

**PENGARUH SUHU PEMANASAN TERHADAP KEKUATAN TARIK
PADA PENGGABUNGAN PELAT A1100 DAN A6061 PADA PROSES
*HOT ROLL BONDING***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



MUHAMAD FAJAR
NIM. 135060201111049

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018

JUDUL SKRIPSI: **LEMBAR PENGESAHAN**
PENGARUH SUHU PEMANASAN TERHADAP KEKUATAN TARIK PADA
PENGARUH SUHU PEMANASAN TERHADAP KEKUATAN TARIK
PADA PENGGABUNGAN PELAT A1100 DAN A6061 PADA PROSES

Nama Mahasiswa: **HOT ROLL BONDING**
NIM: **135060201111049**

Program Studi: **SKRIPSI**
Sektor: **TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



MUHAMAD FAJAR
NIM. 135060201111049

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 20 Juli 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr.Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.
NIP 19750710 199903 1 004

Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, ST., MT.
NIP 19591128 198710 1 001



Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP 19740930 200012 1 001



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 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Malang, 24 Juli 2018

Mahasiswa



Muhamad Fajar

NIM. 135060201111049

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



JUDUL SKRIPSI:

**PENGARUH SUHU PEMANASAN TERHADAP KEKUATAN TARIK PADA
PENGGABUNGAN PELAT A1100 DAN A6061 PADA PROSES *HOT ROLL BONDING***

Nama Mahasiswa : Muhamad Fajar
NIM : 135060201111049
Program Studi : Teknik Mesin
Konsentrasi : Teknik Manufaktur

KOMISI PEMBIMBING:

Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.

TIM DOSEN PENGUJI:

Dosen Penguji I : Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met.
Dosen Penguji II : Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D.
Dosen Penguji III : Rudianto Raharjo, ST., MT.

Tanggal Ujian : 10 Juli 2018
SK Penguji : 1393/UN10.F07/SK/2018



*Terima Kasih
Untuk...
Ayah dan Ibu*



KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga skripsi yang berjudul “**Pengaruh Suhu Pemanasan Terhadap Kekuatan Tarik Pada Penggabungan Pelat A1100 Dan A6061 Pada Proses *Hot Roll Bonding***” ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan dan penyelesaian skripsi ini telah dibantu oleh banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini:

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D, selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng, Ph.D., selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT., selaku Kepala Program Studi S1 Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE, selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Teknik Produksi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
5. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng., selaku Pembimbing Akademik yang telah memberi pengarahan seputar akademik.
6. Bapak Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng., selaku pembimbing I skripsi yang telah memberikan bimbingan dan motivasi selama peyusunan skripsi.
7. Bapak Dr. Ir. Achmad As’ad Sonief, MT., selaku pembimbing II skripsi yang telah memberikan bimbingan dan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
8. Segenap staf pengajar khususnya dosen-dosen dan jajaran staf karyawan Jurusan Teknik Mesin dan Fakultas Teknik.
9. Bapak Rachwaniansyah dan Ibu Ikah Holikah selaku orang tua penulis yang selalu memberikan dukungan baik berupa moral dan doa agar penulis selalu diberikan kelancaran dalam setiap kegiatan.
10. Novi Rachmawati dan Irfan Faturahman selaku saudara/saudari kandung penulis yang telah memberikakn semangat dalam penulisan skripsi ini.
11. Teman satu perjuangan skripsi Ridha Dharminsyah dan Sibro Malisy yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.
12. Teman satu angkatan Mesin 2013 yang selalu memberikan semangat dan bantuan atas skripsi ini.



13. Bapak Rudianto Raharjo, ST., MT., selaku Kepala Laboratorium Pengecoran Logam dan Bapak Gatot Siswanto selaku laboran Laboratorium Pengecoran Logam yang telah memberikan semangat dan pembinaan selama saya menjadi asisten.
14. Mas Muchlis, Mas Febry, Mas Aldi, Mas Alfian, Mbak Nurul, Sudiro, Rofi, Redy, Hisyam, Yepy, Tiara, Ahlal, Fathur, Fahri, Ajim, Farhan, Surya, Eka, Pudya selaku rekan asisten Laboratorium Pengecoran Logam
15. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini tidak lepas dari kekurangan. Oleh karena itu penulis sangat menghargai setiap saran dan masukan untuk kesempurnaan laporan proposal skripsi ini. Semoga laporan proposal skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca sekaligus bisa menjadi bahan acuan penelitian selanjutnya.

Malang, 24 Juli 2018

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
SUMMARY	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Aluminium	6
2.2.1 Aluminium Paduan	8
2.2.1.1 Aluminium 1xxx	11
2.2.1.2 Aluminium 6xxx	12
2.3 <i>Metal Cladding</i>	14
2.4 <i>Roll bonding</i>	15
2.4.1 <i>Hot Rolling</i>	16
2.5 Mekanisme <i>Bonding</i>	17
2.6 Pengerollan	19
2.6.1 Gaya-gaya Pengerollan	27
2.6.2 Cacat Pengerollan	30
2.7 Pengujian Kekuatan Tarik	31
2.8 Hubungan antara Uji Tarik dengan Suhu Pemanasan	34
2.9 Patahan	35
2.9.1 Jenis-jenis patahan	35
2.10 Hipotesis	36



BAB III METODE PENELITIAN	39
3.1 Metode Penelitian.....	39
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	39
3.3 Variabel Penelitian	39
3.3.1 Variabel Bebas	39
3.3.2 Variabel Terikat	39
3.3.3 Variabel Terkontrol.....	40
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	40
3.4.1 Alat.....	40
3.4.2 Bahan	47
3.4.2.1 Dimensi Bahan	47
3.5 Skema Penelitian.....	48
3.6 Prosedur Penelitian.....	49
3.6.1 Prosedur <i>Roll Bonding</i>	49
3.6.2 Prosedur Pengujian Tarik.....	50
3.6.3 Prosedur Pengujian <i>Microstructure</i>	50
3.7 Diagram Alir Penelitian	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1 Data Hasil Pengujian.....	55
4.2 Pembahasan.....	56
4.2.1 Kekuatan Tarik.....	56
4.2.2 Tegangan-Regangan.....	57
4.2.3 Hasil Foto Uji <i>Microstructure</i>	59
BAB V PENUTUP	65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran	65
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sistem Penandaan Paduan Aluminium Tempa.....	8
Tabel 2.2	Komposisi, Sifat Mekanik, dan Aplikasi untuk Sebagian Aluminium Tempa Paduan	10
Tabel 2.3	Komposisi Kimia A1100.....	11
Tabel 2.4	Sifat Fisik, Mekanik, dan Massa Jenis A1100	11
Tabel 2.5	Komposisi Kimia A6061	12
Tabel 2.6	Sifat Fisik, Mekanik, dan Massa Jenis A6061	13
Tabel 3.1	Komposisi Kimia A1100 yang digunakan untuk Penelitian.	47
Tabel 3.2	Komposisi Kimia A6061 yang digunakan untuk Penelitian.	47
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Kekuatan Tarik dari Setiap Spesimen Variasi Suhu Pemanasan Awal Pada Proses <i>Hot Roll Bonding</i>	55
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Material Konvensional Tanpa Perlakuan Sebelum Proses <i>Hot Roll Bonding</i>	55
Tabel 4.3	Nilai Regangan Total Pada Spesimen Dengan Suhu Pemanasan Awal 475°C, 525°C, dan 575°C.....	58
Tabel 4.4	Hasil Pengukuran Lebar Celah Pada Setiap Spesimen Variasi Suhu Pemanasan	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses produksi aluminium.....	7
Gambar 2.2	Foto mikro A1050 pada proses akumulatif <i>roll bonding</i>	12
Gambar 2.3	Diagram fasa Al-Mg ₂ Si	13
Gambar 2.4	Foto Mikro A6061 pada proses akumulatif <i>roll bonding</i>	14
Gambar 2.5	Proses <i>roll bonding</i>	16
Gambar 2.6	Proses <i>bonding</i> pada dua buah pelat A1100	18
Gambar 2.7	Urutan dari tahapan metallurgi pada proses <i>diffusion bonding</i>	19
Gambar 2.8	Perubahan butir material setelah proses pengerollan.....	20
Gambar 2.9	Variasi <i>flat rolling</i> dan <i>shape rolling</i>	21
Gambar 2.10	Langkah dalam <i>shape rolling</i> dari pembentukan <i>I-Beam</i>	22
Gambar 2.11	<i>Roll forging</i>	23
Gambar 2.12	<i>Skew rolling</i>	23
Gambar 2.13	<i>Ring rolling</i>	24
Gambar 2.14	<i>Thread rolling</i>	25
Gambar 2.15	<i>Rotary tube piercing</i>	25
Gambar 2.16	<i>Tube rolling</i> , (a) <i>Tube rolling</i> menggunakan <i>mandrel</i> , (b) <i>Tube rolling</i> tanpa <i>mandrel</i>	26
Gambar 2.17	Gaya-gaya pengerollan	27
Gambar 2.18	Distribusi tekanan <i>roll</i> sepanjang busur kontak.....	28
Gambar 2.19	Skema ilustrasi torsi <i>roll</i>	30
Gambar 2.20	<i>Wavy edges</i>	30
Gambar 2.21	Cacat <i>crack</i> , (a) <i>Zipper crack</i> , (b) <i>Edge cracks</i>	31
Gambar 2.22	<i>Alligatoring</i>	31
Gambar 2.23	Ilustrasi gaya tarik pada sebuah tabung	32
Gambar 2.24	Grafik tegangan-regangan	33
Gambar 2.25	Pengaruh suhu pada ukuran butir terekristalisasi	35
Gambar 2.26	Jenis-jenis patahan pada logam akibat beban tarik sesumbu.....	36
Gambar 3.1	Mesin <i>roll bonding</i>	40
Gambar 3.2	<i>Sandpaper</i>	41
Gambar 3.3	Dapur listrik.....	41
Gambar 3.4	Jangka sorong digital	42
Gambar 3.5	Larutan <i>acetone</i>	42



Gambar 3.6	<i>Tachometer</i>	43
Gambar 3.7	Kawat bendrat.....	43
Gambar 3.8	<i>Marker</i>	44
Gambar 3.9	<i>Feeler gauge</i>	44
Gambar 3.10	Gunting pelat	44
Gambar 3.11	Mesin bor.....	45
Gambar 3.12	Digital <i>multimeter</i>	45
Gambar 3.13	Penggaris.....	46
Gambar 3.14	<i>Mesin uji tarik (a) display controller (b) specimen holder</i>	46
Gambar 3.15	Dimensi lembaran proses <i>roll bonding</i> dalam satuan mm.....	47
Gambar 3.16	Dimensi spesimen uji tarik	47
Gambar 3.17	Skema penelitian proses <i>roll bonding</i> dan uji tarik	48
Gambar 3.18	Skema penelitian uji <i>microstructure</i>	49
Gambar 3.19	Diagram alir proses <i>hot roll bonding</i> dan uji tarik	52
Gambar 3.20	Diagram alir proses uji <i>microstructure</i>	53
Gambar 4.1	Grafik hubungan nilai kekuatan tarik terhadap variasi suhu pemanasan awal pada proses <i>hot roll bonding</i>	56
Gambar 4.2	Grafik tegangan-regangan antara spesimen dengan suhu pemanasan awal 475°C, 525°C, dan 575°C	57
Gambar 4.3	Foto patahan spesimen pengujian tarik (a) suhu pemanasan 475°C (b) suhu pemanasan 525°C (c) suhu pemanasan 575°C	59
Gambar 4.4	Foto <i>microstructure</i> lebar celah antar spesimen dengan suhu pemanasan awal (a) 475°C (b) 525°C (c) 575°C.....	60
Gambar 4.5	Diagram batang lebar celah rata-rata dari spesimen setiap variasi suhu pemanasan pada proses <i>hot roll bonding</i>	61
Gambar 4.6	Foto <i>microstructure</i> butiran spesimen dengan suhu pemanasan awal (a) 475°C (b) 525°C (c) 575°C	62

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Surat Keterangan Telah Melakukan Uji Tarik
- Lampiran 2 Lembar Hasil Pengujian Tarik
- Lampiran 3 Lembar Hasil Uji Komposisi Material A1100 dan A6061
- Lampiran 4 Lembar Hasil Uji *Microstructure*
- Lampiran 5 Grafik Tegangan - Regangan Tiap Spesimen Pada Suhu Pemanasan 475°C, 525°C, dan 575°C
- Lampiran 6 Contoh Perhitungan Ukuran Butir
- Lampiran 7 Desain Mesin *Roll Bonding*



RINGKASAN

Muhamad Fajar, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2018, Pengaruh suhu pemanasan terhadap kekuatan tarik pada penggabungan pelat A1100 dan A6061 pada proses *hot roll bonding*, Dosen Pembimbing: Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng. dan Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.

Kemampuan mengolah bahan mentah menjadi produk berkualitas tinggi dengan biaya rendah adalah hal yang terus berkembang agar dapat menghadapi persaingan di zaman modern ini, terutama pengolahan logam pada aluminium. Paduan aluminium berlapis memberikan keuntungan besar dibandingkan paduan aluminium tunggal untuk berbagai aplikasi. Sebagai contoh, lapisan kulit pesawat untuk pesawat komersial dilapisi dengan lapisan bagian dalam yang merupakan paduan aluminium kekuatan tinggi sementara lapisan luarnya adalah aluminium murni yang memiliki ketahanan korosi yang tinggi

Salah satu metode untuk mendapatkan paduan aluminium berlapis adalah dengan menggunakan metode *metal cladding* dengan proses *hot roll bonding*. Pada proses *roll bonding*, energi tekan digunakan untuk menggabungkan dua atau lebih lapisan logam. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh suhu pemanasan terhadap nilai kekuatan tarik pada penggabungan antara aluminium A6061 dan A1100 dengan proses *hot roll bonding*. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah suhu pemanasan pelat aluminium A6061 dan A1100 yang telah diberikan persiapan permukaan, dimana variasi suhu pemanasan adalah 475°C, 525°C, dan 575°C. Variabel terikat yang digunakan dalam penelitian ini adalah nilai kekuatan tarik dari spesimen *hot roll bonding*. Variabel yang terkontrol adalah kecepatan roll: 25rpm, *holding time*: 40 menit, proses roll: *hot roll*, *rolling ration*: 50%.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan nilai kekuatan tarik tertinggi adalah 130,26 MPa pada spesimen dengan suhu pemanasan 475°C, dan nilai kekuatan tarik terendah adalah 118,59 MPa pada spesimen dengan suhu pemanasan 575°C. Penurunan nilai kekuatan tarik disebabkan oleh suhu pemanasan yang meningkat dan menyebabkan ukuran butir semakin besar.

Kata Kunci: *aluminium, kekuatan tarik, roll bonding, suhu pemanasan*

SUMMARY

Muhamad Fajar, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, July 2018, *The effect of heating temperature on tensile strength on the merger of A1100 and A6061 plate on hot roll bonding process*, academic supervisor: Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng. and Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.

The ability to process raw material into a high quality products with low cost is a thing that continues to grow in order to face the competition in this modern age, especially metal processing on aluminum. Multi-layered aluminum alloys provide great advantages over single-aluminum alloys for a variety of applications. For example, the fuselage skin sheets for commercial airplanes are layered with the inside structural layer being high strength aluminum alloy while the outside layer being pure aluminum which has high corrosion resistance.

One of the method to get the layered aluminum alloys is by using metal cladding method with hot roll bonding process. On the roll bonding process compressive energy is used to combine two or more layers of metal. The purpose of this research is to know the effect of heating temperature to the value of tensile strength on the bonding of A6061 and A1100 with hot roll bonding process. The independent variables used in this research are the heating temperature of aluminum plate A6061 and A1100 which have been given surface preparation, in which the variation of heating temperature is 475°C, 525°C, and 575°C. The dependent variable used in this research is the tensile strength value of the specimen of the roll bonding. The controlled variable is the roll speed: 25 rpm, holding time: 40minute, roll process: hot roll, rolling ratio: 50%.

The result from this research showed highest tensile strength value is 130,26 MPa at specimen with heating temperature is 475°C, and the lowest tensile strength value is 118,59 MPa at specimen with heating temperature is 575°C. The decrease tensile strength value is caused by heating temperature that increase and caused the grain size getting larger.

Keywords: *aluminum, heating temperature, roll bonding, tensile strength*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan manusia terhadap logam semakin meningkat, karena logam dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang. Semakin berkembangnya permintaan dan kemajuan teknologi dalam pengolahan logam maka semakin tinggi juga daya saing dalam bidang manufaktur, kemampuan untuk mengolah bahan mentah menjadi produk yang berkualitas dengan biaya yang rendah adalah hal yang akan terus berkembang supaya dapat menghadapi persaingan yang ketat pada zaman modern ini. Salah satu logam yang paling banyak digunakan adalah aluminium, karena ketahanan terhadap korosi, ringan dan mudah dalam pembentukannya.

Paduan aluminium berlapis memberikan keuntungan daripada paduan tunggal untuk berbagai aplikasi. Misalnya lembaran untuk kulit badan pesawat komersial, digunakan aluminium paduan dengan kekuatan tinggi sedangkan lapisan luarnya digunakan aluminium murni yang memiliki ketahanan korosi yang tinggi (Liu *et al.*, 2007).

Metal cladding adalah proses pelapisan logam yang penerapannya dilaksanakan dengan memadukan material induk yang dilindungi dengan lapis pelindung berupa logam dengan cara memanaskan keduanya kemudian memadukannya menjadi satu lapisan padu yang lekat satu dengan lainnya, pelapisan satu logam dengan logam lainnya dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat yang diinginkan (Leonard, 2011). Contoh produk dari *metal cladding* adalah koin, *heat exchanger* dan tabung penyimpanan. *Metal cladding* dapat diproduksi dengan *hot roll bonding*, *cold roll bonding*, *explosive bonding*, *centrifugal casting*, dan *brazing*. Proses manufaktur yang paling ekonomis dan produktif untuk *metal cladding* lembaran yang berukuran besar adalah *roll bonding* (Liu *et al.*, 2007). *Roll bonding* adalah proses penyambungan dua logam yang berbeda pada kondisi padat, pada prosesnya dua atau lebih lembaran, atau pelat logam atau paduan ditumpuk bersama dan dilewati melalui sepasang *roll* sampai deformasi yang diinginkan tercapai. Pada umumnya terdapat dua jenis *roll bonding* yaitu *hot rolling* dan *cold rolling*, *hot roll bonding* adalah proses pengerollan yang melibatkan panas dari luar (Chen *et al.*, 2005).

Pada penelitian *hot rolling* yang dilakukan Zacharias *et al.* (1996) tentang pengaruh kecepatan *roll* terhadap kekuatan ikatan metalurgi antarmuka pelat AlMg-2, dengan kecepatan 10,75 ; 11,75 ; 12,75 ; 13,75 ; 14,75 m/menit dan suhu 415 °C menghasilkan nilai

maksimum kekuatan ikatan metalurgi mekanik 74,12 MPa didapat pada kecepatan 13,75 m/menit, dan kecepatan ini merupakan kecepatan optimum untuk mendapatkan kekuatan maksimum ikatan metalurgi antarmuka pelat AlMg-2. Febriyanti *et al.* (2016) melakukan penelitian tentang pengaruh peningkatan persen reduksi terhadap struktur mikro dan sifat mekanik paduan kuningan Cu-Zn 70/30 setelah proses *warm rolling* pada suhu 400°C. Pada penelitian menggunakan variasi persen reduksi 29,03%, 34,4%, dan 38,16% pada suhu konstan yaitu 400°C. Hasil metalografi didapat ukuran butir yang semakin menurun sebesar 30,03 μm di bagian tepi dan 33,45 μm di bagian tengah pada persen reduksi 38,16%. Hasil uji tarik dengan persen reduksi 38,6% menghasilkan nilai *ultimate tensile strength* (UTS) sebesar 478 MPa, *yield strength* (YS) sebesar 434 MPa, dan persentase elongasi sebesar 9%. Untuk hasil uji kekerasan menghasilkan nilai kekerasan sebesar 135,8 HV di bagian tepi dan 128,4 HV di bagian tengah pada persen reduksi 38,16%.

Dari penelitian di atas menggunakan variasi kecepatan putar *roll* untuk mendapatkan kekuatan ikatan metalurgi antarmuka, sedangkan suhu pemanasan awalnya tetap. Persen reduksi menjadi variabel pada penelitian selanjutnya untuk mencari pengaruh terhadap struktur mikro dan sifat mekanik material pada keadaan suhu pemanasan awal konstan yaitu 400°C. Kita belum mengetahui pengaruh suhu pemanasan awal *hot rolling* terhadap kekuatan tarik pada material hasil *hot roll bonding*. Maka dari itu penelitian ini akan membahas tentang pengaruh suhu pemanasan awal *hot roll bonding* terhadap kekuatan tarik dari material A1100 dan A6061.

1.2 Rumusan Masalah

Sesuai dengan uraian pada latar belakang, dapat dirumuskan permasalahan yang akan diteliti yaitu bagaimana pengaruh suhu pemanasan awal terhadap nilai kekuatan tarik pada penggabungan dua buah pelat material A1100 dan A6061 pada proses *hot roll bonding*.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Kecepatan putar *roll* dianggap konstan selama pengerollan.
2. Suhu lingkungan dianggap tidak mempengaruhi proses pengerollan.
3. Suhu material saat pengerollan dianggap konstan.
4. Kondisi material dianggap sama pada semua daerah spesimen setelah pengerollan.

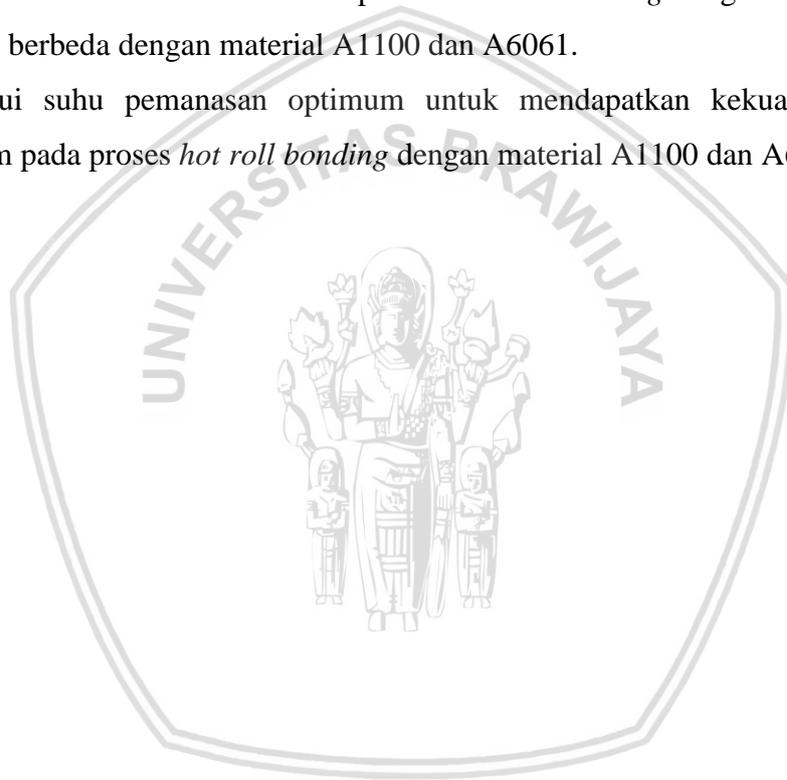
1.4 Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh suhu pemanasan awal *hot roll bonding* terhadap kekuatan tarik pada penggabungan dua buah pelat A1100 dan A6061.
2. Mengetahui suhu pemanasan awal yang optimum untuk mendapatkan nilai kekuatan tarik maksimum pada penggabungan dua buah pelat A1100 dan A6061 dengan metode *hot roll bonding*.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Mengetahui hasil kekuatan tarik dari proses *hot roll bonding* dengan suhu pemanasan awal yang berbeda dengan material A1100 dan A6061.
2. Mengetahui suhu pemanasan optimum untuk mendapatkan kekuatan tarik yang maksimum pada proses *hot roll bonding* dengan material A1100 dan A6061.





BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Generousdi (2010) melakukan penelitian tentang pengaruh suhu dan reduksi terhadap kekerasan dan mikrostruktur pada proses *roll* panas paduan Al2024. Pada penelitian ini menggunakan variasi suhu 350°C dan 400°C, variasi reduksi 30% dan 50%, dari hasil penelitian ini didapatkan nilai kekerasan tertinggi yaitu 91 HB pada suhu 350°C dan reduksi 50% selanjutnya nilai kekerasan untuk variasi suhu 350°C dan reduksi 50% didapatkan nilai kekerasan sebesar 88 HB, selanjutnya nilai kekerasan untuk variasi suhu 400°C dan reduksi 50% didapatkan nilai kekerasan sebesar 80 HB, sedangkan nilai terendah yaitu 80 HB menggunakan variasi suhu 400°C dan reduksi 30%, dapat ditarik kesimpulan bahwa peningkatan persen reduksi terhadap pelat Al2024 akan meningkatkan kekerasan, sedangkan peningkatan suhu pada persen reduksi yang sama akan mengurangi nilai kekerasannya.

Febriyanti *et al.* (2016) melakukan penelitian tentang pengaruh peningkatan persen reduksi terhadap struktur mikro dan sifat mekanik paduan kuningan Cu-Zn 70/30 setelah proses *warm rolling* pada suhu 400°C. Pada penelitian menggunakan variasi persen reduksi 29,03%, 34,4%, dan 38,16% pada suhu konstan yaitu 400°C. Hasil metalografi didapat ukuran butir yang semakin menurun sebesar 30,03 µm di bagian tepi dan 33,45 µm di bagian tengah pada persen reduksi 38,16%. Hasil uji tarik dengan persen reduksi 38,16% menghasilkan nilai *ultimate tensile strength* (UTS) sebesar 478 MPa, *yield strength* (YS) sebesar 434 MPa, dan persentase elongasi sebesar 9%. Untuk hasil uji kekerasan menghasilkan nilai kekerasan sebesar 135,8 HV di bagian tepi dan 128,4 HV di bagian tengah pada persen reduksi 38,16%.

Lihong Su (2013) melakukan penelitian dengan judul *microstructure and mechanical properties of 1050/6061 laminated composite processed by accumulative roll bonding*. Pada penelitian membuat suatu material komposit dengan cara melaminasi satu sama lain, material yang digunakan adalah aluminium seri 1050 dan 6061 dengan ketebalan awal 1,5 mm, panjang 400 mm, dan lebar 50 mm. sebelum melakukan pengerollan spesimen dibersihkan pada sisi yang ingin dibonding menggunakan *acetone* dan sikat kawat. Spesimen kemudian dipanaskan pada suhu 250°C selama 10 menit dan kemudian diroll dengan reduksi sebesar 50% dalam keadaan kering. Hasil *roll* di potong menjadi dua bagian dan dibonding kembali dengan proses yang sama (2 *cycle*). Penelitian ini menghasilkan kesimpulan bahwa

nilai uji tarik kedua benda tersebut berada pada nilai tengah antara kekuatan dasar material yang digunakan, kekuatan awal 6061 adalah 330 MPa dan 1050 adalah 130 MPa sedangkan kekuatan material *composite* 6061/1050 adalah 288 MPa pada siklus pertama dan pada siklus kedua nilai kekuatan tarik sebesar 317 MPa. Nilai kekuatan tarik di hasilkan berdasarkan konstanta tegangan alir kedua material. Total elongasi setelah siklus pertama adalah 4,5% dan 3% pada siklus kedua.

Zacharias *et al.* (1996) melakukan penelitian pengaruh kecepatan pengerollan terhadap kekuatan ikatan metalurgik antarmuka pelat AlMg-2 pada proses *hot rolling*. Pada penelitian ini variasi menggunakan kecepatan putar *roll* 10,75; 11,775; 12,75; 13,75; 14,75 m/menit, suhu pemanasan 415°C. Pelat hasil proses *roll* dikenai uji geser, uji metalografi, dan kekerasan. Dari hasil uji geser didapat data hubungan antara kecepatan putar *roll* terhadap kekuatan ikatan metalurgik. Nilai maksimum kekuatan ikatan metalurgik 74,12 MPa didapat pada kecepatan perolan 13,75 m/menit, dan kecepatan ini merupakan kecepatan optimum pengerollan yang dapat menghasilkan kekuatan maksimum ikatan metalurgik antarmuka pelat AlMg-2. Untuk kecepatan putar yang lebih besar dari 13,75 m/menit didapatkan penurunan kualitas kekuatan ikatan metalurgi, hal ini terjadi karena waktu untuk difusinya sangat singkat.

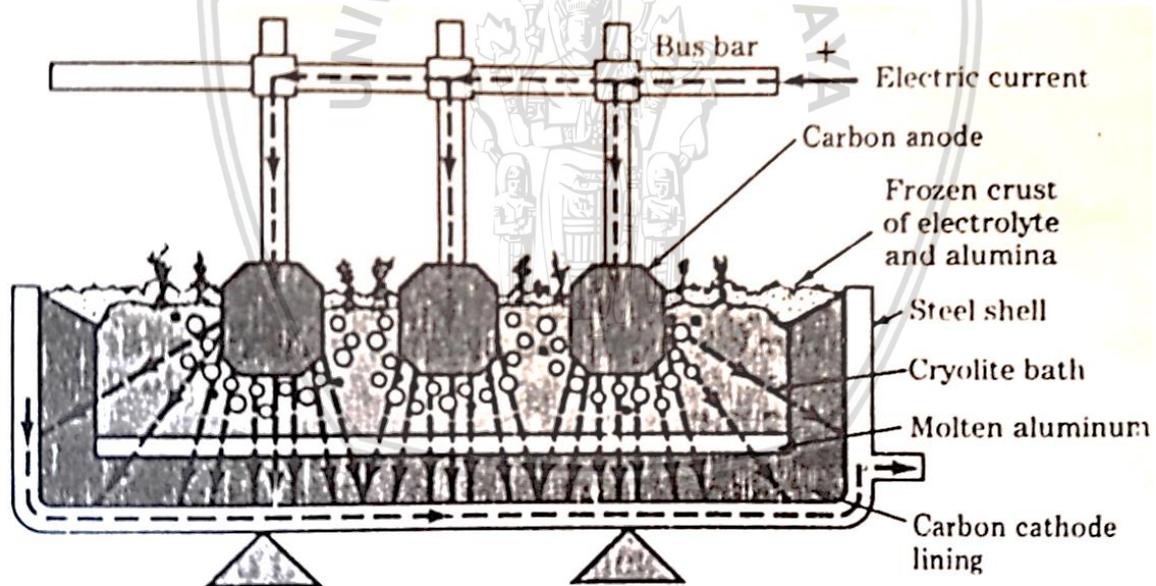
Parikin *et al.* (2010) melakukan penelitian pengaruh proses *roll* pada kekuatan tarik pelat paduan ZrNbMoGe, pada penelitian menghasilkan pengujian tarik pada pelat hasil *roll* dingin pada suhu 650°C memberikan kekuatan tarik sebesar 940 MPa dan tidak memberikan peregangan (0%), bahan langsung putus. Sedangkan pelat hasil *roll* panas pada temperatur 850°C dan dibungkus *foil* tembaga besarnya kekuatan tarik 650 MPa dan mengalami peregangan 5,5%. Pelat hasil *roll* pada temperatur 650°C sangat keras dan menunjukkan kualitas pelat yang getas/rapuh (*brittle*). Pelat hasil *roll* pada suhu 850°C cukup ulet (*ductile*) dan bisa dilakukan proses pembengkokan (*bending*) dengan menggunakan *multi roll* pada suhu 400°C untuk membentuk *skelp*.

2.2 Aluminium

Sejarah aluminium sendiri sudah cukup lama. Berbagai jenis aluminium (tanah liat aluminium) sudah digunakan selama berabad-abad, tercatat aluminium sudah digunakan sejak zaman Mesir kuno dan bangsa Romawi. Sebelum tahun 1886 aluminium sangat langka dan sulit untuk diekstrak hingga pada tahun tersebut 2 orang mahasiswa berkebangsaan Amerika dan Prancis bernama C.M. Hall serta Paul Herout berupaya untuk mengembangkan proses peleburan biji aluminium untuk mengekstrak aluminium. Keberhasilan metode yang

diciptakan Hall dan Herout sekarang banyak diaplikasikan di seluruh dunia. Aluminium sendiri pertama kali diproduksi dengan bebas pada pertengahan 1820-an seorang ahli kimia asal Jerman Frederich Wohler dan ahli kimia serta ahli ilmu fisika yang berasal dari Denmark Hans Oersted Kristen.

Aluminium termasuk logam yang berlimpah di muka bumi dan biasanya ditemukan bergabung bersama elemen lain seperti besi, oksigen, dan silikon dalam bentuk bauksit (Smith, 1993:471). Bauksit yang terdiri dari aluminium oksida yang terhidrasi adalah mineral utama yang digunakan untuk memproduksi aluminium. Pada proses bayer bauksit direaksikan dengan natrium hidroksida untuk diubah menjadi natrium aluminat. Setelah itu aluminium hidroksida dipadatkan lalu menebal dan dikalsinasi menjadi aluminium oksida. Aluminium oksida dilarutkan dengan larutan *cryolite* dan dielektrolisis dalam sel elektrolitik menggunakan karbon anoda dan katoda. Pada proses elektrolisis logam aluminium terbentuk pada keadaan cair dan tenggelam ke dasar biasanya mengandung 99,5% - 99,9% aluminium. Pada Gambar 2.1 menunjukkan skema *electrolytic cell* yang digunakan untuk produksi aluminium.



Gambar 2.1 *Electrolytic cell* untuk produksi aluminium
Sumber: Smith (1993:471)

Aluminium mempunyai masa jenis $2,7 \text{ g/cm}^3$ sehingga menjadi logam yang lebih ringan dibandingkan baja dengan massa jenis $7,83 \text{ g/cm}^3$ dan tembaga dengan massa jenis $8,93 \text{ g/cm}^3$. Aluminium memiliki keunggulan pada ketahanan korosi, konduktifitas *thermal* serta elektrik, dan ringan dibandingkan logam lain.

2.2.1 Aluminium Paduan

Sistem numerik angka empat digit biasa digunakan untuk mengidentifikasi aluminium dan aluminium paduan. Cara penandaan aluminium berdasarkan paduannya ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1
Sistem Penandaan Paduan Aluminium Tempa

Unsur Paduan Utama	No. Seri
Aluminium, $\geq 99,00\%$	1xxx
<i>Copper</i>	2xxx
<i>Manganese</i>	3xxx
<i>Silicon</i>	4xxx
<i>Magnesium</i>	5xxx
<i>Magnesium dan Silicon</i>	6xxx
<i>Zinc</i>	7xxx
Unsur Lain	8xxx

Sumber: ASM handbook vol.2 properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose material (1992:39)

Aluminium 1xxx, digunakan untuk mengidentifikasi aluminium murni tanpa paduan. Dua angka terakhir mengindikasikan minimum kandungan aluminium. Aluminium 2xxx – 8xxx digunakan untuk mengidentifikasi aluminium dengan paduan yang paling dominan. Angka ke-2 menunjukkan modifikasi dari paduan, apabila angka ke dua adalah 0 maka menunjukkan paduan murni.

Pada Tabel 2.1 terdapat delapan nomor seri untuk aluminium dan aluminium paduan yaitu 1xxx, 2xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx dan 8xxx. Semua nomor seri disebutkan berdasarkan unsur paduan yang paling dominan pada aluminium tersebut.

Aluminium 1xxx adalah aluminium dengan kandungan 99,00 % atau lebih tinggi, memiliki banyak aplikasi khususnya dalam bidang elektrik dan kimia karena memiliki ketahanan korosi yang baik, konduktivitas *thermal* dan listrik yang tinggi, dan mudah dalam pengerjaan. Biasa digunakan sebagai bahan *heat exchanger*, lembar pengemasan, reflektor konduktor, dan kapasitor.

Aluminium 2xxx adalah aluminium dengan unsur paduan dominan yaitu Cu, sering juga Mg menjadi unsur paduan tambahan. Paduan ini membutuhkan perlakuan panas larutan untuk mendapatkan properti yang optimum. Contohnya, dikerjakan perlakuan panas *precipitation* untuk meningkatkan sifat mekanik yaitu kekuatan *yield*.

Aluminium 3xxx adalah aluminium dengan unsur paduan dominan yaitu Mn. Unsur Mn yang ditambahkan secara efektif pada aluminium ini mencapai 1,5%. Paduan ini tidak dapat diberi perlakuan panas tapi memiliki kekuatan 20% lebih tinggi dibandingkan aluminium 1xxx. Biasanya aluminium 3xxx digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan

sedang dan kemampuan dikerjakan baik contohnya kaleng minuman, alat masak, tangki penyimpanan, *furniture*, tanda jalan, dan atap bangunan.

Aluminium 4xxx adalah aluminium dengan unsur paduan dominan yaitu Si. Unsur Si dapat ditambahkan sampai 12% yang dapat memberikan efek titik lebur menjadi rendah tanpa menghasilkan getas, kelebihan ini yang menjadikan aluminium 4xxx biasa digunakan untuk kawat las dan sebagai paduan mematri untuk penggabungan aluminium karena titik leburnya lebih rendah dari logam induk. Jenis paduan ini tidak dapat diperlakukan panas, tetapi memiliki ketahanan aus yang tinggi dan ekspansi *thermal* rendah sehingga cocok untuk produksi torak mesin dengan cara ditempa.

Aluminium 5xxx adalah aluminium dengan unsur paduan yang paling dominan yaitu Mg. Saat Mg ditambahkan sebagai unsur paduan utama atau ditambah dengan unsur Mn maka yang dihasilkan kekuatan sedang sampai tinggi. Magnesium lebih efektif dalam menghasilkan kekerasan dibandingkan unsur Mn, sekitar 0,8% Mg sama dengan 1,25% Mn, dan unsur Mg dapat ditambahkan dalam jumlah yang lebih banyak lagi. Paduan ini memiliki kemampuan dilas yang baik, namun terdapat batasan untuk suhu pada pengerjaan dingin (sekitar 3,5% Mg suhu pengerjaan dilakukan sekitar 65°C) untuk menghindari keretakan yang diakibatkan *stress-corrosion cracking*. Paduan ini digunakan untuk keperluan rumah tangga, bahan baku kapal, tangki penyimpanan, bagian *crane*, dan struktur otomotif.

Aluminium 6xxx adalah aluminium dengan unsur paduan dominan yaitu Mg dan Si, perpaduan ini harus mencukupi untuk membentuk Mg_2Si yang akan membuat paduan ini mampu diberi perlakuan panas. Paduan ini memiliki kemampuan dibentuk, dilas, dimesin dan ketahanan korosi yang baik. Paduan ini digunakan untuk aplikasi arsitektural, kerangka sepeda, keperluan transportasi, dan struktur pengelasan.

Aluminium 7xxx adalah aluminium dengan unsur paduan dominan yaitu Zn, unsur Zn ditambahkan sekitar 1 sampai 8%. Saat ditambahkan dengan sedikit unsur Mg maka paduan akan menghasilkan kekuatan yang sangat tinggi saat diberi perlakuan panas. Paduan ini digunakan untuk kerangka pesawat, dan bagian yang mengalami tegangan tinggi.

Seperti halnya dengan baja, aluminium dan logam *non-ferrous* lainnya diidentifikasi secara internasional oleh *Unified Numbering System* (UNS), terdiri dari sebuah huruf yang diikuti oleh angka yang mengidentifikasi komposisi paduannya. Contohnya A untuk aluminium, C untuk tembaga, N untuk nikel, dan Z untuk seng. Dalam penyebutan UNS aluminium paduan 2024 ditunjukkan dengan A2024. Pada Tabel 2.2 menunjukkan komposisi sifat mekanik dan aplikasi untuk sebagian aluminium tempa paduan.

Tabel 2.2
Komposisi, Sifat Mekanik, dan Aplikasi untuk Sebagian Aluminium Tempa Paduan

Aluminium Association Number	UNS Number	Composition (wt%)	Condition (Temper designation)	Mechanical properties			Typical application
				Tensile strength [MPa(ksi)]	Yield strength [MPa(ksi)]	Ductility [%EL in 50mm (2 in)]	
<i>Wrought, nonheat-treatable alloys</i>							
1100	A91100	0,12 Cu	Annealed (O)	90 (13)	35 (5)	35-45	Food/chemical storage, heat exchangers, light reflector
3003	A93003	0,12 Cu 1,2 Mn 0,1 Zn	Annealed (O)	110 (16)	40 (6)	30-40	Cooking utensils, pressure vessels, and piping
5052	A95052	2,5 Mg 0,25 Cr	Strain hardened (H32)	230 (33)	195 (28)	12-18	Aircraft fuel and oil lines, fuel tanks, appliances, rivets and wire
<i>Wrought, heat-treatable alloys</i>							
2024	A92024	4,4 Cu 1,5 Mg 0,6 Mn	Heat-treated (T4)	470 (68)	325 (47)	20	Aircraft structure, rivets, truck wheels, screw machine product
6061	A96061	1,0 Mg 0,6 Si 0,3 Cu 0,2 r	Heat-treated (T4)	240 (35)	145 (21)	22-25	Truck, canoes, railroad cars, furniture, and pipelines
7075	A97075	5,6 Zn 2,5 Mg 1,6 Cu 0,2 Cr	Heat-treated (T6)	570 (83)	505 (73)	11	Aircraft structural part and other highly stressed application
<i>Cast, Heat-treatable alloys</i>							
2950	A02950	4,5 Cu 1,1 Si	Heat-treated, cold-worked (T83)	221 (32)	110 (16)	8,5	Flywheel and rear-axle housing, bus and aircraft wheels, crankcase
3560	A03560	7,0 Si 0,3 Mg	Heat-treated (T6)	228 (33)	164 (24)	3,5	Aircraft pumps part, automotive transmissions cases, water cooled cylinder blocks
<i>Aluminum-lithium alloys</i>							
2090	-	2,7 Cu 0,25 Mg 2,25 Li 0,12 Zr	Heat-treated, cold-worked (T83)	455 (66)	455 (66)	5	Aircraft structure and cryogenic tankage structure
8090	-	1,30 Cu 0,95 Mg 2,0 Li 0,1 Zr	Heat-treated, Cold worked (T651)	465 (67)	360 (52)	-	Aircraft structure that must be highly damage tolerant

Sumber: Callister (2010:409)

2.2.1.1 Aluminium 1xxx

Aluminium dengan kandungan 99,00 % atau lebih tinggi, memiliki banyak aplikasi khususnya dalam bidang elektrik dan kimia karena memiliki ketahanan korosi yang baik, konduktifitas *thermal* dan listrik yang tinggi, dan mudah dalam pengerjaan. Biasa digunakan sebagai bahan *heat exchanger*, lembar pengemasan, reflektor konduktor, dan kapasitor. Komposisi kimia A1100 dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan sifat fisik, mekanik dan massa jenis A1100 dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.3

Komposisi Kimia A1100

Aluminium	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Zn (%)	Al (%)
1100	0,95 (Si+Fe)		0,05-0,20	0,05	0.10	99,00

Sumber: ASM handbook vol.2 *properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose material* (1993:43)

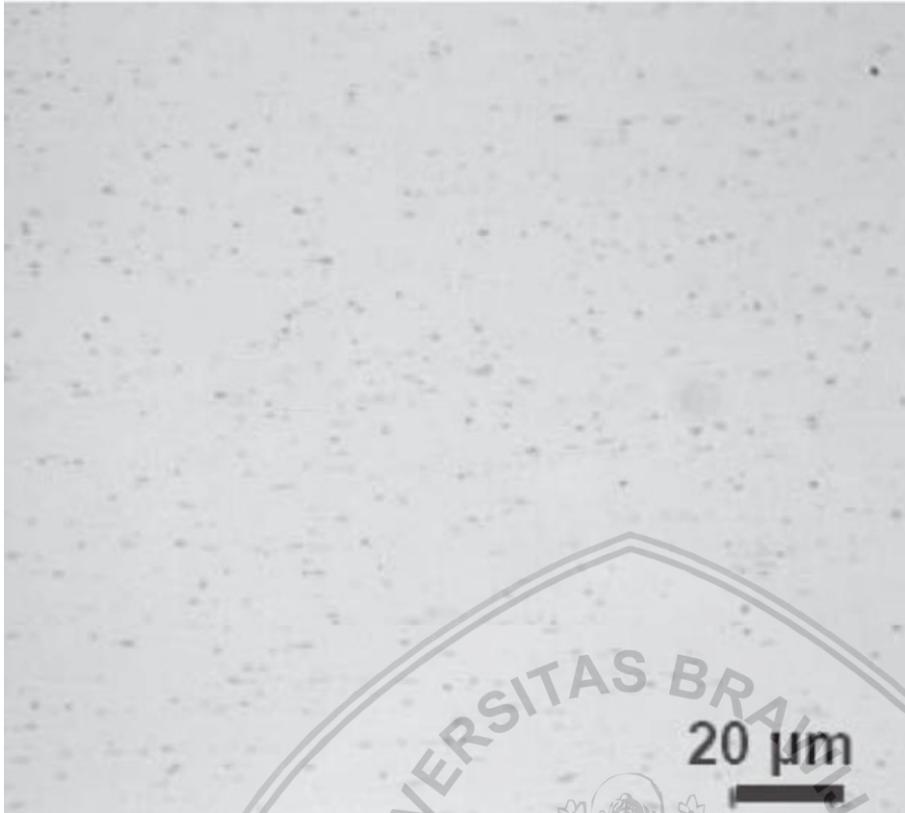
Tabel 2.4

Sifat Fisik, Mekanik, dan Massa Jenis A1100

Aluminium	Density (g/cm ³)	Coefficient of thermal expansion (μm/m.°C)	Melting range (°C)	Thermal conductivity at 25°C (W/m.°K)	Ultimate tensile strength (MPa)
1100	2,71	23,6	655	222	90

Sumber: ASM handbook vol.2 *properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose material* (1993:178)

Contoh foto mikro A1050 dapat dilihat pada Gambar 2.2, area yang berwarna hitam tidak terlalu terlihat karena tidak ada unsur paduan yang dominan pada aluminium seri 1xxx sehingga warna putih yang menunjukkan unsur aluminium lebih dominan.



Gambar 2.2 Foto mikro A1050 pada proses akumulatif *roll bonding*.
Sumber: Su *et al.* (2011)

2.2.1.2 Aluminium 6xxx

Aluminium dengan kandungan magnesium dan silikon sebagai paduannya sehingga dapat diberikan perlakuan panas. Aluminium jenis ini memiliki kemampuan yang baik dalam pembentukan, pengelasan, permesinan, dan ketahanan korosi. Paduan ini digunakan untuk aplikasi arsitektural, kerangka sepeda, keperluan transportasi, dan struktur pengelasan. Komposisi kimia A6061 dapat dilihat pada Tabel 2.5 dan sifat fisik, mekanik dan massa jenis A6061 dapat dilihat pada Tabel 2.6. Diagram fasa Al-Mg₂Si dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Tabel 2.5

Komposisi Kimia A6061

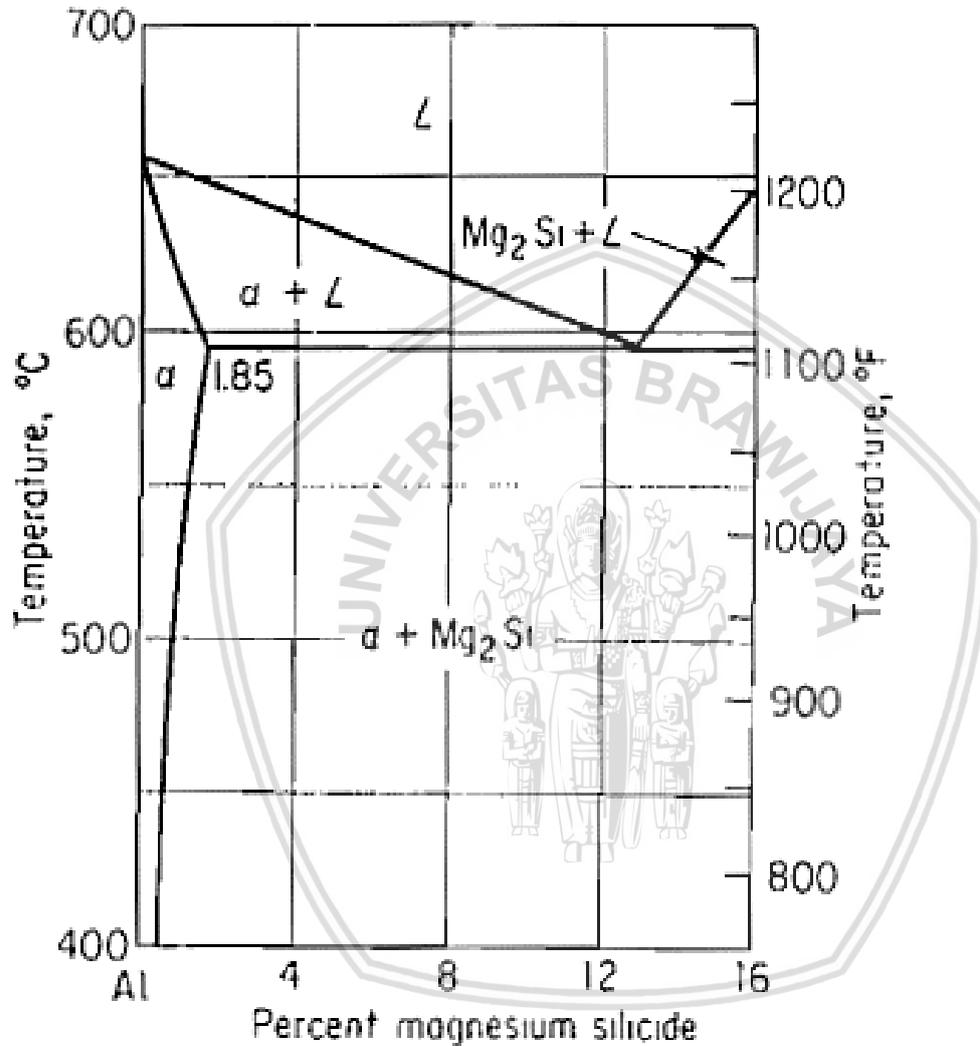
Aluminium	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Al (%)
6061	0,40-0,80	0,1	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	95,8- 98,6

Sumber: ASM *handbook vol.2 properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose material* (1993:62)

Tabel 2.6
Sifat Fisik, Mekanik, dan Massa Jenis A6061

Aluminium	Density (g/cm ³)	Coefficient of thermal expansion ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	Melting range ($^{\circ}\text{C}$)	Thermal conductivity at 25 $^{\circ}\text{C}$ (W/m. $^{\circ}\text{K}$)	Ultimate tensile strength (MPa)
A6061	2,70	23,6	650	180	125

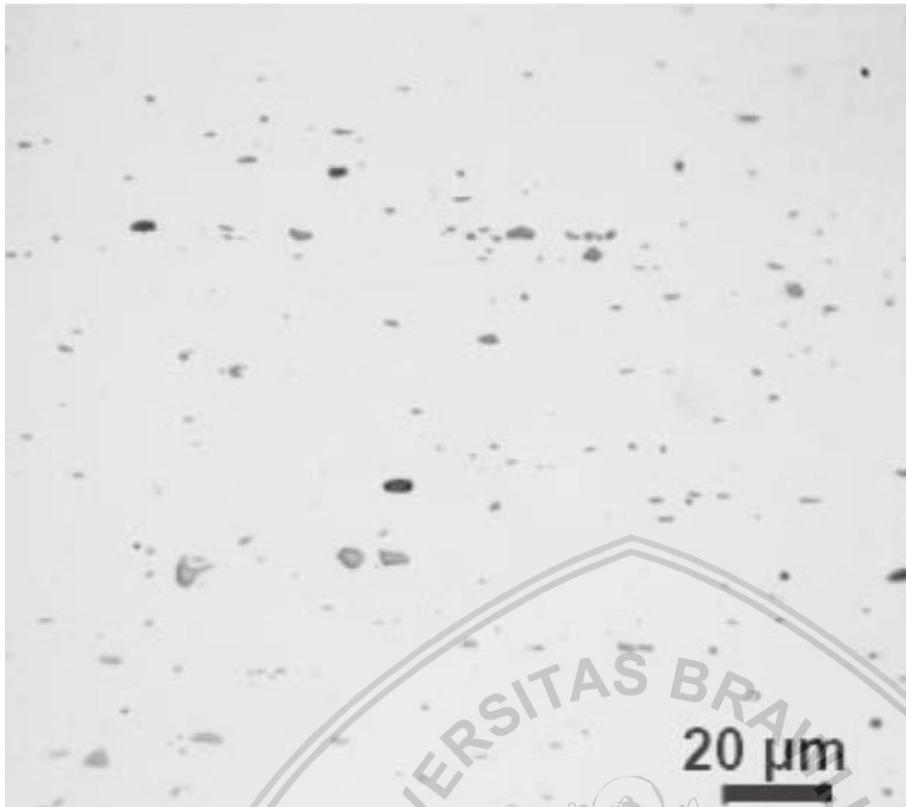
Sumber: ASM handbook vol.2 properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose material (1993:178)



Gambar 2.3 Diagram fasa Al-Mg₂Si

Sumber: Avner (1974:491)

Contoh foto mikro A6061 dapat dilihat pada Gambar 2.4, area yang berwarna hitam menunjukkan padatan dari Mg₂Si yang mana adalah unsur paduan yang paling dominan dalam aluminium seri 6xxx.



Gambar 2.4 Foto mikro A6061 pada proses akumulatif *roll bonding*.
Sumber: Su *et al.* (2011)

2.3 Metal Cladding

Metal cladding adalah proses pelapisan logam yang penerapannya dilaksanakan dengan memadukan material induk yang dilindungi dengan lapis pelindung berupa logam dengan cara memadukannya menjadi satu lapisan padu yang lekat satu dengan lainnya, pelapisan satu logam dengan logam lainnya dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat yang diinginkan (Leonard, 2011). Metode yang dapat digunakan untuk menghasilkan *metal cladding* yaitu, *hot/cold roll bonding*, *explosive welding*, dan *brazing*. Terdapat tiga contoh sistem *clad metal* dalam penggabungannya, pertama yaitu sistem *transition clad metal* yang menghasilkan hubungan antara dua logam atau paduan, salah satu aplikasinya yaitu menggunakan *fusion welding* untuk menggabungkan aluminium dengan baja dalam perakitan otomotif, kedua yaitu sistem *self-brazing clad metal*, yang mana sebuah logam atau logam paduan yang memiliki ketebalan yang tipis dan memiliki titik lebur rendah beraksi sebagai *brazing filler* saat penggabungan logam dasar, contohnya adalah tembaga yang digabung dengan baja yang digunakan untuk *heat exchanger*, ketiga yaitu sistem *brazing filler clad metal*, yang mana memiliki perbedaan pada lapisan logam atau logam paduan, perbandingan ketebalannya menjadi sebuah paduan *brazing filler* sebagai hasil dari pemanasan saat *brazing* dan menghasilkan *brazing joints* (Chen, 2005).

Metal Cladding secara luas telah digunakan dalam dunia industri, bentuk produk dari *metal cladding* berupa pelat, lembaran, *foil*, tabung, batang, dan kawat. *Metal cladding* bertujuan untuk memberikan ketahanan korosi, perbaikan penampilan serta sifat-sifat yang tidak dimiliki oleh satu jenis logam saja.

2.4 Roll Bonding

Roll bonding adalah proses penyambungan dua logam yang berbeda pada kondisi padat, pada prosesnya dua atau lebih lembaran, atau pelat logam atau paduan ditumpuk bersama dan dilewati melalui sepasang *roll* sampai deformasi yang diinginkan tercapai. Proses *roll bonding* dapat dilihat pada Gambar 2.5.

Terdapat lima tahapan dalam proses *roll bonding* yaitu dimensi, persiapan permukaan, menjepit, pemanasan permukaan, dan *rolling*.

1. Pengukuran dimensi

Dimensi merupakan proses pertama dalam melakukan *roll bonding*. Dimensi adalah pemotongan lembaran logam sesuai dengan dimensi yang telah direncanakan, dimensi panjang, dimensi lebar dan dimensi tinggi (ketebalan) lembaran harus dispesifikasikan, untuk ketebalan harus diperhitungkan ketebalan awal dan ketebalan akhir sebelum memulai pengerollan.

2. Persiapan Permukaan

Persiapan permukaan bertujuan untuk menghilangkan lapisan kontaminasi pada permukaan material yang akan dibonding, membersihkan atau menghilangkan lapisan kontaminasi pada sisi yang akan digunakan untuk penggabungan. Persiapan permukaan dapat dilakukan menggunakan sikat kawat untuk menjadikan permukaan menjadi kasar.

3. Menjepit

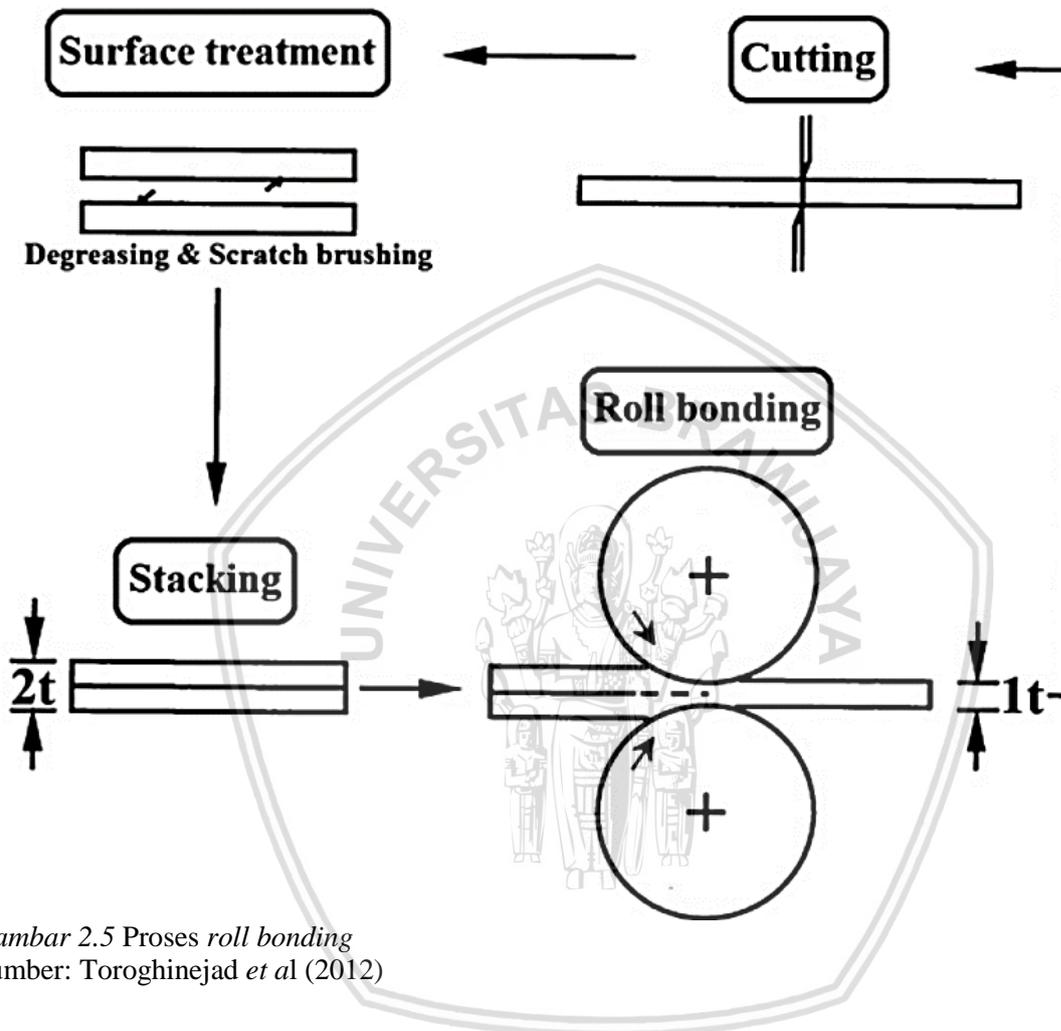
Menjepit dua material atau lebih bisa dengan berbagai macam cara mulai dengan memberikan pengikat berupa kawat pada kedua sisi dengan cara membuat lubang untuk mengikatnya atau dengan mengelas pada tiap ujungnya.

4. Pemanasan

Pemanasan adalah proses pemanasan material sebelum mengalami pengerollan. Pemanasan yang diberikan pada material bertujuan agar mudah dibentuk dan pemanasan yang diberikan tidak sampai suhu peleburan material.

5. Rolling

Dalam proses ini persiapan alat *rolling* diperhatikan agar tidak terjadi kesalahan saat melakukan *roll bonding*, seperti mengatur kecepatan putar *roll*, jarak antara *roll*, tekanan yang harus dihasilkan selama proses *rolling*.



Gambar 2.5 Proses roll bonding
Sumber: Toroghinejad *et al* (2012)

2.4.1 Hot Rolling

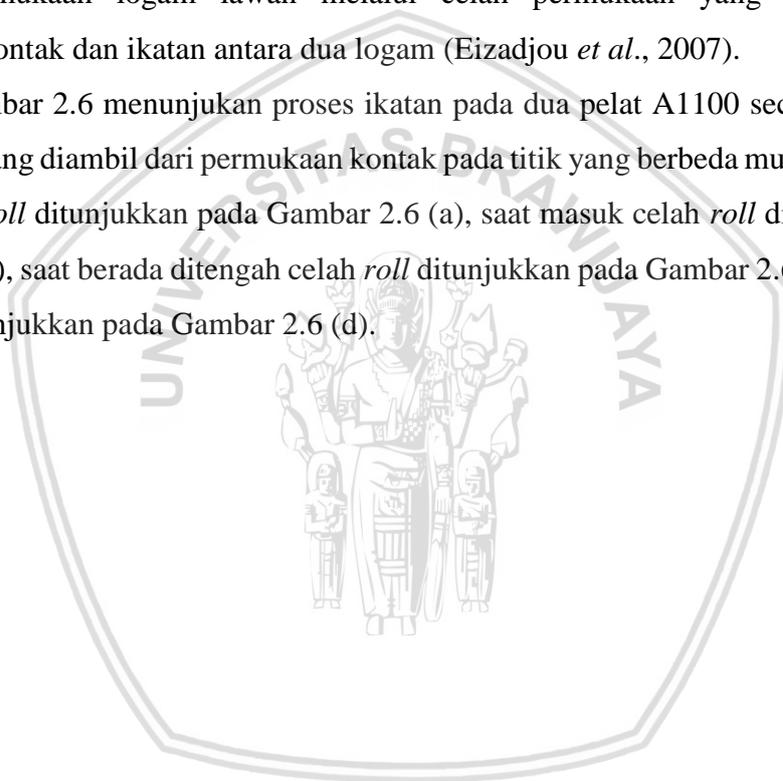
Hot rolling pada hakekatnya adalah proses pengerollan yang dilakukan pada suhu di atas suhu rekristalisasi bahan. Hal ini mempunyai arti fisik bahwa deformasi berlangsung pada daerah rekristalisasi. Rekristalisasi yang terus menerus inilah yang menyebabkan tidak adanya pengerasan regangan, sehingga logam tetap relatif lunak selama proses *hot rolling*. Proses *hot rolling* terhadap pelat dilakukan dengan dua tujuan utama. Pertama adalah untuk menipiskan pelat menjadi pelat dengan reduksi pengerollan yang cukup besar. Tujuan yang kedua adalah untuk memperbaiki struktur mikro, yang dapat diartikan sebagai mengubah struktur coran pada pelat menjadi struktur yang lebih homogen. Selain itu *hot rolling* juga akan menyeragamkan struktur dan distribusi kadar unsur paduan yang tadinya tidak homogen

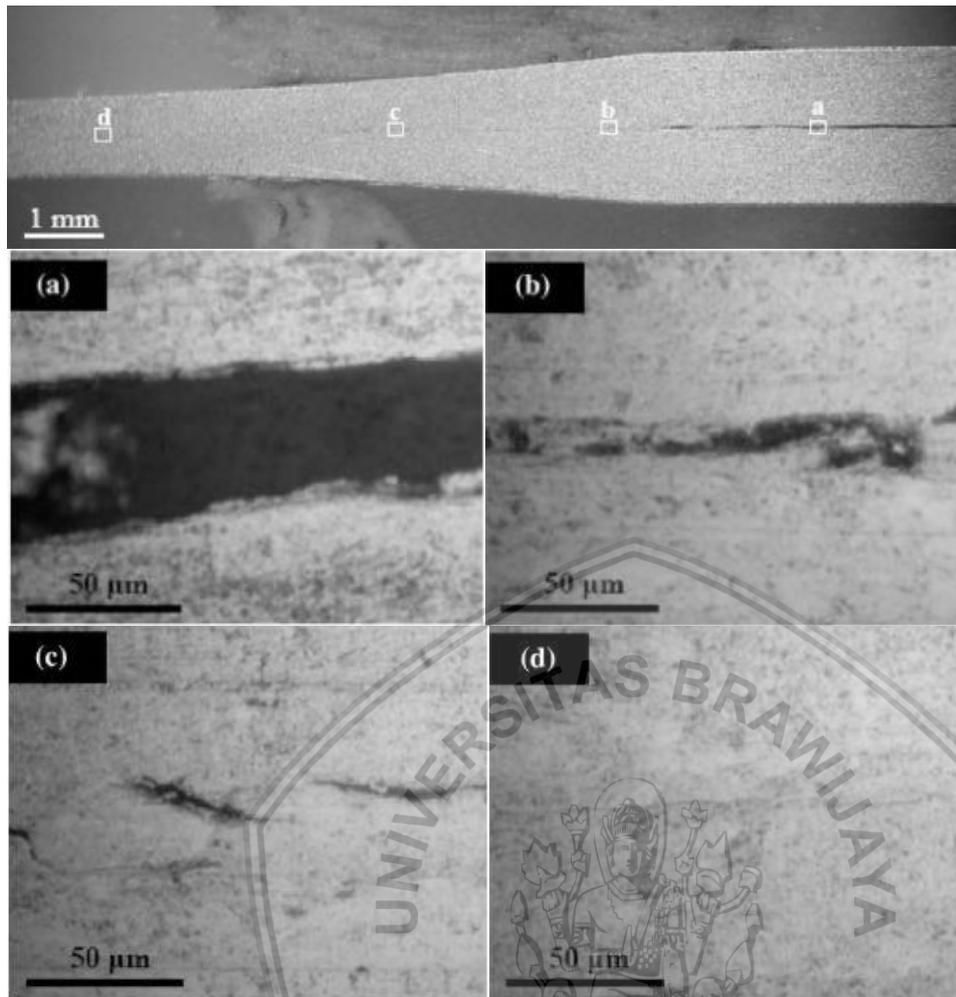
akibat adanya degregasi pada saat pembekuan. *Hot rolling* juga akan memecah dan menghaluskan inklusi serta menutup porositas. Parameter proses pengerollan dapat juga dipakai untuk mengontrol sifat pelat yang dihasilkannya. Hal ini sejalan dengan prinsip yang menyatakan bahwa sifat bahan itu dipengaruhi oleh struktur bahan dan struktur bahan dipengaruhi oleh komposisi bahan dan proses pengolahannya.

2.5 Mekanisme *Bonding*

Pada proses *roll bonding* ikatan dibentuk oleh deformasi plastis dari logam yang akan digabungkan. *Bonding* (ikatan) diperoleh saat luas permukaan yang bebas dari kontaminan menekan permukaan logam lawan melalui celah permukaan yang retak sehingga membangun kontak dan ikatan antara dua logam (Eizadjou *et al.*, 2007).

Pada Gambar 2.6 menunjukkan proses ikatan pada dua pelat A1100 secara *mechanical interlocking* yang diambil dari permukaan kontak pada titik yang berbeda mulai dari sebelum masuk celah *roll* ditunjukkan pada Gambar 2.6 (a), saat masuk celah *roll* ditunjukkan pada Gambar 2.6 (b), saat berada ditengah celah *roll* ditunjukkan pada Gambar 2.6 (c), dan keluar celah *roll* ditunjukkan pada Gambar 2.6 (d).



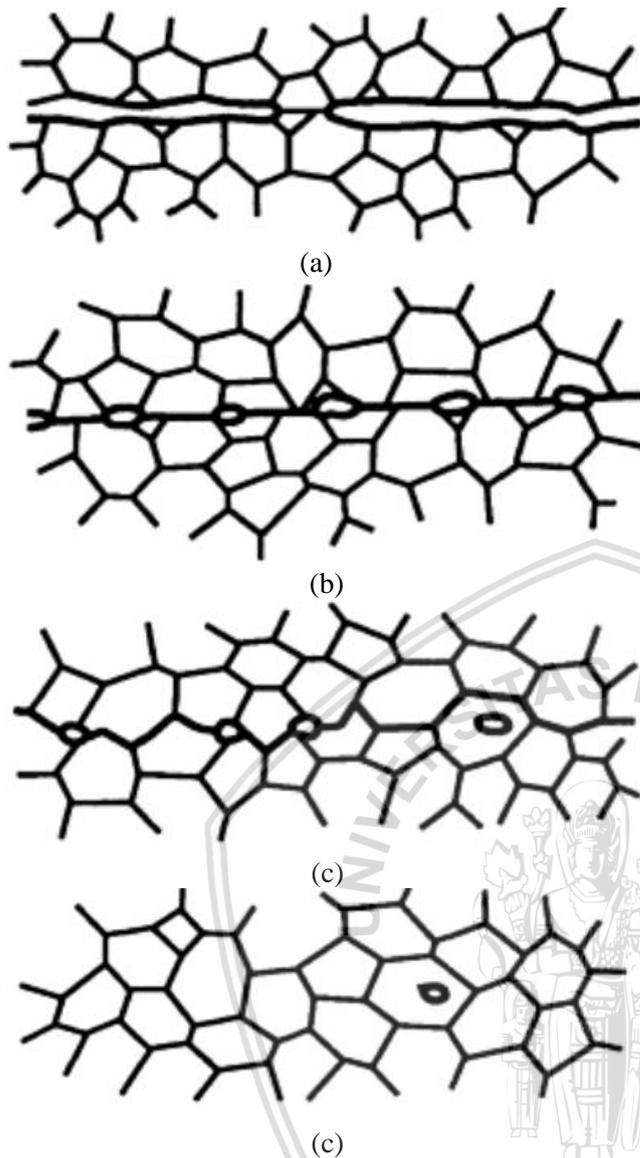


Gambar 2.6 Proses *bonding* pada dua buah pelat A1100

Sumber: Eidzajou *et al.* (2007)

Deformasi awal dan tekanan saat lembaran masuk celah *roll* menyebabkan keretakan dan penguncian antara dua permukaan logam dan beberapa retakan kecil mulai terbentuk seperti pada Gambar 2.6(b). Pada pertengahan celah *roll* proses deformasi berjalan dan tekanan terus meningkat, retakan berkembang sehingga menimbulkan celah dan permukaan logam saling menekan lalu masuk melalui celah-celah retakan seperti pada Gambar 2.6(c) yang akhirnya membentuk sebuah ikatan antara dua pelat logam yang sudah melalui celah *roll* seperti pada Gambar 2.6(d).

Selain *mechanical interlocking*, *bonding* juga dapat terjadi secara difusi, pada *bonding* secara difusi sifat proses penggabungan pada dasarnya adalah gabungan dari dua atom pada permukaan yang bersih. Pada Gambar 2.7 menunjukkan proses *bonding* secara difusi.



Gambar 2.7 Urutan dari tahapan metalurgi pada proses *diffusion bonding*
 Sumber: ASM Handbook vol.6 welding, brazing and soldering (1993:520)

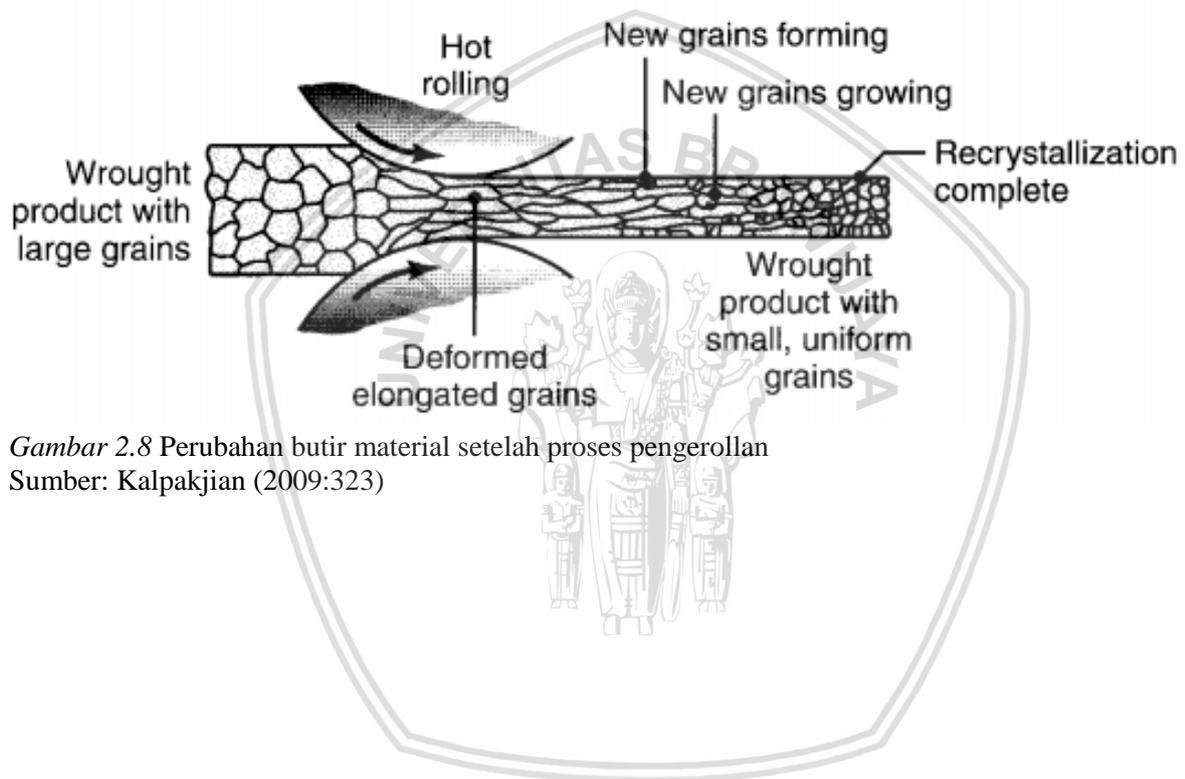
Pada Gambar 2.7(a) menunjukkan proses awal bersentuhnya dua permukaan, pada Gambar 2.7(b) menunjukkan luasan yang saling bersentuhan semakin bertambah akibat deformasi, faktor seperti kekasaran permukaan, kekuatan *yield*, pekerjaan pengerasan, suhu, dan tekanan adalah faktor utama dalam tahap ini. Pada Gambar 2.7(c) menunjukkan batas butir mulai bersentuhan dan bersatu yang mengakibatkan berkurangnya celah. Pada Gambar 2.7(d) menunjukkan celah mulai menghilang dan proses *bonding* difusi sudah selesai.

2.6 Pengerollan

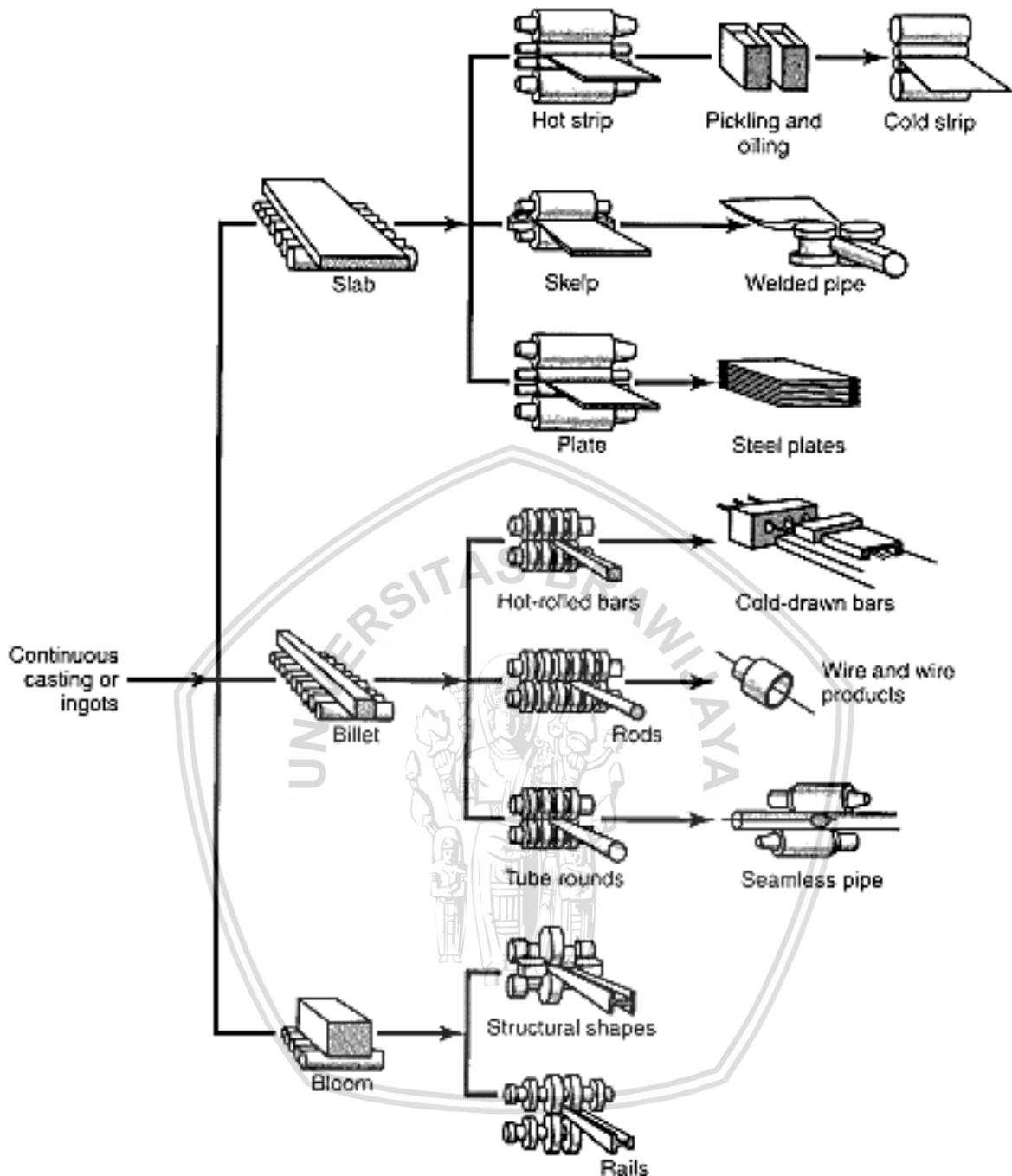
Pengerollan adalah proses mengurangi ketebalan atau merubah penampang benda kerja oleh gaya tekan melalui sepasang *roll* (Kalpakjian, 2009), Proses *rolling* menyumbang

sekitar 90% dari semua produk logam yang dihasilkan oleh proses pengerjaan logam, pertama kali dikembangkan pada tahun 1500-an.

Proses pengerollan dapat merubah struktur butiran dari material, butiran awal yang terbentuk dari *cast structure* biasanya berupa butiran yang tidak seragam, struktur yang demikian biasanya memiliki sifat yang getas dan bisa jadi terdapat rongga. Pengerollan merubah *cast structure* menjadi *wrought structure* seperti Gambar 2.8. Gambar 2.8 memperlihatkan butiran yang besar berubah bentuk menjadi lebih kecil setelah dilakukan proses pengerollan, hal ini dapat meningkatkan sifat keuletan dari material. Variasi dari *flat rolling* dan *shape-rolling* proses dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.8 Perubahan butir material setelah proses pengerollan
Sumber: Kalpakjian (2009:323)



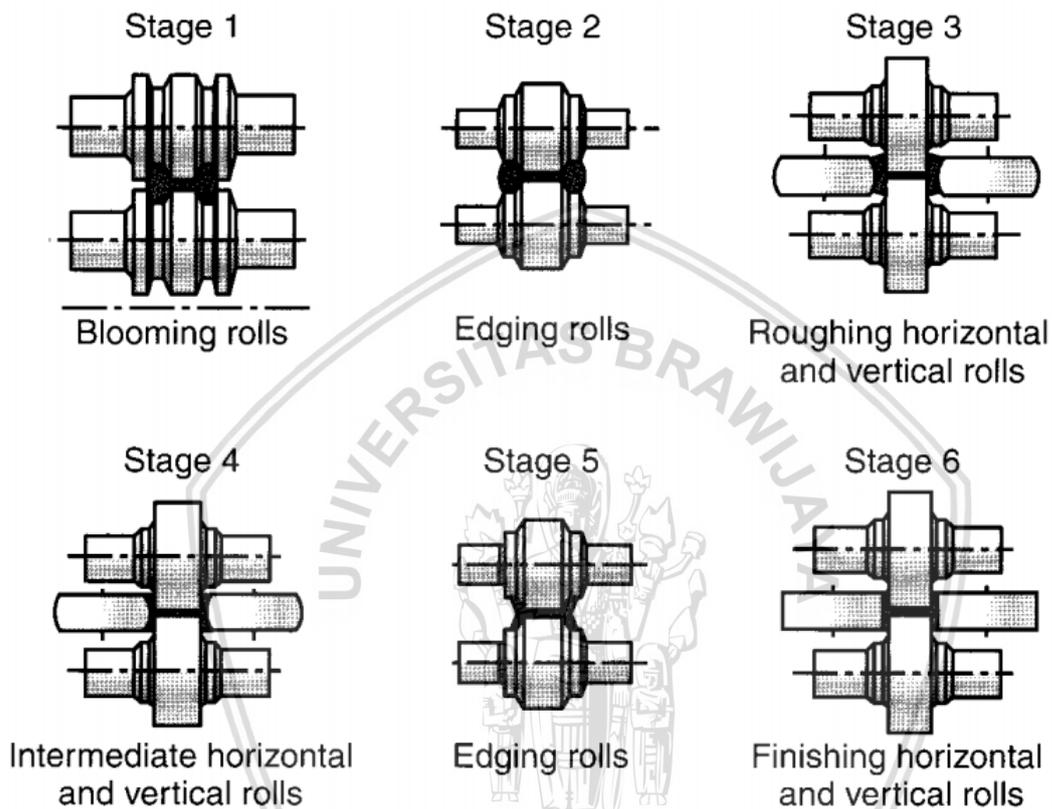
Gambar 2.9 Variasi dari *flat rolling* dan *shape-rolling* proses.
 Sumber: Kalpakjian (2009:317)

Beberapa proses *rolling* telah dikembangkan untuk memproduksi bentuk produk yang spesifik, variasi dari pengerollan berdasarkan bentuk produk yaitu:

1. *Shape rolling*

Struktur yang panjang dan lurus seperti *I-beams*, rel kereta api, dan baja tulangan terbentuk pada suhu tinggi dengan proses *shape rolling (profile rolling)*, di mana benda kerja melewati beberapa *roll* yang telah dirancang khusus seperti Gambar 2.10. Pada Gambar 2.10 benda kerja akan melewati banyak *stage* dimana setiap *stage* memiliki

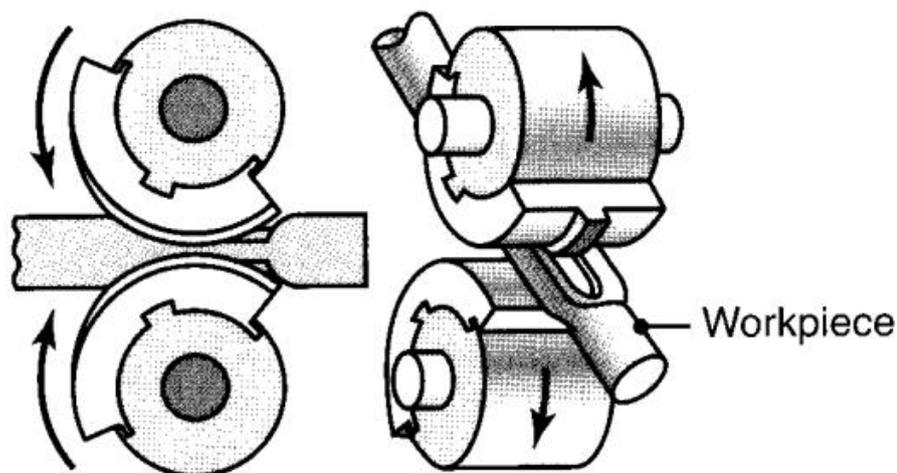
bentuk celah yang berbeda sampai akhirnya benda kerja memiliki bentuk yang sesuai dengan desain. *Cold shape rolling* juga dapat dilakukan dengan material awal berupa kawat dengan berbagai penampang. Penampang material biasanya berkurang secara tidak seragam maka desain dari *roll-pass* membutuhkan pengalaman yang cukup untuk menghindari cacat eksternal dan internal, menjaga toleransi dimensi, dan mengurangi aus pada *roll*.



Gambar 2.10 Langkah dalam *shape rolling* dari pembentukan *I-Beam*
 Sumber: Kalpakjian (2009:327)

2. *Roll forging*

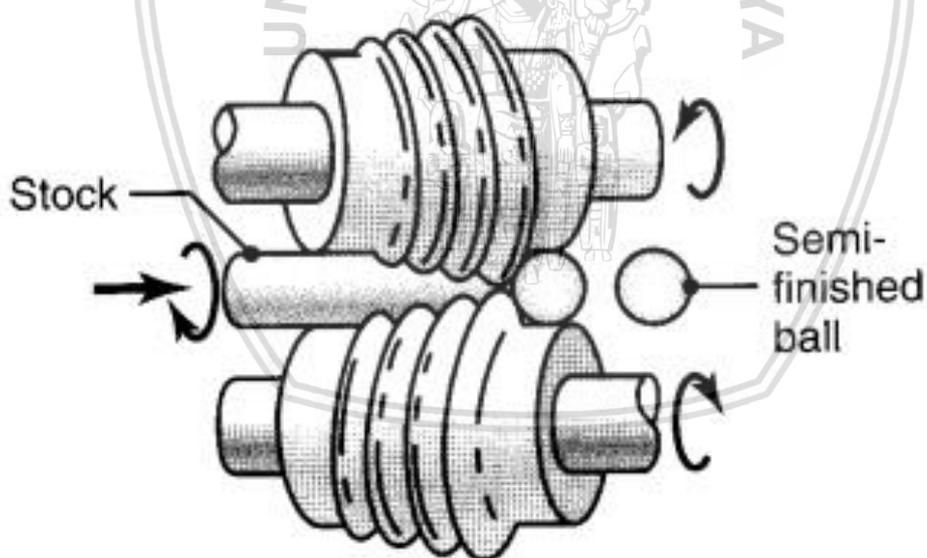
Pada proses ini penampang dari benda kerja dibentuk dengan cara dilewatkan melalui sepasang *roll* yang profilnya memiliki alur seperti Gambar 2.11. *Roll forging* biasanya digunakan untuk memproduksi *tapered shaft*, dan *tapered leaf spring*.



Gambar 2.11 Roll forging
Sumber: Kalpakjian (2009:32)

3. Skew rolling

Proses *rolling* ini mirip dengan *roll forging*, proses ini biasa digunakan untuk memproduksi bola-bola bantalan. *Round bar* atau *round wire* dimasukkan kedalam celah *roll* dan kemudian terbentuk bola-bola yang terus menerus keluar dari celah *roll*, proses *skew rolling* dapat dilihat pada Gambar 2.12.

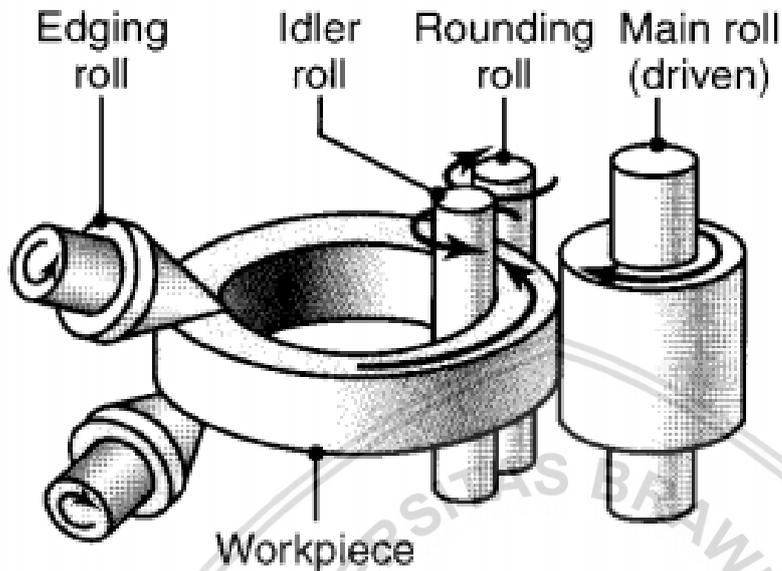


Gambar 2.12 Skew rolling
Sumber: Kalpakjian (2009:328)

4. Ring rolling

Dalam proses *ring rolling*, ketebalan cincin akan terus berkurang dengan membesarnya diameter dari cincin. Cincin diletakkan diantara dua buah *roll*, di mana satu *roll* bergerak (*main roll*) dan satu *roll* diam (*idler roll* dan *rounding roll*), ketebalan akan berkurang ketika *edging roll* bergerak menjauhi *main roll* seperti pada Gambar 2.13. *Ring rolling*

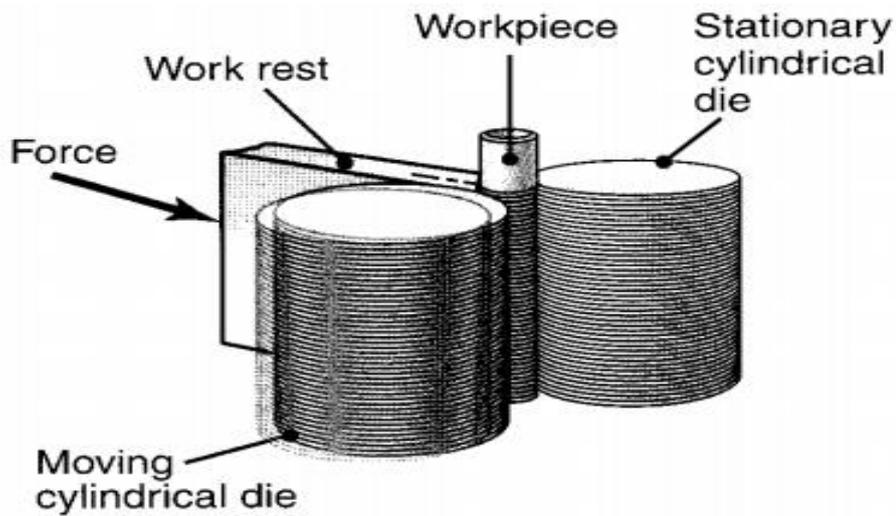
biasanya digunakan untuk memproduksi cincin dengan diameter dan ketebalan yang besar dan digunakan untuk badan roket dan turbin, pembungkus mesin jet, bagian luar *bearing*, *flanges* dan cincin penguat untuk pipa.



Gambar 2.13 Ring rolling.
Sumber: Kalpakjian (2009:329)

5. Thread rolling

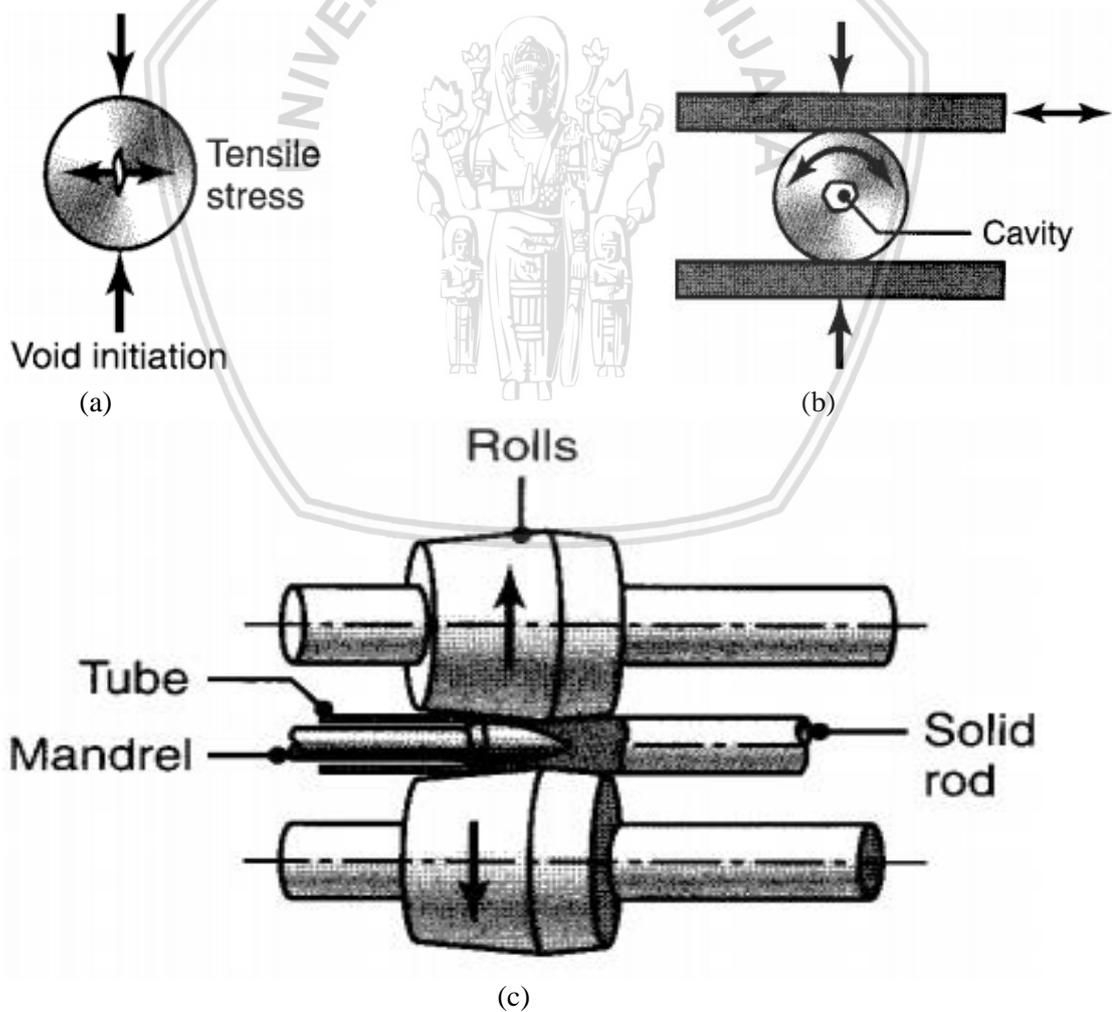
Thread rolling adalah proses *cold-forming* dimana ulir lurus atau *tapered* (meruncing) dibentuk pada *round rods* atau *round wire*. Ulir terbentuk setelah melewati *roll* yang berputar dimana profil *roll* memiliki alur yang akan membentuk ulir pada benda kerja seperti Gambar 2.14. *Thread rolling* memiliki keuntungan dibandingkan dengan proses lainnya yaitu produk memiliki kekuatan yang baik karena proses pengerjaan dingin, tidak menghasilkan geram, dan permukaan yang halus. *Thread rolling* biasa digunakan untuk memproduksi sekrup, baut, dan bagian yang memerlukan ulir.



Gambar 2.14 Thread rolling
Sumber: Kalpakjian (2009:330)

6. *Rotary tube piercing*

Proses pengerollan ini menggunakan proses pengerjaan panas untuk membuat pipa berongga dan tabung. Gambar 2.15 menunjukkan skema *rotary tube piercing*.

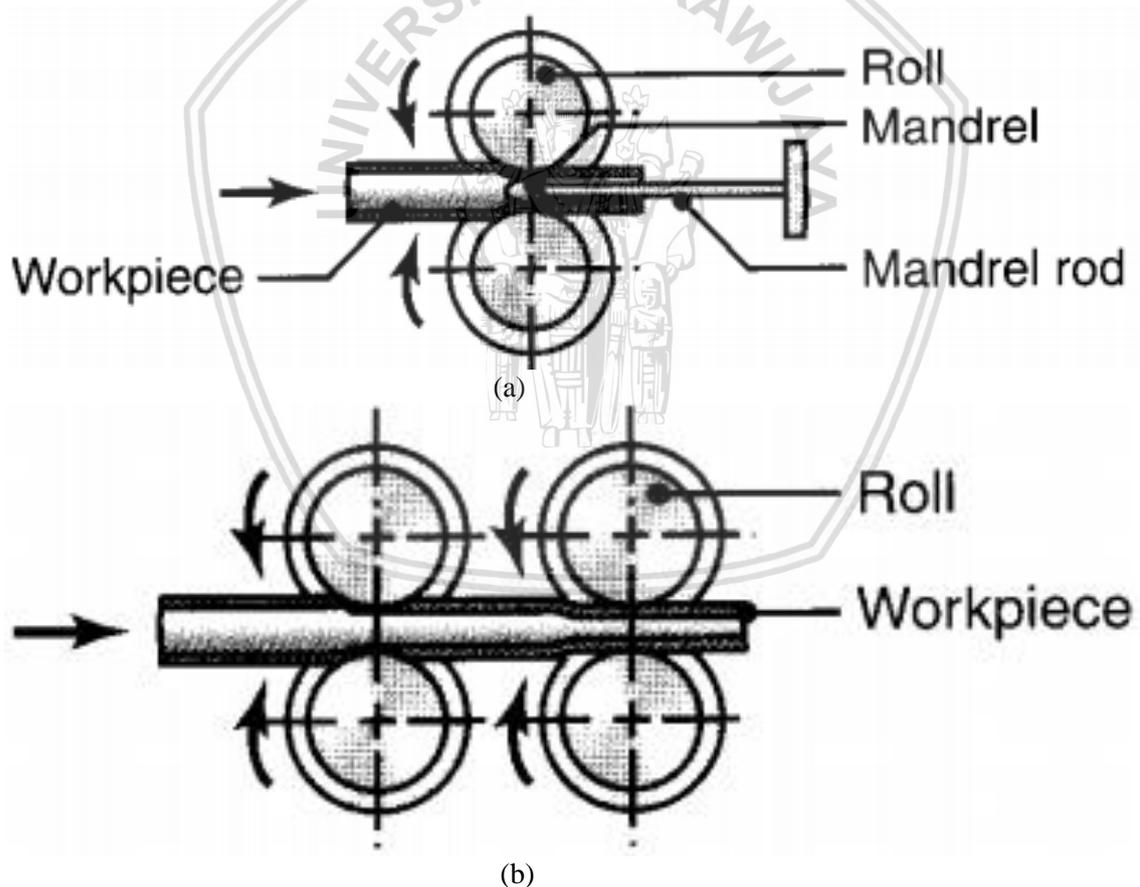


Gambar 2.15 Rotary tube piercing
Sumber: Kalpakjian (2009:331)

Prinsip yang mendasari *rotary tube piercing* adalah ketika *round bar* dikenakan gaya tekan radial, tegangan tarik akan berkembang pada titik pusat bar yang dapat dilihat pada Gambar 2.15(a), saat gaya tekan radial terus berlanjut yang dapat dilihat pada Gambar 2.15(b) maka celah pada pusat *round bar* akan mulai berkembang. *Rotary tube piercing* dilakukan menggunakan sebuah pengaturan dari *roll* yang berputar ditunjukkan pada Gambar 2.15(c) putaran dari *roll* akan menarik *round bar* menuju *mandrel*, *mandrel* berfungsi untuk melebarkan celah dan membentuk lubang sesuai dimensi pada *round bar*.

7. Tube rolling

Diameter dan ketebalan dari pipa dapat direduksi menggunakan *tube rolling*, yang mana menggunakan *roll* yang sudah dibentuk. Pada beberapa proses *tube rolling* dapat menggunakan *mandrel* yang ditunjukkan pada Gambar 2.16(a) atau tidak menggunakan *mandrel* yang ditunjukkan pada Gambar 2.16(b).



Gambar 2.16 Tube rolling, (a) Tube rolling menggunakan mandrel, (b) Tube rolling tanpa mandrel

Sumber: Kalpakjian (2009:332)

2.6.1 Gaya-Gaya Pengerollan

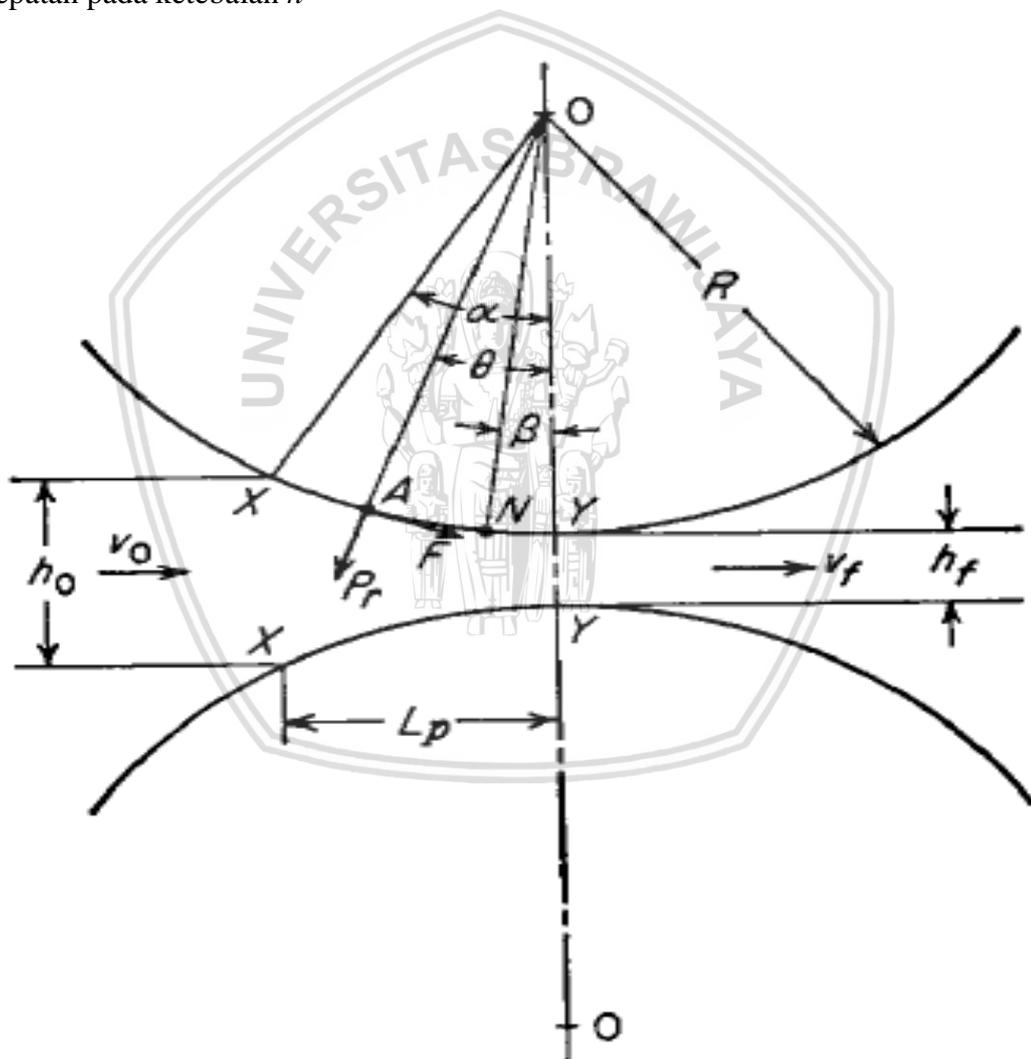
Gaya-gaya pengerollan yang ditunjukkan Gambar 2.17 memperlihatkan sejumlah hubungan antara geometri pengerollan dengan gaya-gaya yang terlibat pada deformasi logam. Suatu lembaran dengan ketebalan h_0 masuk melalui bidang masuk XX dengan kecepatan v_0 . Anggaplah tidak terjadi pelebaran, jadi penekanan logam ke arah vertikal berubah menjadi perpanjangan pada arah pengerollan. Maka didapatkan persamaan:

$$b \cdot h_0 \cdot v_0 = b \cdot h \cdot v = b \cdot h_f \cdot v_f \quad (2-1)$$

dengan:

b : lebar lembaran

v : kecepatan pada ketebalan h



Gambar 2.17 Gaya-gaya pengerollan
Sumber: Dieter (1988:594)

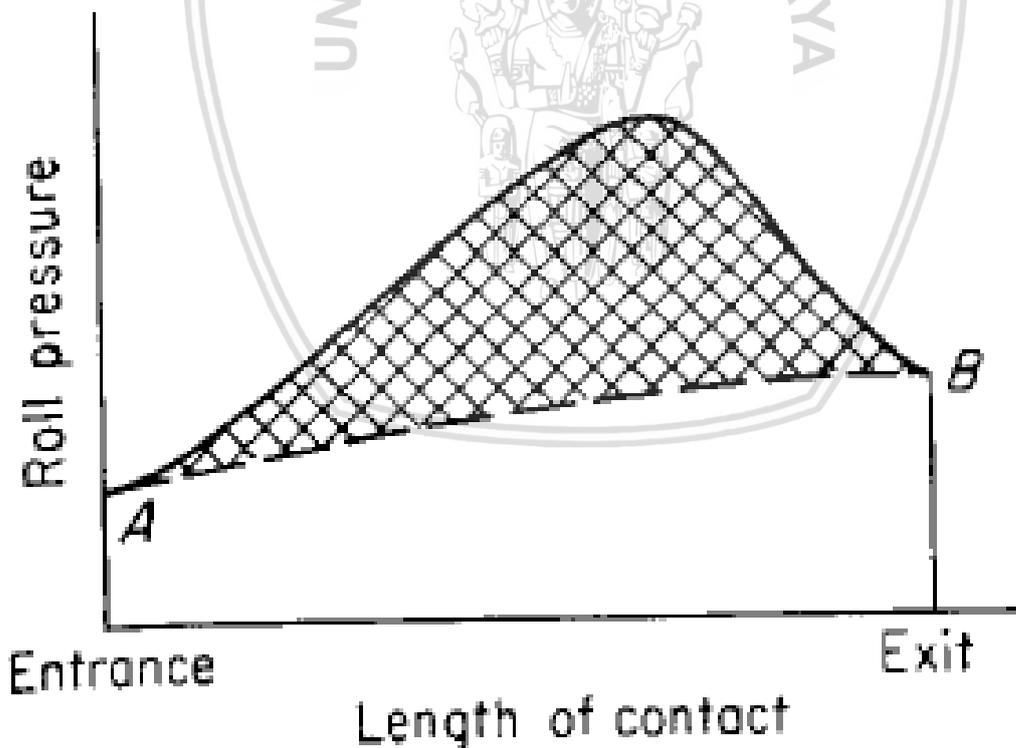
Persamaan (2-1) memiliki persyaratan yaitu v_f harus lebih besar dibandingkan v_0 sehingga kecepatan lembaran harus terus-menerus meningkat sejak lembaran dimasukkan. Hanya pada satu titik di sepanjang permukaan kontak *roll* dan lembaran yang kecepatan

permukaan $roll$ v_f sama dengan kecepatan lembaran. Titik ini dinamakan *no-slip point*. Pada Gambar 2.17 dinyatakan sebagai N .

Pada titik A Gambar 2.17 terdapat 2 buah gaya yang bekerja yaitu gaya radial P_r dan gaya tangensial F . Antara bidang masuk dan titik netral, lembaran bergerak lebih lambat dibanding permukaan $roll$ dan terjadi gesekan pada arah yang ditunjukkan pada Gambar 2.17 sehingga logam tertarik antara $roll$. Pada daerah kanan titik N , gerak lembaran lebih cepat daripada permukaan $roll$ sehingga arah gaya gesekan berbalik sehingga berfungsi sebagai hambatan arah gerak lembaran yang menggulingkan $roll$.

Titik P_r dinamakan sebagai beban pengerollan P . Beban pengerollan adalah gaya $roll$ menekan logam. Karena gaya ini sama dengan gaya reaksi dari logam yang mendorong $roll$ maka gaya ini juga disebut gaya pemisah.

Distribusi tekanan $roll$ di sepanjang busur kontak ditunjukkan pada Gambar 2.18 adalah daerah yang menyatakan gaya yang dibutuhkan untuk mengatasi gesekan antara $roll$ dan lembaran, sedangkan daerah dibawah garis putus-putus AB menyatakan gaya yang dibutuhkan untuk membentuk logam.



Gambar 2.18 Distribusi tekanan $roll$ sepanjang busur kontak
Sumber: Dieter (1998:595)

Sudut α antara bidang masuk dan garis pusat pengerollan dinamakan sudut kontak atau sudut gigi (*angle of bite*). Gambar 2.18 menunjukkan bahwa komponen horizontal gaya normal adalah $P_r \cdot \sin \alpha$ dan komponen horizontal gaya gesekan adalah $F \cdot \cos \alpha$. Agar benda

kerja dapat masuk pada celah *roll* maka gaya gesek yang mengarah ke *celah roll* harus lebih besar atau sama dengan gaya normal yang cenderung menjauh benda kerja dari celah *roll*.

Syarat batas untuk memasukan pelat tanpa gaya luar adalah:

$$F \cdot \cos \alpha = P \cdot \sin \alpha \quad (2-2)$$

$$\frac{f}{p} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha \quad (2-3)$$

$$F = \mu \cdot P \quad (2-4)$$

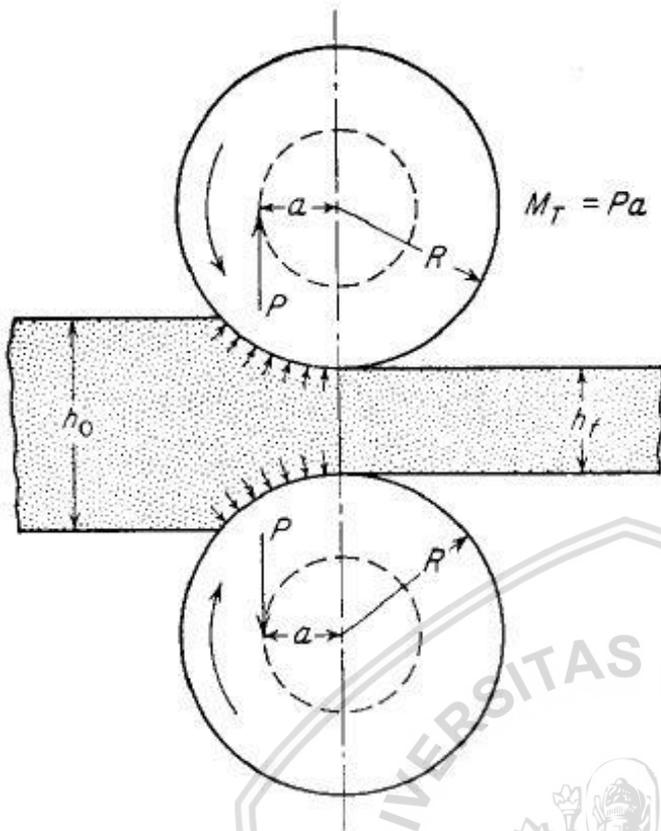
Benda kerja tidak dapat dimasukkan ke celah *roll*, jika garis singgung sudut kontak melebihi koefisien gesekan. Jika $\mu=0$, pengerolan tidak dapat terjadi tetapi jika nilai μ bertambah maka *slab* yang dimasukkan ke dalam *roll* bertambah besar. Untuk kondisi gesekan yang sama, *roll* berdiameter besar akan memungkinkan masuknya *slab* yang bertambah besar. Hal ini terjadi karena meskipun sudut antara pusat *roll* dengan bidang masuk akan sama dalam kedua kasus ($\tan x$) tetapi panjang busur kontak akan berbeda cukup besar.

Beban *roll* merupakan beban yang diberikan *roll* kepada material yang mengalami *roll bonding* agar material mengikat beban *roll* harus diperhatikan agar beban *roll* sanggup untuk memberikan beban. Beban *roll* dapat dihitung dari perkalian tekanan *roll* dengan luas daerah kontak antara *roll* dengan logam.

$$P = p \cdot b \cdot L_p = \sigma_o \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (2-5)$$

Besarnya torsi sama dengan beban pengerolan total dikalikan dengan lengan momen efektif, dan karena terdapat dua buah *roll* kerja, maka besarannya torsi diberikan oleh:

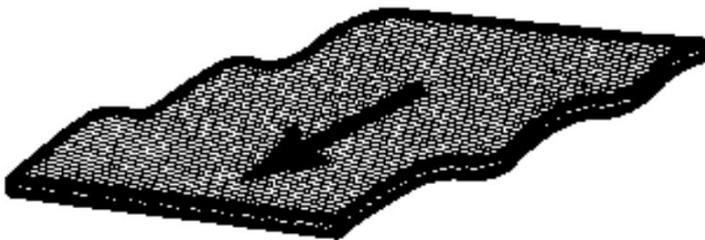
$$M_t = 2Pa \quad (2-6)$$



Gambar 2.19 Skema ilustrasi torsi roll
Sumber: Dieter (1998:614)

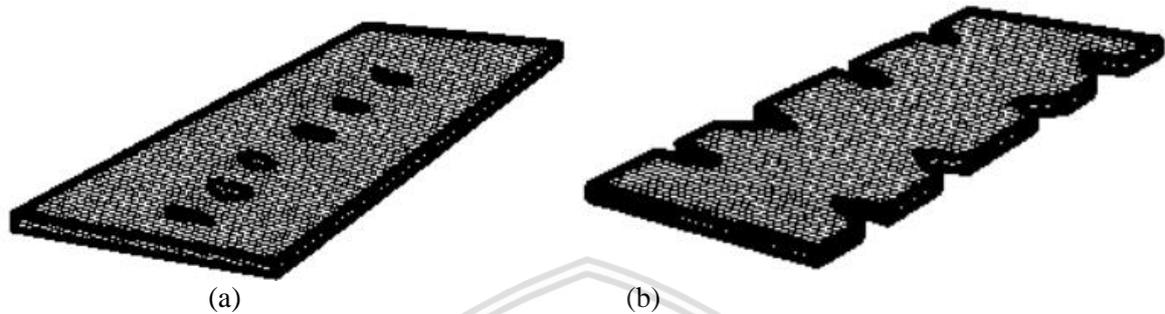
2.6.2 Cacat Pengerollan

Cacat bisa jadi muncul pada permukaan pelat hasil proses pengerollan, atau didalam struktur pelat (Kalpakjian, 2009). Cacat tidak diinginkan bukan hanya karena mempengaruhi penampilan tapi juga karena mempengaruhi kekuatan, kemampuan dibentuk, dan karakteristik *manufacturing* lainnya. Cacat *wavy edges* yang ditunjukkan pada Gambar 2.20 adalah hasil dari *bending* saat pengerollan, biasanya bagian tepi lebih tipis dibandingkan bagian tengah dengan demikian bagian tepi mengalami perpanjangan yang lebih besar dibandingkan bagian tengah.



Gambar 2.20 Wavy edges
Sumber: Kalpakjian (2009:324)

Cacat *zipper crack* dan *edge crack* yang ditunjukkan pada Gambar 2.21 merupakan retakan yang dihasilkan karena kualitas keuletan material yang buruk pada suhu pengerollan, karena retak akan mempengaruhi kualitas pinggiran yang mana akan mempengaruhi proses pembentukan pelat, maka retak harus dihilangkan biasanya dengan proses *shearing* dan *slitting*.



Gambar 2.21 Cacat crack, (a) Zipper crack, (b) Edge cracks
Sumber: Kalpakjian (2009:324)

Cacat *alligating* yang ditunjukkan pada Gambar 2.22 adalah fenomena yang kompleks dan khususnya terjadi karena deformasi yang tidak seragam dari *billet* saat pengerollan atau cacat yang sudah ada pada material benda kerja.



Gambar 2.22 Alligating
Sumber: Kalpakjian (2009:324)

2.7 Pengujian Kekuatan Tarik

Pengujian tarik digunakan untuk mengetahui nilai kekuatan material, pada pengujian ini spesimen diberikan beban uniaksial sampai terjadi patahan (Smith, 1993). Kekuatan tarik suatu bahan dapat diketahui melalui pengujian tarik, kekuatan suatu bahan ditetapkan dengan membagi gaya maksimum dengan luas penampang mula-mula.

Tegangan (σ) di dapat dari gaya tarik uniaksial rata-rata (F) yang dibagi dengan luas penampang awal (mm^2), dapat dirumuskan menjadi:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2-7)$$

dengan:

σ = Tegangan Tarik (N/mm^2)

F = Gaya tarik uniaksial rata-rata (N)

A_0 = Luas penampang awal (mm^2)

Material yang diberikan gaya tarik uniaksial akan mengalami perpanjangan searah dengan gaya, perpanjangan ini disebut regangan. Regangan (ε) adalah perbandingan dari perubahan panjang (l) searah dengan gaya tarik yang dibagi dengan panjang awal (l_0) regangan tidak memiliki unit dimensi, dalam dunia industri biasa ditemukan dalam persen regangan atau persen perpanjangan. Dapat dirumuskan menjadi:

$$\varepsilon = \left(\frac{l - l_0}{l_0} \right) \times 100 \% \quad (2-8)$$

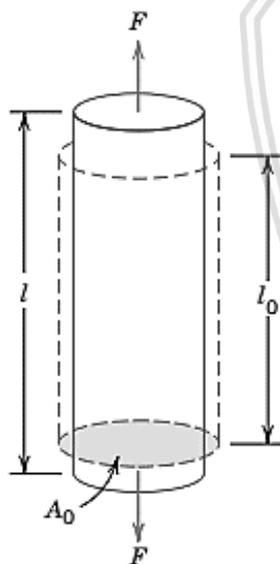
dengan:

ε = Regangan (%)

l_0 = Panjang awal (mm)

l = Perubahan panjang (mm)

Gambar 2.23 mengilustrasikan bagaimana gaya tarik (F) menghasilkan perpanjangan, garis nyata mempresentasikan bentuk akhir setelah deformasi yaitu perpanjangan, garis putus-putus mempresentasikan bentuk awal sebelum terdeformasi.



Gambar 2.23 Ilustrasi gaya tarik pada sebuah tabung
Sumber: Callister (2010:153)

Tegangan dan regangan yang didapatkan dapat dihubungkan sehingga membentuk kurva tegangan-regangan. Pada kurva ini dapat menunjukkan daerah elastis, daerah plastis, kekuatan tarik maksimum, modulus elastisitas, kekuatan *yield*, dan total regangan saat patah. Gambar 2.24 menunjukkan grafik tegangan-regangan.

Pada Gambar 2.24 garis OA menunjukkan daerah elastis dimana material akan kembali ke bentuk semula saat beban yang diberikan dilepas, sedangkan daerah plastis berada pada daerah titik B sampai titik e_f (regangan patah) dimana material tidak akan kembali ke bentuk

semula saat beban sudah dilepas. Kekuatan tarik maksimum dapat dicari dengan cara membagi gaya maksimal (F_{max}) dengan luas permukaan awal (A). Dapat dirumuskan menjadi:

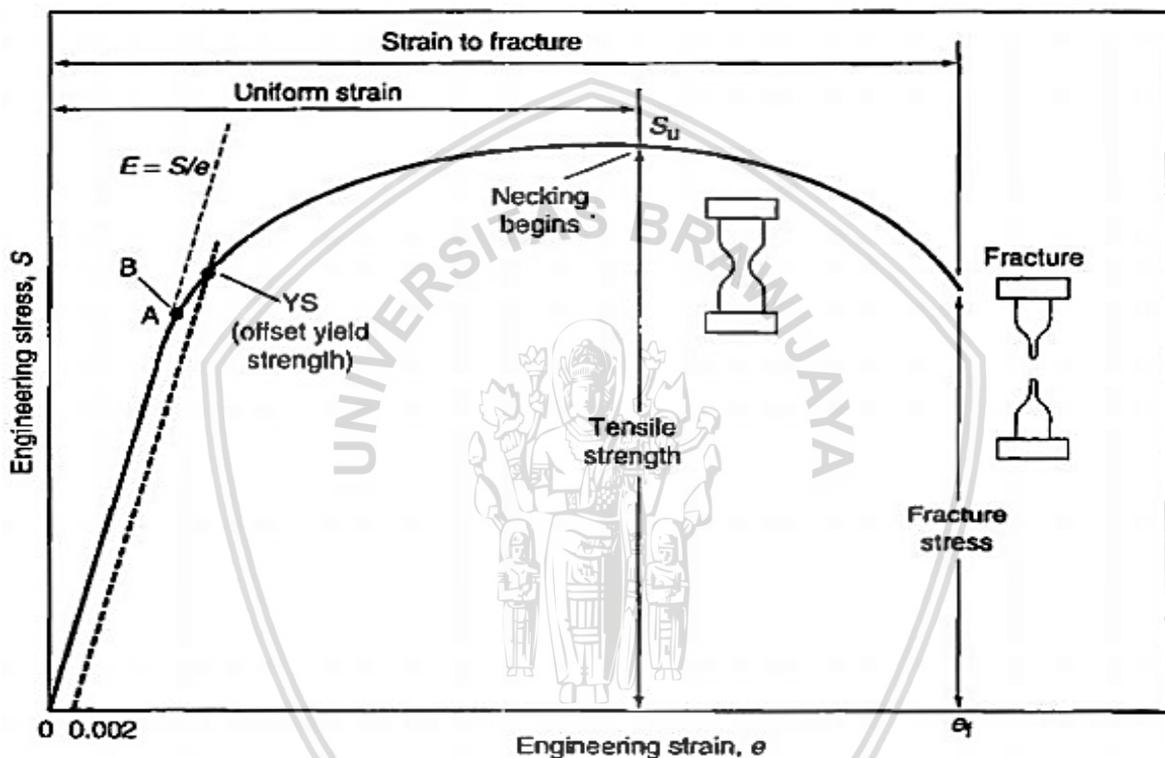
$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_o} \quad (2-9)$$

dengan:

σ_{max} = Tegangan Tarik maksimal (MPa)

F_{max} = Gaya Tarik maksimal (N/mm²)

A_o = Luas penampang awal (mm²)



Gambar 2.24 Grafik tegangan-regangan

Sumber: ASM atlas of stress-strain curves (2002:1)

Modulus elastisitas (E) dapat dicari dengan membagi tegangan (σ) dan regangan (ϵ) pada daerah elastis, regangan saat material patah adalah regangan total. Dapat dirumuskan menjadi:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2-10)$$

dengan:

E = Modulus elastistas (GPa)

σ = Tegangan (N/mm²)

ϵ = Regangan (mm²)

2.8 Hubungan antara Uji Tarik dengan Suhu Pemanasan

Proses perlakuan bertujuan untuk meningkatkan sifat keuletan, memperbaiki kualitas permesinan, menurunkan tegangan dalam, meningkatkan sifat kekerasan dan sifat kekuatan tarik, dan menghasilkan sifat tangguh. Pada saat material dipanaskan ada tiga faktor penting yang diperhatikan yaitu temperatur logam yang dipanaskan, lamanya logam ditahan pada temperatur tersebut dan kecepatan pendinginan, seperti pada pengerasan permukaan. Pada proses pengerasan pemanasan suatu material dilakukan sampai mencapai temperatur tertentu atau temperatur rekristalisasi ini adalah untuk memperoleh tingkat kekuatan tarik material yang diproses. Dari proses ini diharapkan adanya perubahan yang menghasilkan struktur mikro yang lebih baik dari pada material sebelum mengalami perlakuan panas.

Semakin tinggi suhu pemanasan maka pertumbuhan butir akan semakin besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.25, butiran besar memiliki sedikit energi dibandingkan dengan butiran kecil, ini berhubungan dengan berkurangnya batas butir yang menyebabkan kemampuan material untuk menahan beban yang diterima semakin berkurang.

Secara umum hubungan antara kekuatan *yield* dan ukuran butir di usulkan oleh Hall dan diteruskan oleh Patch, karena hal tersebut maka dikenal dengan istilah *Hall-Patch equation*. Hal tersebut di maksudkan untuk menggambarkan ketergantungan ukuran butir terhadap alur tegangan terhadap setiap regangan plastis pada material (*ductile fracture, brittle fracture, fatigue strength*) berdasarkan ukuran butir. Persamaan Hall-Patch yaitu:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (2-11)$$

dengan:

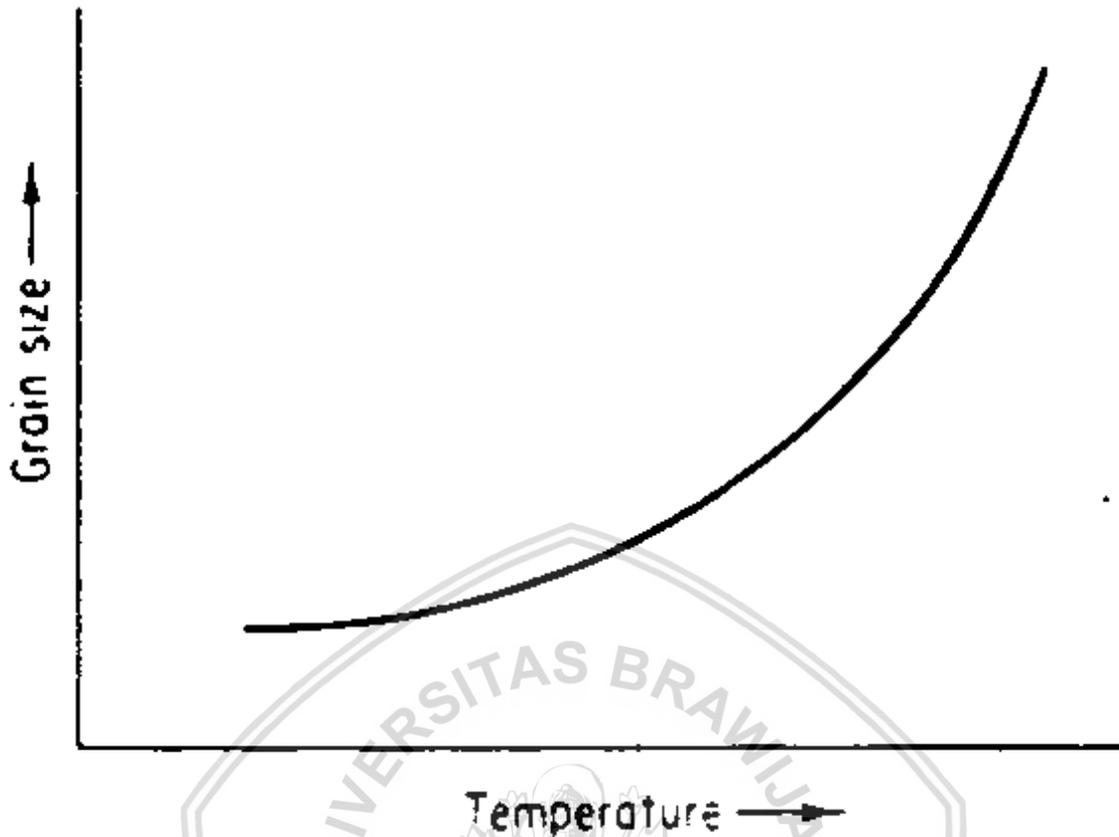
σ_y = Tegangan *yield*

σ_0 = Konstanta material (ketahanan kisi terhadap pergerakan dislokasi)

k_y = Koefisien penguatan

d = Diameter butir

Pada Persamaan (2-11) di mana σ_y adalah tegangan *yield*, σ_0 adalah konstanta material untuk tegangan awal selama pergerakan dislokasi (ketahanan kisi terhadap pergerakan dislokasi), k_y adalah koefisien penguatan (konstanta untuk masing-masing material) dan d adalah diameter butir rata-rata. Pada Persamaan (2-11) dapat dilihat apabila semakin besar nilai diameter butir rata-rata maka nilai tegangan *yield* akan semakin mengecil, sehingga beban *yield* yang dapat diterima oleh material akan semakin berkurang.



Gambar 2.25 Pengaruh suhu pada ukuran butir terekristalisasi
Sumber: Avner (1997:135)

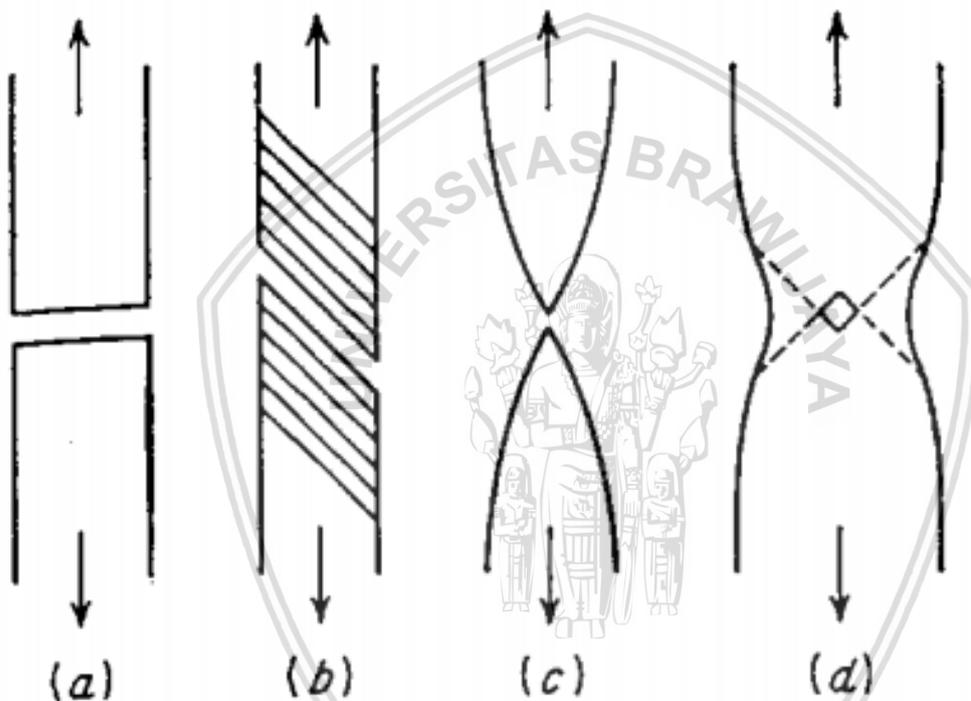
2.9 Patahan

Patahan adalah pemisahan atau pemecahan suatu benda padat, menjadi 2 bagian atau lebih diakibatkan adanya tegangan. Proses perpatahan terdiri atas 2 tahap, yaitu timbulnya retak dan tahap penjalaran retak. Patah dapat digolongkan dalam 2 kategori umum, yakni patah liat serta patah getas. Patah liat ditandai oleh deformasi plastis yang cukup besar sebelum dan selama proses penjalaran retak. Pada permukaan patahan, biasanya nampak adanya deformasi yang cukup besar. Patah getas pada logam, ditandai oleh adanya kecepatan penjalaran retak yang tinggi, tanpa terjadi deformasi kasar, dan sedikit sekali deformasi mikro kecenderungan terjadinya patah getas akan bertambah besar, bila temperatur turun, laju regangan bertambah (Dieter, 1987).

2.9.1 Jenis-Jenis Patahan

Logam dapat memperlihatkan beberapa jenis perpatahan yang berbeda-beda, tergantung pada temperatur, keadaan tegangan dan laju pembebanan. Kategori umum yang selalu dipergunakan adalah patah getas dan patah liat (ulet). Gambar 2.26 menunjukkan beberapa jenis patah akibat tegangan tarik yang terjadi pada logam. Patah getas Gambar 2.26(a)

ditandai oleh adanya pemisahan berarah tegak lurus terhadap tegangan tariknya. Dari luar tidak terdapat bukti adanya deformasi. Ada beberapa macam bentuk patah liat kristal-kristal tunggal logam HCP dapat mengalami *slip* pada bidang-bidang dasar yang berurutan, sampai akhirnya kristal-kristal tersebut akan terpisah akibat tegangan geser Gambar 2.26 (b). Benda uji polikristal dari logam yang sangat liat, misalnya emas atau timah putih, dapat ditarik hingga suatu titik sebelum terjadinya patah Gambar 2.27(c). Pada perpatahan akibat tegangan tarik logam yang cukup liat, deformasi plastik akhirnya akan menghasilkan daerah yang tertakik Gambar 2.27(d). Patah berawal dari pusat benda uji dan kemudian meluas akibat pemisahan geser, sepanjang garis putus-putus pada Gambar 2.27(d) (Dieter, 1987).



Gambar 2.26 Jenis-jenis patahan pada logam akibat beban tarik sesumbu
Sumber: George E Dieter (1987:243)

2.10 Hipotesis

Dalam penelitian ini variasi yang digunakan adalah suhu pemanasan awal sebelum material dilakukan *hot roll bonding*, semakin tinggi suhu pemanasan di atas suhu rekristalisasi akan karena ukuran butir yang semakin besar. Proses *hot roll bonding* mengakibatkan bahan mengalami deformasi plastis, sehingga nilai kekerasan material akan meningkat berbanding terbalik dengan nilai uji tariknya setelah dilakukan proses *hot roll bonding*.

Sehingga dapat dinyatakan hipotesis dari penelitian ini adalah semakin tinggi suhu pemanasan maka pertumbuhan butir akan semakin besar, butiran besar memiliki sedikit

energi dibandingkan dengan butiran kecil, ini berhubungan dengan berkurangnya batas butir. Hal ini menyebabkan kemampuan material untuk menahan beban yang diterima semakin berkurang, sesuai dengan persamaan Hall-Patch yang ditunjukkan pada Persamaan (2-11) di mana nilai diameter butir yang semakin besar akan menurunkan tegangan *yield*, maka dari itu semakin tinggi suhu pemanasan semakin rendah kekuatan tarik yang dapat diterima oleh material tersebut.





BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini, yaitu *true experimental research* atau penelitian eksperimental nyata, yang mana membandingkan tiap data kekuatan tarik hasil penggabungan pelat A1100 dengan A6061 dengan proses *hot roll bonding* menggunakan suhu pemanasan awal yang berbeda tiap prosesnya.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat dan waktu untuk melaksanakan penelitian ini adalah:

1. Laboratorium Pengecoran Logam, Universitas Brawijaya untuk melakukan proses *hot roll bonding* pada tanggal 5 Februari 2018 - 16 Februari 2018.
2. Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang, Politeknik Negeri Malang untuk melakukan pembentukan spesimen uji tarik pada tanggal 17 Februari 2018 - 18 Februari 2018.
3. Laboratorium Struktur, Universitas Negeri Malang untuk melakukan uji tarik pada tanggal 24 Februari 2018 - 26 Februari 2018.
4. Laboratorium Uji Logam, Universitas Merdeka Malang untuk melakukan pengujian *microstructure* pada tanggal 2 April 2018 - 6 April 2018.

3.3 Variabel Penelitian

Terdapat tiga variabel pada penelitian ini yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel terkontrol.

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang dapat dirubah besar nilainya sehingga mempengaruhi nilai hasil penelitian. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah suhu pemanasan awal: 475°C; 525°C; dan 575°C

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besar nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah nilai uji tarik dari setiap spesimen hasil *hot rolling* pada suhu pemanasan awal yang telah ditetapkan.

3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol merupakan variabel yang nilainya dijaga agar tetap konstan selama penelitian. Variabel terkontrol yang digunakan antara lain:

- Kecepatan putar *roll* : 25 rpm
- *Roll gap* : 1 mm
- Proses pengerollan : *Hot roll bonding*
- Reduksi pengerollan : 50%
- *Holding time* : 40 menit

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian adalah:

1. Mesin *roll bonding*

Mesin *roll bonding* digunakan untuk melakukan proses *roll bonding*, dengan spesifikasi sebagai berikut.

- Diameter *roll* : 60 mm
- Daya motor : 4 HP
- *Reducer* motor : 1 : 20



Gambar 3.1 Mesin *roll bonding*

2. Sandpaper

Sandpaper digunakan untuk memberikan *surface preparation* pada kedua permukaan pelat yang akan dibonding. *Sandpaper* yang digunakan adalah jenis *waterproof* nomor 60.



Gambar 3.2 Sandpaper

3. Dapur listrik

Dapur listrik digunakan untuk memberikan suhu pemanasan kepada dua pelat sebelum proses *hot roll bonding*. Dengan spesifikasi dapur listrik sebagai berikut.

Voltase	: 220 V
Arus listrik	: 7,0 A
Daya	: 1500 W



Gambar 3.3 Dapur listrik

4. Jangka sorong digital

Jangka sorong digital digunakan untuk mengukur dimensi pelat.



Gambar 3.4 Jangka sorong digital

5. Larutan *acetone*

Larutan *acetone* digunakan untuk membersihkan kedua permukaan pelat yang akan dibonding.



Gambar 3.5 Larutan *acetone*

6. Tachometer

Tachometer digunakan untuk mengukur kecepatan putar roll.



Gambar 3.6 Tachometer

7. Kawat bendrat

Kawat bendrat digunakan untuk melakukan penjepitan dua pelat yang akan diroll supaya tidak bergeser.



Gambar 3.7 Kawat bendrat

8. *Marker*

Marker digunakan untuk menandai spesimen saat pengukuran dimensi.



Gambar 3.8 Marker

9. *Feeler gauge*

Feeler gauge digunakan untuk mengukur celah antara dua *roll*.



Gambar 3.9 Feeler gauge

10. *Gunting pelat*

Gunting pelat digunakan untuk memotong pelat sesuai dengan spesimen pengerollan.



Gambar 3.10 Gunting pelat

11. Mesin bor

Mesin bor digunakan untuk membuat lubang di setiap ujung pelat.



Gambar 3.11 Mesin bor

12. Digital multimeter

Digital *multimeter* alat ini digunakan untuk mengukur suhu spesimen setelah keluar dari dapur listrik.



Gambar 3.12 Digital multimeter

13. Penggaris

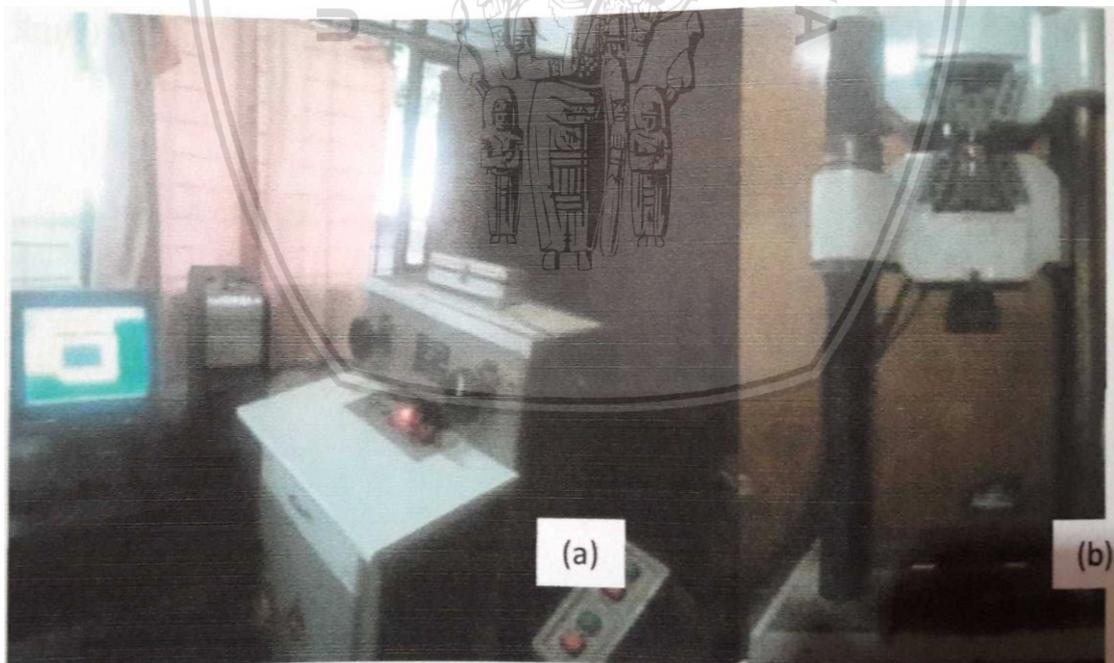
Penggaris digunakan untuk mengukur dimensi pelat sesuai dengan bentuk spesimen pengerollan.



Gambar 3.13 Penggaris

14. Mesin uji tarik

Mesin uji tarik digunakan untuk melakukan pengujian kekuatan tarik.



Gambar 3.14 Mesin uji tarik (a) *Display controller* (b) *Specimen holder*

Sumber: Laboratorium Struktur, Universitas Negeri Malang

3.4.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah A1100 dan A6061 berbentuk lembaran dengan komposisi paduan sebagai berikut:

Tabel 3.1

Komposisi Kimia A1100 yang digunakan Untuk Penelitian

Aluminium	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Cr (%)	Ti (%)
A1100	<99,43	0,099	0,312	0,049	0,031	0,013	0,002	<0,001	0,021

Tabel 3.2

Komposisi A6061 yang digunakan Untuk Penelitian

Aluminium	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Cr (%)	Ti (%)
A6061	<97,90	0,405	0,133	0,308	0,030	0,911	0,051	0,135	0,018

3.4.2.1 Dimensi Bahan

1. Dimensi spesimen *roll bonding*

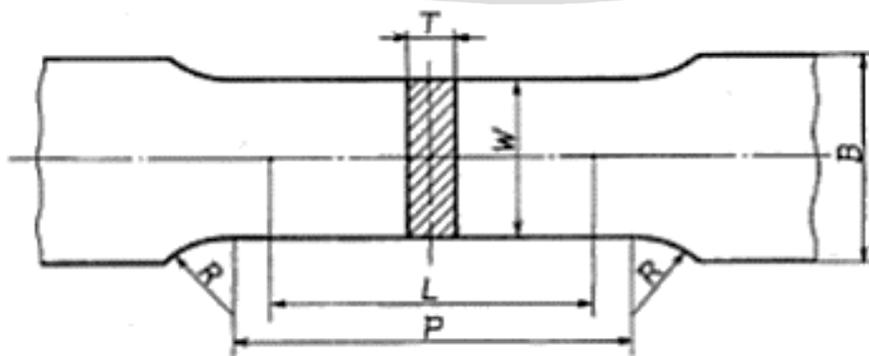
Dimensi A1100 dan A6061 yang akan digunakan untuk proses *roll bonding* pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Dimensi lembaran proses *roll bonding* dalam satuan mm

2. Dimensi spesimen uji tarik

Ukuran spesimen uji tarik dapat dilihat pada Gambar 3.16 sesuai dengan standart JIS Z 2201 untuk *sheet-type*.



Gambar 3.16 Dimensi spesimen uji tarik

Keterangan Gambar 3.16:

- | | |
|----------------------------|-----------|
| 1. W —Lebar | = 25 mm |
| 2. T —Tebal | = 1 mm. |
| 3. R —Radius | = 20 mm |
| 4. L —Panjang seluruhnya | = 240 mm. |
| 5. P —Daerah pengurangan | = 50 mm. |
| 6. B —Lebar | = 35 mm. |

3.5 Skema Penelitian

Pada Gambar 3.17 menunjukkan skema penelitian untuk proses *hot roll bonding* dan uji tarik.

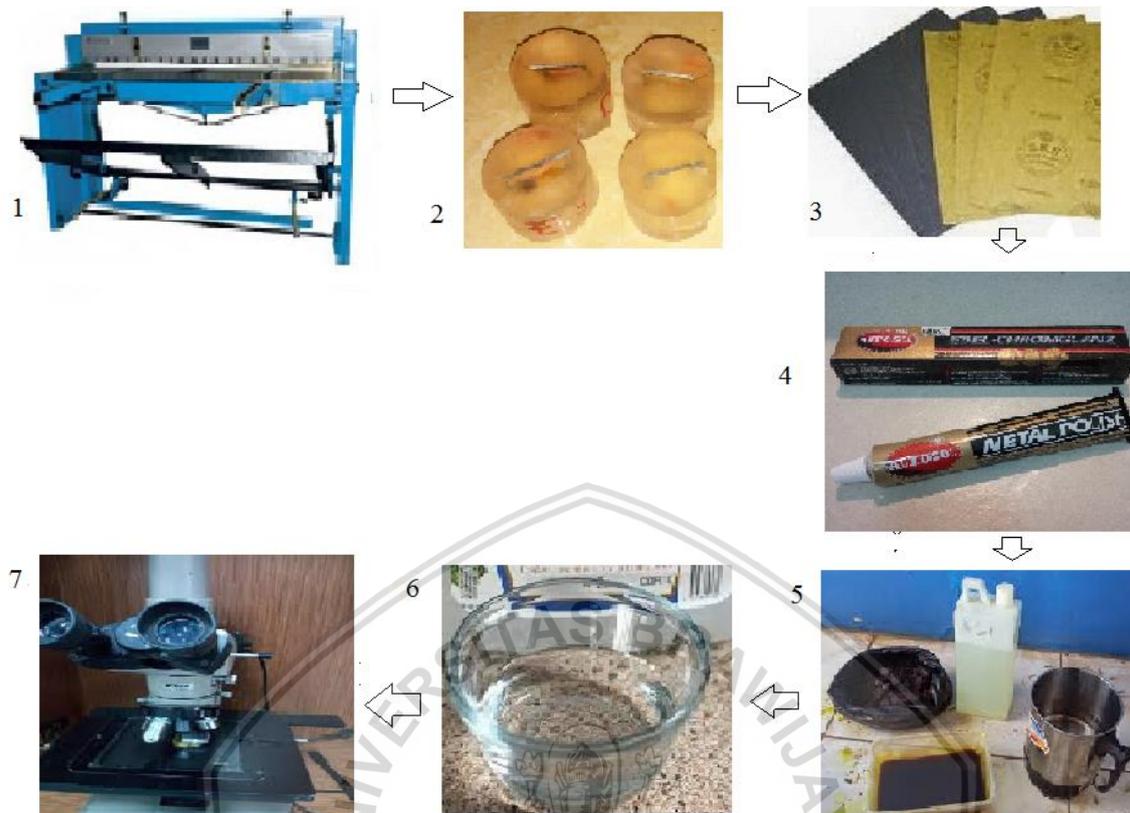


Gambar 3.17 Skema penelitian proses *hot roll bonding* dan uji tarik

Keterangan Gambar 3.17:

1. Memotong pelat A1100 dan A6061 sesuai dimensi pada Gambar 3.15
2. *Surface preparation* dengan mengamplas permukaan masing-masing pelat yang akan digabungkan
3. Perendaman spesimen didalam larutan *acetone*
4. Penjepitan dua pelat dengan kawat bendrat
5. *Preheating* spesimen dengan dapur listrik
6. Proses *roll bonding*
7. Membentuk spesimen uji tarik sesuai Gambar 3.16
8. Pengujian tarik

Pada Gambar 3.18 menunjukkan skema penelitian dari proses uji *microstructure*:



Gambar 3.18 Skema penelitian uji *microstructure*

Keterangan Gambar 3.18:

1. Memotong pelat hasil *roll bonding* untuk uji *microstructure*
2. *Mounting* spesimen dengan resin
3. Pengamplasan permukaan spesimen
4. Pemolesan permukaan menggunakan *metal polish*
5. Proses etsa menggunakan *keller reagent*
6. Uji foto *microstructure*

3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Prosedur *Roll Bonding*

Pada penelitian ini dilakukan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Mempersiapkan alat dan bahan yaitu *sandpaper*, A1100, dan A6061
2. Memotong dimensi benda kerja sesuai dengan yang direncanakan
3. Mengamplas kedua permukaan benda kerja menggunakan *sandpaper*
4. Mencelupkan spesimen yang sudah dipotong kedalam larutan *acetone*
5. *Wiring* pada kedua benda kerja
6. *Preheating* dengan suhu 425°C; 525°C dan 575°C

7. Mempersiapkan mesin *roll bonding*
 - a. Mengatur *roll gap*
 - b. Mengatur kecepatan putar *roll*
8. Proses pengerollan

3.6.2 Prosedur Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan pada spesimen hasil *roll bonding* yang telah dibentuk menjadi spesimen uji tarik sesuai dengan standar JIS Z 2201 untuk *sheet-type* seperti pada Gambar 3.16.

Prosedur pengujian kekuatan tarik:

1. Mempersiapkan alat & bahan
2. Mengukur tebal & lebar spesimen untuk mengetahui luas penampang awal
3. Menjepit kedua sisi spesimen pada kedua *chuck* mesin uji tarik
4. Menyalakan mesin uji tarik
5. Memberikan beban tarik sampai spesimen mengalami patahan
6. Mematikan mesin
7. Mencatat data uji tarik

3.6.3 Prosedur Pengujian *Microstructure*

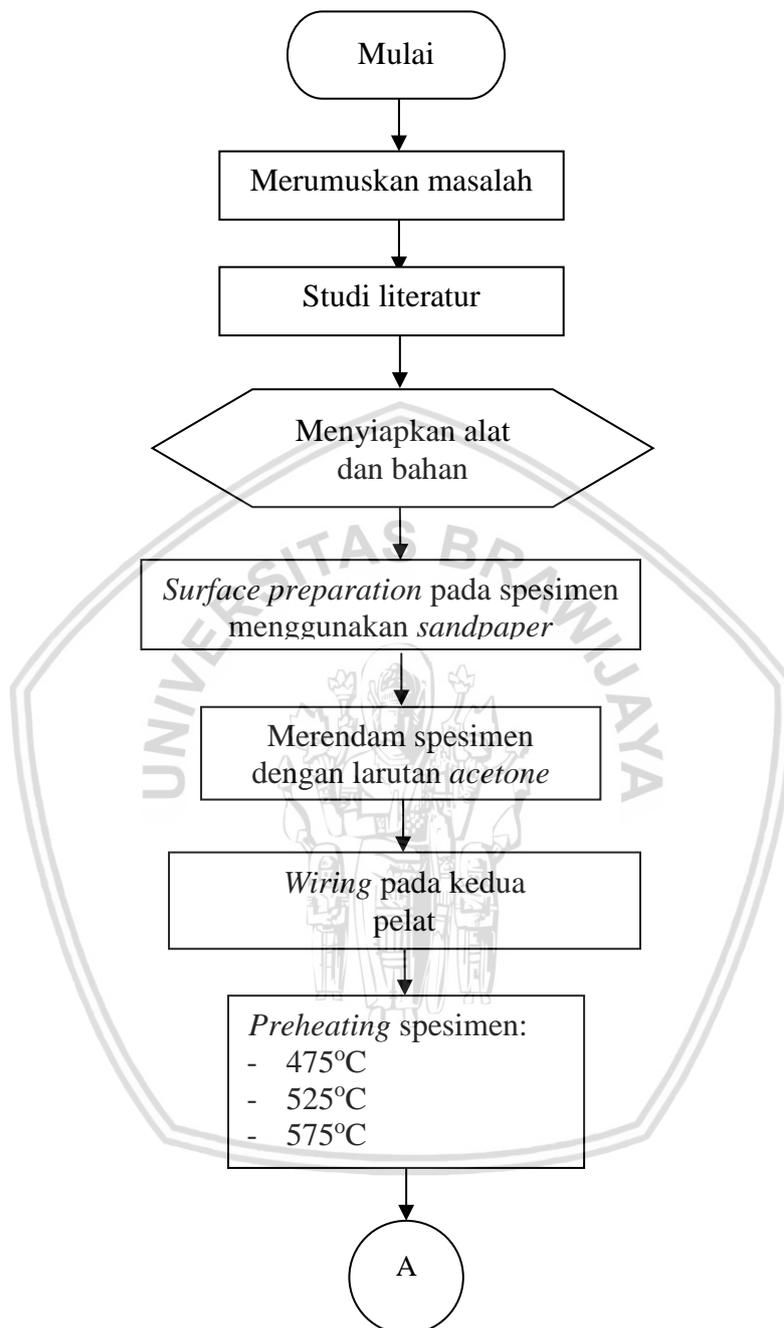
Pengujian *microstructure* dilakukan untuk melihat besar butir pada spesimen hasil *roll bonding*.

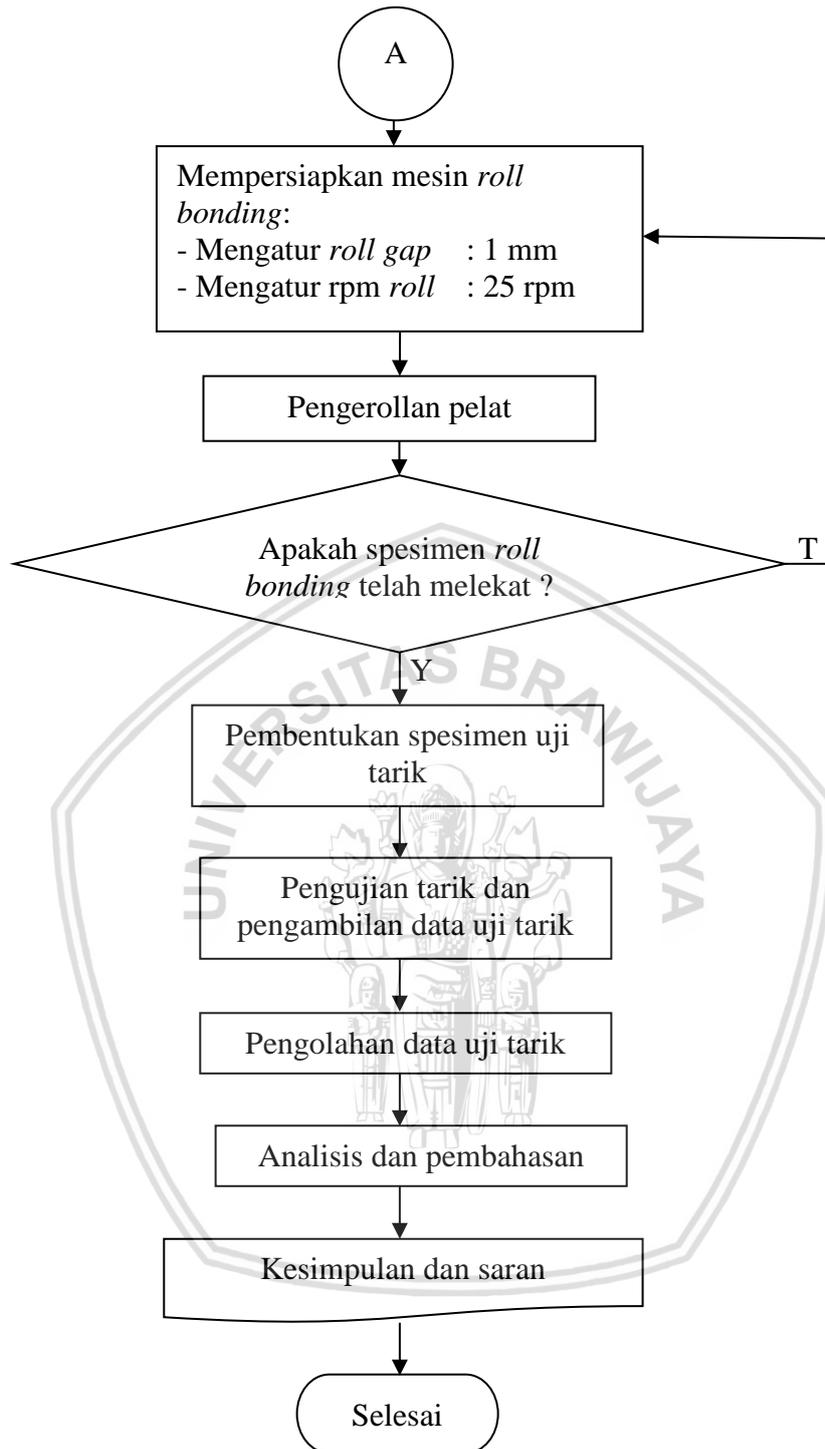
Prosedur pengujian *microstructure*:

1. Memotong pelat hasil *roll bonding* untuk dijadikan sampel uji *microstructure*
2. *Mounting* yaitu dengan memasukkan pelat kedalam resin
3. Pengamplasan pada pelat yang telah dimounting menggunakan *sandpaper* dengan no.100, no.200, no.500, no.1000, no.2000 dan no.5000 secara berurutan
4. Pemolesan pada spesimen dengan menggunakan *metal polish*
5. Spesimen dimasukkan kedalam etsa dimana yang digunakan adalah *keller reagent*
6. Pengujian *microstructure* menggunakan mikroskop logam.
7. Pengujian *microstructure* selesai

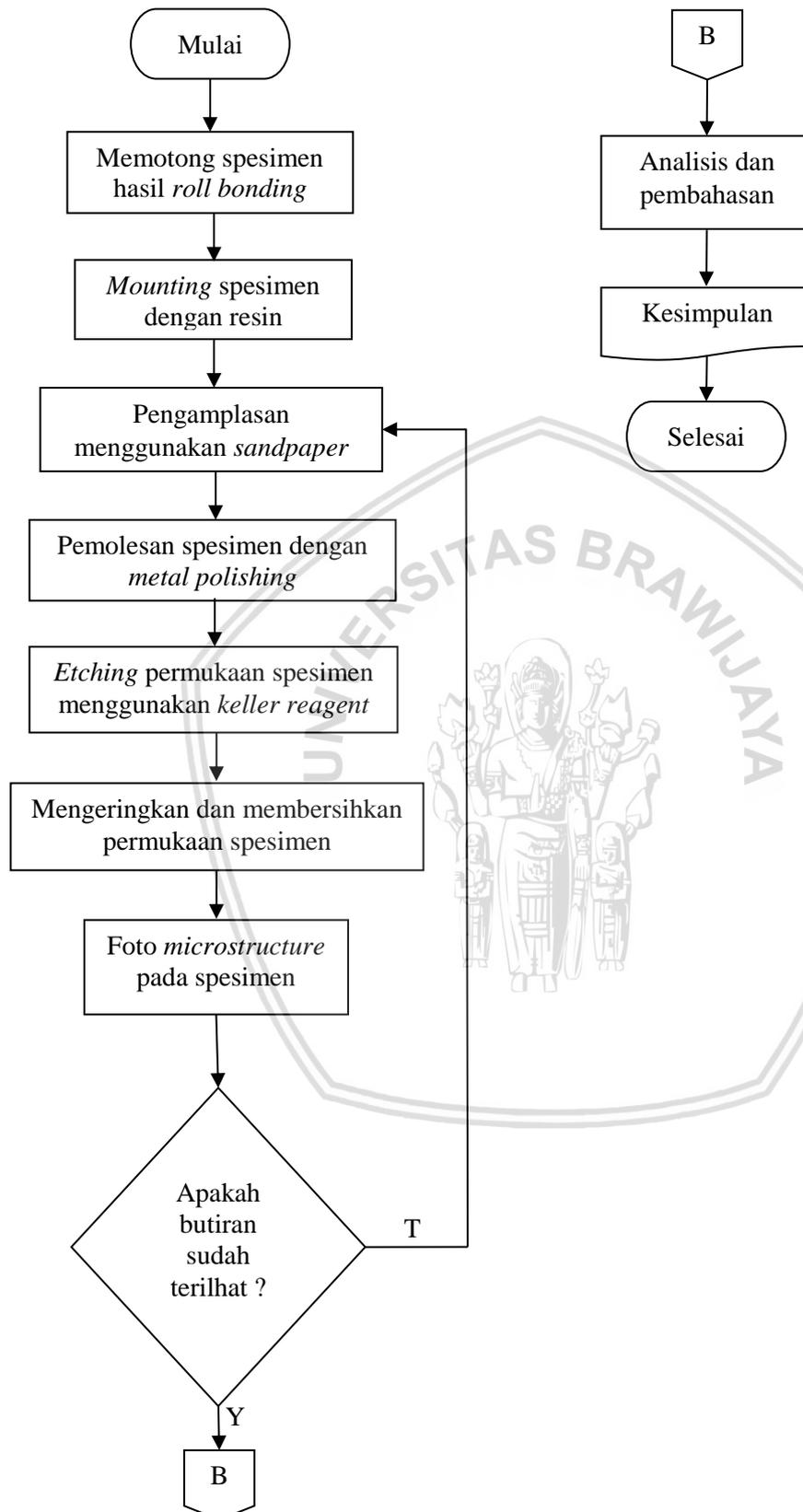
3.7 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir proses *hot roll bonding* dan uji tarik:





Gambar 3.19 Diagram alir proses hot roll bonding dan uji tarik

Diagram alir proses uji *microstructure*Gambar 3.20 Diagram alir proses uji *microstructure*



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian

Pengujian tarik dilakukan untuk setiap spesimen setelah proses *hot roll bonding* yang telah dibentuk sesuai dengan standar spesimen uji tarik yang digunakan, lalu dilakukan pengujian tarik menggunakan alat uji tarik. Pengujian tarik dilakukan pengulangan untuk setiap variasi yaitu sebanyak tiga kali pengulangan untuk mendapatkan nilai rata-rata dari setiap variasi suhu pemanasan. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah suhu pemanasan awal dengan *holding time* tetap selama 40 menit, variasi suhu pemanasan yaitu: 475°C, 525°C, dan 575°C. Nilai dari pengujian tarik dari setiap spesimen terdapat pada Tabel 4.1. Nilai kekuatan tarik untuk A1100 dan A6061 tanpa perlakuan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.1
Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Dari Setiap Spesimen Variasi Suhu Pemanasan Awal Pada Proses *Hot Roll Bonding*

Suhu pemanasan (°C)	F max (N)	Luas permukaan (mm ²)	Kekuatan tarik (MPa)	Kekuatan tarik rata-rata (MPa)	Standar deviasi (%)
475	4064	31.2	130.26	129.20	1.01
	3680	28.7	128.22		
	3680	28.5	129.12		
525	3900	31.05	125.60	125.70	1.50
	3740	30.1	124.25		
	3960	31.12	127.25		
575	3470	29.26	118.59	118.42	1.69
	3630	31.12	116.65		
	3520	29.33	120.01		

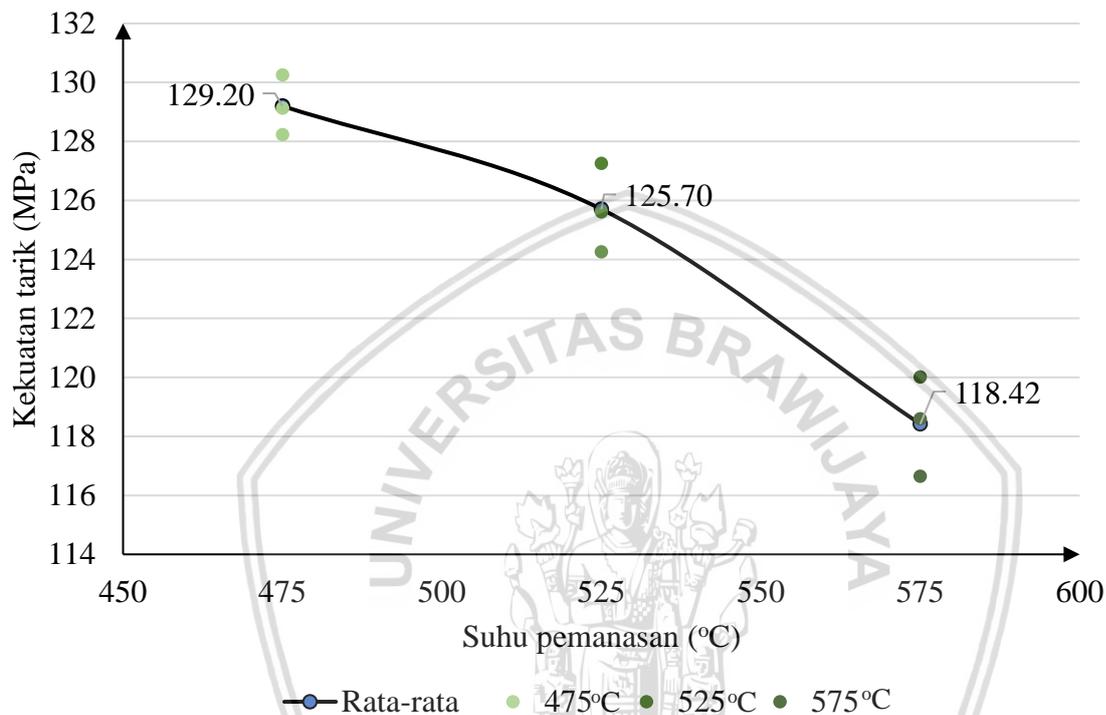
Tabel 4.2
Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Material Konvensional Tanpa Perlakuan Sebelum Proses *Hot Roll Bonding*

Aluminium	F max (N)	Luas permukaan (mm ²)	Kekuatan tarik (MPa)
1100	2461	25,13	97,930
6061	2693	25,97	107,849

4.2 Pembahasan

4.2.1 Kekuatan Tarik

Hasil pengujian tarik berupa nilai kekuatan tarik dari setiap spesimen setelah itu dibuat dalam bentuk grafik supaya mudah saat melakukan analisis data. Hubungan antara variasi suhu pemanasan awal terhadap nilai kekuatan tarik spesimen hasil *hot roll bonding* dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik hubungan nilai kekuatan tarik terhadap variasi suhu pemanasan awal pada proses *hot roll bonding*

Pada grafik hubungan nilai kekuatan tarik terhadap variasi suhu pemanasan awal proses *hot roll bonding* pada Gambar 4.1 menunjukkan kecenderungan nilai kekuatan tarik yang menurun setiap penambahan suhu pemanasan awal pada proses *hot roll bonding*.

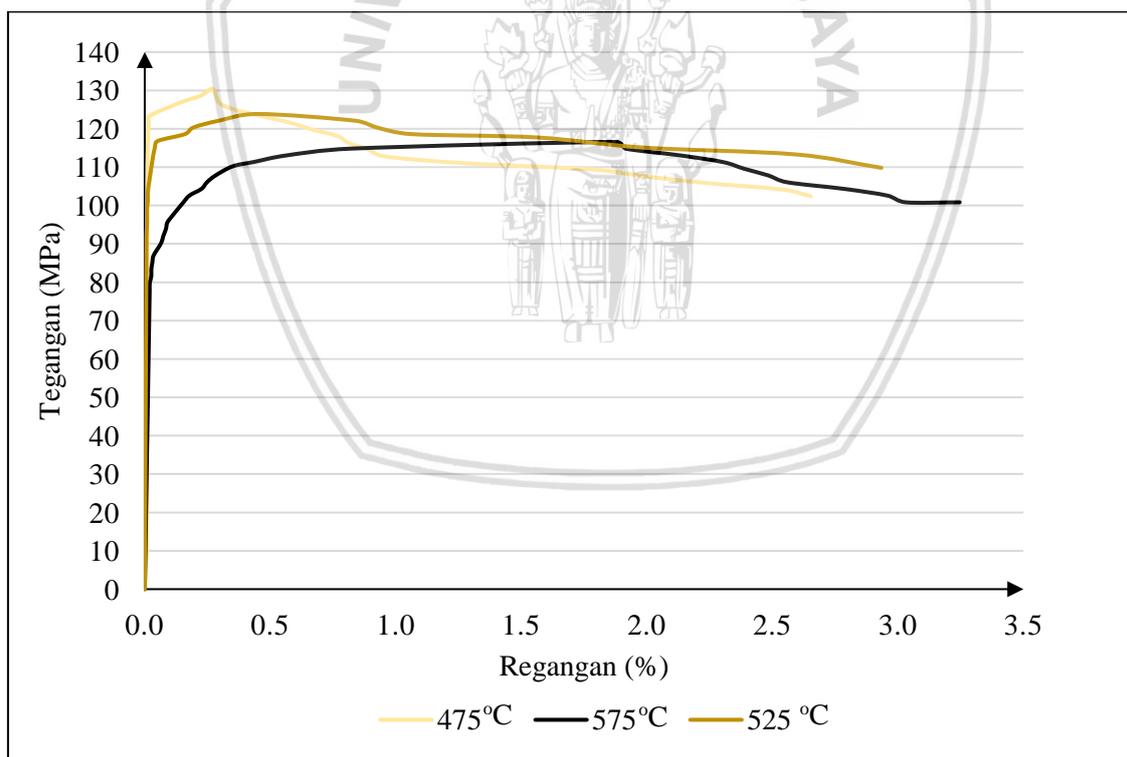
Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa spesimen dengan suhu pemanasan awal 475°C *holding time* 40 menit memiliki nilai kekuatan tarik tertinggi yaitu 130,26 MPa dan spesimen dengan suhu pemanasan 575°C *holding time* 40 menit memiliki nilai kekuatan tarik terendah yaitu 116,65 MPa. Jika dirata-rata maka nilai kekuatan tarik rata-rata dari spesimen dengan suhu pemanasan awal 475°C memiliki nilai kekuatan tarik tertinggi dibandingkan spesimen dengan suhu pemanasan 525°C dan 575°C dan spesimen dengan suhu pemanasan 575°C memiliki nilai kekuatan tarik rata-rata yang paling rendah.

Dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai suhu pemanasan awal pada proses *hot roll bonding* dapat menurunkan nilai kekuatan tarik, peningkatan suhu akan mengakibatkan

diameter butir semakin besar, diameter butir yang semakin besar memiliki sedikit energi dibandingkan dengan butiran kecil karena batas butir yang semakin berkurang, sesuai dengan persamaan Hall-Patch (2-11) bahwa meningkatnya nilai diameter butir akan mengakibatkan penurunan nilai tegangan luluh, semakin kecil nilai tegangan luluh material maka kemampuan menahan beban sebelum batas plastis akan semakin berkurang.

4.2.2 Tegangan – Regangan

Pengujian kekuatan tarik yang sudah dilakukan juga menghasilkan diagram tegangan-regangan yang akan memperlihatkan besarnya regangan yang terjadi selama tegangan diberikan secara terus menerus sampai spesimen mengalami patahan, untuk nilai tegangan didapatkan menggunakan persamaan (2-7) dan nilai regangan didapatkan menggunakan persamaan (2-8). Grafik tegangan-regangan spesimen dengan suhu pemanasan 475°C yang memiliki nilai kekuatan tarik 130,26 MPa, spesimen dengan suhu pemanasan 525°C yang memiliki nilai kekuatan tarik 125,60 MPa, dan spesimen dengan suhu pemanasan 575°C yang memiliki nilai kekuatan tarik 116,65 MPa ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik tegangan-regangan antara spesimen dengan suhu pemanasan awal 475°C, 525°C, dan 575°C

Pada Gambar 4.2 menunjukkan grafik tegangan-regangan dengan tegangan tertinggi dimiliki oleh spesimen dengan suhu pemanasan awal 475°C lebih tinggi dibandingkan spesimen dengan suhu pemanasan 525°C, dan 575°C. Sedangkan nilai regangan terbesar

dimiliki oleh spesimen dengan suhu pemanasan awal 575°C yaitu 3,2% selanjutnya spesimen dengan suhu pemanasan 525°C yaitu 2,93%, dan nilai regangan yang paling rendah adalah spesimen dengan suhu pemanasan 575°C yaitu 2,65 %. Hal ini menunjukkan bahwa nilai tegangan berbanding terbalik dengan nilai regangan, karena spesimen dengan suhu pemanasan 475°C memiliki nilai tegangan tertinggi namun memiliki nilai regangan yang paling rendah.

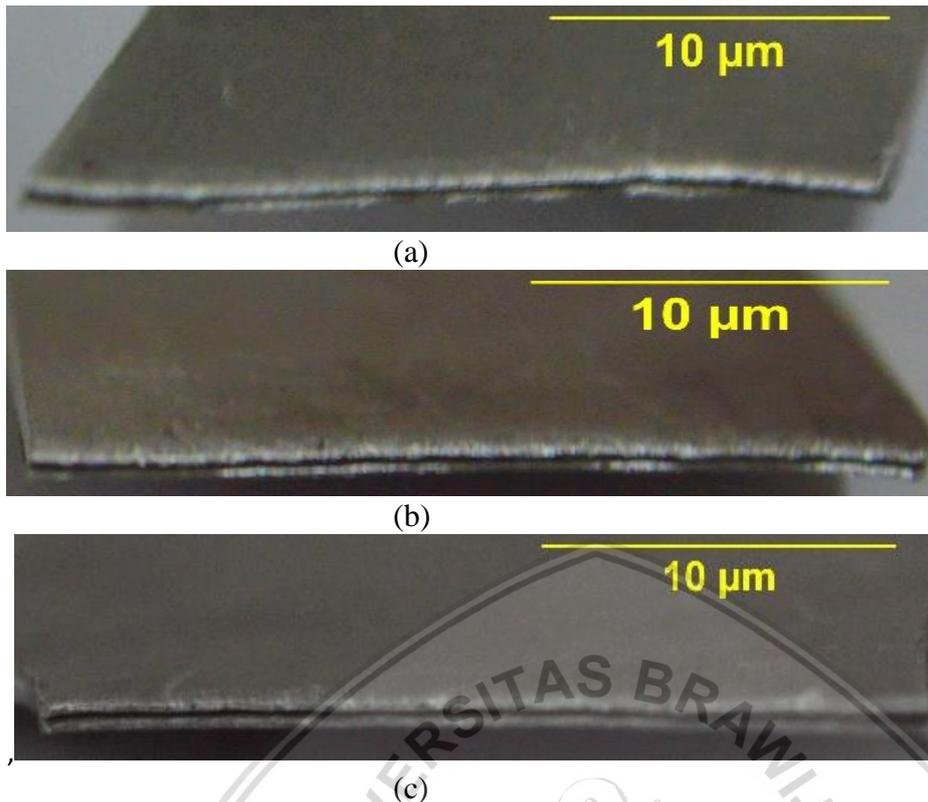
Tabel 4.3

Nilai Regangan Total dari Setiap Spesimen Variasi Suhu Pemanasan Awal pada Proses *Hot Roll Bonding*

Suhu pemanasan (°C)	Kekuatan Tarik (MPa)	Regangan total (%)	Regangan total rata-rata (%)
475	130.26	2,65	2,55
	128.22	2,58	
	129.12	2,42	
525	125.60	2,93	2,91
	124.25	2,86	
	127.25	2,94	
575	118.59	3,24	3,39
	116.65	3,24	
	120.01	3,70	

Spesimen dengan suhu pemanasan awal 575°C dengan nilai regangan total rata-rata 3,39% memiliki sifat yang lebih ulet dibandingkan dengan spesimen dengan suhu pemanasan 475°C yang memiliki nilai regangan total yaitu 2,55 % dan spesimen 525°C yang memiliki nilai regangan total 2,91% karena total regangan rata-rata yang lebih besar yaitu 3,39%.

Gambar 4.3 menunjukkan foto dari patahan pada spesimen hasil pengujian kekuatan tarik dari spesimen uji tarik dengan suhu pemanasan awal 475°C, 525°C, dan 575°C.

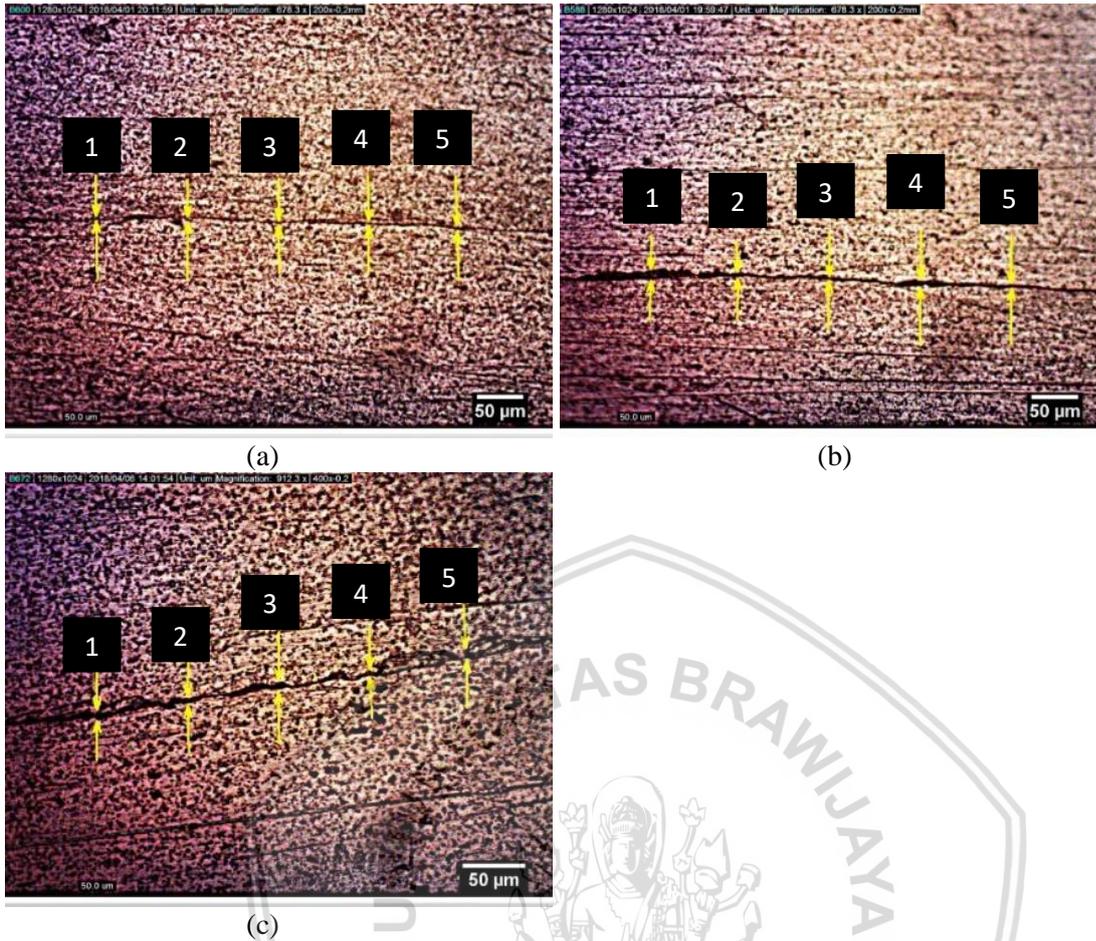


Gambar 4.3 Foto patahan spesimen pengujian tarik (a) Suhu pemanasan 475°C, (b) suhu pemanasan 525°C, dan (c) suhu pemanasan 575°C

Gambar 4.3(a) daerah patahan yang nampak mengkilap lebih terlihat dibandingkan Gambar 4.3(b) dan Gambar 4.3(c), daerah yang mengkilap disebabkan oleh deformasi plastis yang terjadi lebih kecil. Pada Gambar 4.3(c) daerah kelabu yang terlihat lebih banyak dibandingkan dengan 4.3(a) dan Gambar 4.3(b) hal ini terjadi karena regangan yang dimiliki oleh spesimen dengan suhu pemanasan 575°C lebih besar sehingga sempat terjadi deformasi plastis yang besar selama proses penjalaran retak dibandingkan spesimen dengan suhu pemanasan awal 475°C dan 525°C.

4.2.3 Hasil Foto Uji *Microstructure*

Variasi suhu pemanasan awal yang diberikan akan mempengaruhi ukuran butir dan lebar celah antara dua material yang disatukan dengan proses *hot roll bonding*. Saat uji *microstructure* dilakukan pada setiap variasi suhu pemanasan, akan memberikan hasil yang berbeda pada material sesuai dengan suhu pemanasan awal yang ditentukan, dapat dilihat pada Gambar 4.4 foto *microstructure* lebar celah dari spesimen dengan suhu pemanasan awal 475°C, 525°C, dan 575°C.



Gambar 4.4 Foto microstructure lebar celah antar spesimen dengan suhu pemanasan awal (a) 475°C, (b) 525°C, dan (c) 575°C.

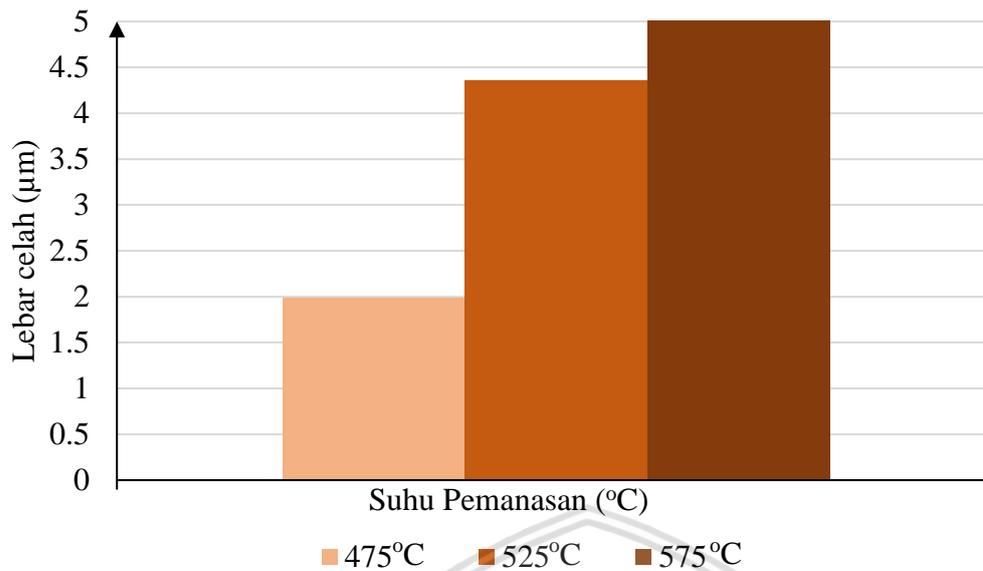
Pada Gambar 4.4 menunjukkan lebar celah antara dua material, lebar celah diukur pada lima titik secara acak. Hasil dari pengukuran lebar celah pada setiap titik terdapat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Lebar Celah Pada Setiap Spesimen Variasi Suhu Pemanasan.

Suhu pemanasan (°C)	Lebar celah di titik ke-n (µm)					Lebar celah rata-rata (µm)
	1	2	3	4	5	
475	2,2	3,1	2,0	1,7	2,4	2,28
525	8,4	3,0	1,9	4,0	2,2	3,90
575	4,2	3,6	5,0	4,3	6,8	4,78

Pada Tabel 4.4 menunjukkan nilai lebar celah disetiap titik pada Gambar 4.4. Data yang didapat ditampilkan dalam diagram batang yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.

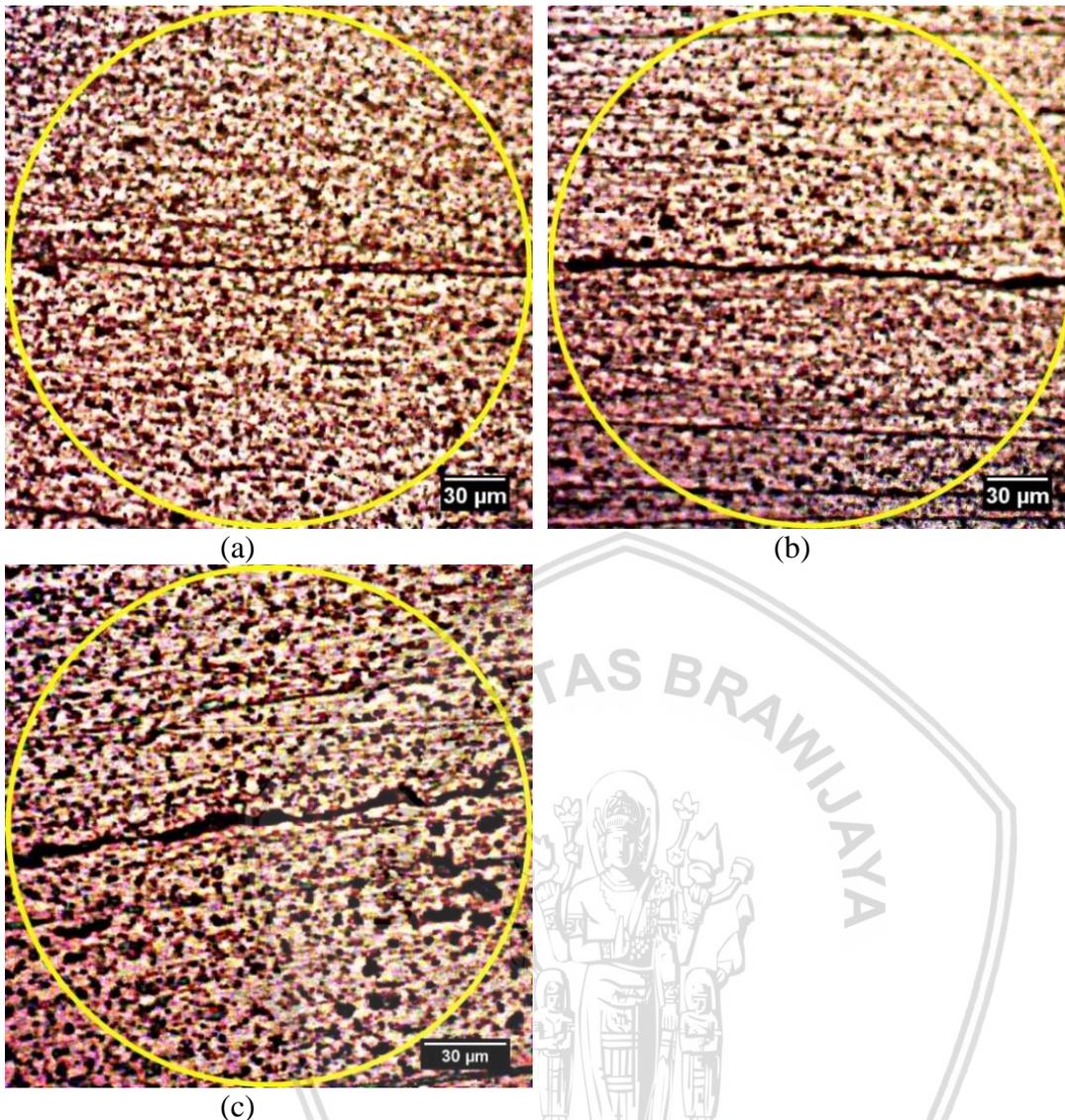




Gambar 4.5 Diagram batang lebar celah rata-rata dari spesimen setiap variasi suhu pemanasan pada proses *hot roll bonding*

Gambar 4.5 menunjukkan diagram batang lebar celah rata-rata dari spesimen setiap variasi suhu pemanasan pada proses *hot roll bonding*, lebar celah diambil dari 5 titik yang berbeda sepanjang celah pada foto *microstructure*, lebar celah rata-rata dengan nilai terkecil adalah milik spesimen dengan suhu pemanasan 475°C yaitu 1,98 µm selanjutnya spesimen dengan suhu pemanasan 525°C memiliki nilai lebar celah yaitu 4,36 µm, dan nilai lebar celah rata-rata yang terbesar yaitu milik spesimen dengan suhu pemanasan 575°C yaitu 5,66 µm.

Peningkatan nilai lebar celah terjadi seiring dengan penambahan suhu pemanasan yang bertambah besar, semakin besarnya lebar celah antar material mengakibatkan nilai uji tarik yang menurun sesuai dengan grafik pada Gambar 4.1, meningkatnya suhu pemanasan juga memberikan pengaruh terhadap besar butir pada spesimen suhu pemanasan yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Foto *microstructure* butiran spesimen dengan suhu pemanasan awal (a) 475°C, (b) 525°C, dan (c) 575°C

Pada Gambar 4.6 menunjukkan besar butir pada spesimen setiap variabel suhu pemanasan, nilai diameter besar butir didapatkan menggunakan prosedur *planimetric* (*or Jeffries*). Pada Gambar 4.6(a) adalah foto *microstructure* dari spesimen dengan suhu pemanasan awal 475°C yang memiliki nilai diameter butir rata-rata sebesar 11,9 µm, selanjutnya Gambar 4.6(b) spesimen dengan suhu pemanasan 525°C memiliki nilai diameter butir rata-rata 16,26 µm, dan yang terakhir Gambar 4.6(c) spesimen dengan suhu pemanasan suhu pemanasan 575°C memiliki nilai diameter butir rata-rata 16,5 µm.

Semakin besar suhu pemanasan maka nilai diameter butir rata-rata akan semakin besar juga, nilai diameter butir rata-rata yang dimiliki oleh spesimen dengan suhu pemanasan 475°C yaitu 11,9 µm sedangkan nilai diameter butir rata-rata yang dimiliki oleh spesimen dengan suhu pemanasan 575°C yaitu 16,26 µm. Semakin kecil diameter butir maka material

memiliki butiran yang semakin banyak atau halus, dan memiliki batas butir yang semakin banyak sehingga material mampu menahan kekuatan yang lebih dibandingkan dengan material yang memiliki batas butir sedikit, berdasarkan persamaan Hall-Patch (2-11) semakin besar diameter butir maka nilai tegangan luluh akan menurun, ketika tegangan luluh menurun maka kemampuan material untuk menahan beban sebelum plastis akan semakin berkurang. Maka dari itu kekuatan tarik yang dimiliki spesimen dengan suhu pemanasan awal 475°C lebih besar dari spesimen dengan suhu pemanasan 575°C , karena spesimen dengan suhu pemanasan 475°C memiliki butir yang banyak atau halus dan batas butir yang lebih banyak dibandingkan dengan spesimen dengan suhu pemanasan awal 575°C .





BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, maka dapat disimpulkan bahwa:

Suhu pemanasan awal yang berbeda dengan *holding time* yang tetap akan berpengaruh pada proses *hot roll bonding*, semakin besarnya nilai suhu pemanasan awal yang diberikan maka nilai kekuatan tarik dari material hasil proses *hot roll bonding* akan semakin menurun, nilai kekuatan tarik rata-rata dari yang tertinggi sampai yang terendah secara berurutan dimiliki oleh spesimen dengan suhu pemanasan awal 475°C selanjutnya spesimen dengan suhu pemanasan awal 525°C dan selanjutnya spesimen suhu pemanasan awal 575°C. Kekuatan tarik menurun disebabkan oleh perubahan suhu pemanasan yang semakin meningkat, peningkatan suhu akan mengakibatkan diameter butir semakin besar, diameter butir yang semakin besar memiliki sedikit energi dibandingkan dengan butiran kecil karena batas butir yang semakin berkurang. Sesuai dengan persamaan Hall-Patch Persamaan (2-11) bahwa meningkatnya nilai diameter butir akan mengakibatkan penurunan nilai tegangan luluh, penurunan nilai tegangan luluh akan mengakibatkan semakin kurang kemampuan suatu material dalam menahan gaya sebelum plastis.

5.2 Saran

1. Mesin yang digunakan untuk proses *hot roll bonding* harus memiliki daya pengerollan yang cukup supaya dua material yang diroll dapat bergabung.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang variasi suhu pemanasan pada material berbeda supaya dapat diketahui suhu yang baik untuk mendapatkan kekuatan tarik yang tinggi pada proses *hot roll bonding*.

DAFTAR PUSTAKA

- ASM International. 1993. *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International.
- ASM International. 1993. *ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering*. ASM International.
- ASM International. 2002. *ASM Atlas of Stress-Stress Curves*. ASM Internatioal.
- Avner, S.H. 1974. *Introduction To Physical Metallurgy*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Callister, Jr, William D. Rethwisch, David G. 2010. *Material and Science Engineering 8th Edition*. Amerika: John Wiley & Sons, Inc.
- Chen, L. Yang, Z. Jha, B. Xia, B. Stevenson, J. W. 2005. *Clad Metals, Roll Bonding and Their Application for SOFC Interconnect*. *Journal of Power Sources* 152 (2005) 40–45
- Dieter, George E. 1986. *Mechanical Metallurgy SI Metric Edition*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Eizadjou, M. Manesh, H. Danesh. Janghorban, K. 2009. *Mechanism of warm and cold roll bonding of aluminum alloy strips*. *Material and Design* 30 (2009) 4156-4161.
- Febriyanti, Eka. Suhadi, Amin. Priadi, Dedi. Riastuti, Rini. 2016. *Pengaruh Peningkatan % Reduksi Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Paduan Kuningan Cu-Zn 70/30 Setelah Proses Warm Rolling Pada Suhu 400°C*. *Majalah Pengkajian Industri* Vol.10, No 3, Desember 2016, (163 - 172).
- Ismoyo, Parikin. Bandriyana, B. 2010. *Pengaruh Proses Rol Pada Kekuatan Tarik Plat Paduan ZrNbMoGe*. *Prosiding PPI – PDIPTN 2010*. Yogyakarta: BATAN.
- Irawan, Yudy Surya., Hagiwara, Yosihiko., Ohya, shin-ichi. 2006. *Effects of Rolling Ratios, Microstructures and Crystal Orientations on Peculiar Fatigue Crack Growth Paths in Anisotropic Cold-Rolled Pure Aluminum Sheets*. Vol 55 Hal 402-408. Jepang: *Journal of the Society of Material Science, Japan*.
- Kalpakjian, S. Schmid, Steven R. 2009. *Manufacturing Engineering and Technology Sixth Edition SI Units*. New Jersey: Prentice Hall.
- Leonard, J. 2011. *Analisis Retakan Material Komposit Metal Cladding Baja Karbon Dan Tembaga*. *Prosiding Hasil Penelitian Fakultas Teknik*. Makassar: Grup Teknik Mesin.
- Liu, J. Li, M. Simon Sheu, M. E. Karabin. R. W. Schultz. 2007. *Macro- and Micro- Surface Engineering To Improve Hot Roll Bonding Of Alumunium Plate And Sheet*. *Materials Science and Engineering A* 479 (2008) 45–57.
- Smith, William F. 1993. *Foundation of Material Science and Engineering, Second Edition*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Su, Lihong. Lu, Cheng. Deng, Guanyu. Tieu, A K. Sun, Xudong. 2013. *Microstructure and Mechanical Properties of 1050/6061 Laminated Composite Processed by Acumulative Roll Bonding*. *Reviews on Advanced Materials Science*, 33 (1), 33-37.

Toroghinejad, Mohammad Reza. Ashrafizadeh, Fakhreddin. Jamaati, Roohollah. 2012. *On the Use of Accumulative Roll Bonding Process To Develop Nanostructured Aluminum Alloy 5083*. Materials Science & Engineering A 561 (2013) 145–151.

Zacharias, P. Al Hasa, M. H. Hersubeno, J. Sardjono. 1996. *Pengaruh Kecepatan Perolan Terhadap Kekuatan Ikatan Metalurgik Antarmuka Pelat AlMg-2*. Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bahan Nuklir. Jakarta: PEBN-BATAN.

