

**PENGARUH REDUKSI PENEROLAN PANAS TERHADAP  
GEOMETRI DAN KEKERASAN PADA ALUMINIUM Al-Mg-Si  
HASIL *RECYCLING***

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**LUKMAN PRATAMA  
NIM. 125060200111025**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2016**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGARUH REDUKSI PENEROLAN PANAS TERHADAP GEOMETRI DAN KEKERASAN PADA ALUMINIUM Al-Mg-Si HASIL *RECYCLING*

#### SKRIPSI TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**LUKMAN PRATAMA**  
**NIM. 125060200111025**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
Pada tanggal 27 Juni 2016

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT. Met

Purnami, ST., MT.

NIP. 19551117 198601 1 001

NIP. 19770707 200812 1 005

Mengetahui,

Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.

NIP. 19750802 199903 2 02

## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2013, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 22 Juni 2016

Mahasiswa,

Lukman Pratama

NIM. 125060200111025



**JUDUL SKRIPSI :**

**Pengaruh Reduksi Pengerolan Panas terhadap Geometri dan Kekerasan pada Aluminium Al-Mg-Si Hasil *Recycling***

Nama Mahasiswa : Lukman Pratama  
NIM : 125060200111025  
Program Studi : Teknik Mesin  
Minat : Produksi

**KOMISI PEMBIMBING**

Pembimbing 1 : Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met  
Pembimbing 2 : Purnami, ST., MT.,

**TIM DOSEN PENGUJI**

Dosen Penguji 1 : Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D  
Dosen Penguji 2 : Ir. Erwin Sulistyono, MT.  
Dosen Penguji 3 : Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D

Tanggal Ujian : 25 Mei 2016  
SK Penguji : 650/UN10.6/SK/2016

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan judul, “**Pengaruh Reduksi Pengerolan Panas terhadap Geometri dan Kekerasan pada Aluminium Al-Mg-Si Hasil *Recycling***” dengan baik. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Rasulullah SAW.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini dapat terselesaikan berkat bantuan, petunjuk dan bimbingan dari berbagai pihak yang telah banyak membantu proses penyelesaian tugas akhir ini, oleh karena itu tak lupa penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Eng Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng, selaku ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
2. Bapak Purnami, ST., MT., selaku sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang dan sebagai dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan serta arahan untuk penulisan skripsi.
3. Bapak Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan pengarahan, ilmu dan bimbingan selama proses penyusunan skripsi ini.
4. Ibu Fransisca Gayuh U.D, ST., MT. Selaku dosen pembimbing akademik saya.
5. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M. Sc., CSE selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Produksi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
6. Bapak Ir. Djarot B Darmadi, MT.,Ph.D selaku Majelis Penguji Skripsi I penulis.
7. Bapak Ir. Erwin Sulisty, MT. selaku Majelis Penguji Skripsi II penulis.
8. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D selaku Majelis Penguji Skripsi III penulis.
9. Dosen pengajar dan staf Jurusan Teknik Mesin dan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan yang sangat mendukung baik dalam perkuliahan maupun selama penyusunan skripsi ini.
10. Kedua orang tua tercinta, bapak Sihono, ibu Junaidah, dan keluarga besar yang selalu memberikan kasih sayang, cinta, doa, motivasi, materiel, kepercayaan, dan dukungan kepada penulis

11. Adik kandung Azizah Paramitha dan Alifah Inas Pratiwi atas semua motivasi dan doanya untuk penulis.
12. Amira Naafila yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi serta selalu memberikan semangat dan doa kepada penulis
13. Laboratorium  $\alpha\beta\gamma$  yang telah berkontribusi selama proses penelitian.
14. Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Universitas Brawijaya khususnya ADMIRAL (angkatan 2012) terimakasih atas doanya, kebersamaan, dan solidaritas selama masa kuliah.
15. Semua pihak yang telah membantu terselesainya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyusunan yang baik karena penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna.

Akhir kata, penulis berharap agar skripsi ini dapat berguna bagi kita semua sehingga dapat menjadi acuan untuk penelitian lebih lanjut untuk kemajuan kita bersama.

Malang, 27 Juni 2016

Penulis



DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>viii</b>
<b>RINGKASAN.....</b>	<b>ix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Penelitian Sebelumnya .....	5
2.2 Paduan Aluminium-Magnesium-Silikon (Al-Mg-Si).....	5
2.3 <i>Recycling</i> Aluminium.....	6
2.4 Pengerolan .....	8
2.4.1 Pengerolan Panas .....	9
2.4.2 Pengerolan Dingin .....	10
2.4.3 Pengerolan Hangat.....	10
2.4.4 Perbedaan antara Pengerolan Panas, Dingin dan Hangat .....	11
2.5 Masalah Geometri pada Produk Rol.....	11
2.5.1 Gaya-gaya dan Hubungan Geometri pada Pengerolan.....	13
2.5.2 <i>Poisson Ratio</i> .....	14
2.6 Kekerasan .....	14

2.6.1	Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kekerasan.....	15
2.6.2	Macam-macam Pengerasan .....	15
2.6.3	Uji Kekerasan <i>Rockwell</i> .....	17
2.7	Hipotesis .....	18

**BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... 19**

3.1	Metode Penelitian.....	19
3.2	Tempat dan Waktu Penilitan .....	19
3.3	Variabel Penelitian .....	19
3.3.1	Variabel Bebas.....	19
3.3.2	Variabel Terikat.....	19
3.3.3	Variabel Terkontrol .....	20
3.4	Alat dan Bahan .....	20
3.4.1	Alat .....	20
3.4.2	Bahan.....	23
3.5	Prosedur Penelitian.....	23
3.5.1	Prosedur Pembuatan <i>Slab</i> .....	23
3.5.2	Prosedur Pengerolan Panas.....	24
3.6	Titik Pengambilan Data Kekerasan .....	24
3.7	Rancangan Hasil Penelitian.....	24
3.8	Diagram Alir Penelitian .....	25

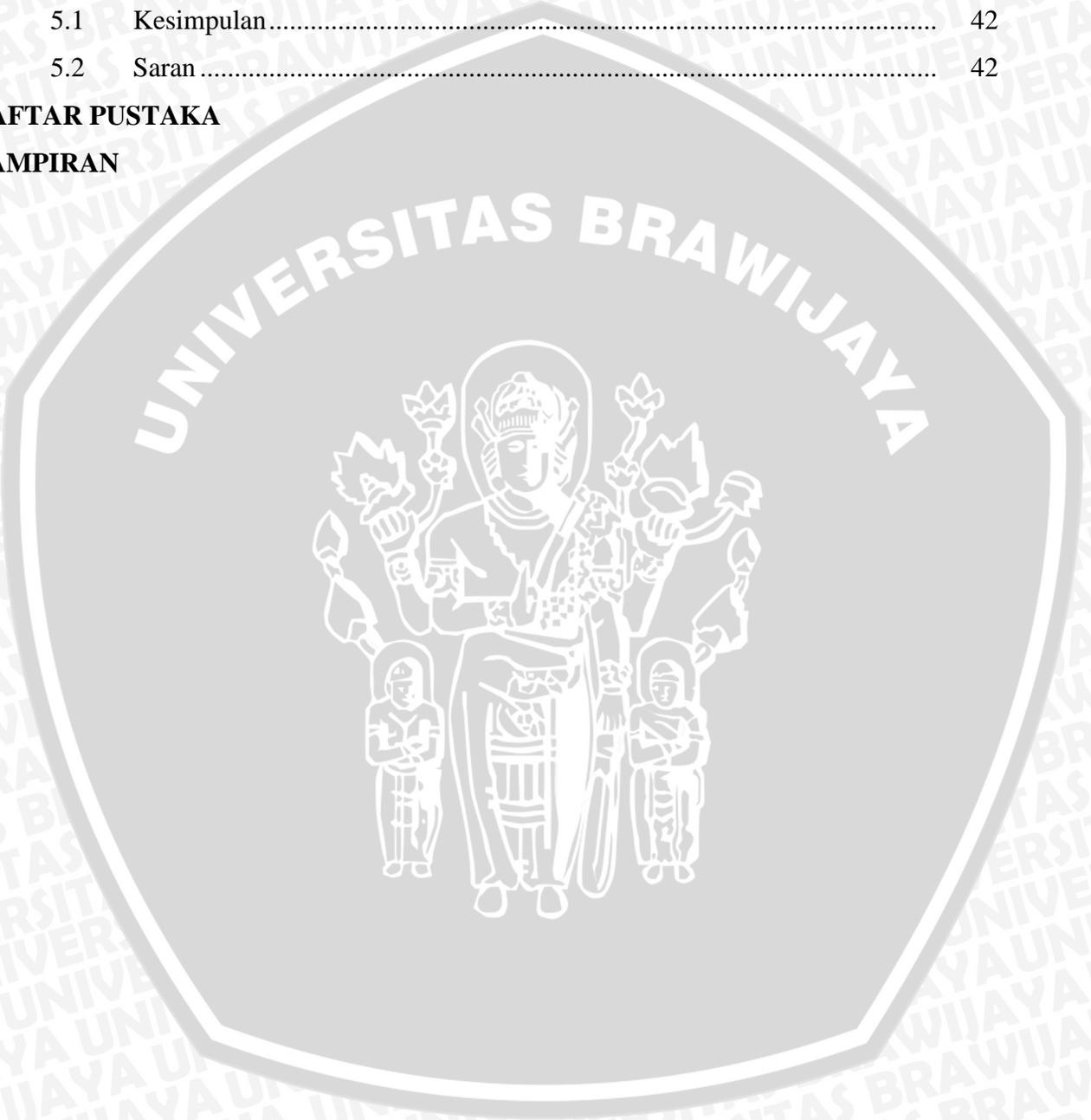
**BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... 27**

4.1	Analisa Data Geometri .....	27
4.1.1	Perbandingan Bentuk Sebelum dan Sesudah Pengerolan .....	27
4.1.2	Data Hasil Pengukuran Dimensi .....	28
	4.1.2.1 Perhitungan Tebal Reduksi Benda Kerja.....	30
	4.1.2.2 Perhitungan Perbandingan Pertambahan Panjang, Lebar dan Tebal .....	31
4.2	Data Hasil Uji Kekerasan .....	33

4.3	Pembahasan .....	36
4.3.1	Pembahasan Grafik Dimensi .....	36
4.3.2	Pembahasan Grafik Kekerasan .....	40
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>41</b>
5.1	Kesimpulan .....	42
5.2	Saran .....	42

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**



**DAFTAR TABEL**

NO	JUDUL	HALAMAN
Tabel 2.1	Perbedaan antara pengerolan panas dengan pengerolan dingin .....	11
Tabel 2.2	<i>The Rockwell Hardness Scales</i> .....	18
Tabel 4.1	Perbandingan bentuk plat sebelum dan sesudah pengerolan.....	27
Tabel 4.2	Panjang plat sebelum dan sesudah pengerolan panas .....	29
Tabel 4.3	Lebar plat sebelum dan sesudah pengerolan panas .....	29
Tabel 4.4	Tebal plat sebelum dan sesudah pengerolan panas .....	30
Tabel 4.5	Perbandingan persentase pertambahan panjang dan lebar serta pengurangan Tebal .....	33
Tabel 4.6	Nilai kekerasan pada setiap reduksi ketebalan .....	34
Tabel 4.7	Konversi nilai kekerasan dari HRB menjadi BHN .....	35

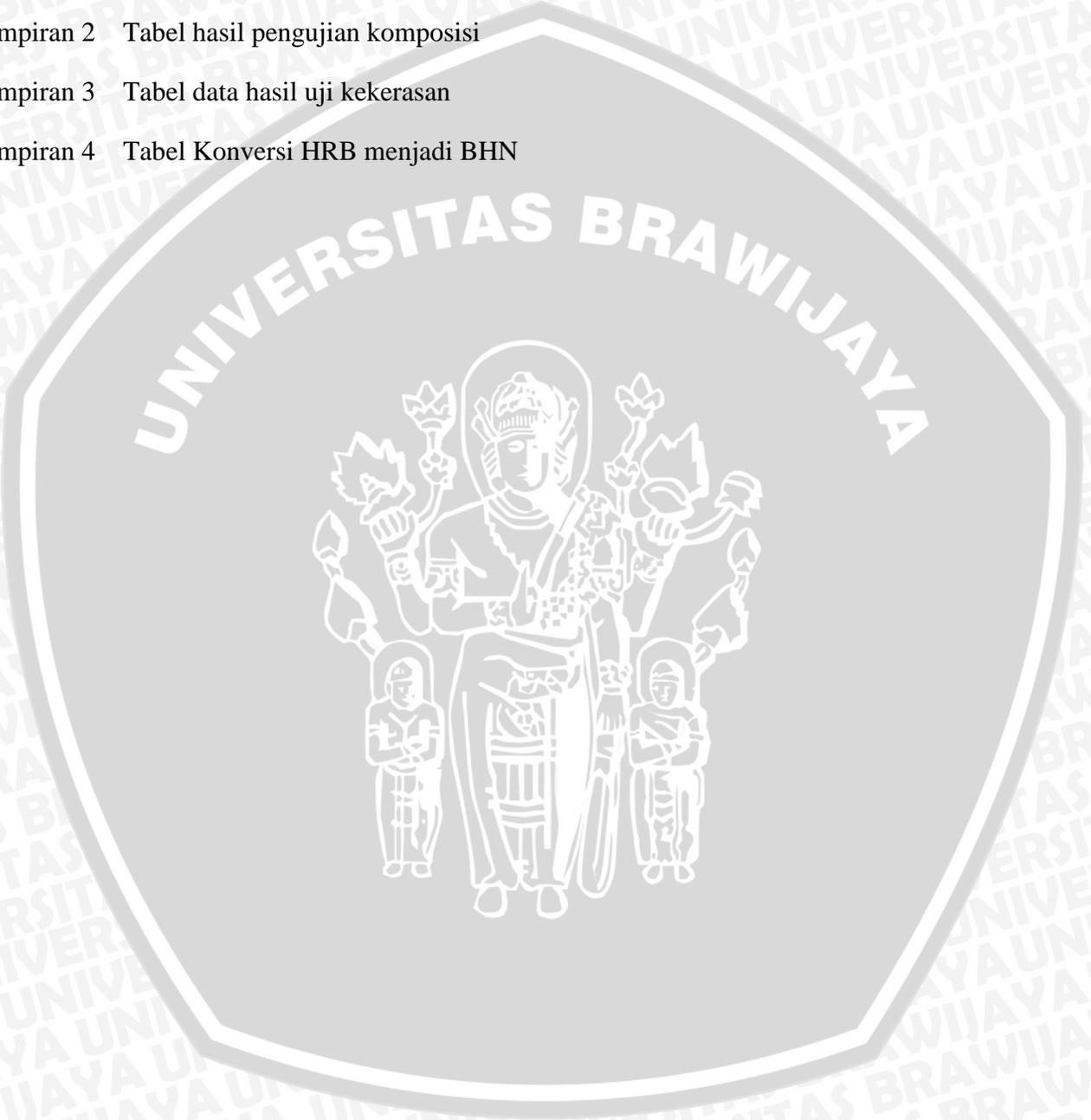


DAFTAR GAMBAR

NO	JUDUL	HALAMAN
Gambar 2.1	Grafik solidifikasi .....	8
Gambar 2.2	Susunan rol untuk pengerolan logam, (a) searah, dua tingkat; (b) dua tingkat, bolak- balik; (c) tiga tingkat; (d) empat tingkat; (e) tandem ( <i>cluster</i> ).....	9
Gambar 2.3	Akibat-akibat pembengkokan rol yang menghasilkan cacat .....	12
Gambar 2.4	Gaya-gaya yang bekerja selama pengerolan.....	13
Gambar 3.1	<i>Electrical Furnace</i> .....	20
Gambar 3.2	Dimensi cetakan <i>slab</i> .....	21
Gambar 3.3	Mesin Rol .....	21
Gambar 3.4	<i>Thermogun</i> .....	21
Gambar 3.5	<i>Rockwell hardness tester</i> .....	22
Gambar 3.6	Jangka sorong .....	22
Gambar 3.7	Penggaris .....	22
Gambar 3.8	<i>Scrap Aluminium Al-Mg-Si</i> .....	23
Gambar 3.9	Titik Pengambilan data uji kekerasan.....	24
Gambar 4.1	Grafik pengaruh reduksi ketebalan terhadap perubahan panjang.....	36
Gambar 4.2	Grafik pengaruh reduksi ketebalan terhadap perubahan lebar .....	37
Gambar 4.3	Grafik pengaruh reduksi ketebalan terhadap tebal .....	38
Gambar 4.4	Grafik persentase perbandingan pertambahan panjang dan lebar serta pengurangan tebal.....	39
Gambar 4.5	Grafik pengaruh reduksi ketebalan terhadap kekerasan .....	40

## DAFTAR LAMPIRAN

NO	JUDUL
Lampiran 1	Gambar benda kerja: <i>Slab</i>
Lampiran 2	Tabel hasil pengujian komposisi
Lampiran 3	Tabel data hasil uji kekerasan
Lampiran 4	Tabel Konversi HRB menjadi BHN



## RINGKASAN

**Lukman Pratama**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2016, Pengaruh Reduksi Pengerolan Panas terhadap Geometri dan Kekerasan pada Aluminium Al-Mg-Si Hasil *Recycling*, dosen Pembimbing: Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT. Met dan Purnami, ST., MT.

Semakin banyaknya permintaan dari industri kendaraan bermotor untuk kebutuhan lembaran aluminium, maka diperlukan juga bahan baku untuk pembuatan lembaran aluminium itu sendiri. Banyaknya limbah aluminium dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan pasar dengan dilakukannya proses daur ulang atau yang biasa disebut *recycling*.

Dalam penelitian ini dilakukan penilitan pengaruh reduksi pengerolan terhadap geometri dan kekerasan dengan bahan Al-Mg-Si hasil *recycling*. Dengan memvariasikan reduksi celah sebesar 30%, 40% dan 50% dari benda kerja serta suhu pengerolan sebesar 400°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk yang didapatkan setelah pengerolan panas cenderung melengkung, dan kecenderungan pertambahan ukuran dimensi lebih ke arah sumbu panjang jika dibandingkan ke lebar dengan perbandingan pada reduksi 30% sebesar 1 : 0,23 dan pada reduksi 40% sebesar 1 : 0,19. Ketebalan yang diperoleh adalah sebesar 4,13 mm pada reduksi celah 30% dari benda kerja dan 3,63 mm pada reduksi celah 40% dari benda kerja.

Dari uji kekerasan didapatkan nilai kekerasannya naik pada setiap pertambahan reduksi berturut-turut dari reduksi 30% adalah sebesar 16,2 HRB , pada reduksi 40% sebesar 22 HRB dan pada reduksi 50% sebesar 24,8 HRB. Hal ini disebabkan karena adanya perbaikan struktur mikro dan semakin besar reduksi yang diberikan maka kerapatan dislokasinya juga semakin tinggi sehingga nilai kekerasan pada reduksi 30% sampai reduksi 50% terus meningkat.

**Kata Kunci** : Aluminium Al-Mg-Si, *Recycling*, Reduksi pengerolan panas

## SUMMARY

**Lukman Pratama**, Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Brawijaya University, May 2016, The Effect of Hot Rolling Reduction Toward Geometry and Hardness Al-Mg-Si Aluminium Recycling, lecturer: Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT., Met and Purnami, ST.,MT.

Increasing number of demand for aluminium sheet from vehicle industry, so it needs basic material too to make aluminium sheet. Many aluminium waste can used to supply market needs by do a recycling process.

In this research we do a research how the effect of rolling reduction toward geometry and hardness with material Al-Mg-Si Aluminium recycling. With variation the reduction 30%, 40%, and 50% from work object and rolling temperature 400°C. Result from this research show that the trend shape after rolling are curve, and the trend of increasing dimension are more to length axis than to width axis with a ratio for 30% reduction 1 : 0,23 and for 40% reduction 1 : 0,19. The thickness of work object that we got are 4,13 mm for 30% reduction and 3,63 mm for 40% reduction.

From the hardness test we got that the hardness number are increasing from 16,2 HRB for 30% reduction to 22 HRB for 40% reduction and increase again to 24,8 HRB for 50% reduction. The increasing of hardness number because that is any refinement of microstructure in work object and increasing the reduction that the work object take it make the dislocation are increasing too so that make the hardness number from 30% reduction until 50% reduction increase.

**Keywords:** *Al-Mg-Si Aluminium, Recycling, Hot rolling reduction*

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Semakin berkembangnya industri manufaktur di Indonesia terutama pada bidang kendaraan bermotor kebutuhan akan bahan baku sangat diperlukan. Lembaran aluminium adalah salah satu komponen yang digunakan pada kendaraan bermotor terutama biasa digunakan untuk bagian kerangka dan *body* pada kendaraan. Lembaran aluminium dipilih karena sifatnya yang tahan terhadap berbagai jenis perubahan cuaca, memiliki daya tahan karat yang tinggi karena aluminium membentuk lapisan pasif oksida yang tahan terhadap korosi jika dibandingkan dengan besi, dan lembaran aluminium mudah untuk dibentuk.

Keunggulan dari penggunaan plat aluminium ini adalah karena plat dari bahan aluminium ini memiliki sifat ringan dan kuat, plat aluminium memiliki sifat yang tahan terhadap segala cuaca, tahan terhadap karat dan mudah dibentuk. Selain memiliki kelebihan aluminium juga memiliki kekurangan yaitu proses pengolahan aluminium dari produk logam murni memiliki kebutuhan biaya yang sangat tinggi sehingga termasuk dalam industri yang mahal dan membutuhkan biaya oprasional yang besar. Kelemahan inilah yang membuat harga dari plat aluminium jadi tidak stabil dan sulit untuk ditetapkan dalam satu periode waktu yang sama.

Semakin banyaknya permintaan dari industri kendaraan bermotor untuk kebutuhan lembaran aluminium, maka diperlukan juga bahan baku untuk pembuatan lembaran aluminium itu sendiri. Banyaknya limbah aluminium dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan pasar dengan dilakukannya proses daur ulang atau yang biasa disebut *recycling*. *Recycling* di sini menggunakan bahan aluminium yang sudah tidak dipakai lagi dan sisa-sisa dari penggunaan aluminium yang sudah digunakan. Diharapkan nantinya hasil dari proses daur ulang yang kemudian akan diproses dengan pengerolan panas untuk dijadikan lembaran aluminium ini memiliki sifat mekanik yang tidak jauh berbeda dari sifat mekanik yang menggunakan bahan aluminium primer.

Dalam pembuatan lembaran aluminium proses yang digunakan adalah proses pengerolan panas. Pengerolan adalah proses mengurangi ketebalan atau mengubah penampang dari benda kerja panjang dengan kekuatan tekan diterapkan melalui

serangkaian alat *roll*. Proses ini mirip dengan proses pengerolan adonan dengan *rolling pin* untuk mengurangi ketebalannya (Kalpakjian dan Schmid, 2009:336).

Tentunya hasil dari pengerolan panas yang dilakukan memiliki spesifikasi akhir yang diinginkan. Spesifikasi yang diinginkan ditentukan oleh fungsi dan kegunaan dari lembaran aluminium nantinya. Namun dalam proses pengerjaan pengerolan panas pasti didapatkan ada produk yang tidak sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan. Untuk mencegah hal ini dilakukan proses lanjutan agar lembaran aluminium yang dihasilkan nantinya sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

Hasil pengerolan panas dari aluminium paduan hasil *recycling* dapat dilihat dari geometrinya yaitu bentuk dan dimensi dari lembaran aluminium seperti kerataan ketebalan yang dihasilkan setelah dilakukan proses pengerolan panas. Apakah lembaran aluminium hasil *recycling* ini memiliki ketebalan yang merata atau tidak maka diperlukan dilakukannya suatu percobaan untuk mengetahui hasilnya.

Sesuai penjelasan di atas di sini penulis akan melakukan penelitian tentang pengaruh reduksi pengerolan panas terhadap geometri dan kekerasan pada aluminium Al-Mg-Si hasil *recycling*. Diharapkan dengan dilakukan penelitian ini nantinya dapat dijadikan referensi bagi bidang manufaktur khususnya dalam bidang pengerolan panas pembuatan lembaran aluminium.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana pengaruh reduksi ketebalan pada proses pengerolan panas aluminium Al-Mg-Si hasil *recycling* terhadap bentuk dan dimensi yang dihasilkan dan nilai kekerasannya.

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang diberikan adalah:

1. Temperatur dan kecepatan penuangan dianggap konstan
2. Pengujian kekerasan dengan *Rockwell*
3. Geometri yang didapat yaitu berupa bentuk dan dimensi

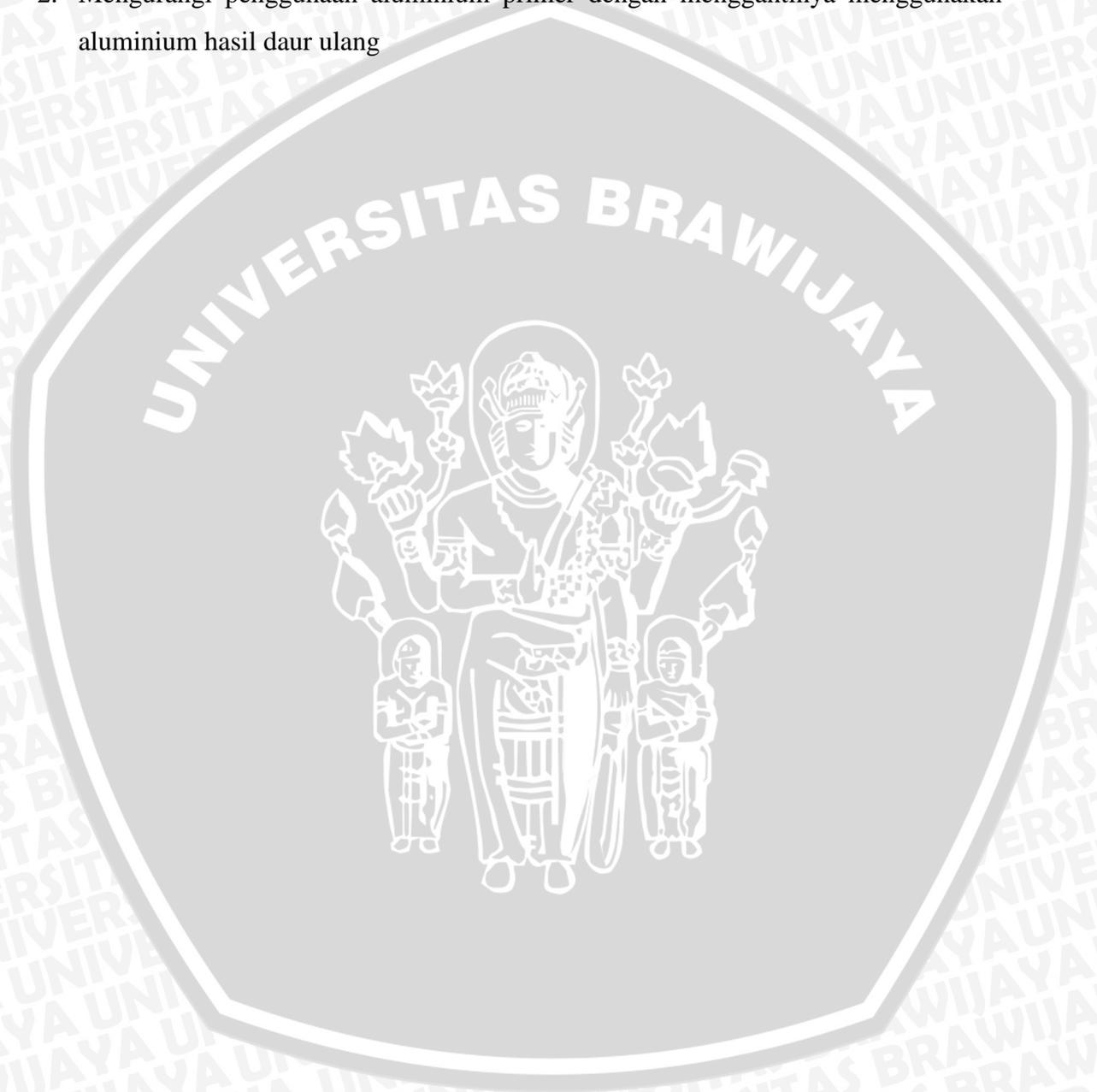
## 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui sejauh mana pengaruh dari reduksi ketebalan pengerolan panas terhadap geometri secara bentuk dan dimensi serta kekerasan yang dihasilkan dengan bahan Aluminium Al-Mg-Si hasil *recycling*

### 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Meningkatkan kualitas dari produk hasil pengerolan panas dengan mengetahui berapa reduksi yang menghasilkan geometri dan kekerasan yang paling baik dari hasil pengerolan panas
2. Mengurangi penggunaan aluminium primer dengan menggantinya menggunakan aluminium hasil daur ulang





## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Generousdi (2012) dalam penelitiannya menyatakan bahwa peningkatan reduksi terhadap plat aluminium 2024 pada proses canai panas akan meningkatkan kekerasan. Peningkatan temperatur canai panas pada persen reduksi yang sama akan menghasilkan kekerasan yang lebih rendah. Pada suhu  $350^{\circ}\text{C}$  reduksi 30% kekerasan yang didapat sebesar 88 BHN, pada suhu  $450^{\circ}\text{C}$  reduksi 30% kekerasan yang didapat sebesar 80 BHN, pada suhu  $350^{\circ}\text{C}$  reduksi 50% kekerasan yang didapat sebesar 91 BHN dan pada suhu  $450^{\circ}\text{C}$  reduksi 50% kekerasan yang didapat sebesar 89 BHN. Hal ini disebabkan karena temperatur proses pencanaian yang lebih rendah teganga alir bahan lebih tinggi, sedangkan untuk persen reduksi yang tinggi menyebabkan kerapatan dislokasinya tinggi.

Ismoyo (2013) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa dari hasil proses pengerolan panas dengan bahan ZrNbMoGe dapat disimpulkan bahwa dari hasil pengerolan panas temperatur  $900^{\circ}\text{C}$  dan proses penempaan temperatur  $950^{\circ}\text{C}$  menghasilkan pelat dengan peningkatan kekerasan melalui perbaikan struktur mikro. Kekerasan bahan meningkat dari kondisi awal sebesar 114,21 HV menjadi 210,47 HV setelah proses pengerolan dan menjadi 365,73 HV setelah proses penempaan. Pembentukan presipitat  $\text{Zr}_3\text{Ge}$  dan  $\text{ZrMo}_2$  meningkatkan sifat kekerasan bahan.

Sungkono dan Aidah (2014) dalam penelitiannya menyatakan bahwa Semakin besar reduksi tebal yang diterapkan pada proses pengerolan panas paduan mengakibatkan : (1) perubahan mikrostruktur paduan Zr-0,4%Nb-0,5%Fe- 0,5%Cr dari struktur widmanstätten dan kolumnar menjadi kolumnar terdeformasi dan batang pipih, kolumnar terdeformasi dan batang pipih terdeformasi; (2) kekerasan paduan Zr-0,4%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr semakin tinggi akibat pengerasan regangan; (3) peningkatan homogenitas paduan Zr-0,4%Nb- 0,5%Fe-0,5%Cr.

#### 2.2 Paduan Aluminium-Magnesium-Silikon (Al-Mg-Si)

Aluminium mengalami perbaikan sifat yang mencolok jika aluminium dipadu dengan logam lain. Contohnya jika dipadu dengan tembaga meningkatkan kekerasan, magnesium meningkatkan kekuatan, silikon kemampu tuang. Dan beberapa logam paduan

lainnya adalah mangan, seng, nikel yang mengakibatkan sifat yang dikehendaki dalam persentase kecil.

Paduan Aluminium Magnesium Silicon (Al-Mg-Si) adalah jenis paduan aluminium yang didalamnya terdapat unsur magnesium dan silicon. Dengan penambahan unsur magnesium dan silicon sifat mekanis yang dimiliki juga membaik. Sifat yang dimiliki oleh paduan Al-Mg-Si ini adalah memiliki ketahanan korosi yang baik, dapat dituakeraskan dalam keadaan panas dan dingin. Dalam keadaan lunak mudah disepih dan dianodisasikan.

Penggunaan dari paduan Al-Mg-Si ini biasa digunakan dalam konstruksi kapal dan kendaraan serta dalam arsitektur. Dalam jenis buatan eloxal untuk tujuan tata hias. Dalam perdagangan paduan dari aluminium magnesium dan silicon (Al-Mg-Si) ini biasa disebut sebagai Aludur, Duralumin K, Pantal Polital, Elran dan Dekoral (Gruber, 1993 : 133).

### 2.3 *Recycling Aluminium*

Proses *recycling* atau daur ulang aluminium adalah proses dimana penggunaan kembali dari scrap aluminium untuk dijadikan menjadi sebuah produk. Tujuan dari proses daur ulang ini adalah mengurangi konsumsi energi atau *energy savings* di mana pada proses ini hanya dibutuhkan 5 % dari energi pada saat pengolahan Al dari bijih bauksit. Selain itu, dapat mengurangi emisi gas buang yang dihasilkan pada saat proses pengolahan Al dari bauksit, terutama mereduksi CO<sub>2</sub> dan gas rumah kaca seperti CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, dan PFC, sehingga lebih ramah lingkungan.

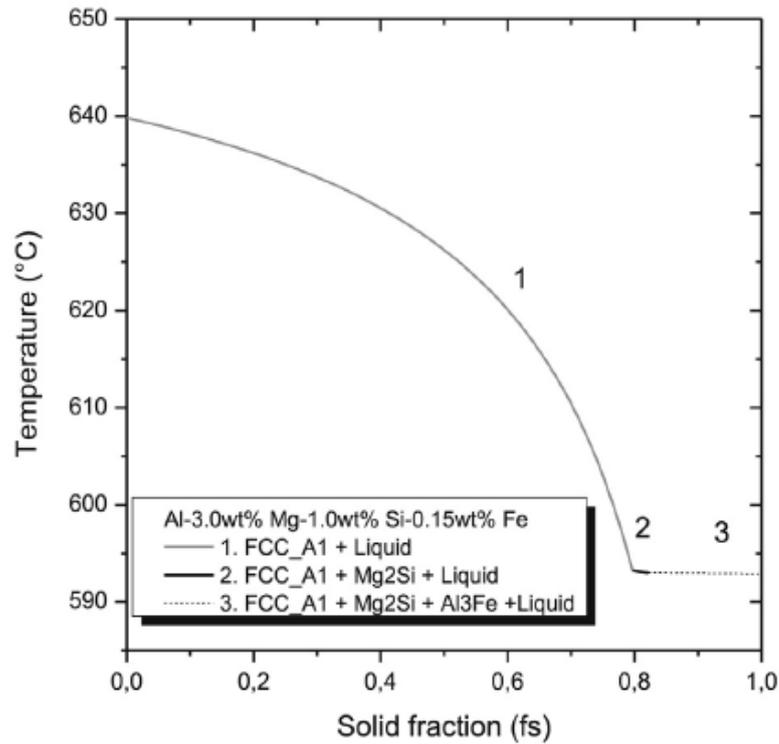
Aluminium dapat didaur ulang tanpa kehilangan kualitas, dan daur ulang menghemat 95% dari energi yang dibutuhkan untuk memproduksi aluminium dari bijih. Sejak 1980-an, tingkat permintaan untuk aluminium lebih dari 50%. Kelemahan serius aluminium dari sudut pandang rekayasa yaitu modulus elastisitas yang relatif rendah, yang juga sekitar sepertiga dari baja. Modulus elastisitas tidak bisa secara signifikan diubah oleh paduan atau perlakuan panas, biasanya diperlukan untuk memberikan kekakuan dan lipatan (DeGarmo, 2008 : 145).

Beberapa langkah yang diperlukan dalam proses daur ulang aluminium adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan bahan baku, bahan baku dari proses daur ulang ini bisa didapatkan pada benda-benda aluminium yang sudah tidak dipakai lagi dan dari sisa pemotongan benda aluminium yang sudah tidak dipakai lagi.

2. Perlakuan bahan, di sini fungsi perlakuan bahan adalah untuk mendapatkan kualitas yang baik sebelum dilakukan proses peleburan. Caranya adalah dengan memisahkan semua material yang menempel pada aluminium bekas tersebut.
3. Pemisahan atau pensortiran, sebelum dimasukkan ke dalam furnace, aluminium akan dipisahkan berdasarkan komposisi unsur paduannya agar didapatkan ketepatan komposisi pada saat produk telah jadi. Pada proses ini telah dilakukan secara komputerisasi sehingga lebih mudah dan efektif.
4. Peleburan, proses pelelehan dilakukan pada suhu  $T_m$  dari Al yaitu sekitar  $750\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  dibawah lapisan garam. Pada saat proses peleburan biasanya Al akan bereaksi dengan oksigen membentuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan menghasilkan aluminium dross, dan dapat digunakan untuk industri semen.
5. *Refining*, setelah melalui proses peleburan, Al akan melalui proses *refining* di mana dilakukan di *holding furnace*. Proses ini bertujuan untuk mengatur kadar paduan dan konsentrasinya serta untuk menghilangkan pengotor dengan penambahan agen pemurni.
6. Pengecoran, adalah proses dimana aluminium cair akan dituangkan ke dalam *ingots* dan aluminium oksida yang terperangkap dilakukan pemisahan saat proses pengecoran. Selain dicor, aluminium cair dijadikan produk *wrought*, di mana dimasukkan ke dalam ekstrusi untuk menjadi *billets* dan di rol dan menjadi *slabs*, yang dilanjutkan dengan proses perlakuan panas.

Pada saat proses *recycling* ini juga perlu ditentukan suhu saat pengecoran yang bertujuan agar hasil *recycling* bisa sempurna. Untuk menentukan suhu saat pengecoran sendiri kita dapat melihat dari titik lebur material yang kita gunakan saat *recycling*. Suhu yang digunakan adalah suhu di atas titik lebur material tersebut atau yang biasa disebut *superheating*. *Superheating* itu sendiri bertujuan agar pada saat pengecoran tidak terjadi solidifikasi dini. Solidifikasi sendiri adalah transformasi logam cair kembali ke bentuk padatnya. Untuk aluminium sendiri suhu yang diambil harus diatas suhu  $660^{\circ}\text{C}$ . Ketika baja atau paduan mendingin dari fasa liquid ke fasa solid, berkontraksi dalam tiga tahapan: (i) kontraksi liquid, di mana terletak ketika paduan didinginkan dari suhu tuang menuju suhu solidifikasi; (ii) kontraksi solidifikasi, terletak ketika baja melewati tahap solidifikasi; dan (iii) kontraksi solid, di mana terbentang pada periode pendinginan dari suhu solidifikasi sampai suhu ruang. (Jain, 1976 : 181)

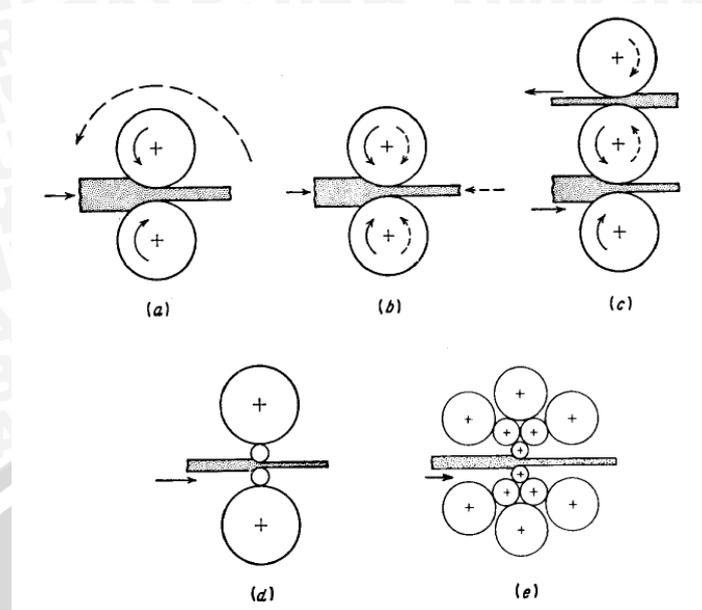


Gambar 2.1 Grafik solidifikasi Al-Mg-Si  
Sumber: Brito et al , 2016

## 2.4 Pengerolan

Pengerolan adalah suatu proses pembuatan benda setengah jadi dari *slab* menjadi lembaran dengan bentuk penampang seragam. Proses ini memanfaatkan sifat *plastic* dari benda yang akan diroll dengan melewatkannya diantara celah pada mesin rol. Pengerjaan ini banyak digunakan pada proses pengerjaan logam, karena memberikan kemungkinan untuk memproduksi produk akhir yang berkualitas tinggi dan mudah dikontrol. Pada perubahan bentuk logam diantara celah mesin rol, benda kerja dikenai tegangan kompresi yang tinggi yang berasal dari gerakan jepit rol dan tegangan geser gesek permukaan sebagai akibat gesekan antara rol dan logam. Gaya gesek juga mempunyai pengaruh terhadap penarikan logam di antara rol (Dieter, 1986 : 586) .

Suatu pengerolan logam pada dasarnya terdiri atas rol, bantalan, dan rumah untuk tempat komponen-komponen tersebut, serta pengendali untuk mengatur catu daya untuk rol dan mengendalikan kecepatannya. Pada umumnya pengerolan logam dapat digolongkan berdasarkan jumlah dan susunan rol. Macam pengerolan berdasarkan susunan dan jumlah rol ada rol searah dua tingkat, rol bolak-balik dua tingkat, rol tiga tingkat, rol empat tingkat, dan rol tandem.



Gambar 2.2 Susunan rol untuk pengerolan logam, (a) searah, dua tingkat; (b) dua tingkat, bolak-balik; (c) tiga tingkat; (d) empat tingkat; (e) tandem (*cluster*)

Sumber: Dieter, 1986 : 588

Untuk pengerjaannya sendiri pengerolan mempunyai dua kondisi pengerjaan yang berdasarkan suhu pengerjaan yaitu:

1. Pengerolan panas
2. Pengerolan dingin
3. Pengerolan hangat

#### 2.4.1 Pengerolan Panas

Proses pengerolan panas dilakukan untuk mereduksi ketebalan plat dengan temperatur pengerjaan di atas temperatur rekristalisasi benda kerja. Proses ini dapat dilakukan langsung pada *slab* yang dipanaskan terlebih dahulu. Pada proses ini akan dihasilkan terak pada permukaan lembaran akibat oksidasi, sehingga perlu dilakukan proses pembersihan dengan menggunakan asam. Proses pengerjaan panas pertama untuk sebagian besar produk baja dilakukan pada mesin rol kasar primer. Proses yang terjadi adalah mengubah *ingot* cor menjadi bentuk *bloom* atau *slab* untuk tahap pengerjaan berikutnya, hingga pada akhirnya diperoleh bentuk batang, pelat atau lembaran. Perubahan awal seringkali hanya melibatkan reduksi kecil.

Lembaran-lembaran diproduksi dengan cara pengerolan panas, baik dengan pemanasan kembali *slab* maupun langsung dengan pengecoran kontinyu. Untuk suhu

pengerjaan pengerolan panas dilakukan pada suhu di atas 0,6 temperatur lebur dan dengan temperature tertinggi yaitu sekitar 100<sup>0</sup>F dibawah temperature lebur. (Dieter, 1986 : 527)

#### 2.4.2 Pengerolan Dingin

Proses pengerolan dingin dilakukan untuk mendapatkan pelat yang lebih tipis dibandingkan dengan pengerolan panas. Temperatur pengerjaan proses pengerolan dingin adalah dengan temperature dibawah suhu rekristalisasi benda kerja. Proses ini ditujukan untuk mencapai ketebalan akhir yang benar dan sesuai keinginan. Pada proses ini lembaran mengalami peristiwa *strain hardening* sehingga pada prosesnya kadang dibutuhkan proses *annealing* untuk mengurangi kegetasannya.

Reduksi total yang dicapai dengan pengerolan dingin, biasanya beragam dari 50% hingga 90%. Dalam menentukan besarnya reduksi pada setiap stan, sedapat mungkin persentase reduksinya diseragamkan, sehingga tidak terdapat stan tertentu yang mereduksi jauh lebih besar dibanding yang lain. Pada umumnya reduksi terkecil terdapat pada tahap akhir agar diperoleh pengerolan yang lebih baik terhadap ukuran, keretakan dan kondisi akhir permukaan. Salah satu prosedur yang rasional untuk menyusun tahapan pengerolan dingin adalah dengan melakukan pengaturan pada setiap tahapan sedemikian hingga menghasilkan beban pengerolan konstan. Untuk suhu pengerjaan pengerolan dingin dilakukan pada suhu di bawah 0,3 dari temperatur lebur.

#### 2.4.3 Pengerolan Hangat

Pengerolan hangat merupakan proses pengerolan logam dimana temperatur pengerjaannya terletak diantara temperatur proses pengerjaan panas dan pengerjaan dingin. Apabila dibandingkan dengan proses pengerolan dingin, proses pengerolan hangat memiliki beberapa keuntungan, yaitu gaya yang diperlukan lebih kecil pada perkakas dan peralatan, menaikkan keuletan material serta dapat menurunkan jumlah proses *annealing* karena turunya efek pengerasan regangan. Proses pengerjaan hangat memperluas kemungkinan penggunaan proses *forming* untuk berbagai jenis material dan berbagai bentuk dan ukuran. Apabila dibandingkan dengan proses pengerolan panas, maka pengerjaan hangat melakukan sedikit lebih energi, metalurgi pembentukan kerak dan dekarburisasi, memberikan ketelitian, pengaturan dimensi dan *surface finish* yang lebih baik. Untuk suhu pengerjaan pengerolan hangat dilakukan pada suhu antara 0,3 temperatur lebur sampai pada 0,5 temperature lebur.

#### 2.4.4 Perbedaan antara Pengerolan Panas, Dingin dan Hangat

Antara pengerolan panas dengan pengerolan dingin memiliki beberapa perbedaan yang dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbedaan antara pengerolan panas dengan pengerolan dingin

Variabel	Pengerolan Panas	Pengerolan Dingin	Pengerolan Hangat
Suhu	$>0,6 T_m$	$<0,3 T_m$	$0,3 T_m < T_{hangat} < 0,5 T_m$
Kualitas Permukaan	Kasar	Halus	Lebih halus dibanding pengerolan panas tetapi lebih kasar jika dibandingkan pengerolan dingin
Ketepatan dimensional	Kurang akurat	Lebih akurat	Berada diantara pengerolan panas dan pengerolan dingin
Energi pengerolan	Rendah	Tinggi	Lebih rendah dibanding pengerolan dingin dan lebih tinggi dibanding pengerolan panas
Tegangan alir benda	Semakin kecil	Meningkat	Lebih besar dibanding pengerolan panas tetapi lebih kecil dibanding pengerolan dingin
Penguatan benda kerja	Tidak terjadi	Terjadi	Terjadi tetapi tidak sebesar pengerolan dingin

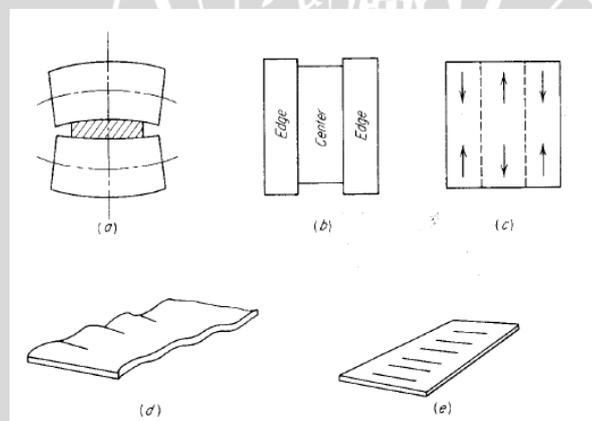
#### 2.5 Masalah Geometri Pada Produk Rol

Permasalahan geometri bisa terjadi karena adanya interaksi antara benda kerja yang mengalami deformasi secara *plastic* serta mesin rol yang berdeformasi secara elastik. Pada kondisi gaya pengerolan yang tinggi, rol akan menjadi datar dan melengkung dan seluruh bagian mesin rol akan mengalami distorsi elastik. Dengan adanya *mill spring*, maka tebal lembaran yang keluar dari mesin rol lebih besar dibanding celah rol pada saat tidak dipergunakan.

Perataan elastik pada rol dengan bertambahnya tekanan rol memungkinkan rol berdeformasi secara lebih mudah dibandingkan dengan benda kerja. Jadi untuk suatu bahan dan kondisi pengerolan tertentu, maka akan terjadi tebal minimum dibawah mana benda kerja tidak dapat dipertipis lagi. Analisis yang lengkap mengenai persoalan diatas menunjukkan bahwa tebal batas kira-kira berbanding lurus dengan koefisien gesekan, jari-jari rol, tegangan alir benda kerja dan berbanding terbalik dengan modulus elastisitas rol.

Celah rol harus benar-benar sejajar, kalau tidak salah satu sisi lembaran akan mengalami pengurangan ketebalan lebih besar dibanding yang lain, dan karena volume serta lebar tetap nilainya, maka sisi tersebut akan mengalami perpanjangan melebihi yang lain, sehingga lembaran tersebut akan membengkok. Terdapat 2 aspek yang mempengaruhi bentuk lembaran, yaitu:

1. Mengenai tebal seragam pada arah lebar dan panjang. Tebal dapat diukur secara teliti, dan dapat dikontrol dengan sistem kontrol ukuran otomatis yang modern.
2. Keadaan datar lembaran. Sulit untuk menentukan besaran ini secara teliti khususnya jika lembaran bergerak melalui mesin kontinu pada kecepatan tinggi. Proses pengerolan sangat peka terhadap kerataan.



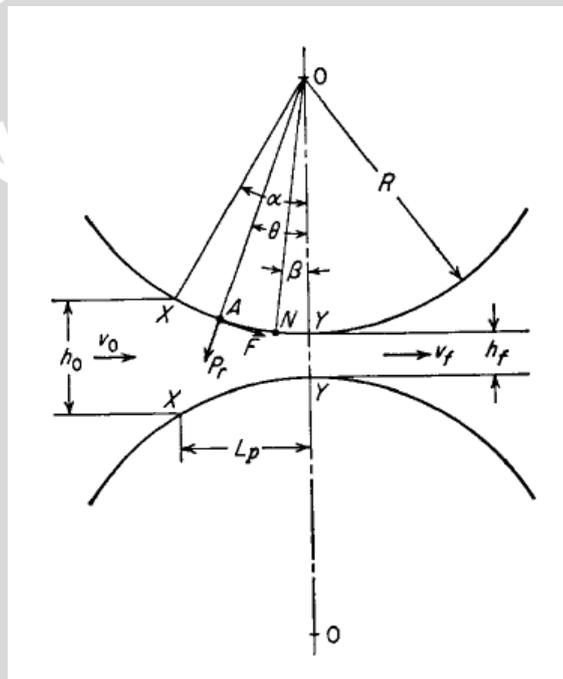
Gambar 2.3 Akibat-akibat pembengkokan rol yang menghasilkan cacat  
Sumber: Dieter, 1986 : 603

Pada gambar 2.3 dapat dilihat bahwa gambar (a) menjelaskan bahwa jika hasil pengerolan melengkung maka pinggiran lembaran akan mengalami perpanjangan yang lebih besar dibandingkan pusat lembaran. Pada gambar (b) adalah keadaan yang diperoleh jika pinggiran lebih bebas untuk bergerak dibanding pusatnya. Gambar (c) menjelaskan bagian pusat lembaran mengalami tegangan tarik dan pinggiran lembaran mengalami

kompresi pada arah pengerolan. Hasil yang diperoleh dari gambar (c) adalah suatu pinggiran yang bergelombang seperti gambar (d). Pada gambar (e) terjadi retakan pada pusat lembaran yang diakibatkan distribusi regangan yang dihasilkan oleh pinggiran yang panjang.

### 2.5.1 Gaya-gaya dan Hubungan Geometri pada Pengerolan

Dapat dilihat pada gambar 2.3 sejumlah hubungan antara geometri pengerolan dan gaya-gaya yang terlibat pada deformasi rol logam.



Gambar 2.4 Gaya-gaya yang bekerja selama pengerolan  
Sumber: Dieter, 1986 : 594

Persamaan yang digunakan untuk mengetahui gaya pengerolan yang terjadi:

$$P = \frac{2}{3} \bar{\sigma}_0 \left[ \frac{1}{Q} (e^Q - 1) b \sqrt{R \Delta h} \right] \quad (2.1)$$

- Dimana:
- P = Gaya penekanan (N)
  - $\bar{\sigma}_0$  = Tegangan *yield* rata-rata (MPa)
  - e = Dasar logaritma natural (2.718)
  - Q = Rasio pengurangan tebal
  - b = Lebar plat setelah pengerolan (mm)
  - R = Jari-jari *roll* (mm)
  - $\Delta h$  = Selisih tebal (mm)

$$\text{Dengan } Q = \frac{\mu L_p}{\bar{h}} \quad (2.2)$$

Dimana:  $\mu$  =  $\tan \alpha$

$L_p$  = Panjang kontak specimen dengan roll 9(mm)

$\bar{h}$  = tebal rata-rata sebelum dan sesudah pengerolan

$$\text{Dengan } L_p = [R (h_0 - h_f)]^{1/2} \quad (2.3)$$

Dimana:  $R$  = Jari-jari roll (mm)

$h_0$  = Tebal sebelum pengerolan (mm)

$h_f$  = Tebal sesudah pengerolan (mm)

Untuk perhitungan reduksi pengerolan panas menggunakan persamaan

$$R = 100\% \left( \frac{h_0 - h_f}{h_0} \right) \quad (2.4)$$

Dimana:  $R$  = Reduksi (%)

$h_0$  = Tebal sebelum pengerolan (mm)

$h_f$  = Tebal sesudah pengerolan (mm)

### 2.5.2 Poisson Ratio

*Poisson ratio* adalah konstanta elastisitas yang dimiliki oleh setiap material. Sebuah material yang diberikan gaya satu arah, ditarik maupun ditekan, akan mengalami perubahan bentuk. Selain perubahan bentuk ke arah gaya yang diberikan, ada juga perubahan bentuk ke arah yang tegak lurus dengan arah gaya. Poisson Ratio adalah perbandingan dari perubahan arah aksial dengan perubahan arah transversal tersebut. Ketika sebuah gaya satu arah diberikan kepada material tersebut sehingga menghasilkan regangan dan membuat material tersebut berdeformasi.

$$\nu = - \frac{\epsilon_{transversal}}{\epsilon_{axial}}$$

Dimana:  $\nu$  = Poisson ratio

$\epsilon_{transversal}$  = Regangan transversal

$\epsilon_{axial}$  = Regangan axial

### 2.6 Kekerasan

Kekerasan adalah salah satu sifat mekanik yang dimiliki suatu material. Kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi dan untuk logam dengan sifat tersebut merupakan ukuran ketahanannya terhadap deformasi plastis atau deformasi permanen.

Deformasi plastis sendiri suatu keadaan dari suatu material ketika material tersebut diberikan gaya maka struktur mikro dari material tersebut sudah tidak bisa kembali ke bentuk asal artinya material tersebut tidak dapat kembali ke bentuknya semula.

Di dalam aplikasi manufaktur, material dilakukan pengujian dengan dua pertimbangan yaitu untuk mengetahui karakteristik suatu material baru dan melihat mutu untuk memastikan suatu material memiliki spesifikasi kualitas tertentu. Terdapat tiga jenis umum mengenai uji ukuran kekerasan, yang tergantung pada cara melakukan pengujian. Ketiga jenis tersebut adalah kekerasan goresan, kekerasan lekukan dan kekerasan pantulan atau kekerasan dinamik (Dieter, 1986 : 325).

### **2.6.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kekerasan**

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kekerasan dari material, faktor tersebut antara lain adalah:

1. Kadar karbon, semakin banyak kadar karbon yang terkandung pada suatu material maka kekerasan yang didapat dari material tersebut akan semakin keras namun rapuh. Kadar karbon sebesar 0,6-1% merupakan kadar karbon yang sangat berpengaruh pada kekerasan material tersebut. Setelah melebihi kadar 1% maka kadar karbon tersebut tidak berpengaruh pada nilai kekerasannya.
2. Unsur paduan, unsur paduan mempengaruhi kekerasan pada suatu material karena dengan dipadu dengan material sifat mekanik suatu material akan berubah termasuk kekerasannya tergantung dari unsur paduan yang dipakai.
3. Perlakuan panas, perlakuan panas terhadap suatu material akan mempengaruhi kekerasan dari material tersebut tergantung perlakuan apa yang dilakukan.
4. Struktur mikro atau struktur butir, material dengan ukuran butir kecil akan memiliki nilai kekerasan yang tinggi sedangkan material dengan ukuran butir besar akan memiliki nilai kekerasan yang rendah.

### **2.6.2 Macam-macam Pengerasan**

Beberapa macam pengerasan yang ada yaitu:

1. Pengerasan Kerja / Pengerasan Regangan

Pengerasan kerja adalah pengerasan yang terjadi jika bahan dideformasikan pada temperatur sangat rendah dibandingkan dengan titik cairnya, maka pengerasan terjadi mengikuti deformasinya. Pengerasan kerja terjadi karena regangan bertambah maka kekuatan mulur, kekuatan tarik, dan kekerasannya meningkat, sedangkan hantaran

listrik dan masa jenisnya menurun. Pengerasan kerja biasa juga disebut pengerasan regangan. Pengerasan regang disebabkan oleh dislokasi yang berinteraksi satu sama lain dan dengan penghalang yang menghalangi gerakannya dalam kisi kristal.

Salah satu konsep dislokasi paling dini untuk menjelaskan pengerasan regang adalah gagasan bahwa dislokasi itu menumpuk di bidang slip di penghalang dalam kristal. Tumpukan itu menghasilkan tegangan balik yang melawan tegangan pada bidang slip.

## 2. Pengerasan Paduan

Pengerasan paduan adalah pengerasan yang terjadi jika dilakukan penambahan unsur paduan pada material yang akan dikeraskan. Unsur yang ditambahkan disebut unsur terlarut. Bagi atom terlarut diketahui mempunyai banyak faktor seperti perubahan dimensi di mana diameter atom berbeda dengan diameter atom matriks, sesuai dengan itu modulus kekakuan yang disebabkan medan regangan elastik mendorong peningkatan modulus elastik di medan antar aksi dengan atom terlarut.

## 3. Pengerasan Kulit

Pengerasan kulit adalah pengerasan dengan cara melakukan beberapa proses antara lain dengan pengarbonan, penitridan, pengerasan permukaan dengan arus frekuensi tinggi atau dengan nyala api dan sebagainya. Pengerasan kulit biasa dilakukan untuk mengatasi masalah beberapa komponen mesin yang mengalami keausan permukaan tegangan yang bolak balik seperti pada roda gigi.

## 4. Pengerasan Presipitasi

Pengerasan presipitasi juga biasa disebut pengerasan penuaan adalah proses di mana fase kedua yang dimulai dalam larutan padat dengan logam matriks diendapkan dari larutan dengan cara mendinginkan logam, meninggalkan partikel dari fase didistribusikan di seluruh menyebabkan resistensi dislokasi slip. Hal ini dicapai dengan terlebih dahulu pemanasan logam sampai suhu di mana unsur-unsur pembentuk partikel yang larut kemudian mendinginkannya, hal ini menjebak partikel dalam larutan padat. Sebuah perlakuan panas kedua pada suhu yang sesuai selanjutnya dibutuhkan untuk penuaan material. Suhu tinggi memungkinkan elemen terlarut berdifusi lebih cepat, dan membentuk partikel endapan yang diinginkan. Pendinginan diperlukan semenjak material dinyatakan akan mulai terpresipitasi selama pendinginan lambat. Jenis dari hasil presipitasi ini di beberapa partikel lebih besar daripada umumnya yang diinginkan, kelimpahan endapan kecil. Pengerasan presipitasi adalah salah satu teknik yang paling umum digunakan untuk pengerasan paduan logam.

### 2.6.3 Uji Kekerasan *Rockwell*

Uji kekerasan *Rockwell* adalah uji yang menggunakan kedalaman lekukan pada beban yang konstan sebagai ukuran kekerasan. Tes ini dilakukan dengan mula-mula menetapkan beban minor untuk menempatkan benda uji. hal ini ditujukan untuk memperkecil jumlah preparasi permukaan yang dibutuhkan dan juga memperkecil kecenderungan untuk terjadinya penurunan yang disebabkan oleh penumbuk. Kemudian diberikan beban mayor dan secara otomatis kedalaman lekukan akan terekam pula *gauge* penunjuk yang menyatakan angka kekerasan. Satuan dalam uji kekerasan ini adalah HR.

Sifat-sifat dari uji kekerasan *Rockwell* yaitu cepat, bebas dari kesalahan manusia, mampu untuk membedakan perbedaan kekerasan yang kecil pada baja yang diperkeras, dan ukuran lekukannya kecil, sehingga bagian yang mendapat perlakuan panas yang lengkap, dapat diuji kekerasan tanpa menimbulkan kerusakan.



Tabel 2.2 *The Rockwell Hardness Scales*

Skala	Major Load (kg)	Tipe dari indentor	Jenis material yang diuji
A	60	<i>Diamond cone</i>	Material yang sangat keras, tungsten, carbides, dsb
B	100	1/16" ball	Material dengan kekerasan sedang, baja karbon rendah dan sedang, <i>brass, bronze</i> , dsb
C	150	<i>Diamond cone</i>	Baja yang dikeraskan, paduan yang dikeraskan dan ditemper
D	100	<i>Diamond cone</i>	Baja yang dikeraskan permukaan
E	100	1/8" ball	Besi tuang, aluminium, dan paduan magnesium
F	60	1/16" ball	<i>Brass</i> dan <i>copper</i> yang dianeal
G	150	1/16" ball	<i>Berylium copper, phosphor bronze</i> , dsb
H	60	1/8" ball	Lembaran aluminium
K	150	1/8" ball	Besi tuang, paduan aluminium
L	60	1/4" ball	Plastik
M	100	1/4" ball	Sama seperti skala L
P	150	1/4" ball	Sama seperti skala L
R	60	1/2" ball	Sama seperti skala L
S	100	1/2" ball	Sama seperti skala L
V	150	1/2" ball	Sama seperti skala L

Sumber: Avner, 1974 : 30

## 2.7 Hipotesis

Dari hasil penulisan tinjauan pustaka didapatkan hipotesis bahwa jika semakin besar reduksi ketebalan (persen) pada proses pengerolan panas yang dilakukan kepada material Al-Mg-Si maka geometri yang akan didapatkan akan semakin tidak merata karena semakin besar reduksi yang diberikan maka gaya yang melawan dari benda kerjanya juga semakin besar, dan jika reduksi ketebalan yang diberikan semakin besar maka kekerasan yang didapatkan pada hasil pengerolan panas adalah karena kerapatan dislokasinya tinggi.

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Pada penelitian kali ini metode yang digunakan adalah metode eksperimental. Metode eksperimental adalah metode yang langsung melakukan percobaan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh dari reduksi pengerolan panas pada hasil geometri bentuk dan dimensi serta kekerasan yang dihasilkan pada aluminium Al-Mg-Si hasil *recycling*.

#### 3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu untuk melakukan penelitian dilaksanakan pada bulan April 2016 hingga Mei 2016. Dan untuk melakukan pengujian dilaksanakan pada:

- Laboratorium  $\alpha \beta \gamma$  Landungsari, Malang untuk proses pengecoran *recycling* aluminium Al-Mg-Si dan untuk proses pengerolan panas
- Laboratorium PPPPTK VEDC Malang untuk proses pengujian kekerasan

#### 3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan pada penelitian ini ada tiga yaitu variabel bebas, variabel terikat dan variabel terkontrol

##### 3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini adalah reduksi pada ketebalan yang akan digunakan pada proses pengerolan yaitu sebesar 30%, 40% dan 50%

##### 3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat yang digunakan pada penelitian ini adalah hasil dari foto bentuk geometri dan dimensi yang dihasilkan, dan kekerasan yang didapatkan dari hasil pengerolan panas pada aluminium Al-Mg-Si hasil *recycling*.

### 3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Bahan untuk pengecoran yang digunakan adalah aluminium Al-Mg-Si
2. *Recycling* yang digunakan adalah sebanyak 1 kali
3. Temperatur peleburan yang digunakan adalah 700°C
4. Volume cetakan yang digunakan tetap 99000 mm<sup>3</sup>
5. Dimensi *slab* sebelum proses pengerolan panas panjang: 200 mm ; lebar: 33 mm ; tebal: 5 mm
6. Temperatur pengerolan panas yang digunakan tetap sebesar 400°C

### 3.4 Alat dan Bahan

#### 3.4.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian kali ini antara lain:

1. *Electrical Furnace*



Gambar 3.1 *Electrical Furnace*

Sumber: Laboratorium  $\alpha \beta \gamma$  Landungsari, Malang

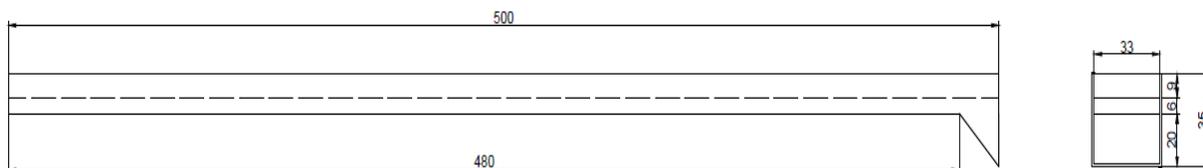
Spesifikasi alat:

- Sumber panas : Arus listrik
- Arus : 13,2 A
- Daya : 2468,4 W
- Tegangan : 200 V
- Kapasitas :  $\pm 2$  kg

*Electrical furnace* digunakan untuk melakukan proses *recycling* aluminium yang akan digunakan.

## 2. Cetakan *Slab*

Cetakan digunakan untuk mencetak *slab* setelah dilakukan proses *recycling*



Gambar 3.2 Dimensi cetakan *slab*

## 3. Mesin rol



Gambar 3.3 Mesin rol

Sumber: Laboratorium  $\alpha \beta \gamma$  Landungsari, Malang

Mesin rol digunakan untuk melakukan proses pengerolan panas Aluminium

Al-Mg-Si

## 4. *Thermogun*



Gambar 3.4 *Thermogun*

Sumber: Laboratorium  $\alpha \beta \gamma$  Landungsari, Malang

*Thermogun* digunakan untuk mengukur suhu pemanasan slab saat dipanaskan di dalam tungku sebelum pengerolan.

### 5. Rockwell Hardness Test

*Rockwell hardness test* digunakan untuk mengukur kekerasan dari aluminium Al-Mg-Si hasil dari pengerolan panas



Gambar 3.5 *Rockwell hardness tester*

Sumber: Laboratorium pengujian bahan, jurusan mesin, Universitas Brawijaya

### 6. Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur lebar dan tebal serta perubahan lebar dan tebal yang terjadi pada lembaran aluminium



Gambar 3.6 Jangka sorong

Sumber: Laboratorium  $\alpha$   $\beta$   $\gamma$  Landungsari, Malang

### 7. Penggaris

Penggaris digunakan untuk mengukur panjang sebelum dan sesudah pengerolan pada lembaran aluminium



Gambar 3.7 Penggaris

Sumber: Laboratorium  $\alpha$   $\beta$   $\gamma$  Landungsari, Malang

### 3.4.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian kali ini adalah Aluminium Al-Mg-Si



Gambar 3.8 *Scrap* Aluminium Al-Mg-Si  
Sumber: Laboraturium  $\alpha \beta \gamma$  Landungsari, Malang

### 3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini
2. Menyiapkan tungku peleburan dengan mengatur suhu yang akan digunakan yaitu sebesar  $700^{\circ}\text{C}$
3. Masukkan Al-Mg-Si ke dalam tungku peleburan tunggu sampai melebur
4. Tuang hasil peleburan ke dalam cetakan slab yang telah disiapkan
5. Dilakukan *recycling* pengecoran pada Al-Mg-Si sebanyak 1 kali
6. Panaskan slab sebelum dilakukan proses pengerolan pada suhu  $>0,6 \text{ Tm}$
7. Lakukan proses pengerolan panas dengan reduksi sebesar
  - a. Untuk spesimen 1: 30%
  - b. Untuk spesimen 2: 40%
  - c. Untuk spesimen 3: 50%
8. Ukur perubahan panjang, lebar, dan tebal pada plat yang sudah di rol
9. Foto bentuk geometri dari setiap spesimen hasil pengerolan pada *recycling* aluminium Al-Mg-Si hasil *recycling*
10. Uji kekerasan menggunakan *Rockwell Hardness Test*

#### 3.5.1 Prosedur Pembuatan Slab

Prosedur pembuatan slab yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat dan bahan untuk pembuatan *slab*
2. Panaskan tungku peleburan sampai pada temperatur  $700^{\circ}\text{C}$

3. Masukkan scrap aluminium kedalam tungku peleburan
4. Buang terak yang terdapat pada saat proses peleburan aluminium
5. Panaskan cetakan yang akan dipakai
6. Tuang aluminium yang telah melebur ke dalam cetakan yang sudah dipanaskan
7. Tunggu aluminium sampai tersolidifikasi di dalam cetakan
8. Pisahkan cetakan dengan *slab* yang telah jadi

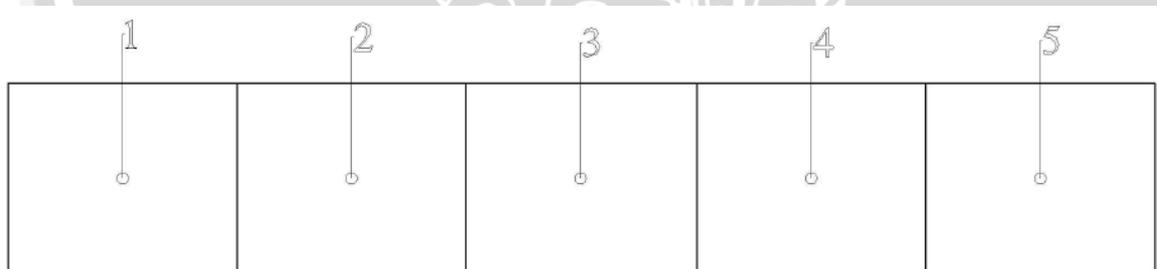
### 3.5.2 Prosedur Pengerolan Panas

Prosedur pengerolan panas yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat dan bahan untuk pengerolan panas
2. Panaskan tungku pemanasan sampai pada temperatur 400°C
3. Masukkan slab ke dalam tungku pemanas
4. Cek temperatur pada slab sampai pada temperatur 400°C
5. Keluarkan *slab* dari tungku pemanas
6. Masukkan *slab* yang sudah dipanaskan ke dalam mesin *roll*

### 3.6 Titik Pengambilan Data Kekerasan

Untuk pengambilan data uji kekerasan diberikan titik sebagai gambar 3.9



Gambar 3.9 Titik uji kekerasan

Koordinat titik uji kekerasan:

$$\text{Titik 1} = X = \frac{1}{10}p ; Y = \frac{1}{2}l$$

$$\text{Titik 2} = X = \frac{1}{3,33}p ; Y = \frac{1}{2}l$$

$$\text{Titik 3} = X = \frac{1}{2}p ; Y = \frac{1}{2}l$$

$$\text{Titik 4} = X = \frac{1}{1,43}p ; Y = \frac{1}{2}l$$

$$\text{Titik 5} = X = \frac{1}{1,11}p ; Y = \frac{1}{2}l$$

### 3.7 Rancangan Hasil Percobaan

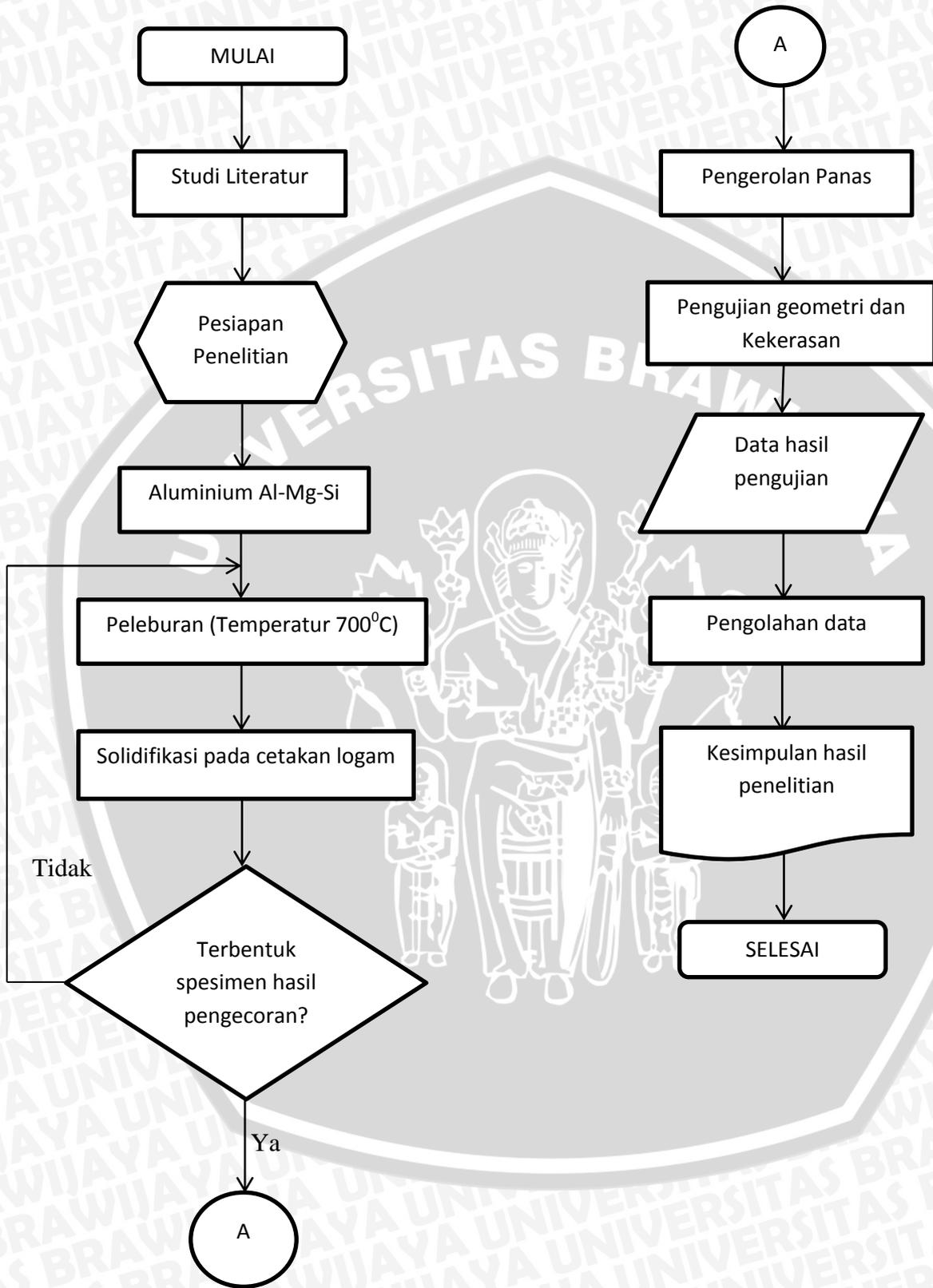
Hasil dari percobaan ini nantinya akan disajikan dalam bentuk:

1. Hasil foto geometri
2. Pembuatan tabel
3. Pembuatan grafik

Hal di atas dilakukan untuk mempermudah untuk membaca hasil penelitian



3.8 Diagram Alir Penelitian



## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisa Data Geometri

##### 4.1.1 Perbandingan Bentuk Sebelum dan Sesudah Pengerolan

Untuk melihat perbedaan bentuk antara sebelum dengan sesudah pengerolan dilakukan perbandingan dengan foto benda kerja sebelum dan sesudah pengerolan.

Tabel 4.1 Perbandingan bentuk plat sebelum dan sesudah pengerolan

Reduksi	Replikasi	Bentuk Sebelum Pengerolan	Bentuk Sesudah Pengerolan
30%	1		
	2		
	3		
40%	1		
	2		
	3		
50%	1		
	2		
	3		

Dari tabel 4.1 dapat dilihat perbedaan antara sebelum dengan sesudah pengerolan pada reduksi celah sebesar 30% dari benda kerja, sebelum dilakukan pengerolan plat cenderung lurus tidak ada pelengkungan di sisinya namun pada foto plat setelah dilakukan proses pengerolan benda kerja mengalami pelengkungan bentuk. Hal serupa juga dapat dilihat pada benda kerja yang diberi perlakuan pengerolan panas dengan reduksi celah yang diberikan sebesar 40% dari benda kerja, sebelum pengerolan panas plat cenderung lurus dan tidak melengkung tetapi setelah dilakukan proses pengerolan panas plat mengalami pelengkungan. Pelengkungan plat terjadi karena adanya penambahan panjang yang tidak sama pada setiap sisinya yang disebabkan karena pembebanan yang tidak merata.

Sedangkan pada benda kerja yang diberi perlakuan pengerolan panas dengan reduksi celah sebesar 50% dari benda kerja, sebelum dilakukan pengerolan plat cenderung lurus dan tidak ada pelengkungan. Setelah benda kerja dilakukan proses pengerolan panas plat mengalami deformasi yang menyebabkan benda kerja hancur. Hal tersebut dapat disebabkan karena kekuatan dari plat tidak mampu menahan beban yang diberikan pada reduksi 50% dari benda kerja sehingga plat menjadi hancur.

#### **4.1.2 Data Hasil Pengukuran Dimensi**

Pengukuran dimensi benda kerja dilakukan untuk mengetahui perbedaan dimensi benda kerja sebelum dan setelah dilakukannya proses pengerolan panas. Dimensi yang diukur adalah panjang, lebar, dan tebal dari benda kerja.

Tabel 4.2 Panjang plat sebelum dan sesudah pengerolan panas

Reduksi	Replikasi	Panjang (mm)		Panjang rata-rata sesudah pengerolan (mm)
		Sebelum Pengerolan	Sesudah Pengerolan	
30%	1	200	214	216
	2	200	220	
	3	200	214	
40%	1	200	232	233,7
	2	200	229	
	3	200	240	
50%	1	200	-	-
	2	200	-	
	3	200	-	

Tabel 4.3 Lebar plat sebelum dan sesudah pengerolan panas

Reduksi	Replikasi	Lebar (mm)		Lebar rata-rata sesudah pengerolan (mm)
		Sebelum Pengerolan	Sesudah Pengerolan	
30%	1	33	33,5	33,6
	2	33	33,6	
	3	33	33,7	
40%	1	33	33,7	34,03
	2	33	33,8	
	3	33	34,6	
50%	1	33	-	-
	2	33	-	
	3	33	-	

Tabel 4.4 Tebal plat sebelum dan sesudah pengerolan panas

Reduksi	Replikasi	Tebal (mm)		Tebal rata-rata sesudah pengerolan (mm)
		Sebelum Pengerolan	Sesudah Pengerolan	
30%	1	5	4,2	4,13
	2	5	4,2	
	3	5	4	
40%	1	5	3,6	3,63
	2	5	3,5	
	3	5	3,8	
50%	1	5	-	-
	2	5	-	
	3	5	-	

#### 4.1.2.1 Perhitungan tebal reduksi benda kerja

Perhitungan tebal reduksi benda kerja dilakukan untuk mengetahui berapa persen benda kerja tereduksi jika diberikan reduksi celah yang sudah ditentukan. Untuk perhitungan reduksi dihitung menggunakan persamaan 2.4, yaitu:

$$R = 100\% \frac{h_0 - h_f}{h_0}$$

Dimana: R = Reduksi (%)

$h_0$  = Tebal sebelum pengerolan (mm)

$h_f$  = Tebal sesudah pengerolan (mm)

1. Reduksi celah 30% dari benda kerja

$$R = 100\% \frac{5 - 4,13}{5}$$

$$R = 17,4 \%$$

Pada reduksi celah sebesar 30% dari benda kerja, tebal rata-rata yang didapat adalah sebesar 17,4%. Tebal yang didapat berbeda sebesar 12,6% dari reduksi tebal yang diharapkan. Hal ini disebabkan karena ada efek *springback* dari benda kerja sehingga reduksi yang didapatkan tidak sesuai dengan yang diharapkan.

*Springback* merupakan gaya balik yang ditimbulkan akibat pengaruh elastisitas bahan pelat yang mengalami proses pembentukan. Perubahan ini terjadi akibat dari perubahan regangan yang dihasilkan oleh pemilahan elastik. Jika beban dihilangkan regangan total akan berkurang disebabkan oleh terjadinya pemulihan elastik. Pemulihan elastik berarti pula balikan pegas, akan mungkin besar jika tegangan luluh semakin tinggi, atau modulus elastik lebih rendah dan regangan plastiknya makin besar.

2. Reduksi celah 40% dari benda kerja

$$R = 100\% \frac{5 - 3,63}{5}$$

$$R = 27,4\%$$

Pada reduksi celah sebesar 40% dari benda kerja, tebal rata-rata yang didapat adalah sebesar 27,4%. Tebal yang didapat berbeda sebesar 12,6% dari reduksi tebal yang diharapkan. Hal ini disebabkan karena ada efek *springback* dari benda kerja sehingga reduksi yang didapatkan tidak sesuai dengan yang diharapkan. *Springback* merupakan gaya balik yang ditimbulkan akibat pengaruh elastisitas bahan pelat yang mengalami proses pembentukan.

3. Reduksi celah 50% dari benda kerja

Pada reduksi 50% ini diharapkan benda kerja mengalami perubahan tebal sebesar 2,5 mm tetapi karena benda kerja pada reduksi ini hancur maka perhitungan tebal tidak bisa dilakukan.

#### 4.1.2.2 Perhitungan Perbandingan Pertambahan Panjang, Lebar dan Tebal

Perhitungan perbandingan pertambahan panjang, lebar dan tebal dilakukan untuk mengetahui jika diberi reduksi ketebalan berapa perbandingan yang didapat antara panjang, lebar dan tebal. Untuk menghitung pertambahan panjang digunakan persamaan:

$$\text{Pertambahan panjang} = \frac{\text{panjang akhir} - \text{panjang awal}}{\text{panjang awal}} 100\%$$

Untuk pertambahan lebar digunakan persamaan:

$$\text{pertambahan lebar} = \frac{\text{lebar akhir} - \text{lebar awal}}{\text{lebar awal}} 100\%$$

Untuk perhitungan pengurangan tebal menggunakan persamaa sama seperti reduksi yaitu:

$$R = \frac{h_0 - h_f}{h_0} 100\%$$

1. Perbandingan panjang, lebar dan tebal pada reduksi celah 30% dari benda kerja

$$\text{Pertambahan panjang} = \frac{216-200}{200} 100\%$$

$$\text{Pertambahan panjang} = 8\%$$

$$\text{Pertambahan lebar} = \frac{33,6 - 33}{33} 100\%$$

$$\text{Pertambahan lebar} = 1,82\%$$

$$\text{Pengurangan tebal} = 17,4\%$$

Jadi rasio perbandingan panjang, lebar dan tebal pada reduksi celah 30% dari benda kerja adalah 1 : 0,23 : 2,18

2. Perbandingan panjang, lebar dan tebal pada reduksi celah 40% dari benda kerja

$$\text{Pertambahan panjang} = \frac{233,7 - 200}{200} 100\%$$

$$\text{Pertambahan panjang} = 16,85\%$$

$$\text{Pertambahan lebar} = \frac{34,03 - 33}{33} 100\%$$

$$\text{Pertambahan lebar} = 3,12\%$$

$$\text{Pengurangan tebal} = 27,4\%$$

Jadi perbandingan panjang,tebal dan lebar pada reduksi celah 40% dari benda kerja adalah 1 : 0,19 : 1,63

3. Perbandingan panjang, lebar dan tebal pada reduksi celah 50% dari benda kerja

Pada reduksi 50% ini perhitungan tidak dapat dilakukan karena plat yang diberi reduksi celah 50% dari benda kerja hancur.

Tabel 4.5 Perbandingan persentase pertambahan panjang dan lebar serta pengurangan tebal

Reduksi	Persentase pertambahan panjang setelah pengerolan (%)	Persentase pertambahan lebar setelah pengerolan (%)	Persentase pengurangan tebal setelah pengerolan (%)
30%	8%	1,82%	17,4%
40%	16,8%	3,12%	27,4%
50%	-	-	-

#### 4.2 Data Hasil Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari reduksi benda kerja terhadap kekerasan yang dihasilkan.

Tabel 4.6 Nilai kekerasan pada setiap reduksi ketebalan

Reduksi	Titik	Nilai Kekerasan (HRB)	Nilai Kekerasan Rata-rata (HRB)
30%	1	19	16,2
	2	16	
	3	16	
	4	15	
	5	15	
40%	1	25	22
	2	19	
	3	24	
	4	25	
	5	17	
50%	1	26	24,8
	2	27	
	3	24	
	4	25	
	5	22	

Pada tabel 4.6 dapat dilihat nilai kekerasan pada reduksi celah 30% dari benda kerja pada titik 1 sampai 5 nilainya berturut-turut yaitu 19 HRB, 16 HRB, 16 HRB, 15 HRB, 15 HRB dan dengan rata-rata nilai kekerasan sebesar 16,2 HRB. Pada reduksi celah 40% dari benda kerja nilai kekerasan dari titik 1 sampai 5 nilainya berturut-turut yaitu 25 HR, 19 HRB, 24 HRB, 25 HRB, 17 HRB dan dengan rata-rata nilai kekerasan sebesar 22 HRB.

Pada reduksi celah 50% dari benda kerja nilai kekerasan dari titik 1 sampai 5 nilainya berturut-turut yaitu 26 HRB, 27 HRB, 24 HRB, 25 HRB, 22 HRB dan dengan rata-rata nilai kekerasan sebesar 24,8 HRB.

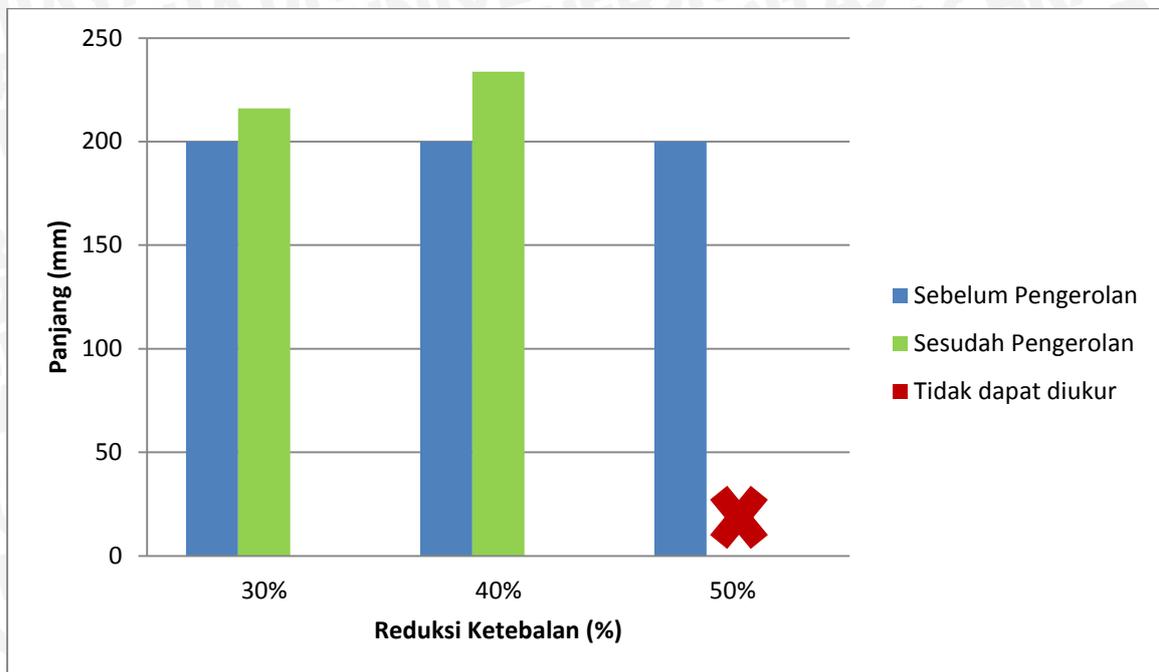
Jika dikonversikan menjadi Brinell Hardness Number (BHN) dengan beban 500 kg maka rata-rata nilai kekerasannya adalah sebesar 60 BHN pada plat yang diberi reduksi tebal celah 30% dari benda kerja, 63 BHN pada plat yang diberi reduksi tebal celah 40% dari benda kerja dan 64 BHN pada plat yang diberi reduksi tebal celah 50% dari benda kerja.

Tabel 4.7 Konversi nilai kekerasan dari HRB menjadi BHN

Reduksi	Rata-rata nilai kekerasan dengan <i>Rockwell Hardness Test</i> (HRB)	Konversi rata-rata nilai kekerasan menjadi <i>Brinell Hardness Number</i> (BHN)
30%	16,2	60
40%	22	63
50%	24,8	64

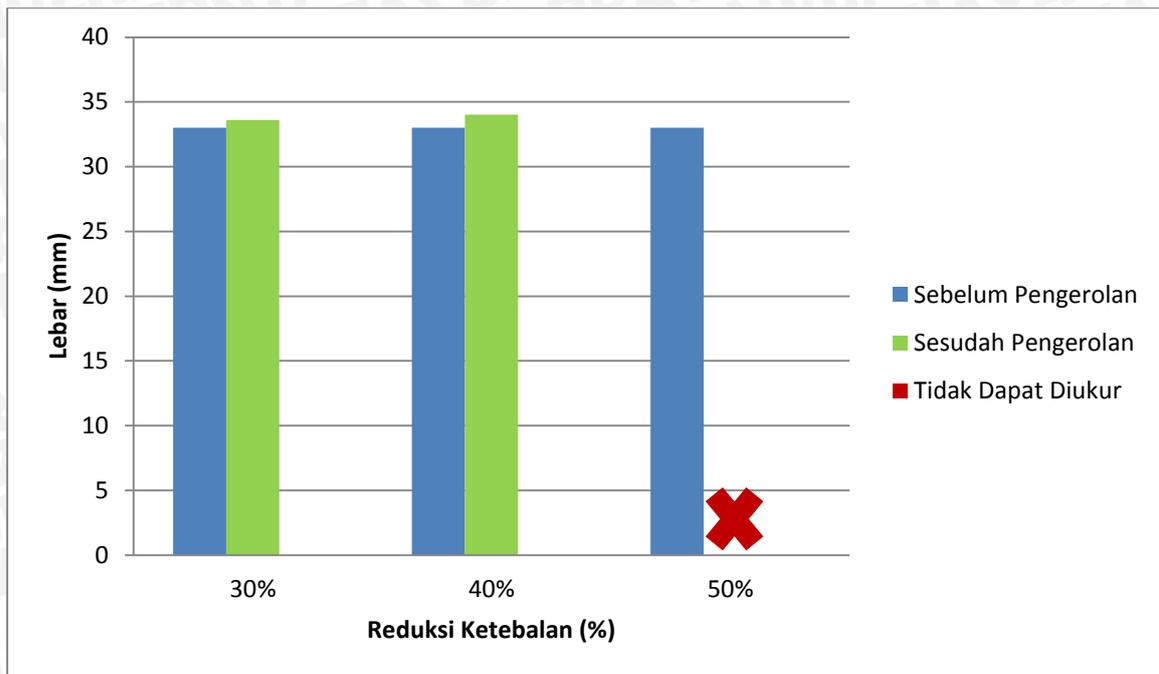
### 4.3 Pembahasan

#### 4.3.1 Pembahasan Grafik Dimensi



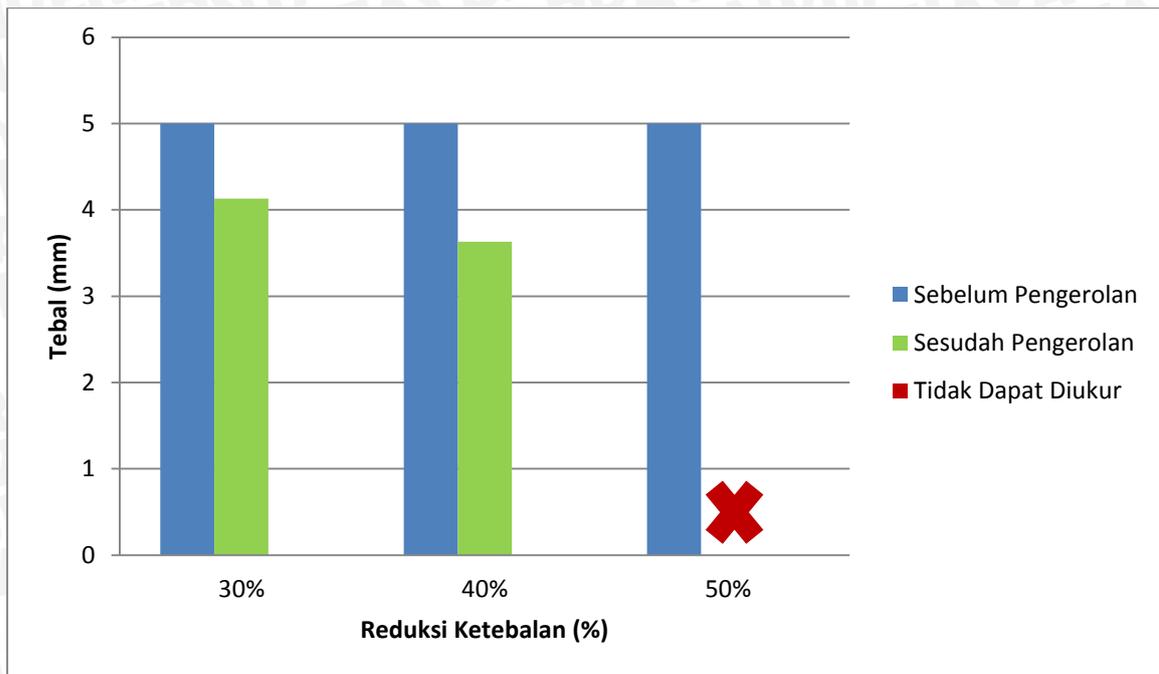
Gambar 4.1 Grafik pengaruh reduksi ketebalan terhadap perubahan panjang

Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa terdapat pengaruh reduksi ketebalan terhadap perubahan panjang. Pada reduksi 30% panjang sebelum pengerolan panas sebesar 200 mm berubah menjadi 216 mm bertambah panjang sebesar 16 mm. Pada reduksi 40% panjang sebelum pengerolan panas sebesar 200 mm berubah menjadi 233,7 mm bertambah panjang sebesar 33,7 mm. Pada reduksi 50% perubahan panjang tidak dapat diukur karena benda kerja hancur. Dilihat dari reduksi 30% dan 40% semakin besar reduksi ketebalan maka penambahan panjang yang didapatkan akan semakin besar.



Gambar 4.2 Grafik pengaruh reduksi ketebalan terhadap perubahan lebar

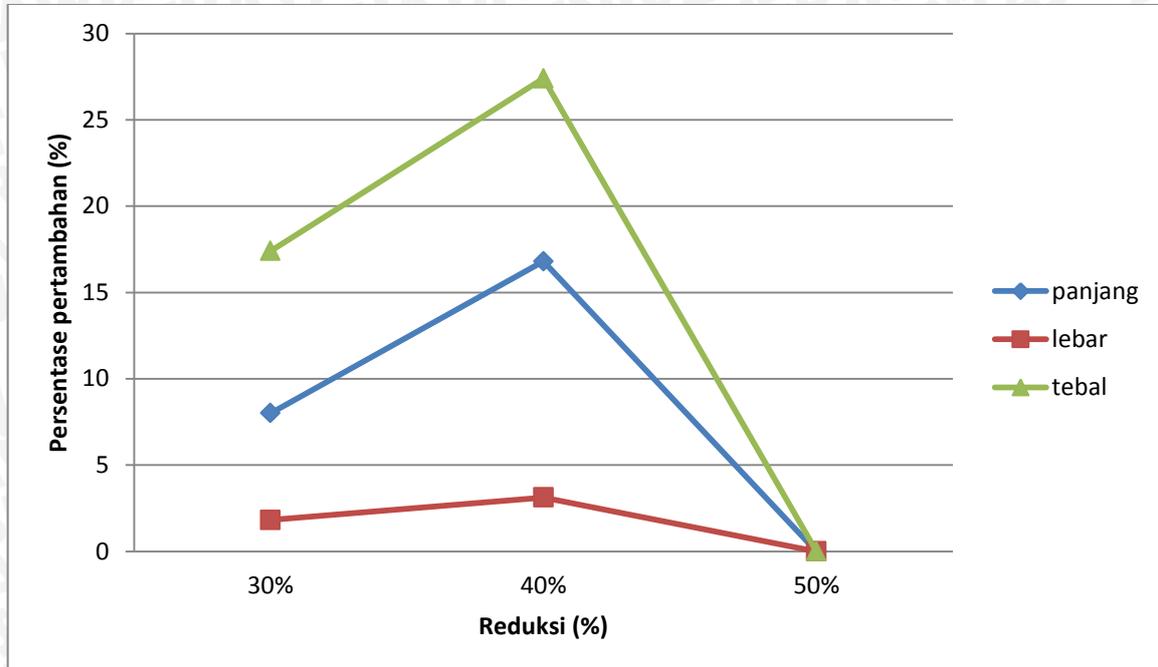
Dari gambar 4.2 dapat dilihat reduksi ketebalan juga berpengaruh terhadap lebar plat yang dihasilkan. Pada reduksi 30% lebar sebelum pengerolan panas sebesar 33 mm berubah menjadi sebesar 33,6 mm setelah pengerolan bertambah lebar sebesar 0,6 mm. Pada reduksi 40% lebar sebelum pengerolan panas sebesar 33 mm berubah menjadi sebesar 34,03 mm bertambah lebar sebesar 1,03 mm. Pada reduksi 50% lebar plat tidak dapat diukur karena pada reduksi 50% plat menjadi hancur. Dilihat dari reduksi 30% dan 40% semakin besar reduksi ketebalan maka pertambahan lebar juga semakin besar.



Gambar 4.3 Grafik pengaruh reduksi ketebalan terhadap tebal

Dari gambar 4.3 dapat dilihat bahwa reduksi ketebalan berpengaruh terhadap tebal plat yang dihasilkan. Pada reduksi 30% tebal sebelum pengerolan panas sebesar 5 mm seharusnya berubah menjadi sebesar 3,5 mm tetapi perubahan tebal yang didapatkan sebesar 4,13 mm berkurang sebesar 0,87 mm. Hal ini disebabkan karena adanya efek *springback* dari benda kerja yang dapat mengubah ketebalan kembali menjadi lebih tebal dibanding ketebalan yang diberikan pada celah. Pada reduksi 40% tebal sebelum pengerolan panas sebesar 5 mm seharusnya berubah menjadi sebesar 3 mm tetapi perubahan tebal yang didapatkan sebesar 3,63 mm berkurang sebesar 1,37 mm. Sama seperti reduksi 30% hal ini disebabkan karena adanya efek *springback* dari benda kerja yang dapat mengubah ketebalan kembali menjadi lebih tebal dibanding ketebalan yang diberikan pada celah. *Springback* merupakan gaya balik yang ditimbulkan akibat pengaruh elastisitas bahan pelat yang mengalami proses pembentukan. Perubahan ini terjadi akibat dari perubahan regangan yang dihasilkan oleh pemilihan elastik. Jika beban dihilangkan regangan total akan berkurang disebabkan oleh terjadinya pemulihan elastik. Pemulihan elastik berarti pula balikan pegas, akan mungkin besar jika tegangan luluh semakin tinggi, atau modulus elastik lebih rendah dan regangan plastiknya makin besar.

. Pada reduksi 50% tebal plat tidak dapat diukur karena pada reduksi 50% plat menjadi hancur. Dilihat dari reduksi 30% dan 40% semakin besar reduksi ketebalan yang diberikan maka pengurangan ketebalan juga semakin besar.



Gambar 4.4 Grafik persentase perbandingan pertambahan panjang dan lebar serta pengurangan tebal

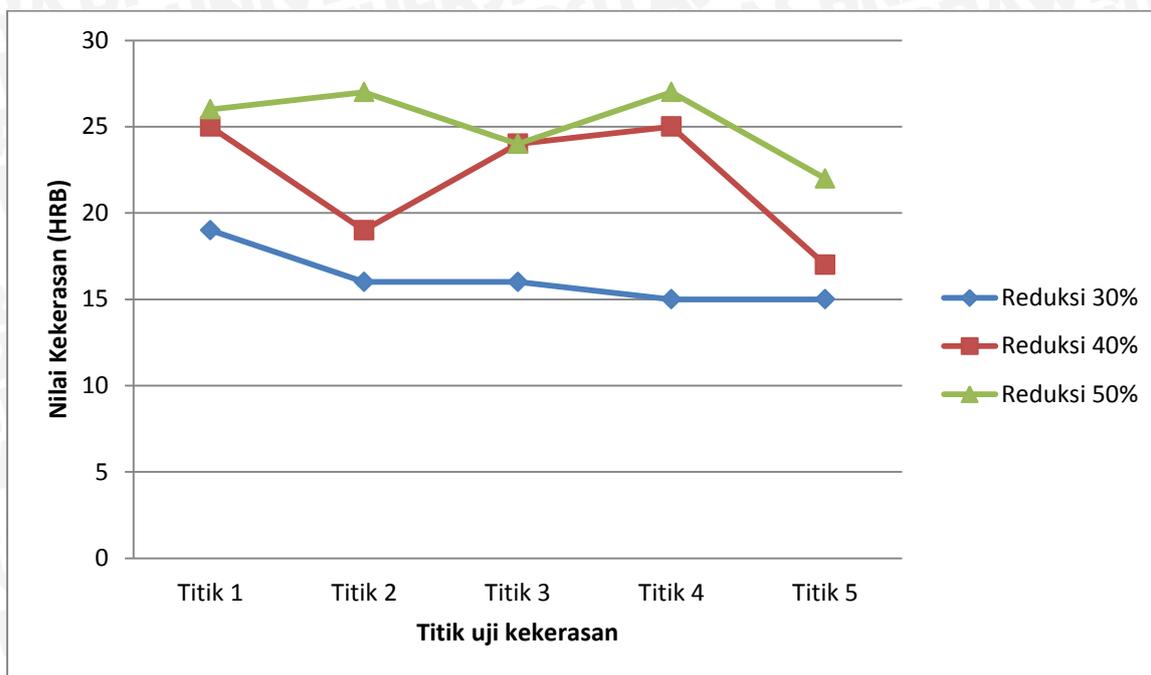
Pada gambar 4.4 dapat dilihat jika persentase pertambahan panjang pada reduksi 30% adalah sebesar 8% dari panjang awal, pada reduksi 40% persentase pertambahan panjang yang didapat adalah sebesar 16,8% dari panjang awal dan pada reduksi 50% tidak dapat dihitung karena benda kerja hancur.

Persentase pertambahan lebar pada reduksi 30% adalah sebesar 1,82% dari lebar awal, pada reduksi 40% persentase pertambahan lebar yang didapat adalah sebesar 3,12% dari lebar awal dan pada reduksi 50% tidak dapat dihitung karena benda kerja hancur.

Persentase pengurangan tebal pada reduksi 30% adalah sebesar 17,4% dari tebal awal, pada reduksi 40% persentase pengurangan tebal yang didapat adalah sebesar 27,4% dari tebal awal dan pada reduksi 50% tidak dapat dihitung karena benda kerja hancur.

Jika dilihat dari persentase pertambahan panjang dan lebar dapat diketahui bahwa kecenderungan pertambahan lebih ke arah panjang plat jika dibanding ke arah lebar plat. Hal ini disebabkan karena pada saat proses pengerolan benda kerja dimasukkan kedalam celah rol pada arah sumbu panjang sehingga kompresi ke arah sumbu tebal lebih banyak dirubah ke arah sumbu panjang.

### 4.3.2 Pembahasan Grafik Kekerasan



Gambar 4.5 Grafik pengaruh reduksi ketebalan terhadap distribusi kekerasan

Pada gambar 4.5 dapat dilihat nilai kekerasan pada reduksi celah 30% dari benda kerja pada titik 1 sampai 5 nilainya berturut-turut yaitu 19 HRB, 16 HRB, 16 HRB, 15 HRB, 15 HRB dan dengan rata-rata nilai kekerasan sebesar 16,2 HRB. Pada reduksi celah 40% dari benda kerja nilai kekerasan dari titik 1 sampai 5 nilainya berturut-turut yaitu 25 HRB, 19 HRB, 24 HRB, 25 HRB, 17 HRB dan dengan rata-rata nilai kekerasan sebesar 22 HRB. Pada reduksi celah 50% dari benda kerja nilai kekerasan dari titik 1 sampai 5 nilainya berturut-turut yaitu 26 HRB, 27 HRB, 24 HRB, 25 HRB, 22 HRB dan dengan rata-rata nilai kekerasan sebesar 24,8 HRB.

Dilihat dari rata-rata nilai kekerasannya jika semakin besar reduksi yang diberikan maka nilai kekerasannya juga akan semakin meningkat. Nilai kekerasannya meningkat dari reduksi 30% nilai kekerasannya sebesar 16,2 HRB, reduksi 40% nilai kekerasannya sebesar 22 HRB, dan pada reduksi 50% nilai kekerasannya sebesar 24,8 HRB. Peningkatan nilai kekerasan ini disebabkan karena adanya perbaikan struktur mikro dan semakin besar reduksi yang diberikan maka kerapatan dislokasinya juga semakin tinggi sehingga nilai kekerasan pada reduksi 30% sampai reduksi 50% terus meningkat. Jika semakin tinggi nilai kekerasan dari suatu material maka untuk proses pembentukannya juga akan semakin susah.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang sudah dilakukan dapat ditarik kesimpulan yaitu:

##### 1. Geometri:

- a. Bentuk slab sebelum dilakukan proses pengerolan cenderung lurus tetapi setelah dilakukan proses pengerolan akan menjadi melengkung
  - b. Semakin besar reduksi ketebalan yang diberikan maka penambahan panjang dan lebar pada benda kerja akan semakin besar juga. Nilai panjang dan lebar pada reduksi 30% dan 40% berturut-turut adalah 216 mm dan 33,6 mm, dan 233,7 mm dan 34,08 mm. Pada reduksi 50% tidak dapat diukur karena benda kerja hancur.
  - c. Hasil pemberian reduksi ketebalan pada celah tidak sama dengan hasil ketebalan benda kerja yang dihasilkan. Pada reduksi celah 30% dan 40% berturut-turut pengurangan tebal yang dihasilkan adalah 4,13 mm dan 3,63 mm. Pada reduksi 50% tidak dapat diukur karena benda kerja hancur.
  - d. Pertambahan besar dimensi ke arah panjang lebih besar dibandingkan pertambahan ke arah lebar. Pada reduksi 30% dan 40% pertambahan panjang dan lebar berturut-turut sebesar 16 mm : 0,6 mm dan 33,7 mm : 1,08 mm
- ##### 2. Semakin besar reduksi ketebalan yang diberikan maka nilai kekerasannya juga akan semakin meningkat. Nilai kekerasannya berturut-turut naik dari reduksi 30% sampai 50% adalah 16,2 HRB, 22 HRB, dan 24,8 HRB

## 5.2 Saran

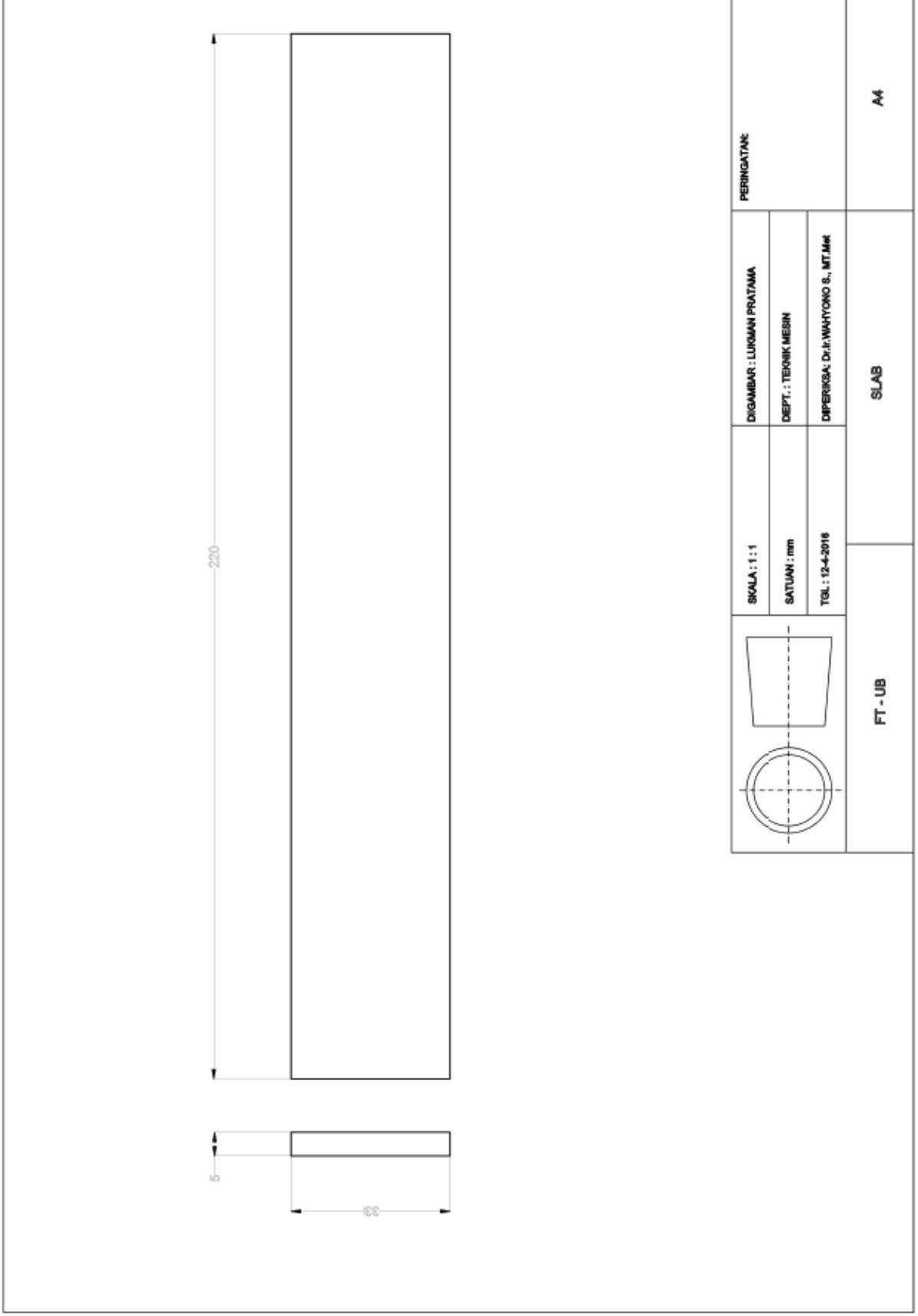
Adapun saran yang diberikan:

1. Sebaiknya saat pengecoran slab suhu saat penuangan lebih diperhatikan lagi agar panjang benda kerjanya bisa mencapai target yang diinginkan
2. Sebaiknya suhu saat pemanasan benda kerja sebelum dilakukan proses pengerolan lebih sering diperiksa agar benda kerja tidak meleleh saat pemanasan
3. Sebaiknya reduksi ketebalan celah lebih sering dikontrol agar tidak terjadi perubahan reduksi ketebalan celah setelah dilakukan proses pengerolan.



## DAFTAR PUSTAKA

- Generousdi. 2012. Pengaruh Temperature dan Reduksi pada Proses Canai Panas Paduan Alumunium 2024 . Jambi : Sekolah Tinggi Teknologi Nasional
- A.H. Ismoyo, Parikin, Bandriyana 2014. Analisis Pengaruh Proses Pengerolan dan Penempaan Panas pada Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Paduan ZrNbMoGe. Tangerang : Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju – BATAN
- Sungkono dan S.Aidah 2014, Pengaruh Reduksi Tebal terhadap Mikrostruktur dan Kekerasan Paduan Zr-0,4%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr Pasca Pengerolan Panas, Serpong: Badan Teknologi Bahan Bakar Nuklir –BATAN
- Brito, Chrystoper., Vida, Talita., Freitas, Emmanuelle., Cheung, Noe., Spinelli E, Jose., & Garcia, Amauri. 2016. *Cellular/dendritic arrays and intermetallic phases affecting corrosion and mechanical resistances of an Al-Mg-Si alloy*. Campinas : University of Campinas
- DeGarmo, E.Paul. 1988. Materials and Processes in Manufacturing 7<sup>th</sup> Edition. United States of America : Macmillan Publishing Company
- Jain, P L. 2003. Priciple of Foundry Technology. New Delhi : Tata McGraw Hill Publishing Company LTD
- Kalpakjian, S. 1990. *Manufacturing Engineering and Technology*. Massachusetts:Adison Wesley Publish Company.
- Dieter, George E. 1986. *Mechanical Metallurgy*. Singapore : Mc Graw Hill.
- Avner, Sidney H. 1974. *Introduction to Physical Metallurgy*, Singapore : Mc Graw Hill.





PT.H.P.METALS INDONESIA

122804

Method: AI-ADC-12  
 Comment: AI-Base ADC-12  
 Sample No.: 1  
 Element Concentration  
 Sample ID:  
 11/10/2015 10:45:10 AM

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.469	0.369	0.0899	0.0534	9.77	0.0113	0.0687	0.0109
2	0.457	0.365	0.0875	0.0532	9.57	0.0112	0.0683	0.0120
3	0.424	0.361	0.0829	0.0531	9.30	0.0112	0.0696	0.0120

	Na	Ca	Ni	Pb	P	Sn	Sb	Sr
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	< 0.00005	0.00087	0.0066	0.0088	< 0.00050	0.0039	< 0.00040	< 0.00010
2	< 0.00005	0.0013	0.0065	0.0082	< 0.00050	0.0032	< 0.00040	< 0.00010
3	< 0.00005	0.0010	0.0060	0.0073	< 0.00050	0.0028	< 0.00040	< 0.00010

	Be	Zr	Bi	Cd	Al			
	%	%	%	%	%			
1	0.00008	0.0012	0.00048	0.00057	89.1			
2	0.00008	0.0012	< 0.00030	0.00054	89.4			
3	0.00008	0.0011	0.00033	0.00056	89.7			



PT.H.P.METALS INDONESIA

122804

Method: AI-ADC-12  
 Comment: AI-Base ADC-12  
 Sample No.: 1  
 Element Concentration  
 Sample ID:  
 11/10/2015 10:45:10 AM

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%
Ø (3)	0.450	0.365	0.0868	0.0532	9.55	0.0112	0.0649	0.0116

	Na	Ca	Ni	Pb	P	Sn	Sb	Sr
	%	%	%	%	%	%	%	%
Ø (3)	< 0.00005	0.0011	0.0064	0.0081	< 0.00050	0.0031	< 0.00040	< 0.00010

	Be	Zr	Bi	Cd	Al			
	%	%	%	%	%			
Ø (3)	0.00008	0.0011	0.00037	0.00056	89.4			



A	Rockwell					Rockwell Superficial					Brinell		Vickers	Shore	Approx Tensile Strength (psi)
	B	C	D	E	F	15-N	30-N	45-N	30-T	3000 kg	500 kg				
60kg Brale	100kg 1/16" Ball	150kg Brale	100kg Brale	100kg 1/8" Ball	60kg 1/16" Ball	15kg Brale	30kg Brale	45kg Brale	30 kg 1/16" Ball	10mm Ball Steel	10mm Ball Steel	136	Diamond Pyramid	Seiero-scope	
86.5	---	70	78.5	---	---	94.0	86.0	77.6	---	---	---	---	1076	101	---
86.0	---	69	77.7	---	---	93.5	85.0	76.5	---	---	---	---	1044	99	---
85.6	---	68	76.9	---	---	93.2	84.4	75.4	---	---	---	---	940	97	---
85.0	---	67	76.1	---	---	92.9	83.6	74.2	---	---	---	---	900	95	---
84.5	---	66	75.4	---	---	92.5	82.8	73.2	---	---	---	---	865	92	---
83.9	---	65	74.5	---	---	92.2	81.9	72.0	---	739	---	---	832	91	---
83.4	---	64	73.8	---	---	91.8	81.1	71.0	---	722	---	---	800	88	---
82.8	---	63	73.0	---	---	91.4	80.1	69.9	---	705	---	---	772	87	---
82.3	---	62	72.2	---	---	91.1	79.3	68.8	---	688	---	---	746	85	---
81.8	---	61	71.5	---	---	90.7	78.4	67.7	---	670	---	---	720	83	---
81.2	---	60	70.7	---	---	90.2	77.5	66.6	---	654	---	---	697	81	320,000
80.7	---	59	69.9	---	---	89.8	76.6	65.5	---	634	---	---	674	80	310,000
80.1	---	58	69.2	---	---	89.3	75.7	64.3	---	615	---	---	653	78	300,000
79.6	---	57	68.5	---	---	88.9	74.8	63.2	---	595	---	---	633	76	290,000
79.0	---	56	67.7	---	---	88.3	73.9	62.0	---	577	---	---	613	75	282,000
78.5	120	55	66.9	---	---	87.9	73.0	60.9	---	560	---	---	595	74	274,000
78.0	120	54	66.1	---	---	87.4	72.0	59.8	---	543	---	---	577	72	266,000
77.4	119	53	65.4	---	---	86.9	71.2	58.6	---	525	---	---	560	71	257,000
76.8	119	52	64.6	---	---	86.4	70.2	57.4	---	500	---	---	544	69	245,000
76.3	118	51	63.8	---	---	85.9	69.4	56.1	---	487	---	---	528	68	239,000
75.9	117	50	63.1	---	---	85.5	68.5	55.0	---	475	---	---	513	67	233,000
75.2	117	49	62.1	---	---	85.0	67.6	53.8	---	464	---	---	498	66	227,000
74.7	116	48	61.4	---	---	84.5	66.7	52.5	---	451	---	---	484	64	221,000
74.1	116	47	60.8	---	---	83.9	65.8	51.4	---	442	---	---	471	63	217,000
73.6	115	46	60.0	---	---	83.5	64.8	50.3	---	432	---	---	458	62	212,000
73.1	115	45	59.2	---	---	83.0	64.0	49.0	---	421	---	---	446	60	208,000
72.5	114	44	58.5	---	---	82.5	63.1	47.8	---	409	---	---	434	58	200,000
72.0	113	43	57.7	---	---	82.0	62.2	46.7	---	400	---	---	423	57	196,000
71.5	113	42	56.9	---	---	81.5	61.3	45.5	---	390	---	---	412	56	191,000
70.9	112	41	56.2	---	---	80.9	60.4	44.3	---	381	---	---	402	55	187,000
70.4	112	40	55.4	---	---	80.4	59.5	43.1	---	371	---	---	392	54	182,000
69.9	111	39	54.6	---	---	79.9	58.6	41.9	---	362	---	---	382	52	177,000
69.4	110	38	53.8	---	---	79.4	57.7	40.8	---	353	---	---	372	51	173,000

68.9	110	37	53.1	---	---	78.8	56.8	39.6	---	344	---	363	50	169,000
68.4	109	36	52.3	---	---	78.3	55.9	38.4	---	336	---	354	49	165,000
67.9	109	35	51.5	---	---	77.7	55.0	37.2	---	327	---	345	48	160,000
67.4	108	34	50.8	---	---	77.2	54.2	36.1	---	319	---	336	47	156,000
66.8	108	33	50.0	---	---	76.6	53.3	34.9	---	311	---	327	46	152,000
66.3	107	32	49.2	---	---	76.1	52.1	33.7	---	301	---	318	44	147,000
65.8	106	31	48.4	---	---	75.6	51.3	32.5	---	294	---	310	43	144,000
65.3	105	30	47.7	---	---	75.0	50.4	31.3	---	286	---	302	42	140,000
64.7	104	29	47.0	---	---	74.5	49.5	30.1	---	279	---	294	41	137,000
64.3	104	28	46.1	---	---	73.9	48.6	28.9	---	271	---	286	41	133,000
63.8	103	27	45.2	---	---	73.3	47.7	27.8	---	264	---	279	40	129,000
63.3	103	26	44.6	---	---	72.8	46.8	26.7	---	258	---	272	39	126,000
62.8	102	25	43.8	---	---	72.2	45.9	25.5	---	253	---	266	38	124,000
62.4	101	24	43.1	---	---	71.6	45.0	24.3	---	247	---	260	37	121,000
62.0	100	23	42.1	---	---	71.0	44.0	23.1	82.0	240	201	254	36	118,000
61.5	99	22	41.6	---	---	70.5	43.2	22.0	81.5	234	195	248	35	115,000
61.0	98	21	40.9	---	---	69.9	42.3	20.7	81.0	228	189	243	35	112,000
60.5	97	20	40.1	---	---	69.4	41.5	19.6	80.5	222	184	238	34	109,000
59.0	96	18	---	---	---	---	---	---	80.0	216	179	230	33	106,000
58.0	95	16	---	---	---	---	---	---	79.0	210	175	222	32	103,000
57.5	94	15	---	---	---	---	---	---	78.5	205	171	213	31	100,000
57.0	93	13	---	---	---	---	---	---	78.0	200	167	208	30	98,000
56.5	92	12	---	---	---	---	---	---	77.5	195	163	204	29	96,000
56.0	91	10	---	---	---	---	---	---	77.0	190	160	196	28	93,000
55.5	90	9	---	---	---	---	---	---	76.0	185	157	192	27	91,000
55.0	89	8	---	---	---	---	---	---	75.5	180	154	188	26	88,000
54.0	88	7	---	---	---	---	---	---	75.0	176	151	184	26	86,000
53.5	87	6	---	---	---	---	---	---	74.5	172	148	180	26	84,000
53.0	86	5	---	---	---	---	---	---	74.0	169	145	176	25	83,000
52.5	85	4	---	---	---	---	---	---	73.5	165	142	173	25	81,000
52.0	84	3	---	---	---	---	---	---	73.0	162	140	170	25	79,000
51.0	83	2	---	---	---	---	---	---	72.0	159	137	166	24	78,000
50.5	82	1	---	---	---	---	---	---	71.5	156	135	163	24	76,000
50.0	81	0	---	---	---	---	---	---	71.0	153	133	160	24	75,000
49.5	80	---	---	---	---	---	---	---	70.0	150	130	---	---	73,000
49.0	79	---	---	---	---	---	---	---	69.5	147	128	---	---	---
48.5	78	---	---	---	---	---	---	---	69.0	144	126	---	---	---
48.0	77	---	---	---	---	---	---	---	68.0	141	124	---	---	---
47.0	76	---	---	---	---	---	---	---	67.5	139	122	---	---	---

46.5	75	--	--	--	--	99.5	--	--	--	67.0	137	120	--	--	--
46.0	74	--	--	--	--	99.0	--	--	--	66.0	135	118	--	--	--
45.5	73	--	--	--	--	98.5	--	--	--	65.5	132	116	--	--	--
45.0	72	--	--	--	--	98.0	--	--	--	65.0	130	114	--	--	--
44.5	71	--	--	100.0	--	97.5	--	--	--	64.2	127	112	--	--	--
44.0	70	--	--	99.5	--	97.0	--	--	--	63.5	125	110	--	--	--
43.5	69	--	--	99.0	--	96.0	--	--	--	62.8	123	109	--	--	--
43.0	68	--	--	98.0	--	95.5	--	--	--	62.0	121	107	--	--	--
42.5	67	--	--	97.5	--	95.0	--	--	--	61.4	119	106	--	--	--
42.0	66	--	--	97.0	--	94.5	--	--	--	60.5	117	104	--	--	--
41.8	65	--	--	96.0	--	94.0	--	--	--	60.1	116	102	--	--	--
41.5	64	--	--	95.5	--	93.5	--	--	--	59.5	114	101	--	--	--
41.0	63	--	--	95.0	--	93.0	--	--	--	58.7	112	99	--	--	--
40.5	62	--	--	94.5	--	92.0	--	--	--	58.0	110	98	--	--	--
40.0	61	--	--	93.5	--	91.5	--	--	--	57.3	108	96	--	--	--
39.5	60	--	--	93.0	--	91.0	--	--	--	56.5	107	95	--	--	--
39.0	59	--	--	92.5	--	90.5	--	--	--	55.9	106	94	--	--	--
38.5	58	--	--	92.0	--	90.0	--	--	--	55.0	104	92	--	--	--
38.0	57	--	--	91.0	--	89.5	--	--	--	54.6	102	91	--	--	--
37.8	56	--	--	90.5	--	89.0	--	--	--	54.0	101	90	--	--	--
37.5	55	--	--	90.0	--	88.0	--	--	--	53.2	99	89	--	--	--
37.0	54	--	--	89.5	--	87.5	--	--	--	52.5	---	87	--	--	--
36.5	53	--	--	89.0	--	87.0	--	--	--	51.8	---	86	--	--	--
36.0	52	--	--	88.0	--	86.5	--	--	--	51.0	---	85	--	--	--
35.5	51	--	--	87.5	--	86.0	--	--	--	50.4	---	84	--	--	--
35.0	50	--	--	87.0	--	85.5	--	--	--	49.5	---	83	--	--	--
34.8	49	--	--	86.5	--	85.0	--	--	--	49.1	---	82	--	--	--
34.5	48	--	--	85.5	--	84.5	--	--	--	48.5	---	81	--	--	--
34.0	47	--	--	85.0	--	84.0	--	--	--	47.7	---	80	--	--	--
33.5	46	--	--	84.5	--	83.0	--	--	--	47.0	---	79	--	--	--
33.0	45	--	--	84.0	--	82.5	--	--	--	46.2	---	79	--	--	--
32.5	44	--	--	83.5	--	82.0	--	--	--	45.5	---	78	--	--	--
32.0	43	--	--	82.5	--	81.5	--	--	--	44.8	---	77	--	--	--
31.5	42	--	--	82.0	--	81.0	--	--	--	44.0	---	76	--	--	--
31.0	41	--	--	81.5	--	80.5	--	--	--	43.4	---	75	--	--	--
30.8	40	--	--	81.0	--	79.5	--	--	--	43.0	---	74	--	--	--
30.5	39	--	--	80.0	--	79.0	--	--	--	42.1	---	74	--	--	--
30.0	38	--	--	79.5	--	78.5	--	--	--	41.5	---	73	--	--	--
29.5	37	--	--	79.0	--	78.0	--	--	--	40.7	---	72	--	--	--
29.0	36	--	--	78.5	--	77.5	--	--	--	40.0	---	71	--	--	--

28.5	35	--	--	--	78.0	77.0	--	--	39.3	--	71	--	--
28.0	34	--	--	--	77.0	76.5	--	--	38.5	--	70	--	--
27.8	33	--	--	--	76.5	75.5	--	--	37.9	--	69	--	--
27.5	32	--	--	--	76.0	75.0	--	--	37.5	--	68	--	--
27.0	31	--	--	--	75.5	74.5	--	--	36.6	--	68	--	--
26.5	30	--	--	--	75.0	74.0	--	--	36.0	--	67	--	--
26.0	29	--	--	--	74.0	73.5	--	--	35.2	--	66	--	--
25.5	28	--	--	--	73.5	73.0	--	--	34.5	--	66	--	--
25.0	27	--	--	--	73.0	72.5	--	--	33.8	--	65	--	--
24.5	26	--	--	--	72.5	72.0	--	--	33.1	--	65	--	--
24.2	25	--	--	--	72.0	71.0	--	--	32.4	--	64	--	--
24.0	24	--	--	--	71.0	70.5	--	--	32.0	--	64	--	--
23.5	23	--	--	--	70.5	70.0	--	--	31.1	--	63	--	--
23.0	22	--	--	--	70.0	69.5	--	--	30.4	--	63	--	--
22.5	21	--	--	--	69.5	69.0	--	--	29.7	--	62	--	--
22.0	20	--	--	--	68.5	68.5	--	--	29.0	--	62	--	--
21.5	19	--	--	--	68.0	68.0	--	--	28.1	--	61	--	--
21.2	18	--	--	--	67.5	67.0	--	--	27.4	--	61	--	--
21.0	17	--	--	--	67.0	66.5	--	--	26.7	--	60	--	--
20.5	16	--	--	--	66.5	66.0	--	--	26.0	--	60	--	--
20.0	15	--	--	--	65.5	65.5	--	--	25.3	--	59	--	--
--	14	--	--	--	65.0	65.0	--	--	24.6	--	59	--	--
--	13	--	--	--	64.5	64.5	--	--	23.9	--	58	--	--
--	12	--	--	--	64.0	64.0	--	--	23.5	--	58	--	--
--	11	--	--	--	63.5	63.5	--	--	22.6	--	57	--	--
--	10	--	--	--	62.5	63.0	--	--	21.9	--	57	--	--
--	9	--	--	--	62.0	62.0	--	--	21.2	--	56	--	--
--	8	--	--	--	61.5	61.5	--	--	20.5	--	56	--	--
--	7	--	--	--	61.0	61.0	--	--	19.8	--	56	--	--
--	6	--	--	--	60.5	60.5	--	--	19.1	--	55	--	--
--	5	--	--	--	60.0	60.0	--	--	18.4	--	55	--	--
--	4	--	--	--	59.0	59.5	--	--	18.0	--	55	--	--
--	3	--	--	--	58.5	59.0	--	--	17.1	--	54	--	--
--	2	--	--	--	58.0	58.0	--	--	16.4	--	54	--	--
--	1	--	--	--	57.5	57.5	--	--	15.7	--	53	--	--
--	0	--	--	--	57.0	57.0	--	--	15.0	--	53	--	--