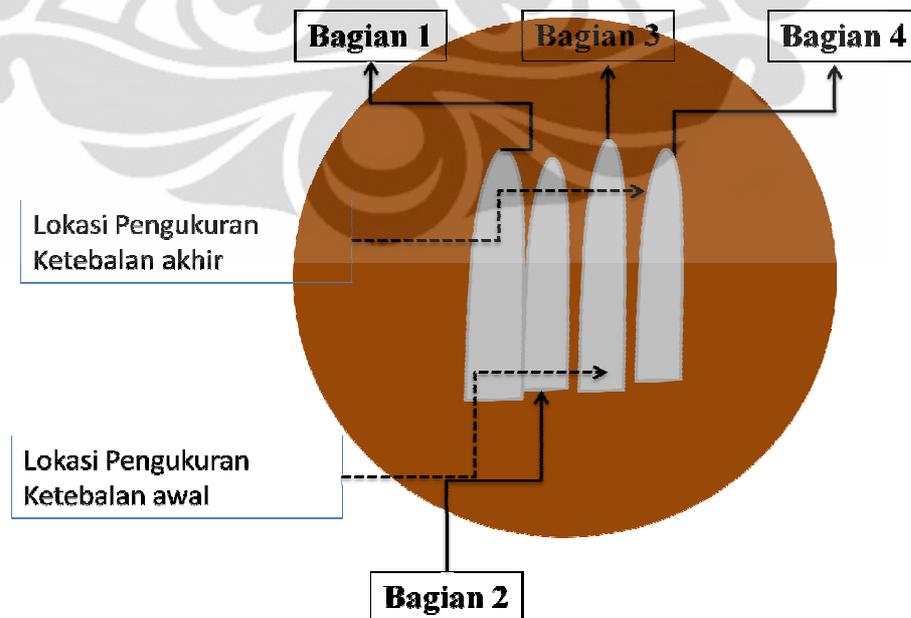
Uji tarik sampai titik 1,15 *yield*. Pengukuran ketebalan dilakukan pada lima titik berbeda *gage width* dengan *measuring microscope*. Pengukuran tebal awal dilakukan pada daerah perbatasan *under grip area* dan *gage section*. Sedangkan, untuk pengukuran reduksi ketebalan maksimum dilakukan pada daerah di sekitar perpatahan.

<b>Spesimen 7</b>	Bagian 1	Bagian2	Bagian 3	Bagian 4
Tebal awal	1.565	1.551	1.573	1.561
Tebal akhir	0.916	0.886	0.871	0.901
<b>Spesimen 8</b>	Bagian 1	Bagian2	Bagian 3	Bagian 4
Tebal awal	2.446	2.456	2.398	2.414
Tebal akhir	1.657	1.578	1.686	1.677

(lanjutan)



**Gambar L5.1** Lokasi Pengukuran Untuk Mendapatkan Tingkat Deformasi Pada Sampel *Mounting* Uji Tarik sampai 1,15 *Yield*.



**Gambar L5.2** Lokasi Pengukuran Untuk Mendapatkan Tingkat Deformasi Pada Sampel *Mounting* Uji Tarik sampai titik kegagalan.

**Lampiran 6: Nilai Regangan Mayor dan minor spesimen 3 dan 4**  
**Hasil Penelitian Eddy Sirajd dkk.**

Pada titik 1,15 *yield*, dihitung nilai regangan *mayor* dan *minor* pada setiap *grid* yang dibuat pada setiap spesimen untuk melihat mekanisme deformasi regangan bidang. Nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.5 hingga Tabel 2.8.

**Tabel 2.5**  $\epsilon$  Minor (Horizontal) spesimen 3 pada 1,15 *yield*<sup>[24]</sup>.

BARIS	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$	$\epsilon_7$	$\epsilon_8$	$\epsilon_9$	$\epsilon_{10}$	$\epsilon_{11}$	$\epsilon_{12}$	$\epsilon_{13}$	$\epsilon_{14}$	$\epsilon_{15}$	$\epsilon_{\text{average}}$
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\epsilon_{\text{average}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

**Tabel 2.6**  $\epsilon$  Mayor (Vertikal) spesimen 3 pada 1,15 *yield*<sup>[24]</sup>.

KOLOM	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$	$\epsilon_7$	$\epsilon_8$	$\epsilon_9$	$\epsilon_{10}$	$\epsilon_{11}$	$\epsilon_{12}$	$\epsilon_{13}$	$\epsilon_{14}$	$\epsilon_{15}$	$\epsilon_{16}$	$\epsilon_{\text{average}}$
1	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011
2	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006
3	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008
4	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011
5	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007
$\epsilon_{\text{total}}$	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043	-0.043

**Tabel 2.7**  $\epsilon$  Minor (Horizontal) spesimen 4 pada 1,15 *yield*<sup>[24]</sup>.

BARIS	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$	$\epsilon_7$	$\epsilon_8$	$\epsilon_9$	$\epsilon_{10}$	$\epsilon_{11}$	$\epsilon_{12}$	$\epsilon_{13}$	$\epsilon_{14}$	$\epsilon_{15}$	$\epsilon_{\text{average}}$
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\epsilon_{\text{average}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

**Tabel 2.8**  $\epsilon$  Mayor (Vertikal) spesimen 4 pada 1,15 *yield*<sup>[24]</sup>.

KOLOM	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$	$\epsilon_7$	$\epsilon_8$	$\epsilon_9$	$\epsilon_{10}$	$\epsilon_{11}$	$\epsilon_{12}$	$\epsilon_{13}$	$\epsilon_{14}$	$\epsilon_{15}$	$\epsilon_{16}$	$\epsilon_{17}$	$\epsilon_{\text{average}}$
1	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006
2	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021
3	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024
4	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021
5	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003
$\epsilon_{\text{total}}$	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075

(lanjutan)

Dengan didapatkan nilai regangan mayor dan minor diatas, maka didapatkan nilai FLD dari setiap *grid*. Nilai FLD ( $\beta$ ) bernilai setara dengan nol jika mekanisme deformasi regangan bidang terjadi pada suatu material. Nilai FLD dari setiap *grid* ini bisa dilihat pada Tabel 2.9 hingga Tabel 2.11.

**Tabel 2.9** Nilai FLD spesimen 3 pada saat 1,15 *yield*<sup>[24]</sup>.

Kolom / Baris	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	$\beta_{\text{avarege}}$
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\beta_{\text{avarege}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

**Tabel 2.10** Nilai FLD spesimen 4 pada saat 1,15 *yield*<sup>[24]</sup>.

Kolom / Baris	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\beta_{\text{avarege}}$
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\beta_{\text{avarege}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Dari tabel diatas, didapatkan nilai FLD yang setara dengan nol. Hal ini menunjukkan bahwa pada setiap spesimen D yang telah dimodifikasi terjadi mekanisme deformasi regangan bidang pada titik 1,15 *yield*. Begitu juga pada titik setelah 1,15 *yield* sampai UTS, diperoleh nilai FLD yang setara dengan nol. Hal ini didukung dengan tidak terbentuknya penyusutan lebar (*gage width*) pada saat posisi 1,15 *yield* sampai pada posisi UTS. Melihat nilai FLD dari material baja HSLA untuk spesimen D diatas, terlihat bahwa terjadi kondisi regangan bidang untuk bentuk spesimen dengan modifikasi dari penelitian Kil Foil. Hal ini disebabkan tidak terjadinya mulur pada jepitan dari *Jig* dengan spesimen.