

**PENGARUH KECEPATAN PUTARAN *ROLLER* TERHADAP
POROSITAS DAN KEKUATAN TARIK PADA HASIL *ROLL*
BONDING PLAT A1100 DENGAN PLAT A6061**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**JHORDAN RIZAL PAHLEVI
NIM. 135060201111040**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**

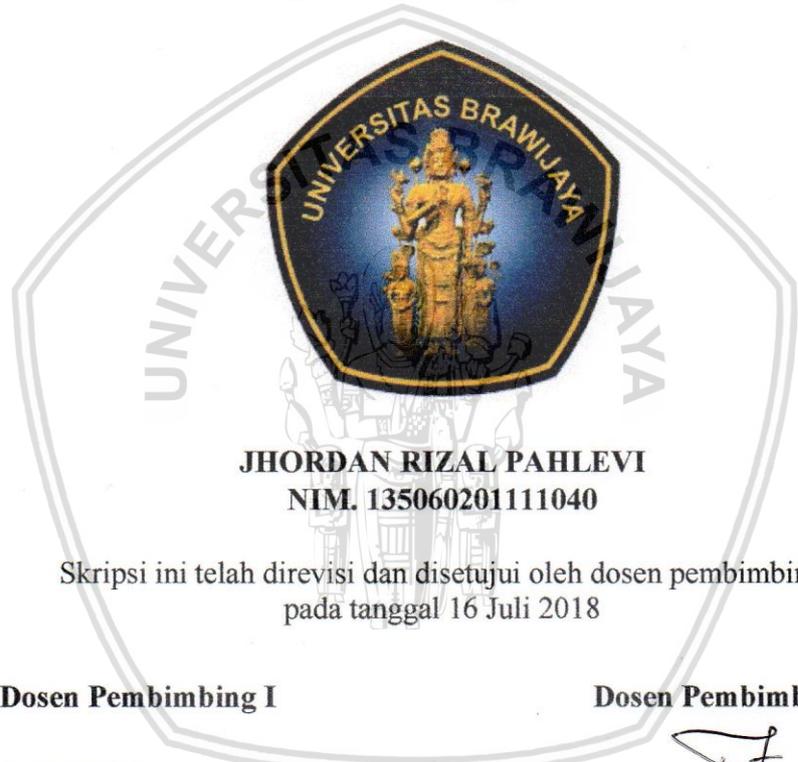
LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH KECEPATAN PUTARAN *ROLLER* TERHADAP
POROSITAS DAN KEKUATAN TARIK PADA HASIL *ROLL BONDING* PLAT A1100 DENGAN PLAT A6061**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



JHORDAN RIZAL PAHLEVI
NIM. 135060201111040

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 16 Juli 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met.
NIP. 19551117 198601 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 sepengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak pernah 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, Mei 2018

Mahasiswa,



Jhordan Rizal Pahlevi

NIM. 135060201111040

JUDUL SKRIPSI:

Pengaruh Kecepatan Putaran *Roller* Terhadap Porositas dan Kekuatan Tarik Pada Hasil *Roll Bonding* Plat A1100 Dengan Plat A6061.

Nama Mahasiswa : Jhordan Rizal Pahlevi
NIM : 135060201111040
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Produksi

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.
Pembimbing II : Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.
Dosen Penguji 2 : Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE.
Dosen Penguji 3 : Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.

Tanggal SK : 31 Mei 2018
SK Penguji : 1173/UN10.F07/SK/2018

PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, berkah dan hidayahnya-Nya sehingga penulis dapat menyusun skripsi dengan judul **“Pengaruh Kecepatan Putaran *Roller* Terhadap Porositas dan Kekuatan Tarik Pada Hasil *Roll Bonding* Plat A1100 dengan Plat A6061”**, yang diajukan untuk memenuhi sebagai persyaratan akademik dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Djarot B. Darmadi, Ir., MT., selaku ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
2. Bapak Teguh Dwi Widodo ST., M.Eng., Phd., selaku sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku ketua prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
4. Bapak Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing I dan telah banyak memberikan arahan, masukan, saran serta bimbingan selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met. selaku dosen pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan, masukan dan saran yang sangat membantu dalam proses penyusunan skripsi ini.
6. Kedua orang tua tercinta, yaitu Bapak Purjito Ipoeng dan Ibu Sriyati yang tanpa henti memberi support baik moral maupun materi dan kasih sayang kepada penulis sehingga penelitian ini berjalan lancar.
7. Mutiara Istiqomah, S.Pd. yang memberi support dan motivasi tanpa henti agar penulis tetap semangat dalam penyusunan skripsi ini.
8. Partner penelitian dan sahabat dalam bertukar pikiran, Zulfa dan Dinung yang selalu menjalin komunikasi yang baik sehingga penulis bisa menyusun tulisan ini.
9. Pak Rofiq, Pak Hastomo, Pak Doni serta teman – teman Laboratorium Pengecoran Logam yang sudah membantu dan memotivasi penulis selama kegiatan penelitian.
10. Teman – Teman Mesin 2013 yang sudah bersama – sama berjuang dan memberikan semangat serta motivasi kepada penulis.

11. Keluarga Besar Mahasiswa Mesin yang sudah membimbing dan membentuk pola berfikir dan bersikap selama penulis menimba ilmu di Teknik Mesin.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna baik dari isi maupun format penulisan. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak agar kedepannya menjadi lebih baik. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, memunculkan ide baru dan dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

Malang, Mei 2018

Penulis



DAFTAR ISI

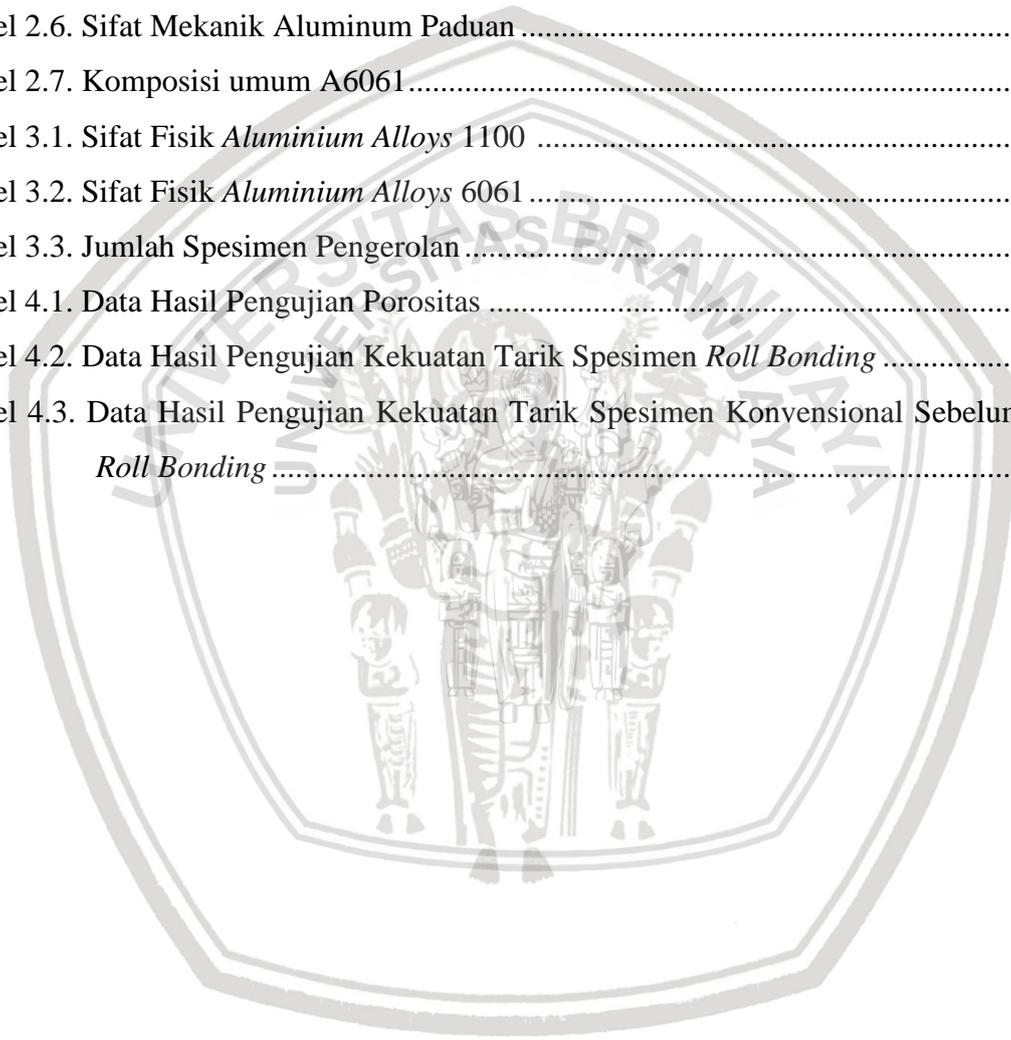
	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
SUMMARY	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penelitian Sebelumnya	5
2.2. Aluminium	7
2.2.1. Definisi Aluminium.....	7
2.2.2. Aluminium dan Paduannya	8
2.2.3. Aluminium A1100	9
2.2.4. Aluminium A6061	10
2.3. <i>Metal Cladding</i>	11
2.3.1. <i>Roll Bonding</i>	12
2.3.2. Mekanisme <i>Bonding</i>	14
2.3.3. Gaya Gaya Pengerolan	14
2.4. Porositas	18
2.4.1. Inspeksi Porositas	19
2.5. Pengujian Kekuatan Tarik	20
2.5.1. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Tarik	22
2.6. Hipotesis	23
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1. Metode Penelitian	25
3.2. Tempat dan Waktu Penelitian.....	25
3.3. Variabel Penelitian	25
3.4. Alat dan Bahan	26
3.4.1. Alat	26
3.4.2. Bahan	32

3.4.3. Dimensi Spesimen	33
3.5. Skema Penelitian	35
3.6. Prosedur Penelitian	36
3.6.1. Prosedur Pengujian Porositas	36
3.6.2. Prosedur Pengujian Mikrostruktur	36
3.7. Diagram Alir Penelitian.....	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1. Data Hasil Pengujian	39
4.1.1 Porositas	39
4.2.2 Kekuatan Tarik	39
4.2. Pembahasan	40
4.2.1. Porositas	40
4.2.2. Kekuatan Tarik	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	51
5.1. Kesimpulan	51
5.2. Saran	51
 DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Sistem Penamaan Paduan Aluminium Tempa	8
Tabel 2.2.	Sifat Fisik <i>Aluminium Alloys</i> 1100	10
Tabel 2.3.	Sifat Mekanik Aluminium Murni	10
Tabel 2.4.	Komposisi umum A1100.....	10
Tabel 2.5.	Sifat Fisik <i>Aluminium Alloys</i> 6061	11
Tabel 2.6.	Sifat Mekanik Aluminium Paduan	11
Tabel 2.7.	Komposisi umum A6061.....	11
Tabel 3.1.	Sifat Fisik <i>Aluminium Alloys</i> 1100	32
Tabel 3.2.	Sifat Fisik <i>Aluminium Alloys</i> 6061	33
Tabel 3.3.	Jumlah Spesimen Pengerolan	33
Tabel 4.1.	Data Hasil Pengujian Porositas	39
Tabel 4.2.	Data Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Spesimen <i>Roll Bonding</i>	40
Tabel 4.3.	Data Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Spesimen Konvensional Sebelum Proses <i>Roll Bonding</i>	40



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Proses <i>roll bonding</i>	13
Gambar 2.2.	Mekanisme <i>bonding</i>	14
Gambar 2.3.	Gaya-gaya pengerolan	15
Gambar 2.4.	Distribusi tekanan rol sepanjang busur kontak	17
Gambar 2.5.	Skema pengujian piknometri	20
Gambar 2.6.	Kurva tegangan-regangan	22
Gambar 3.1.	Mesin <i>roll bonding</i>	26
Gambar 3.2.	Penggaris	26
Gambar 3.3.	Spidol.....	27
Gambar 3.4.	Mesin pemotong plat.....	27
Gambar 3.5.	<i>Sandpaper</i>	27
Gambar 3.6.	Sikat kawat.....	28
Gambar 3.7.	Aceton.....	28
Gambar 3.8.	<i>Surface Roughness Tester</i>	28
Gambar 3.9.	Kawat.....	29
Gambar 3.10.	Dapur Listrik.....	29
Gambar 3.11.	Alat uji piknometri.....	30
Gambar 3.12.	<i>Universal testing machine</i>	30
Gambar 3.13.	Jangka sorong digital	31
Gambar 3.14.	<i>Centrifugal sand paper machine</i>	31
Gambar 3.15.	Mikroskop logam.....	32
Gambar 3.13.	<i>Dino Lite Digital Microscope</i>	32
Gambar 3.14.	Dimensi Plat Proses <i>Roll Bonding</i>	33
Gambar 3.15.	Spesimen Uji Tarik	34
Gambar 3.16.	Skema Penelitian	35
Gambar 4.1.	Grafik Hubungan Antara Kecepatan <i>Roller</i> Terhadap Nilai Porositas Hasil <i>Roll Bonding</i> A1100 dengan A6061 pada setiap variasi kecepatan.....	41
Gambar 4.2.	Grafik Gaya Pengerolan yang Terjadi Pada Tiap Variasi Kecepatan	42
Gambar 4.3.	Foto Mikrostruktur (a) Spesimen 10 RPM, (b) Spesimen 15 RPM, (c) Spesimen 20 RPM.....	43

Gambar 4.4. Grafik Hubungan antara Variasi Kecepatan *Roller* terhadap Kekuatan Tarik pada Hasil *Roll Bonding* A1100 dengan A6061 44

Gambar 4.5. Grafik Perbandingan Kekuatan Tarik Rata-Rata antar Spesimen Alumunium Konvensional dengan Spesimen *Roll Bonding* 45

Gambar 4.6. Grafik Tegangan Regangan Spesimen Kekuatan Tarik Setiap Variasi Kecepatan 46

Gambar 4.7 Foto Makro Patahan (a) Spesimen 10 RPM, (b) Spesimen 15 RPM, (c) Spesimen 20 RPM 47

Gambar 4.8 Foto Mikrostruktur Pada Tiap Variasi Kecepatan (a) Spesimen 10 rpm, (b) Spesimen 15 rpm, (c) Spesimen 20 rpm 47



DAFTAR LAMPIRAN

No. **Judul**

Lampiran 1 : Surat Keterangan Pengujian Kekuatan Tarik

Lampiran 2 : Surat Keterangan Penelitian Laboratorium Uji Logam Universitas Merdeka
Malang

Lampiran 3 : Perhitungan Beban Pengerolan dan Gaya pengerolan

Lampiran 4 : Desain Alat

Lampiran 5 : Hasil Uji Komposisi Material Alumunium

Lampiran 6 : Densitas Air

Lampiran 7 : Dokumentasi Penelitian

Lampiran 8 : Perhitungan Mikrostruktur



RINGKASAN

Jhordan Rizal Pahlevi, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2018, Pengaruh Kecepatan Putaran *Roller* Terhadap Porositas dan Kekuatan Tarik Pada Hasil *Roll Bonding* Plat A1100 dengan Plat A6061, Dosen pembimbing: Yudy Surya Irawan, Wahyono Suprpto.

Dalam menghadapi keterbatasan persediaan dari sumber daya untuk logam di masa yang akan datang, lahirlah inovasi cara-cara untuk meningkatkan kualitas dari logam salah satunya yaitu meningkatkan kekuatan logam dengan metode deformasi plastis menyeluruh. Salah satunya adalah proses *cladding* yang mana merupakan sebuah proses untuk pelapisan satu buah logam dengan logam lainnya untuk mendapatkan sifat yang lebih unggul ataupun memadukan antara dua sifat dari logam yang dipadukan tersebut. Salah satu metode *cladding* adalah *roll bonding* yang mana dilakukan pada Aluminium untuk mendapatkan kualitas yang lebih baik.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan pengerolan (putaran *roller*) terhadap porositas dan kekuatan tarik pada hasil *roll bonding* plat A1100 dengan plat A6061. Penelitian ini sendiri dilakukan menggunakan mesin *roll* buatan sendiri dengan daya motor sebesar 4 HP. Spesifikasi mesin *roll* yang digunakan adalah menggunakan jari-jari *roller* sebesar 6 cm, *rolling ratio* sebesar 50% serta daya dari motor ke *roller* sendiri telah direduksi sebesar 20x dengan menggunakan inverter listrik serta gear. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah kecepatan putaran *roller* sebesar 10 rpm, 15 rpm dan 20 rpm.

Dari analisa yang telah dilakukan, didapat nilai porositas rata-rata tertinggi dihasilkan pada kecepatan putaran *roller* 20 rpm sebesar 0,19 % dan porositas rata-rata terendah pada kecepatan putaran *roller* 10 rpm sebesar 0,03 %. Untuk kekuatan tarik, nilai kekuatan tarik rata-rata tertinggi terjadi pada kecepatan putaran *roller* 10 rpm sebesar 135,73 MPa dan nilai kekuatan tarik rata-rata terendah pada kecepatan putaran *roller* 20 rpm sebesar 122,32 MPa.

Kata kunci: *Roll Bonding*, Aluminium, Kecepatan Putaran *Roller*, Porositas, Kekuatan Tarik.

SUMMARY

Jhordan Rizal Pahlevi, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, in May 2018, *Effect on Roller Speed towards Porosity and Tensile Strength on Roll Bonding Products of A1100 Aluminium Sheet with A6061 Aluminium Sheet*, the advisors : Yudy Surya Irawan, Wahyono Suprpto.

In the face of limited supply of resources for metals in the future, innovations are born ways to improve the quality of metal one of them is to increase the strength of metals by the method of comprehensive plastic deformation. One is the cladding process which is a process for bonding one metal with other metals to obtain superior properties or combine between two properties of the combined metal. One of the cladding method is roll bonding which is done on Aluminum to get better quality.

This research was conducted with the aim to know the effect of rolling speed (rotation of roller) to the porosity and tensile strength on the result of A1100 plate bonding with A6061 plate. The research itself was conducted using a homemade roll engine with a motor power of 4 HP. Rolling machine specifications that used was roller radius of 6 cm, rolling ratio of 50% and power from the motor to the roller itself has been reduced by 20x by using electric inverters and gear. Variations used in this research is roller rotation speed of 10 rpm, 15 rpm and 20 rpm.

From the analysis that has been done, it was obtained that the highest mean porosity value generated at the specimen with 20 rpm roller speed for 0.19% and the lowest mean porosity at the specimen with 10 rpm roller speed for 0.03%. For tensile strength, the highest mean tensile strength value occurs at a 10 rpm roller speed of 135.73 MPa and the lowest average tensile strength value at roller speed of 20 rpm is 122.32 MPa.

Keywords: Roll Bonding, Aluminium, Roller Speed, Porosity, Tensile Strength.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam menghadapi keterbatasan persediaan dari sumber daya untuk logam di masa yang akan datang, lahirlah inovasi cara-cara untuk meningkatkan kualitas dari logam salah satunya yaitu meningkatkan kekuatan logam dengan metode deformasi plastis menyeluruh. Deformasi plastis menyeluruh adalah satu dari teknik yang efektif untuk memperbaiki sifat-sifat mekanis dan penyesuaian karakteristik paduan logam konvensional (Tsuji, 2008).

Salah satunya adalah proses *cladding* yang mana merupakan sebuah proses untuk pelapisan satu buah logam dengan logam lainnya untuk mendapatkan sifat yang lebih unggul ataupun memadukan antara dua sifat dari logam yang dipadukan tersebut. *Cladding* umumnya diterapkan pada tahap pabrik oleh produsen lembaran, piring atau tabung. *Cladding* dengan cara menekan, *rolling* atau ekstrusi dapat menghasilkan lapisan dimana ketebalan dan distribusinya dapat dikendalikan pada rentang yang lebar dan lapisan yang dihasilkan bebas dari porositas. Meskipun hampir tidak ada batasan praktis untuk ketebalan pelapis yang dapat diproduksi dengan *cladding*, penerapan proses ini terbatas pada artikel berbentuk sederhana yang tidak memerlukan banyak deformasi mekanik selanjutnya.

Salah satu metode *cladding* adalah *roll bonding* yang mana merupakan suatu proses produksi dimana memanfaatkan energi tekan yang berasal dari dua buah *roll* atau lebih untuk penggabungan dua buah atau lebih lapisan logam yang berbeda. Tahapan lebih kompleks dari *roll bonding* sendiri biasa disebut *Accumulative Roll Bonding*. Penelitian-penelitian telah dilakukan melalui metode *Accumulative Roll Bonding* yang mana merupakan proses penggabungan setumpukan lempengan logam yang dilakukan dengan melakukan penggulungan dengan *roller* secara berkali-kali dengan rasio penurunan berat, dibagi menjadi dua bagian, menumpuk lagi dan dilakukan pengerollan.

Salah satu material yang dapat digunakan untuk mendapatkan kualitas lebih baiknya dengan melalui proses *roll bonding* adalah Aluminium. Aluminium adalah merupakan suatu material yang memiliki sifat tahan karat dan juga tahan lama yang mana sering sekali kita temui dalam kehidupan sehari-hari. Sebagai contoh lempengan atau plat Aluminium sendiri banyak digunakan untuk proses-proses produksi yang ada sekarang ini dikarenakan

memiliki biaya yang relatif lebih redah ketika dibandingkan dengan material lainnya seperti lempengan *Stainless Steel*. Lempengan atau plat Aluminium sendiri didukung oleh sifat-sifat lainnya seperti tahan terhadap karat, tahan terhadap segala macam cuaca, tahan terhadap temperatur tinggi serta memiliki nilai estetika yang baik sehingga tidak heran bahwa banyak perusahaan yang bergerak di bidang Industri memakai bahan lempengan atau plat Aluminium sebagai bahan baku produk mereka.

Penelitian mengenai *roll bonding* atau *Accumulative Roll Bonding* dilakukan oleh Alil et al. (2014) melakukan penelitian tentang pengaruh dari proses *Accumulative Roll-Bonding* pada sifat sifat AA5083 yang merupakan lempengan logam Al-Mg. Akroma (2011) melakukan penelitian mengenai Aluminium komersil untuk bahan konstruksi atap dengan metode yang sama dan dengan tujuan untuk meningkatkan sifat mekanisnya dengan pengujian kekerasan, pengujian kekuatan tarik serta pengujian mikrostruktur. Zacharias et al. (1996) meneliti tentang pengaruh kecepatan perolan terhadap kekuatan ikatan metalurgik antarmuka pelat AlMg-2. Imansyah et al. (2015) meneliti tentang sintesa awal pada komposit aluminium dengan menggunakan metode *Cross Section Accumulative Roll-Bonding* yang akan diterapkan pada peralatan militer. Irawan et al. (2006) melakukan penelitian tentang pengaruh rasio *rolling*, mikrostruktur dan orientasi kristal pada jalan pertumbuhan *crack* yang diakibatkan oleh *fatigue* pada *Cold-Rolled* plat aluminium murni anisotropik.

Dengan adanya hal-hal yang telah dijabarkan diatas, maka diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui seberapa baiknya metode *roll bonding* sendiri untuk diterapkan dalam perbaikan sifat mekanis suatu material. Oleh karena itu, dalam penelitian kali ini akan meneliti mengenai porositas dan kekuatan tarik yang terjadi pada penggabungan dua buah lempengan logam yang mana kali ini material yang digunakan adalah dua buah lempengan Aluminium A1100 dengan Aluminium A6061 untuk penambahan kekuatan dari karakter masing masing material tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan dari latar belakang masalah di atas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Berapa besar porositas yang terjadi pada hasil penggabungan logam melalui proses *roll bonding*?
2. Bagaimana hasil pengujian kekuatan tarik pengaruh kecepatan putaran *roller* pada dua buah lempengan logam pada proses *roll bonding*?

1.3 Batasan Masalah

1. Pembahasan pada besar porositas yang terjadi pada produk hasil proses *roll bonding*.
2. Pembahasan pada mekanisme penguatan material dengan metode *rolling* dalam peningkatan kekuatan tarik, pengurangan keuletan material serta peningkatan kekerasan material.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui berapa besar porositas yang terjadi pada hasil penggabungan dua buah lempengan logam setelah melalui proses *roll bonding*.
2. Mendapatkan hasil nilai kekuatan tarik dari hasil penggabungan dua buah lempengan logam setelah melalui proses *roll bonding*.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Memberikan suatu metode untuk peningkatan sifat mekanis dari suatu material agar dapat menghasilkan material yang memiliki kualitas lebih baik.
2. Dapat merancang serta mengoperasikan mesin *roll bonding* dengan baik.
3. Memberikan hasil analisis serta solusi dari cacat yang terjadi pada material setelah proses *roll bonding*.
4. Menjadi acuan untuk penelitian selanjutnya mengenai *roll bonding*.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Alil et al. (2014) melakukan penelitian tentang pengaruh dari proses *Accumulative Roll-Bonding* pada sifat sifat AA5083 yang merupakan lempengan logam Al-Mg. Proses ARB dilakukan pada suhu ruang dengan menggunakan rol berdiameter 206 mm pada kecepatan *rolling perifer* 70 rpm dengan metode *Cold Roll-Bonding* dan di berikan perlakuan *annealing* setelah material selesai dilakukan proses ARB. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil yaitu *Yield Strength* meningkat dengan cepat setelah siklus ARB 1 dan 2, dan nilainya setelah siklus ARB 3 dan 4 Hampir 3 kali lebih besar (370 MPa) dibandingkan bahan awal (130 MPa), sebelum deformasi ARB. Nilai *Ultimate Tensile Strength* meningkat pada tingkat yang lebih rendah dengan meningkatkan jumlah siklus ARB dengan peningkatan dari 275 MPa, pada keadaan awal, menjadi 385 MPa setelah 3 Dan 4 siklus ARB. Pemanjangan seragam terjadi sekitar 7,5% setelah 1 siklus ARB, dan menurun hingga 2,5% setelahnya 2 siklus ARB. Dengan deformasi ARB lebih lanjut dari 2 sampai 5 siklus ARB, hampir tetap bertahan tidak berubah.

Akroma (2011) melakukan penelitian dengan menggunakan material aluminium komersil untuk bahan konstruksi atap dengan menggunakan metode *Accumulative Roll-Bonding*. Penelitian dilakukan menggunakan mesin *roll manual* dan bahan yang berupa lempengan logam aluminium yang dapat ditemukan di pasaran dengan spesifikasi ukuran lebar 4 cm dan kemudian melakukan proses ARB yang dilakukan pada suhu 500°C dengan menggunakan variasi layer spesimen yaitu 2 layer, 4 layer serta 8 layer untuk mendapatkan hasil deformasi sebesar 50%. Setelah proses ARB selesai, ukuran dari spesimen kemudian disesuaikan dengan pengujian yang akan dilakukan yang mana untuk pengujian tarik, kekerasan dan struktur mikro. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil yaitu kekuatan tarik pada aluminium komersil dapat ditingkatkan dengan menggunakan *Accumulative Roll-Bonding* (ARB). Kekuatan tarik sebelum diproses ARB adalah 111,147 MPa, setelah diproses ARB pada 8 layer meningkat menjadi 123,438 Mpa. Peningkatan kekuatan tarik yang terjadi sebesar 11,058 %. Diameter butiran akan semakin mengecil seiring dengan banyaknya siklus ARB yang dilakukan pada aluminium tersebut.

Zacharias et al. (1996) meneliti tentang pengaruh kecepatan perolan terhadap kekuatan ikatan metalurgik antarmuka pelat AlMg-2. Pada penelitian ini perolan pelat AlMg-2 dilakukan pada suhu 415 °C dan derajat deformasi sebesar 133% dengan kecepatan perolan 10,75; 11,75; 12,75; 13,75; 14,75 m/menit. Pelat hasil perolan dikenai uji geser, uji metalografi dan kekerasan masing-masing untuk mengetahui keiiatan ikatan metalurgik, mikrostruktur dan kekerasan daerah sambungan. Hasil penelitian pengaruh kecepatan perolan terhadap kekuatan ikatan metalurgik antarmuka pelat AlMg-2 dapat disimpulkan bahwa pada suhu pemanasan sampel 415°C dan derajat deformasi 133% kekuatan maksimum ikatan metalurgik (74,12 MPa) dicapai pada kecepatan perolan 13,75 m/menit. Untuk rentang kecepatan perolan lebih kecil dari 13,75 m/menit kualitas kekuatan ikatan metalurgik dipengaruhi oleh suhu, sedangkan untuk kecepatan perolan lebih besar dari 13,75 m/menit dipengaruhi oleh waktu difusi. Berdasarkan hasil ini dapat disimpulkan bahwa kecepatan optimum perolan untuk mendapatkan kekuatan maksimum ikatan metalurgik antarmuka pelat AlMg-2 adalah 13,75 m/menit.

Imansyah et al. (2015) meneliti tentang sintesa awal pada komposit aluminium dengan menggunakan metode *Cross Section Accumulative Roll-Bonding* yang akan diterapkan pada peralatan militer. Dalam penelitian tersebut membahas proses *Cross Section Accumulative Roll-Bonding* (C-ARB) untuk material komposit yang menggunakan lempengan logam yang terbuat dari bahan aluminium seri 1xxx sebagai matriks dan alumina (Al_2O_3) dalam bentuk *continous fiber*, *short fiber*, dan *particle* sebagai penguat (*reinforce*). Dari penelitian tersebut didapatkan hasil yaitu Alumina sebagai penguat berpengaruh pada karakteristik material yang mana dapat menutup bidang kontak dan meminimalisir rongga udara pada material saat proses pengerolan sehingga menyebabkan nilai densitas dan kekerasan material berbanding terbalik dengan nilai porositas. Semakin tinggi nilai porositas maka densitas dan kekuatan material semakin menurun. Nilai porositas aluminium hasil proses C-ARB berpenguat alumina *fiber* yang memiliki nilai porositas sebesar 0.059%, sampel hasil proses C-ARB berpenguat alumina serbuk memiliki nilai porositas yang tertinggi, sebesar 0.086% dan sampel hasil proses C-ARB berpenguat alumina serat memiliki nilai porositas yang terendah, sebesar 0.031%.

Irawan et al. (2006) melakukan penelitian tentang pengaruh rasio *rolling*, mikrostruktur dan orientasi kristal pada jalan pertumbuhan *crack* yang diakibatkan oleh *fatigue* pada *Cold-Rolled* plat aluminium murni anisotropik. Efek rasio *rolling*, struktur mikro dan orientasi kristal pada retakan kelelahan yang tumbuh pada arah *rolling* karena retak campuran tipe I + II pada lembaran aluminium murni diselidiki dengan melakukan uji kelelahan. Spesimen

CCT digunakan dan dibuat dari lembaran aluminium murni canai dingin dengan rasio putar 50%, 75%, dan 90%. Ditemukan bahwa retak-retak tersebut tumbuh ke arah bergulir saat mode campuran I + II retak pada spesimen dengan rasio *rolling* di atas 75%. Juga dipastikan bahwa mikrostruktur pada spesimen rasio *rolling* tinggi lebih kecil dan lebih memanjang ke arah *rolling* dibandingkan dengan rasio *rolling* yang lebih rendah. Namun, tidak ada pengaruh ukuran mikrostruktur pada jalur *fatigue cracks*. Bidang kristal pada permukaan retakan dan bidang slip aluminium, bidang di dalam lembaran diukur dengan difraksi sinar-X. Ditemukan bahwa bidang slip terutama ada pada permukaan retakan yang tumbuh pada arah *rolling*. Selain itu, ada tekstur yang kuat dari 111 bidang slip pada arah *rolling* spesimen dengan rasio *rolling* lebih tinggi dari 75%. Telah diklarifikasi bahwa retak kelelahan, yang tumbuh ke arah bergulir saat retakan mode retak I + II, disebabkan oleh tekstur kuat 111 pada arah *rolling* yang ada di daerah tegangan geser maksimum.

2.2 Aluminium

2.2.1 Definisi Aluminium

Aluminium termasuk unsur logam yang memiliki kuantitas besar yang terkandung di bumi. Aluminium terdapat pada permukaan bumi dalam bentuk senyawa kimia yang disebut bauksit yang merupakan bijih aluminium dengan komposisi yang terdiri atas tanah tawas, aluminium oksida, besi oksida dan asam silika. Aluminium merupakan logam yang paling banyak digunakan setelah *iron* selain karena jumlahnya yang melimpah di alam, aluminium memiliki beberapa keunggulan dibandingkan *iron*. Aluminium sendiri mempunyai beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan logam lain. Aluminium termasuk logam ringan yang mempunyai kekuatan tinggi, tahan korosi, dan merupakan konduktor listrik yang baik (Wirjosumarto, 2000:113). Karakteristik utamanya adalah ringan (berat jenis = $2,7 \text{ gr/cm}^3$) dibandingkan dengan *iron* (berat jenis = $7,8 \text{ gr/cm}^3$), serta memiliki nilai keuletan yang tinggi serta kemampuan permesinannya yang baik.

Telah terjadi sejarah panjang hingga Aluminium dikenal sebagai logam yang umum digunakan yang mana hingga pada tahun 1886, Charles Heroult dan Martin Hall mampu memperoleh aluminium dari aluminium oksida (alumina). Sejak saat itu aluminium mampu diproduksi massal dengan harga yang terjangkau untuk memenuhi berbagai kebutuhan manusia.

2.2.2 Aluminium dan Paduannya

Aluminium yang sering kita jumpai telah dibagi menjadi Aluminium murni serta Aluminium paduan. Aluminium murni sendiri adalah merupakan logam yang lunak, tahan lama, ringan, dan dapat ditempa dengan penampilan luar bervariasi antara keperakan hingga abu-abu, tergantung kekasaran permukaannya. Dikarenakan Aluminium memiliki berat sekitar satu pertiga baja, mudah ditebuk, diperlakukan dengan mesin, dicor, ditarik (*drawing*) dan diekstrusi, oleh karena itu Aluminium sekarang banyak diberikan bahan paduan untuk memperbaiki sifat dari bahan Aluminium yang akan digunakan untuk produksi.

Tabel 2.1
Sistem Penamaan Paduan Aluminium Tempa

<i>Primary Alloying Element</i>	<i>Series Number</i>	<i>Relative Corrosion Resistance</i>	<i>Relative Strength</i>	<i>Heat Treatment</i>
<i>Aluminium, 99 % dan lebih besar</i>	1xxx	<i>Excellent</i>	<i>Fair</i>	<i>Non-Heat-Treatable</i>
<i>Copper</i>	2xxx	<i>Fair</i>	<i>Excellent</i>	<i>Heat-Treatable</i>
<i>Manganese</i>	3xxx	<i>Good</i>	<i>Fair</i>	<i>Heat-Treatable</i>
<i>Silicon</i>	4xxx	-	-	<i>Varies by Alloy</i>
<i>Magnesium</i>	5xxx	<i>Good</i>	<i>Good</i>	<i>Non-Heat-Treatable</i>
<i>Magnesium dan Silicon</i>	6xxx	<i>Good</i>	<i>Good</i>	<i>Heat-Treatable</i>
<i>Zinc</i>	7xxx	<i>Fair</i>	<i>Excellent</i>	<i>Heat-Treatable</i>

Sumber: Kissel (2002:14)

Berikut ini merupakan beberapa macam paduan aluminium yang dihasilkan melalui tempa/pengerjaan:

1. Paduan Al-Cu

Pada paduan Aluminium seri 2000, biasanya dikenal dengan sebutan duraluminium atau super duraluminium. Kandungan Si yang terdapat lebih banyak pada A2014 dibandingkan A2017 membuat A2014 dapat ditingkatkan kekuatannya dengan memberikan metode perlakuan panas pendinginan cepat (*quenching*) kemudian dipanaskan lagi pada temperatur di bawah suhu rekristalisasi dan didinginkan dengan udara (*tempering*). Kandungan Cu dan Mg yang rendah pada A2117 membuat lebih

lunak sehingga digunakan untuk bahan *rivet*. Kandungan Ni yang ditambahkan pada A2018 dapat meningkatkan kekuatan tahan panasnya sehingga sering digunakan untuk komponen tahan panas dengan kisaran daerah panas penggunaannya antara 200°C hingga 250°C

2. Paduan Al-Mn

Paduan Al-Mn merupakan paduan Aluminium seri 3000. Penambahan Mn sekitar 1.2% pada A3003 meningkatkan kekuatan 10% dari pada aluminium murni dengan sifat tahan korosi dan sifat mampu mesin yang sama dengan aluminium murni. Paduan ini digunakan untuk peralatan dapur, panel.

3. Paduan Al-Mg

Paduan Al-Mg merupakan paduan Aluminium seri 5000. A5005 yang memiliki Mg yang rendah dapat digunakan untuk pembuatan aksesoris. Sedangkan paduan yang memiliki Mg antara 2% hingga 5% digunakan untuk material konstruksi seperti A5052, A5056, A5083. Penambahan Mn dan Cr untuk meningkatkan kekuatan terhadap korosi tegangan (*stress-corrosion*).

4. Paduan Al-Mg-Si

Paduan Al-Mg-Si merupakan paduan Aluminium seri 6000. Paduan ini memiliki sifat tahan korosi dan kekuatan yang tinggi. Contohnya yaitu A6061 yang digunakan untuk material konstruksi dan A6063 untuk bingkai arsitektur

5. Paduan Al-Zn-Mg

Paduan Al-Zn-Mg merupakan paduan aluminium seri 7000. Contohnya yaitu A7075 yang memiliki kekuatan tinggi sehingga banyak digunakan untuk material konstruksi pesawat terbang.

2.2.3 Aluminium A1100

Al didapat dalam keadaan cair dengan elektrolisa, umumnya mencapai kemurnian 99,85% berat. Dengan mengelektrolisa kembali dapat dicapai kemurnian 99,99, yaitu dicapai bahan dengan angka sembilannya empat.

Material yang akan digunakan pada penelitian kali ini adalah Aluminium A1100 yang cenderung merupakan Aluminium murni. Berikut adalah data mengenai sifat fisik, sifat mekanik dan komposisi kimia secara umum pada aluminium murni 1100.

Tabel 2.2
Sifat Fisik *Aluminum Alloys* 1100

<i>Aluminum Alloys</i>	<i>Density</i>		<i>Heat Capacity</i>		<i>Thermal Conductivity</i>	
	<i>g/cm³</i>	<i>lb/in³</i>	<i>j/kg K</i>	<i>calir/g.°C</i>	<i>W/m.K</i>	<i>calir/cm.s.°C</i>
1100	2,71	0,098	963	0,23	222	0,53

Sumber: ASM Handbook Vol. 06 (1993)

Tabel 2.3
Sifat Mekanik *Aluminum Murni*

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		> 99,0	
	Dianil	75% dirol dingin	Dianil	H18
Kekuatan tarik (kg/mm ²)	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekuatan mulur (0,2%) (kg/mm ²)	1,3	11,0	3,5	14,8
Perpanjangan (%)	48,8	5,5	35	5
Kekerasan Brinell	17	27	23	44

Sumber: Surdia (1999:142)

Tabel 2.4
Komposisi umum A1100

<i>Component</i>	<i>Wt. %</i>
Al	99,0 – 99,95
Cu	0,05 – 0,20
Fe	≤ 0,95
Mn	≤ 0,05
Si	≤ 0,95
Zn	≤ 0,1
Residuals	≤ 0,15

Sumber: Baumeister (1996:650-658)

2.2.4 Aluminium A6061

Pada penelitian ini, salah satu material aluminium yang digunakan adalah paduan Al-Mg-Si. Paduan dalam seri ini mempunyai kekuatan kurang sebagai bahan tempaan dibandingkan dengan paduan-paduan lainnya, tetapi sangat baik untuk mampu bentuk yang tinggi pada temperatur biasa. Mempunyai mampu bentuk yang baik pada ekstrusi dan tahan korosi, dan sebagai tambahan dapat diperkuat dengan perlakuan panas setelah pengerjaan.

(Surdia, 1999: 40). Berikut adalah data mengenai sifat fisik, sifat mekanik dan komposisi kimia secara umum pada aluminium paduan 6061.

Tabel 2.5
Sifat Fisik *Aluminum Alloys* 6061

<i>Aluminum Alloys</i>	<i>Density</i>		<i>Heat Capacity</i>		<i>Thermal Conductivity</i>	
	g/cm^3	lb/in^3	j/kg K	$\text{cal}_r/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$	W/m.K	$\text{cal}_r/\text{cm.s} \cdot ^\circ\text{C}$
6061	2,70	0,098	963	0,23	172	0,41

Sumber: ASM Handbook Vol. 06 (1993)

Tabel 2.6
Sifat Mekanik *Aluminum Paduan*

<i>Aluminum Paduan</i>	<i>Kekuatan Tarik</i>	<i>Kekuatan Mulur</i>	<i>Perpanjangan</i>	<i>Kekerasan</i>	<i>Batas Lelah</i>
	(Kgf/mm^2)	(Kgf/mm^2)	$(\%)$	<i>Brinell</i>	(Kgf/mm^2)
6061	31,6	28,0	15	95	9,5

Sumber: Surdia (1999:140)

Tabel 2.7
Komposisi umum *A6061*

Key Words: al6061, UNS A96061; ISO AlMg1SiCu; Aluminium 6061-T6, AD-33 (Russia); AA6061-T6; 6061T6, UNS A96061; ISO AlMg1SiCu; Aluminium 6061-T651, AD-33 (Russia); AA6061-T651

<i>Component</i>	<i>Wt. %</i>	<i>Component</i>	<i>Wt. %</i>	<i>Component</i>	<i>Wt. %</i>
Al	95.8 - 98.6	Mg	0.8 - 1.2	Si	0.4 - 0.8
Cr	0.04 - 0.35	Mn	Max 0.15	Ti	Max 0.15
Cu	0.15 - 0.4	Other, each	Max 0.05	Zn	Max 0.25
Fe	Max 0.7	Other, total	Max 0.15		

Sumber: *ASM Aero Space Metal Inc.*

2.3 *Metal Cladding*

Metal cladding adalah metode untuk melindungi satu logam (atau komposit) dengan membentuk lapisan logam kedua ke permukaannya dengan menggunakan teknik seperti difusi, deformasi dan laser.

Keuntungan dari *cladding* adalah proses dan materialnya dapat dipilih sesuai kebutuhan aplikasi dan kekuatan ikatan yang dibutuhkan. Metode laser dari *cladding* dapat digunakan untuk pelapis keramik dan lapisan logam. Pendinginan yang efektif dalam kasus semacam itu memastikan struktur mikro yang lebih baik, dan karenanya area yang lebih kecil terkena

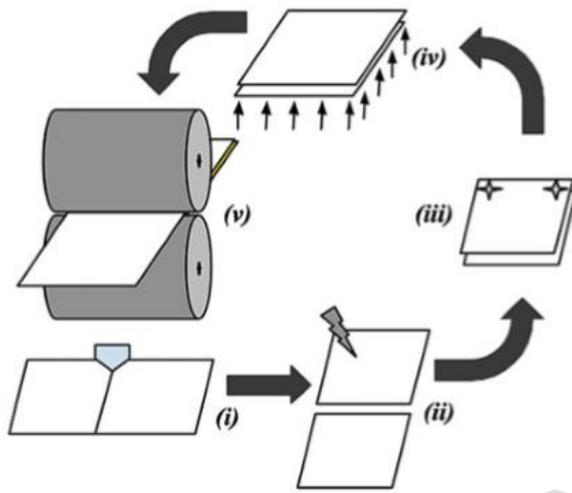
dampak termal. Dengan *metal cladding*, permukaannya bisa mengalami ketahanan aus yang cukup. Metode ini cocok untuk bentuk kompleks juga.

Kabel aluminium berpakaian tembaga banyak digunakan pada aplikasi listrik karena keuntungan biaya dan juga konduktivitas listrik yang lebih baik. *Metal cladding* juga digunakan pada permukaan luar bangunan serta bangunan untuk proteksi korosi dan abrasi. *Cladding* aluminium menguntungkan bangunan karena membersihkan sendiri. Jenis metal *cladding* yang paling awal digunakan pada bangunan disebut "*corrugated sheeting*" yang digunakan untuk atap dan dinding. Dalam beberapa kasus, *cladding* dipilih karena keunggulan estetikanya.

Koin *United States of America*, yang merupakan paduan perak padat sebelumnya, sekarang dibuat dengan *cladding* nikel pada substrat tembaga. Mereka memiliki sifat yang serupa dengan koin perak yang mereka ganti, terutama untuk mesin penjual otomatis yang dioperasikan dengan koin yang direkayasa untuk menolak peluru, namun dengan biaya yang jauh lebih rendah daripada koin perak. Logam permukaan diikat secara metalurgi ke bahan substrat.

2.3.1 Roll Bonding

Roll bonding adalah proses deformasi plastis yang dilakukan dengan memanfaatkan energi tekan dan tarik pada *roller* untuk proses penggabungan dua atau lebih lapisan logam. Melalui proses deformasi ini, pengelasan *solid-state* dilakukan untuk jenis logam yang sama. *Roll bonding* ditemukan oleh ilmuwan Jepang dari Universitas Osaka yang bernama Nobuhiro Tsuji pada tahun 1998. Adapun detail mengenai proses *Roll Bonding* bisa dilihat dari gambar 2.1.

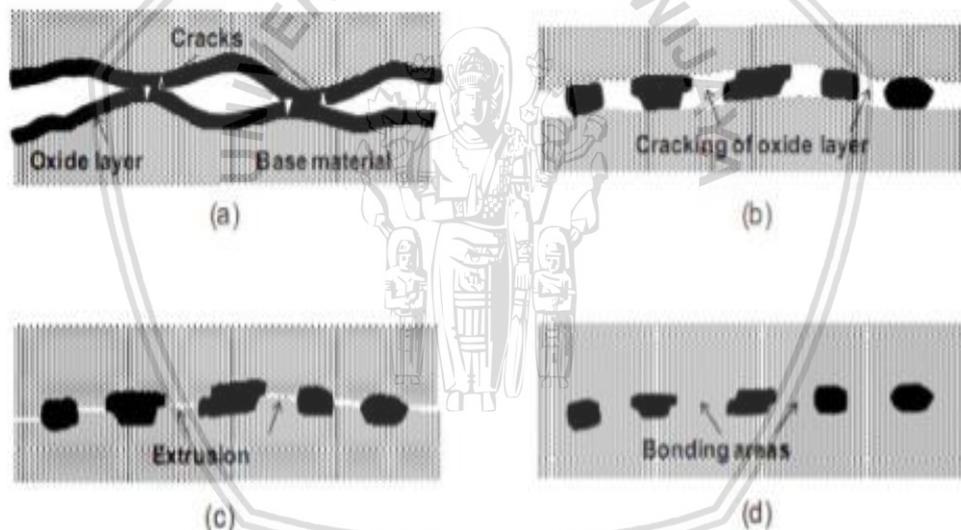


Gambar 2.1 Proses *roll bonding*
Sumber: Narayanan (2015)

Narayanan (2015) menyatakan bahwa *roll bonding* memiliki lima tahapan proses penting yaitu *dimensioning*, *surface preparation*, *riveting or clamping*, *preheating in furnace* dan *rolling*. *Dimensioning* adalah pemotongan lembaran logam dengan dimensi yang telah direncanakan, yaitu panjang kali lebar yang dimana ketebalan lembaran harus dispesifikasikan (pada saat pemilihan material). Namun, ketebalan akhir lembaran *roll bonding* harus dipilih sebelum memulai pengerolan. *Surface preparation* adalah tahap kedua dan merupakan bagian penting dari proses *roll bonding*, *surface preparation* bertujuan untuk menghilangkan lapisan kontaminan yang ada di permukaan material yang akan di *bonding*. Caranya adalah dengan menyikat permukaan dari material, mengamplas atau bisa juga dengan proses *knurling*. Pada langkah ketiga, *riveting* dilakukan hanya dengan melipat lembaran logam di kedua sisi yang akan digabungkan. Sedangkan *clamping* adalah dua plat tersebut di gabungkan dengan bantuan kawat atau pin sebelum di *roll*. Keempat dan langkah yang paling penting adalah *preheating* (hanya untuk proses kerja panas). *Preheating* adalah operasi pemanasan, yang dilakukan sebelum material di *roll* yang dibantu oleh dapur listrik. Proses ini hanya memberikan panas pada material agar mudah di bentuk tidak sampai meleleh atau lunak sekali. Dan yang terakhir adalah proses *rolling*. Dalam proses ini ada beberapa hal yang harus di perhatikan sebelum material di rol yaitu kecepatan putar rol, jarak antara rol, tebal material yang akan di rol dan tekanan yang harus di hasilkan selama proses *rolling*.

2.3.2 Mekanisme *Bonding*

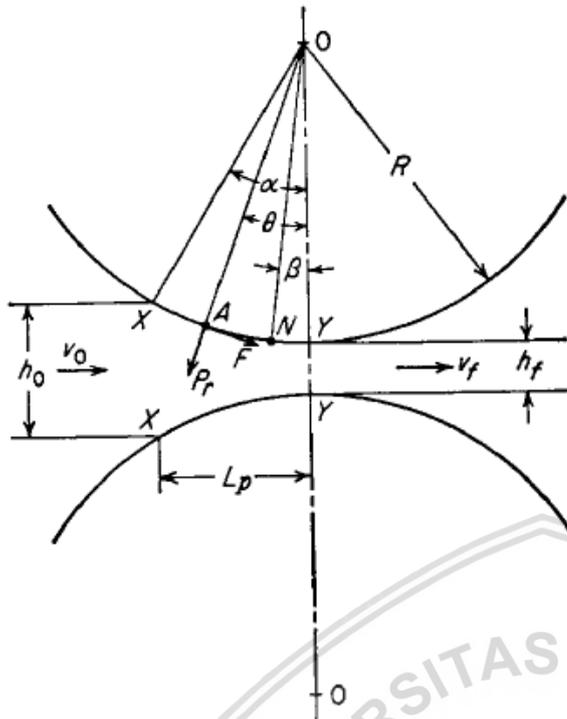
Ada beberapa faktor penting yang mempengaruhi mekanisme *roll bonding*. Faktor-faktor tersebut adalah *mechanical interlocking*, *capitavating of energy barrier*, ikatan antar permukaan dan rekristalisasi selama proses *annealing* dari plat *bonding*. Manesh dan Taheri (2004), mengungkapkan bahwa lapisan kontak terdiri dari lapisan yang keras dan lapisan yang relatif rapuh. Selama proses pengerolan, kedua permukaan plat yang berhadapan mengalami gesekan yang tinggi. Setelah itu, permukaan yang kasar mengalami luluhan dan membentuk pecahan-pecahan blok. *Mechanical interlocking* terjadi ketika logam induk melewati *pass roller*. Lapisan yang kasar dan mengeras membelah dan pada waktu yang bersamaan membentuk blok-blok koheren sepanjang permukaan lapisan. Logam dasar tersebar diantara blok-blok yang mengeras, lalu logam dasar melekat pada lapisan blok yang mengeras (Wright et al., 1978).



Gambar 2.2 Mekanisme *bonding*
Sumber: Lauvdal (2011)

2.3.3 Gaya Gaya Pengerolan

Pada proses pengerolan logam terdapat dua gaya yang bekerja, yaitu gaya radial (P_r) dan gaya tangensial (F). Arah gaya radial keluar bidang lingkaran pada roll sedangkan arah gaya tangensial tegak lurus terhadap gaya radial. Gaya-gaya yang terjadi pada proses pengerolan dapat dijelaskan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Gaya-gaya pengerolan
Sumber: Dieter (1988:594)

Keterangan:

h_0 : tebal awal spesimen (mm)

h_f : tebal akhir spesimen (mm)

P_r : gaya radial (N)

F : gaya gesek (N)

L_p : panjang proyeksi busur rol daerah kontak (mm)

v_0 : kecepatan awal spesimen (rpm)

v_f : kecepatan akhir spesimen (rpm)

R : jari-jari rol (mm)

α : sudut terjadinya kontak antara *roller* dengan spesimen ($^\circ$)

β : sudut antara titik netral dengan titik Y ($^\circ$)

θ : sudut antara titik pusat gaya dengan titik Y ($^\circ$)

N: *netral point* / titik Netral

X: titik awal kontak antara *roller* dengan spesimen

Y: titik akhir kontak antara *roller* dengan spesimen

O: titik pusat *roller* (radius)

Pada gambar 2.3 diatas memperlihatkan sejumlah hubungan antara geometri pengerolan dengan gaya-gaya yang terlibat pada deformasi logam. Suatu lembaran dengan ketebalan h_0 masuk melalui bidang masukan XX dengan kecepatan v_0 . Lembaran tersebut melalui celah rol dan meninggalkan ujung YY dengan ketebalan h_f . Anggaplah tidak terjadi pelebaran, jadi penekanan logam ke arah vertikal berubah menjadi perpanjangan pada arah pengerolan. Maka didapatkan persamaan:

$$bh_0 v_0 = b h_f v_f \dots \dots \dots (2-1)$$

dengan:

b : lebar lembaran (mm)

v_0 : kecepatan pada ketebalan h_0 (tebal awal) (rpm)

v_f : kecepatan pada ketebalan h_f (tebal setelah di *roll*) (rpm)

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 rol dan lembaran yang kecepatan permukaan rol v_f sama dengan kecepatan lembaran. Titik ini dinamakan *no-slip point*. Pada gambar 2.3 dinyatakan sebagai N.

Pada titik A gambar 2.3 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 dibidang permukaan rol dan terjadi gesekan pada arah yang ditunjukkan pada gambar 2.3 sehingga logam tertarik diantara rol. Pada daerah kanan titik N, gerak lembaran lebih cepat daripada permukaan rol sehingga arah gaya gesekan berbalik sehingga berfungsi sebagai hambatan arah gerak lembaran yang meninggalkan rol.

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

Besarnya gaya pengerolan dapat dihitung melalui persamaan:

$$P = p \cdot b \cdot L_p \dots \dots \dots (2-2)$$

dengan:

P = gaya pengerolan (N),

p = tekanan pengerolan rata-rata (MPa)

b = lebar pelat (mm)

L_p = panjang proyeksi busur rol daerah kontak (mm)



dengan:

$$L_p = \sqrt{R\Delta h} \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan: L_p = panjang proyeksi busur rol daerah kontak (mm),

R = jari jari rol (mm)

Δh = selisih tebal antara plat awal dan akhir (mm)

Gaya pengerolan total diasumsikan terkonsentrasi pada satu titik dengan jarak a dari sumbu rol dimana $a=\lambda.L_p$ dan $\lambda=0.5$ (*hot rolling*) atau 0.45 (*cold rolling*). Jika frekuensi putaran adalah n , maka daya pengerolan totalnya adalah:

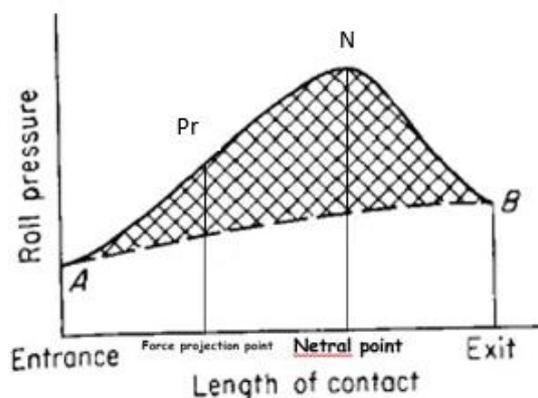
$$N = \frac{4.\pi.a.P.n}{60000} (kW) \dots\dots\dots (2-4)$$

dengan: a = setengah panjang proyeksi busur rol daerah kontak (mm),

P = gaya pengerolan (N)

n = kecepatan roller (rpm)

Distribusi tekanan rol di sepanjang busur kontak ditunjukkan pada gambar 2.4. Tekanan bertambah besar mencapai harga maksimum pada titik netral kemudian turun. Distribusi tekanan tidak berupa puncak yang tajam pada titik netral seperti yang dibutuhkan secara teoritis untuk suatu pengerolan, menyatakan bahwa titik netral tidak berupa garis pada permukaan rol namun berupa luas permukaan. Daerah yang diarsir pada gambar 2.4 adalah daerah yang menyatakan gaya yang dibutuhkan untuk mengatasi gesekan antara rol dan lembaran, sedangkan daerah dibawah garis putus-putus AB menyatakan gaya yang dibutuhkan untuk membentuk logam.



Gambar 2.4 Distribusi tekanan rol sepanjang busur kontak
Sumber: Dieter (1988:595)

Sudut α antara bidang masuk dan garis pusat pengerolan dinamakan sudut kontak atau sudut gigit (*angle of bite*). Gambar 2.4 menunjukkan bahwa komponen horizontal gaya normal adalah $P_r \sin \alpha$ dan komponen horizontal gaya gesekan adalah $F \cos \alpha$. Agar benda kerja dapat masuk pada celah rol maka gaya gesek yang mengarahkan ke celah rol harus lebih besar atau sama dengan gaya normal yang cenderung menjauhkan benda kerja dari celah rol. Syarat batas untuk memasukkan plat tanpa gaya luar adalah:

$$F \cos \alpha = P_r \sin \alpha \text{ (N)} \dots\dots\dots (2-5)$$

$$\frac{F}{P_r} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha \text{ (N)} \dots\dots\dots (2-6)$$

$$F = \mu P_r \text{ (N)} \dots\dots\dots (2-7)$$

$$\mu = \tan \alpha \text{ (N)} \dots\dots\dots (2-8)$$

Benda kerja tidak dapat dimasukkan ke celah rol, 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 rol bertambah besar. Untuk kondisi gesekan yang sama, rol berdiameter besar akan memungkinkan masuknya slab yang bertambah besar. Hal ini terjadi karena meskipun sudut antara pusat rol dengan bidang masuk akan sama dalam kedua kasus ($\tan x$) tetapi panjang busur kontak akan berbeda cukup besar.

Koefisien gesek antara *roller* dengan benda kerja harus lebih besar dari $\tan \alpha$ agar spesimen dapat di rol. Agar specimen dapat dirol maka:

$$F \cos \alpha \geq P_r \sin \alpha \text{ (N)} \dots\dots\dots (2-9)$$

$$\mu P_r \cos \alpha \geq P_r \sin \alpha \text{ (N)} \dots\dots\dots (2-10)$$

$$\mu \geq \tan \alpha \dots\dots\dots (2-11)$$

Umumnya nilai μ pada *cold rolling* berkisar antara 0.05-1 dan *hot rolling* >0.2.

2.4 Porositas

Porositas merupakan cacat berupa lubang-lubang (*voids*) halus atau pori-pori yang biasanya terbentuk akibat adanya gas yang tejabak pada saat proses produksi seperti halnya *roll bonding*. Porositas dalam sistem struktur dapat menimbulkan permasalahan baru, seperti *stress corrosion cracking* meningkat, *segregation* bertambah, *micro crack* permukaan meningkat, *fatigue resistance* dan *density* turun dan lain sebagainya. Porositas bergantung

pada jenis bahan, ukuran bahan, distribusi pori, sedimentasi, riwayat diagenetik, dan komposisinya.

2.4.1 Inspeksi Porositas

Uji porositas dengan uji piknometri dengan komposisi. Dalam pengujian komposisi ketidak teraturan diteliti demikian juga komponen struktur mikro dan sifat mekanik diperiksa dengan demikian juga komponen struktur mikro dan sifat-sifat mekanik diperiksa dengan demikian pemeriksaan porositas dapat dilakukan baik dengan perlakuan tekanan maupun dari foto mikrostruktur dari coran Untuk mencari presentase dari porositas yang terdapat dalam satu produk, digunakan perbandingan 2 buah densitas, yaitu:

- *Theoretical density*: Kepadatan dari suatu benda padat tanpa porositas yang terdapat di dalamnya, didefinisikan sebagai perbandingan terhadap volume sebenarnya (gr/cm^3).
- *Apparent density*: Berat setiap unit volume material termasuk cacat (*vold*) yang terdapat dalam material (gr/cm^3).

Pengukuran densitas menggunakan metode piknometri, yaitu sebuah proses membandingkan densitas relatif dari sebuah padatan dan sebuah cairan diketahui densitas dari padatan dapat dihitung.

Pengujian piknometri didasarkan pada perhitungan presentase porositas hasil *roll bonding* untuk dapat menghitung presentase porositas dapat dihitung dengan rumus:

$$P = (1 - \rho_s / \rho_{th}) \times 100\% \dots\dots\dots (2-12)$$

dengan:

P : Porositas (%)

ρ_s : *Apparent density* (gr/cm^3)

ρ_{th} : *Theoretical density* (gr/cm^3)

Untuk memperoleh nilai *theoretical density* dapat dicari dengan menggunakan persamaan yang ada pada standar ASTM E252.84, yaitu:

$$p_{th} = \frac{100}{\left\{ \frac{(\%Al)}{\rho_{Al}} + \frac{(\%Cu)}{\rho_{Cu}} + \frac{(\%Fe)}{\rho_{Fe}} + \frac{(\%etc)}{\rho_{etc}} \right\}} \dots\dots\dots (2-13)$$

dengan:

p_{th} : Theoretical density (gr/cm³)

$\rho_{Al} \rho_{Cu} \rho_{Fe} etc$: Densitas unsur (gr/cm³)

$\%_{Al} \%_{Cu} \%_{Fe} etc$: Presentase berat unsur

Sedangkan untuk perhitungan *apparent density*, menggunakan persamaan sesuai karakter struktur ASTM B3H-93 sebagai berikut.

$$\rho_s = \rho_w \left(\frac{W_s}{W_s(W_{sb} + W_b)} \right) \dots\dots\dots (2-14)$$

dengan:

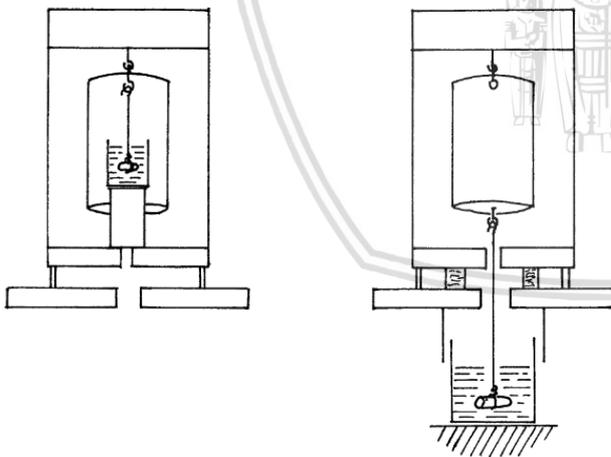
ρ_s : Apparent density (gr/cm³)

ρ_w : Density air (gr/cm³)

w_s : Berat sample udara (gr)

w_{sb} : Berat sample dan keranjang didalam air (gr)

w_b : Berat keranjang (gr)



Gambar 2.6 Skema pengujian pknometri
 Sumber: ASTM B311 – 93 (2002)

2.5 Pengujian Kekuatan Tarik

Uji tarik digunakan untuk memperoleh informasi dari kekuatan bahan dan sebagai uji spesifikasi bahan. Pada uji tarik spesimen dibebani gaya tarik searah sumbu secara kontinyu. Kekuatan tarik suatu bahan dapat diketahui melalui pengujian tarik, kekuatan suatu bahan ditetapkan dengan membagi gaya maksimum dengan luas penampang mula-mula. Tegangan

yang digunakan adalah tegangan rata-rata pada uji tarik yang diperoleh dari pembagian beban (P) dengan luasan spesimen (A_0), yang dapat dirumuskan:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \dots\dots\dots (2-15)$$

dengan:

σ = Tegangan tarik (N/mm^2)

P = Gaya tarik maksimum (N)

A_0 = Luas penampang mula-mula (mm^2)

Regangan yang digunakan adalah regangan rata-rata yang diperoleh dari perbandingan antara pertambahan panjang (ΔL) dengan panjang awal pengukuran (L_0) yang dapat dirumuskan:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta l}{l_0} \dots\dots\dots (2-16)$$

dengan:

\mathcal{E} = Regangan (%)

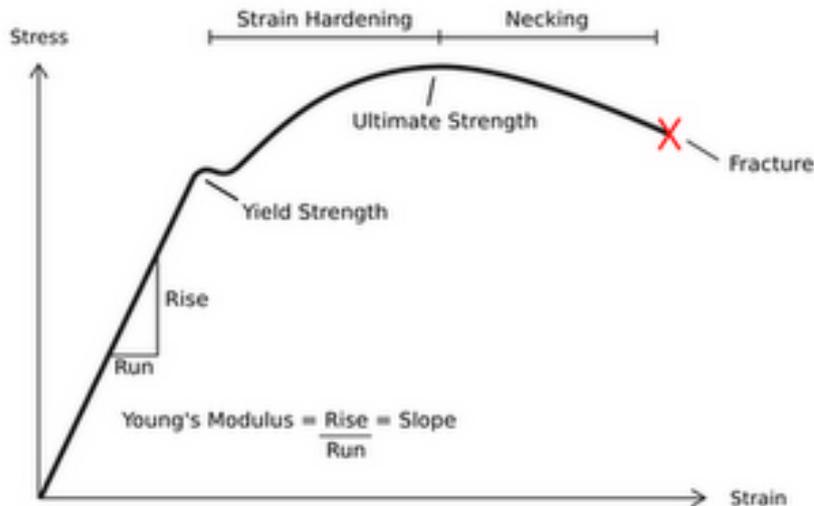
l_0 = Panjang awal (mm)

Δl = Pertambahan panjang (mm)

Pada prakteknya nilai hasil pengukuran tegangan pada suatu pengujian tarik dan tekan pada umumnya merupakan nilai teknik. Regangan akibat beban tarik yang terjadi, panjang akan menjadi berkurang dan diameter pada spesimen akan menjadi besar, maka ini akan terjadi deformasi plastis. Hubungan antara *stress* dan *strain* dirumuskan pada persamaan (2.17).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots (2-17)$$

Modulus Young (E) menjelaskan elastisitas tarik atau kecenderungan suatu benda untuk berubah bentuk sepanjang sumbu ketika *stress* berlawanan diaplikasikan sepanjang sumbu dan didefinisikan sebagai rasio tegangan tarik terhadap regangan tarik.



Gambar 2.7 Kurva tegangan-regangan
Sumber: Hawk Ridge Systems (2015)

2.5.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Tarik

1. Kadar karbon

Dengan meningkatnya kadar karbon dalam baja, maka akan didapat kekerasan dan kekuatan tarik yang meningkat. Untuk baja dengan kandungan karbon 1% maka akan memiliki sifat rapuh/getas.

2. Homogenitas

Homogenitas dari suatu material akan berpengaruh terhadap gaya ikat antar atom. Untuk material dengan tingkat homogenitas tinggi maka gaya ikat antara atomnya juga tinggi dan luas butirnya lebih besar sehingga kekuatan tariknya juga tinggi.

3. Bidang slip

Logam dan paduannya berdeformasi dengan pergeseran plastis, dimana atom didekatnya. Terjadi juga penguraian tegangan atau gaya tekan menjadi tegangan geser. Gerakan kepala silang mesin penguji memaksa benda uji berada di penjepit karena penjepit harus tetap sebaris, sebab benda uji tidak dapat berubah bentuk secara bebas. Semakin banyak bidang slip yang terjadi, maka material akan semakin mudah terdeformasi sehingga kekuatan tariknya menurun.

4. Unsur paduan

Penambahan unsur paduan pada baja akan mempengaruhi sifat pada baja tergantung sifat unsur paduan itu. Misal nikel, chromium dan mangan dapat meningkatkan kekuatan tarik baja karena bersifat mengeraskan baja.

5. *Heat treatment*

Proses ini akan mempengaruhi sifat mekanik logam, struktur mikro specimen dan juga bentuk butiran yang mempengaruhi gaya tarik antar atom. Dengan *Heat treatment* juga akan mempengaruhi kekuatan tariknya.

6. Ukuran butir

Butiran yang ukurannya kecil memiliki ikatan antar atom yang besar sehingga logam yang butiran strukturnya kecil kekerasannya akan tinggi, begitu pula dengan kekuatan tariknya.

7. Kecepatan pendinginan

Semakin cepat pendinginan yang dilakukan maka kekerasan akan meningkat begitu pula dengan kekuatan tariknya juga meningkat.

8. Dimensi bahan

Pada dimensi bahan yang kecil kecepatan pendinginannya lebih besar jadi kekerasan besar dan kekuatan tarik besar begitu pula sebaliknya.

2.6 Hipotesis

Semakin rendah kecepatan putaran *roller* yang digunakan untuk proses pengerolan dalam siklus yang sama, maka semakin merata gaya pembebanan yang diberikan kepada permukaan material serta untuk kecepatan putaran *roller* rendah mekanisme saling difusi atom di sekitar daerah antar muka plat semakin lama sehingga menyebabkan celah yang terjadi antara material tersebut semakin kecil dan kekuatan ikatan antar plat akan semakin meningkat. Hal tersebut menyebabkan nilai kekuatan tarik akan semakin besar dan nilai porositas akan semakin kecil dari plat aluminium hasil *roll bonding*.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Dalam penelitian kali ini, metode penelitian yang digunakan merupakan *True Experimental Research* atau penelitian eksperimental nyata. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai porositas dan kekuatan tarik yang terjadi pada hasil eksperimen *roll bonding* pengaruh dari variasi kecepatan putaran *roller* (rpm) dengan menggunakan material Aluminium A1100 dan Aluminium A6061.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

- Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya selama bulan April 2017 – selesai.
- Politeknik Negeri Malang selama bulan Juli 2017 – selesai.
- Laboratorium Sentral Mesin Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan September 2017.
- Laboratorium Pengujian Bahan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan Oktober 2017.
- Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan Oktober 2017.
- Laboratorium Material Program Studi Perawatan dan Perbaikan Mesin Politeknik Kediri pada bulan Oktober 2017.
- Laboratorium Uji Logam Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang pada bulan Maret 2018.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel Bebas

- Kecepatan putaran *roller* (rpm) = 10; 15; 20

2. Variabel Terikat

Dalam penelitian ini, variabel terikat nya adalah nilai kekuatan tarik (MPa) dan porositas (%).

3. Variabel Terkontrol

- a. Proses pengerolan adalah pengerjaan panas.
- b. Suhu pemanasan sebesar 500°C dan *holding time* selama 3 jam.
- c. Jumlah layer adalah 2 layer.
- d. Diameter *roll* sebesar 60 mm.
- e. *Roller Gap* sebesar 1 mm.
- f. *Rolling Ratio* sebesar 50%.

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat

1. Mesin *roll bonding*

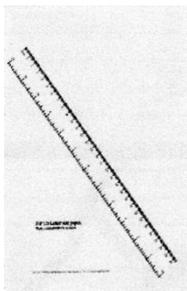
Mesin *roll bonding* digunakan untuk proses pengerolan yang akan dilakukan pengujian.



Gambar 3.1 Mesin *roll bonding*

2. Penggaris

Penggaris digunakan untuk mengukur panjang spesimen.



Gambar 3.2 Penggaris

3. Spidol

Spidol digunakan untuk menandai spesimen.



Gambar 3.3 Spidol

4. Mesin pemotong plat

Mesin pemotong plat digunakan untuk membentuk atau memotong plat sesuai dengan dimensi yang ditentukan.

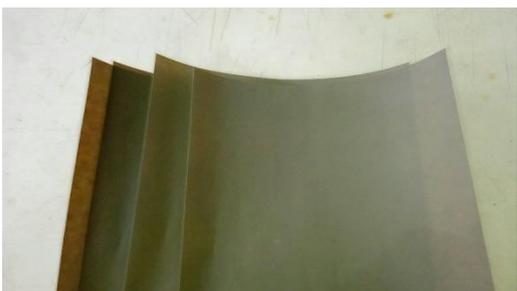


Gambar 3.4 Mesin pemotong plat

Sumber: Laboratorium Proses Produksi Teknik Mesin Universitas Brawijaya

5. Sandpaper

Sandpaper digunakan untuk membersihkan permukaan plat untuk uji mikrostruktur.



Gambar 3.5 Sandpaper

6. Sikat Kawat

Sikat kawat digunakan untuk mengasari permukaan plat untuk proses *surface preparation* dalam *roll bonding*.



Gambar 3.6 Sikat kawat

7. Aseton

Aseton digunakan untuk membantu menghilangkan lapisan kontaminan pada plat dalam proses *surface preparation roll bonding*.



Gambar 3.7 Aseton

8. Surface Roughness Tester



Gambar 3.8 Surface Roughness Tester SJ-301

Sumber: Irfan (2016)

Digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan lubang benda yang akan diteliti.

- a. Merek = Mitutoyo
- b. *Measuring range* = X axis (12.5 mm) dan Z axis (350 μm)
- c. *Stylus tip material* = *Diamond*
- d. Dimensi = 325 mm x 185 mm x 95 mm

9. Kawat

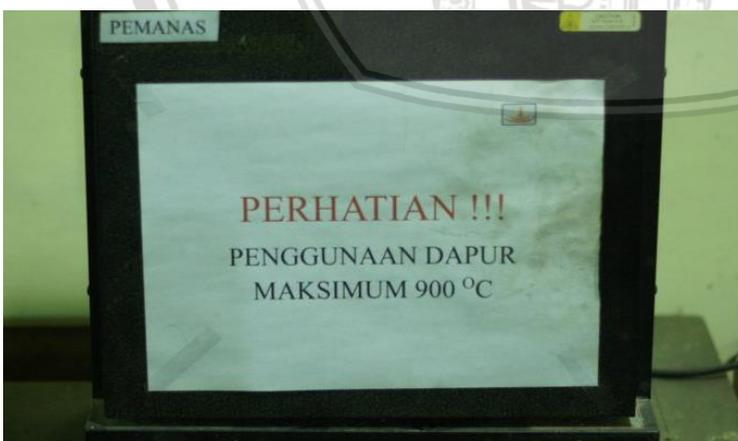
Digunakan untuk membuat 2 plat tidak bergeser ketika proses pengerolan.



Gambar 3.9 Kawat baja

10. Dapur listrik

Digunakan untuk melakukan proses *preheating* pada spesimen.



Gambar 3.10 Dapur listrik

Sumber: Laboratorium Pengecoran Logam Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

11. Alat uji piknometri

Alat ini digunakan untuk menghitung massa jenis spesimen.



Gambar 3.11 Alat uji piknometri

Sumber: Laboratorium Pengecoran Logam Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

12. *Universal testing machine*

Alat ini digunakan untuk memberikan beban tarik kepada spesimen.



Gambar 3.12 *Universal testing machine*

Sumber: Laboratorium Material Politeknik Negeri Kediri

13. Jangka sorong digital

Jangka sorong digital digunakan untuk mengukur dimensi spesimen.



Gambar 3.13 Jangka sorong digital

Sumber: Laboratorium Pengecoran Logam Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

14. *Centrifugal sand paper machine*

Alat ini digunakan untuk membersihkan permukaan material logam dari karat dan kotoran lain yang tidak diperlukan serta dapat digunakan untuk menghaluskan permukaan dan mengurangi dimensi.



Gambar 3.14 Centrifugal Sand Paper Machine

Sumber: Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

15. Mikroskop logam

Alat ini digunakan untuk membesarkan penampakan struktur mikro spesimen.



Gambar 3.15 Mikroskop logam

Sumber: Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

16. *Digital Microscope*

Alat ini digunakan untuk melihat struktur mikro spesimen.



Gambar 3.16 Dino Lite Digital Microscope

Sumber: Laboratorium Sentral Mesin Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

3.4.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah Aluminium A1100 dan Aluminium A6061, sifat fisik bahan teoritis adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1
Sifat Fisik *Aluminum Alloys 1100*

<i>Aluminum</i> <i>Alloys</i>	<i>Density</i>		<i>Heat Capacity</i>		<i>Thermal Conductivity</i>	
	<i>g/cm³</i>	<i>lb/in³</i>	<i>j/kg K</i>	<i>cal_{ir}/g.°C</i>	<i>W/m.K</i>	<i>cal_{ir}/cm.s.°C</i>
1100	2,71	0,098	963	0,23	222	0,53

Sumber: ASM Handbook Vol. 06 (1993)

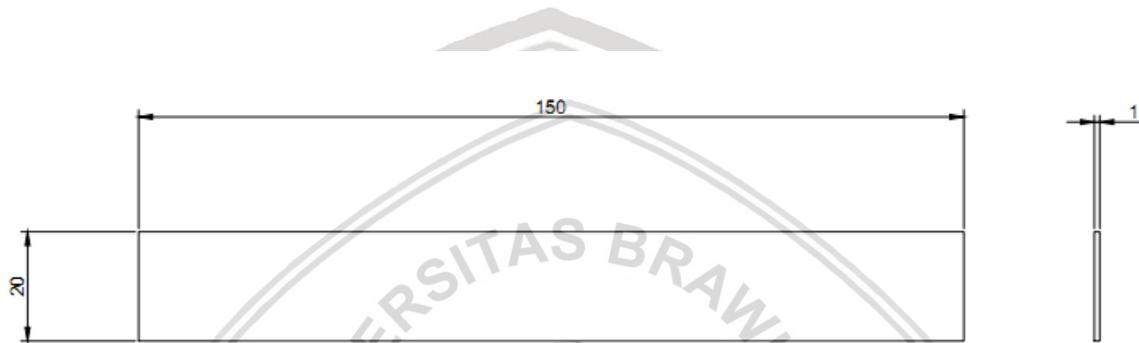
Tabel 3.2
Sifat Fisik *Aluminum Alloys* 6061

<i>Aluminum Alloys</i>	<i>Density</i>		<i>Heat Capacity</i>		<i>Thermal Conductivity</i>	
	g/cm^3	lb/in^3	j/kg K	$\text{calir/g.}^\circ\text{C}$	W/m.K	$\text{calir/cm.s.}^\circ\text{C}$
6061	2,70	0,098	963	0,23	172	0,41

Sumber: ASM Handbook Vol. 06 (1993)

3.4.3 Dimensi Spesimen

1. Roll bonding



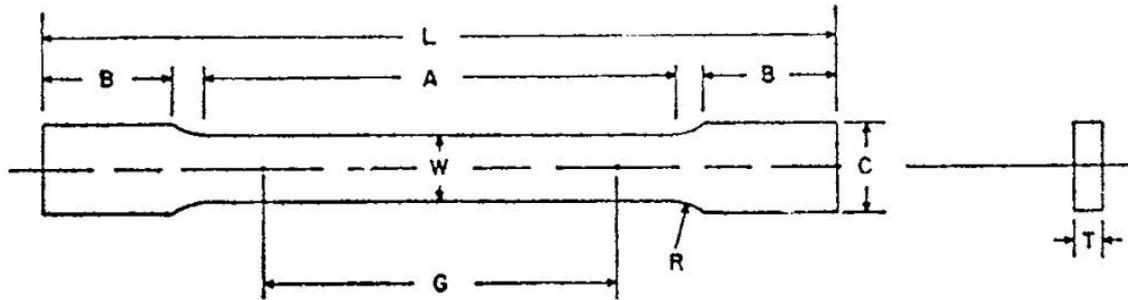
Gambar 3.17 Dimensi Plat Proses Roll Bonding

Tabel 3.3
Jumlah Spesimen Pengerolan

No	Variasi Kecepatan	Jumlah
	Putaran <i>Roller</i>	Spesimen
1.	10 rpm	3
2.	30 rpm	3
3.	50 rpm	3

2. Uji porositas dan uji tarik

Ukuran spesimen uji porositas dan uji tarik mengikuti ukuran spesimen uji tarik yang dapat dilihat pada gambar 3.13 sesuai dengan standart ASTM E 8-04 untuk *sheet-type*.



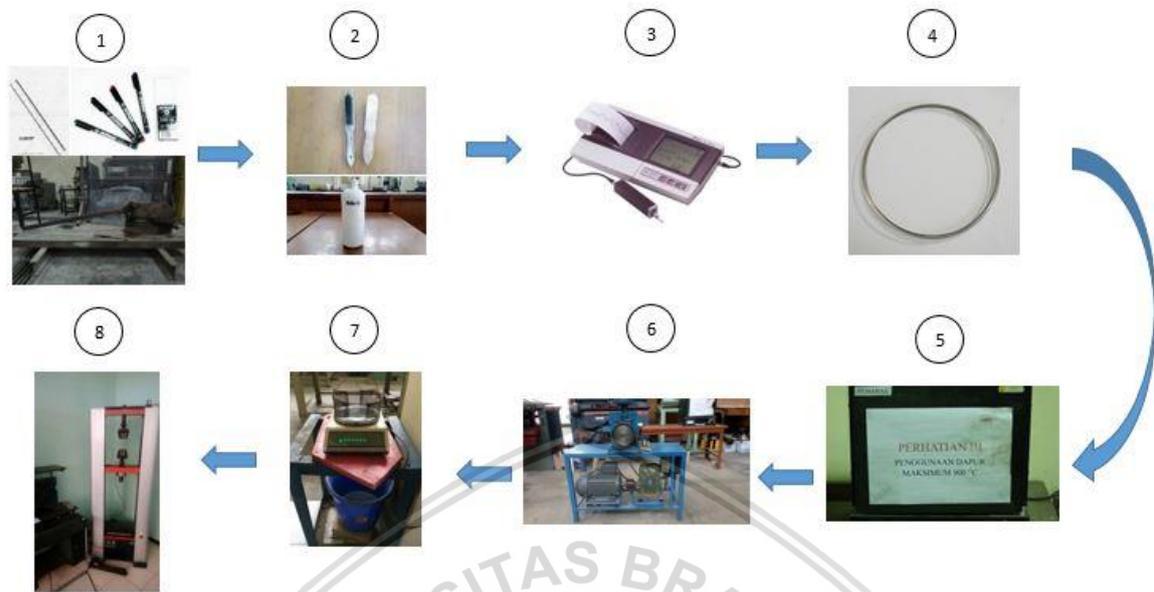
Gambar 3.18 Spesimen Uji Tarik

Sumber: ASTM E 8-04

Keterangan gambar:

1. G—Panjang daerah uji = 50 mm
2. W—Lebar = 12.5 mm
3. T—Tebal = 1 mm.
4. R—Radius = 12.5 mm
5. L—Panjang seluruhnya = 200 mm.
6. A—Daerah pengurangan = 57 mm.
7. B—panjang daerah cekam = 50 mm.
8. C—Lebar = 20 mm.

3.5 Skema Penelitian



Gambar 3.19 Skema Penelitian

Dengan:

1. *Dimensioning* (Penggaris, Spidol, Pemotong Plat)
2. *Surface Preparation* (Sikat Kawat dan Aseton)
3. *Surface Roughness Tester*
4. *Clamping* (Kawat)
5. *Preheating* (Dapur Listrik)
6. Mesin *Roll Bonding*
7. Alat Uji Píknometri
8. Alat Uji Tarik

3.6 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan alat dan bahan.
2. Memotong dimensi benda kerja sesuai dengan yang direncanakan.
3. Mengamplas kedua permukaan benda kerja menggunakan sikat kawat.
4. Melakukan *riveting* atau *clamping* pada kedua benda kerja.
5. Melakukan *preheating* pada suhu 500°C selama 3 jam.
6. Mempersiapkan mesin *roll bonding*:
 - a. Mengatur *roll gap*
 - b. Mengatur kecepatan putar *roll*
7. *Rolling*.
8. Membentuk benda kerja sesuai dengan spesimen uji tarik.
9. Pengambilan data berkaitan dengan uji porositas menggunakan uji piknometri.
10. Mengukur nilai kekuatan tarik menggunakan mesin uji tarik.
 - Pengujian kekuatan tarik dilakukan 7 hari setelah proses pengerolan selesai.
11. Mengolah data dan melakukan analisa dari grafik.
12. Menarik kesimpulan.

3.6.1 Prosedur Pengujian Porositas

1. Spesimen yang digunakan adalah spesimen hasil *roll bonding* yang telah dibentuk sesuai dimensi spesimen uji tarik.
2. Mempersiapkan timbangan kemudian ember yang telah terisi air dan keranjang untuk menimbang.
3. Menyalakan timbangan kemudian diatur agar dalam posisi menunjukkan nilai nol.
4. Menimbang hasil pengerolan yang telah dibentuk ketika di udara.
5. Menimbang berat keranjang di dalam air.
6. Menimbang hasil *roll bonding* dengan keranjang di dalam air dan mencatat hasilnya.
7. Pada kecepatan putaran *roller* selanjutnya diulangi mulai langkah nomor 3 hingga semua variasi telah dilakukan.
8. Pengujian piknometri selesai.

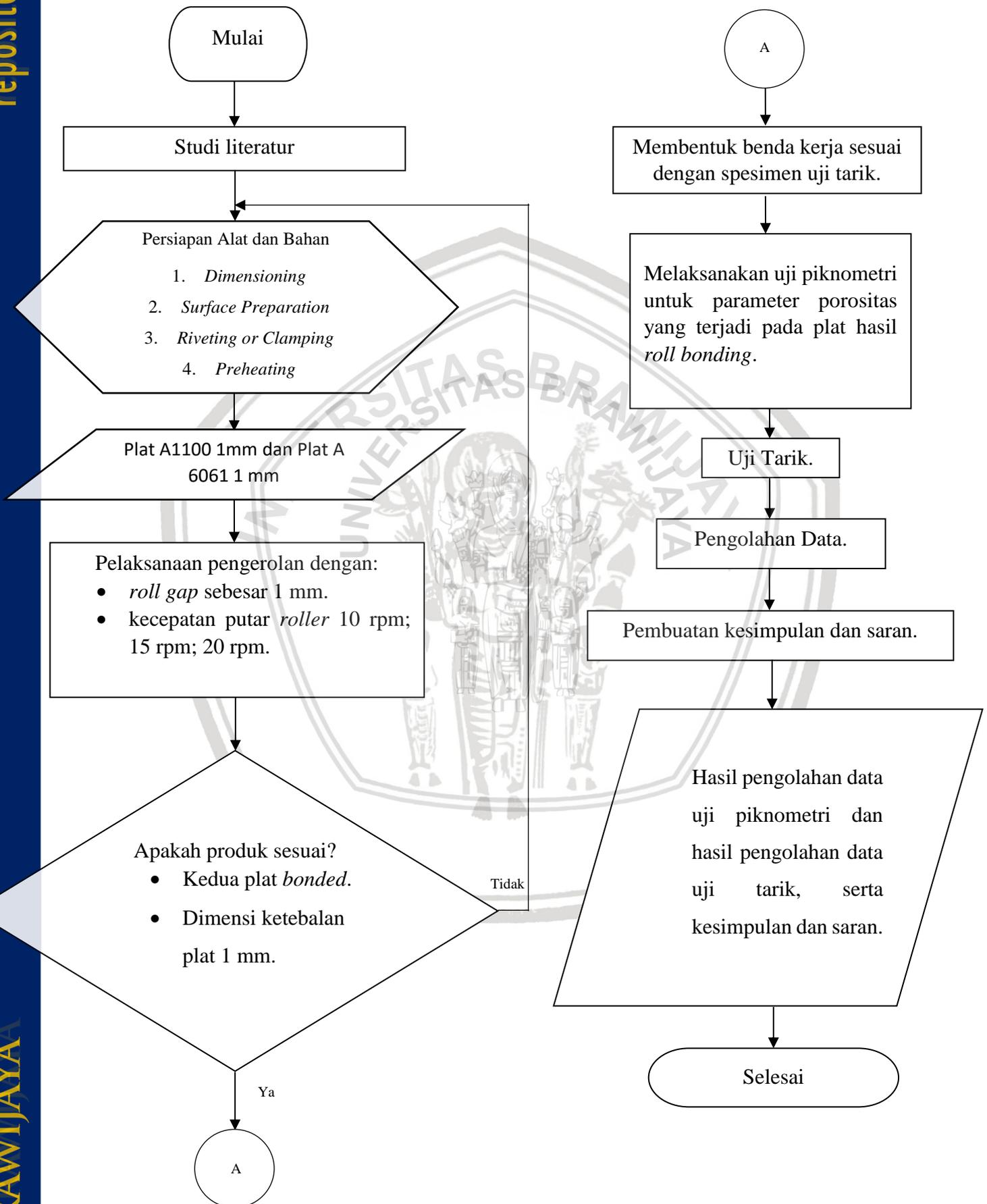
3.6.2 Pengujian Mikrostruktur

1. Memotong plat hasil *roll bonding* untuk dijadikan sample uji mikrostruktur.
2. Dilakukan *mounting* yaitu dengan memasukkan plat kedalam resin.

3. Melakukan pengamplasan pada plat yang telah di *mounting* menggunakan amplas dengan no. 100, no. 200, no. 500, no. 1000, no. 2000 dan no. 5000 secara berurutan.
4. Melakukan pemolesan pada spesimen dengan menggunakan *metal polish*.
5. Spesimen dimasukkan kedalam etsa dimana yang digunakan adalah *keller reagent*.
6. Spesimen dibersihkan menggunakan sabun dan air.
7. Spesimen dibersihkan menggunakan alcohol.
8. Spesimen dikeringkan menggunakan *hair dryer*.
9. Dilakukan pengujian mikrostruktur menggunakan mikroskop logam.
10. Pengujian mikrostruktur selesai.



3.7 Diagram Alir Penelitian



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian

4.1.1 Porositas

Pengolahan data pengujian porositas dilakukan setelah proses *roll bonding* telah selesai pada setiap spesimen, spesimen tersebut terlebih dahulu dibentuk sesuai standard dimensi spesimen uji tarik berdasarkan ASTM E8 dengan dibubut serta setelah itu diampelas dan dibersihkan menggunakan aseton untuk menghilangkan kerak yang tersisa setelah proses permesinan. Setelah itu ditimbang berat spesimen di air dan diudara selanjutnya dilakukan perhitungan sesuai dengan rumus 2.13 hingga 2.15, berikut ditunjukkan hasil pengujian dan perhitungan mencari nilai porositas pada tabel 4.1.

Tabel 4.1
Data Hasil Pengujian Porositas

Kecepatan <i>Roller</i> (rpm)	Berat di Udara (gr)	Berat di Air (gr)	Porositas (%)	Porositas Rata-Rata (%)
10	9,67	6,09	0,05	0,04
	10,13	6,38	0,04	
	10,05	6,33	0,03	
15	9,91	6,24	0,08	0,10
	9,69	6,1	0,12	
	10,07	6,34	0,10	
20	9,77	6,15	0,13	0,15
	10,12	6,37	0,14	
	9,98	6,28	0,19	

4.1.2 Kekuatan Tarik

Pengolahan data pengujian kekuatan tarik dilakukan setelah proses *roll bonding* telah selesai pada setiap spesimen dan telah dibentuk sesuai standard dimensi spesimen uji tarik berdasarkan ASTM E8 serta telah dilakukan pengujian porositas sebelumnya. Setiap variasi dilakukan tiga kali pengulangan dan didapatkan nilai rata-rata dari ketiga pengulangan tersebut pada setiap variasi. Variasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu pada kecepatan putaran *roller* dengan variasi kecepatan sebesar 10 rpm, 15 rpm dan 20 rpm. Hasil pengujian kekuatan tarik tertera pada tabel 4.2.

Tabel 4.2
Data Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Spesimen *Roll Bonding*

Kecepatan Roller (rpm)	Luas Permukaan (mm ²)	Beban Maximal (kN)	UTS (MPa)	UTS Rata-Rata (MPa)	Standard Deviasi
10	12,19	1,72	141,06	135,73	6,4939
	13,89	1,91	137,62		
	13,92	1,79	128,50		
15	13,42	1,70	126,67	128,07	4,3772
	13,91	1,73	124,57		
	12,68	1,69	132,98		
20	15,81	1,95	123,31	122,32	3,9773
	12,82	1,51	117,94		
	14,48	1,82	125,70		

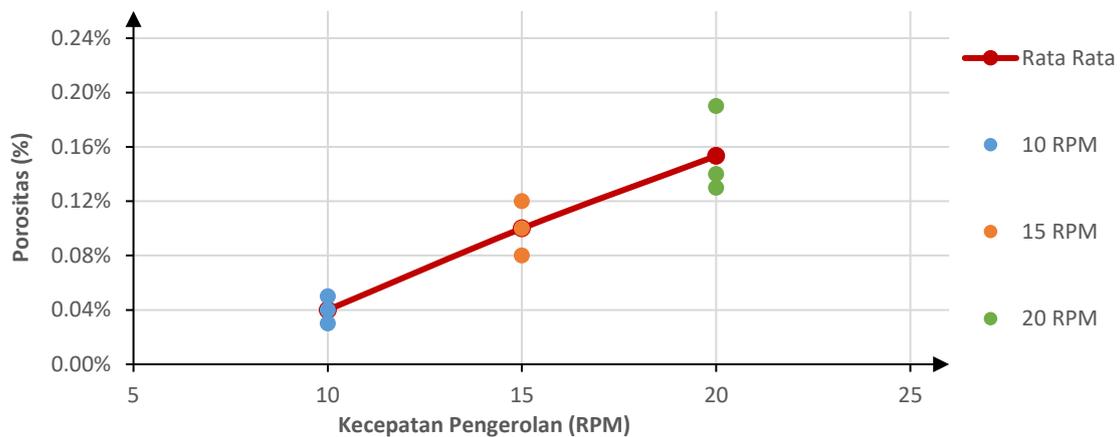
Tabel 4.3
Data Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Spesimen Konvensional Sebelum Proses *Roll Bonding*

Aluminium	Luas Permukaan (mm ²)	Beban Maximal (kN)	UTS (MPa)	UTS Rata-Rata (MPa)	Standard Deviasi
1100	12,68	1,4	110,45	113,63	2,9931
	12,63	1,44	114,06		
	12,72	1,48	116,39		
6061	10,96	1,24	113,12	116,16	2,6768
	10,31	1,21	117,20		
	11,05	1,31	118,16		
1100 HT	12,66	0,82	64,80	64,30	0,8103
	12,67	0,82	64,74		
	12,63	0,80	63,37		
6061 HT	11,08	0,71	63,90	63,78	0,3129
	10,81	0,69	64,01		
	10,78	0,68	63,43		

4.2 Pembahasan

4.2.1 Porositas

Dari tabel 4.1 didapat sebuah grafik hubungan antara nilai porositas terhadap variasi kecepatan putaran *roller* pada sambungan hasil *roll bonding* A1100 dengan A6061. Nilai porositas pada sambungan hasil *roll bonding* muncul disebabkan terjebaknya gas di udara saat proses pengerolan berlangsung sehingga menyebabkan adanya *void* pada daerah sambungan *roll bonding*. Pada gambar 4.1 didapatkan hasil porositas cenderung semakin besar seiring semakin besar variasi kecepatan digunakan.



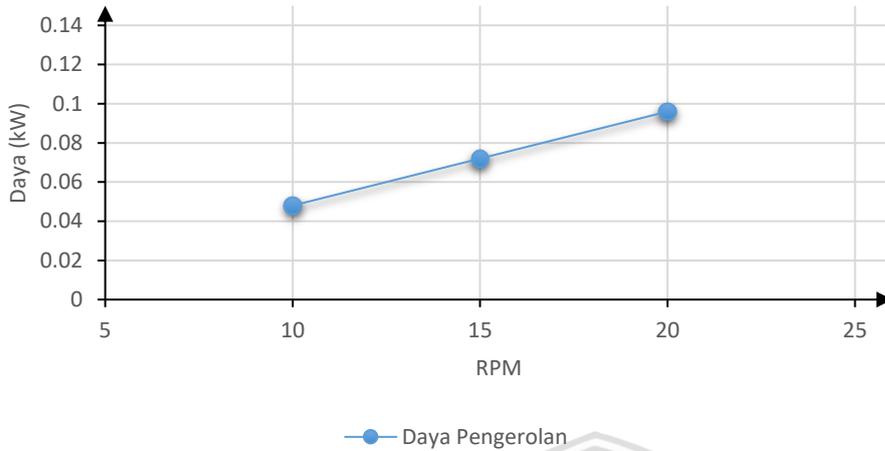
Gambar 4.1 Grafik Hubungan Antara Kecepatan Putaran *Roller* Terhadap Nilai Porositas Hasil *Roll Bonding* A1100 dengan A6061 pada setiap variasi kecepatan

Dari gambar 4.1 menunjukkan pengaruh kecepatan putaran *roller* terhadap nilai porositas. Pada grafik ini menggunakan grafik *linear* untuk mengetahui hubungan masing masing pengaruh antar variasi yang digunakan dalam penelitian ini serta mendapatkan kecenderungan dari antar variasi tersebut. Dapat dilihat pada titik warna biru yang menunjukkan nilai porositas dari variasi kecepatan 10 rpm merupakan nilai porositas terendah dengan nilai 0,03%. Pada titik warna hijau yang menunjukkan nilai porositas dari variasi kecepatan 20 rpm merupakan nilai porositas tertinggi dengan nilai 0,19%. Pada garis warna merah menunjukkan rata rata dari 3 kali pengulangan setiap variasinya yang mana didapatkan nilai porositas terendah pada variasi kecepatan putaran *roller* 10 rpm sebesar 0,04% serta nilai porositas tertinggi pada variasi kecepatan putaran *roller* 20 rpm sebesar 0,15%.

Dari gambar 4.1 menunjukkan kecenderungan semakin bertambah kecepatan putaran *roller* maka menyebabkan nilai porositasnya semakin naik, fenomena ini diakibatkan karena semakin tinggi kecepatan putaran *roller* yang digunakan maka semakin kecil dan tidak merata gaya pembebanan yang diberikan kepada permukaan material serta untuk kecepatan tinggi mekanisme saling difusi atom di sekitar daerah antar muka plat semakin cepat sehingga menyebabkan celah yang terjadi antara material tersebut semakin besar. Semakin besar kecepatan putaran *roller* menyebabkan kemungkinan udara bebas yang terjebak pada sambungan hasil *roll bonding* semakin besar dan akhirnya menyebabkan porositas yang terjadi semakin bertambah besar.

Gambar 4.2 menunjukkan daya pengerolan yang dibutuhkan pada setiap variasi kecepatan.

Daya Pengerolan



Gambar 4.2 Grafik Daya Pengerolan yang Dibutuhkan Pada Tiap Variasi Kecepatan

Dari gambar 4.2 menunjukkan pengaruh kecepatan putaran *roller* terhadap daya pengerolan yang dibutuhkan. Pada grafik ini menggunakan grafik *linear* untuk mengetahui hubungan masing masing pengaruh antar variasi yang digunakan dalam penelitian ini serta mendapatkan kecenderungan dari antar variasi tersebut. Dapat dilihat pada titik yang menunjukkan nilai daya pengerolan dari variasi kecepatan 20 rpm merupakan nilai daya pengerolan tertinggi dengan nilai 0,096 kW dan gaya pengerolan terendah terjadi pada variasi kecepatan 10 rpm dengan nilai 0,048 kW.

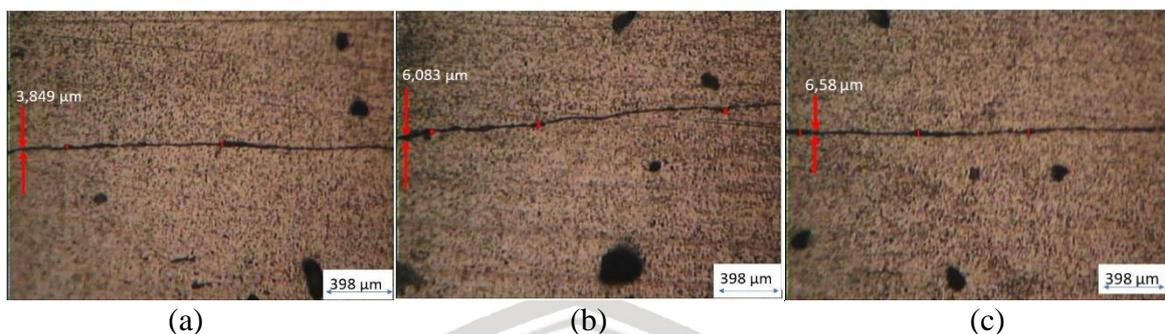
Dari gambar 4.2 menunjukkan kecenderungan semakin bertambah kecepatan pengerolan maka menyebabkan daya yang dibutuhkan saat pengerolan akan semakin besar dikarenakan hubungan antara kecepatan pengerolan dan daya pengerolan berbanding lurus. Hal tersebut ditunjukkan dengan rumus:

$$N = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot P \cdot n}{60000} \text{ (kW)} \dots\dots\dots (4-1)$$

Dengan gaya yang terjadi pada saat pengerolan sebesar 8,528 kN serta dengan panjang plat yang sama yaitu sebesar 150 mm sebelum pengerolan, maka semakin rendah daya pengerolan akan menyebabkan waktu pengerolan akan semakin lama dan menyebabkan difusi logam semakin lama yang ditunjukkan oleh rumus:

$$N = \frac{F \cdot S}{t} \text{ (kW)} \dots\dots\dots (4-2)$$

Gambar 4.3 menunjukkan foto mikrostruktur dari celah yang terjadi pada hasil *roll bonding* plat A1100 dengan plat A6061 pada tiap variasi kecepatan.



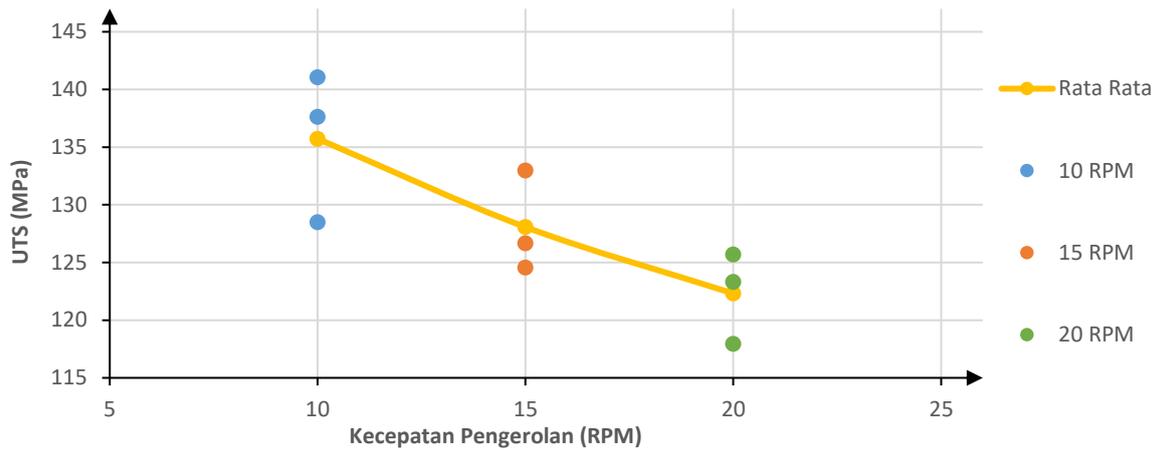
Gambar 4.3 Foto Mikrostruktur (a) Spesimen 10 rpm, (b) Spesimen 15 rpm, (c) Spesimen 20 rpm

Gambar 4.3 menunjukkan foto mikrostruktur pada spesimen hasil *Roll Bonding* pada tiap variasi kecepatannya. Dapat dilihat celah terkecil yang terjadi antar sambungan plat hasil *roll bonding* terdapat pada spesimen dengan kecepatan putaran *roller* 10 rpm sebesar 3,849 μm yang ditunjukkan pada gambar 4.3 (a) dan celah terbesar terjadi pada kecepatan putaran *roller* 20 rpm sebesar 6,580 μm yang ditunjukkan pada gambar 4.3 (c).

Hal ini disebabkan lebih oleh efek beban pengerolan yang cenderung menurun dan mempengaruhi nilai porositas tiap variasi yang semakin meningkat.

4.2.2 Kekuatan Tarik

Dari tabel 4.2 didapat sebuah grafik hubungan antara nilai kekuatan tarik terhadap variasi kecepatan putaran *roller* hasil *roll bonding* A1100 dengan A6061. Grafik yang digunakan merupakan grafik *linear* untuk mengetahui hubungan masing masing pengaruh antar variasi yang digunakan dalam penelitian ini serta mendapatkan kecenderungan dari antar variasi tersebut. Nilai kekuatan tarik pada sebuah hasil spesimen produksi penting untuk diketahui karena berhubungan dengan sifat mekanik suatu produk metalurgi. Pada gambar 4.4 grafik nilai kekuatan tarik hasil *roll bonding* plat aluminium A1100 dengan plat aluminium A6061, didapatkan hasil kekuatan tarik semakin kecil seiring semakin besar kecepatan putaran *roller* yang digunakan.

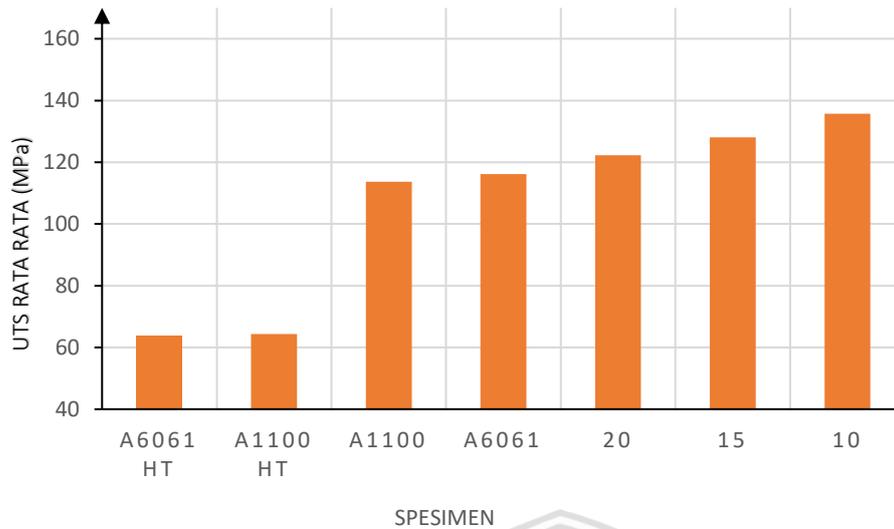


Gambar 4.4 Grafik Hubungan antara Variasi Kecepatan Putaran *Roller* terhadap Kekuatan Tarik pada Hasil *Roll Bonding* A1100 dengan A6061

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik tertinggi terdapat pada kecepatan *roller* 10 rpm, dengan nilai rata-rata 135,73 MPa. Sedangkan kekuatan tarik terendah didapat pada saat kecepatan *roller* sebesar 20 rpm dengan nilai rata-rata 122,32 MPa.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa kecepatan putaran *roller* mempengaruhi nilai kekuatan tarik pada hasil *roll bonding* A1100 dengan A6061. Semakin besar kecepatan putaran *roller* yang digunakan maka nilai kekuatan tarik yang dihasilkan akan semakin rendah sedangkan semakin kecil kecepatan putaran *roller* maka nilai kekuatan tariknya akan semakin besar. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi kecepatan putaran *roller* maka semakin kecil dan tidak merata gaya pembebanan yang diberikan kepada permukaan material serta untuk kecepatan rendah mekanisme saling difusi atom di sekitar daerah antar muka plat semakin cepat dan mengakibatkan kekuatan ikatan antar atom semakin lemah yang mana menghasilkan kekuatan tarik yang semakin rendah tersebut.

Jika dibandingkan dengan kekuatan tarik dari spesimen konvensional (sebelum proses *roll bonding*) pada saat sebelum dan sesudah dipanaskan dengan spesimen hasil *roll bonding*, maka akan terlihat seperti pada gambar 4.5 Grafik perbandingan kekuatan tarik rata-rata antara spesimen aluminium konvensional dengan spesimen *roll bonding*.

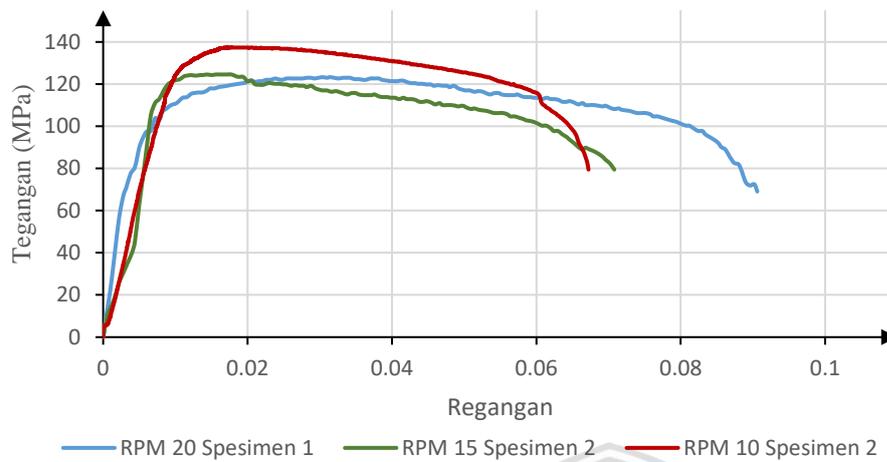


Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Kekuatan Tarik Rata-Rata antar Spesimen Alumunium Konvensional dengan Spesimen *Roll Bonding*

Dapat di lihat pada gambar 4.5 bahwa kekutan tarik rata-rata tertinggi ada pada spesimen *roll bonding* dengan kecepatan putaran *roller* sebesar 20 rpm yaitu dengan nilai kekuatan tarik rata-rata sebesar 135,73 MPa disusul dengan spesimen hasil *roll bonding* dengan kecepatan putaran *roller* sebesar 15 rpm dan 20 rpm kemudian baru spesimen konvensional dan dan spesimen konvensional yang telah dipanaskan sebesar 550°C selama 3 jam kemudian didiamkan dalam dapur hingga suhu dapur mencapai 0°C. Ini menunjukkan bahwa dimana material konvensional dapat di tingkatkan kekuatannya dengan metode *roll bonding* yang terbukti dengan kekuatan tarik rata-rata alumunium A1100 sebesar 113,63 Mpa dan A6061 sebesar 116,16 MPa berada di bawah kekutan tarik dari spesimen hasil proses *roll bonding*. Dan juga ini menjawab bahwa metode *roll bonding* ini bisa menjadi salah satu metode untuk memperbaiki sifat material.

Dari pengujian kekuatan tarik menghasilkan diagram tegangan dan regangan untuk menunjukkan regangan yang didapat dari spesimen yang diberi tegangan secara terus menerus. Gambar 4.6 menunjukkan diagram tegangan regangan antara spesimen dengan kecepatan putaran *roller* sebesar 10 rpm dan 20 rpm.

Grafik Tegangan Regangan

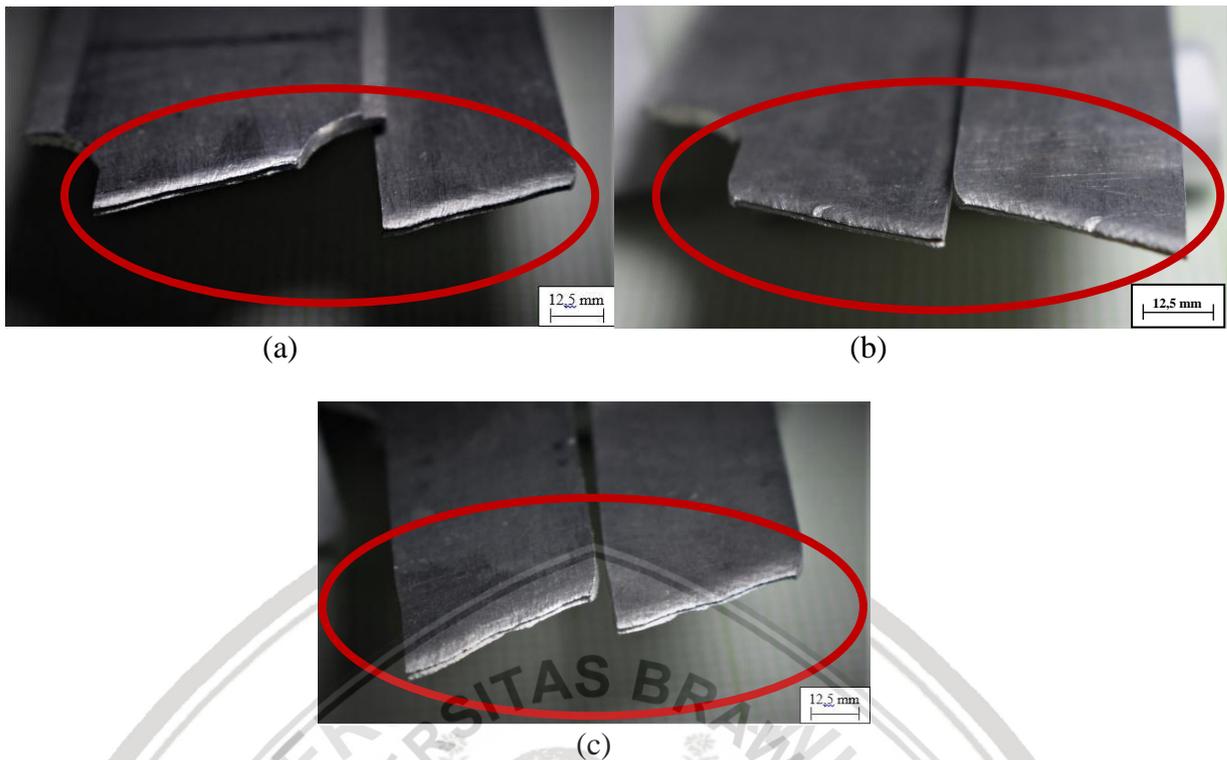


Gambar 4.6 Grafik Tegangan Regangan Spesimen Kekuatan Tarik Setiap Variasi Kecepatan

Bisa dilihat pada grafik tegangan regangan spesimen dengan kekuatan tarik mendekati rata-rata tertinggi pada kecepatan 10 rpm dan yang memiliki kekuatan tarik rata-rata terendah adalah spesimen dengan kecepatan 20 rpm, bahwa spesimen dengan kecepatan 10 rpm memiliki tegangan yang lebih besar dan regangan yang lebih kecil juga bila dibandingkan dengan spesimen dengan kecepatan 20 rpm. Pada spesimen 10 rpm mencapai nilai tegangan maksimal pada 137,62 MPa dan regangan pada saat patah sebesar 6,73% sedangkan pada spesimen 20 rpm mencapai nilai tegangan maksimal pada 123,31 MPa dan regangan pada saat patah sebesar 9,24%.

Hal ini dapat disebabkan karena luas permukaan pada tiap spesimen yang relatif berbeda karena hasil proses permesinan pada saat pembuatan spesimen uji tarik. Hal ini juga menunjukkan bahwa pengaruh proses *roll bonding* berpengaruh pada tegangan dan regangan material tersebut.

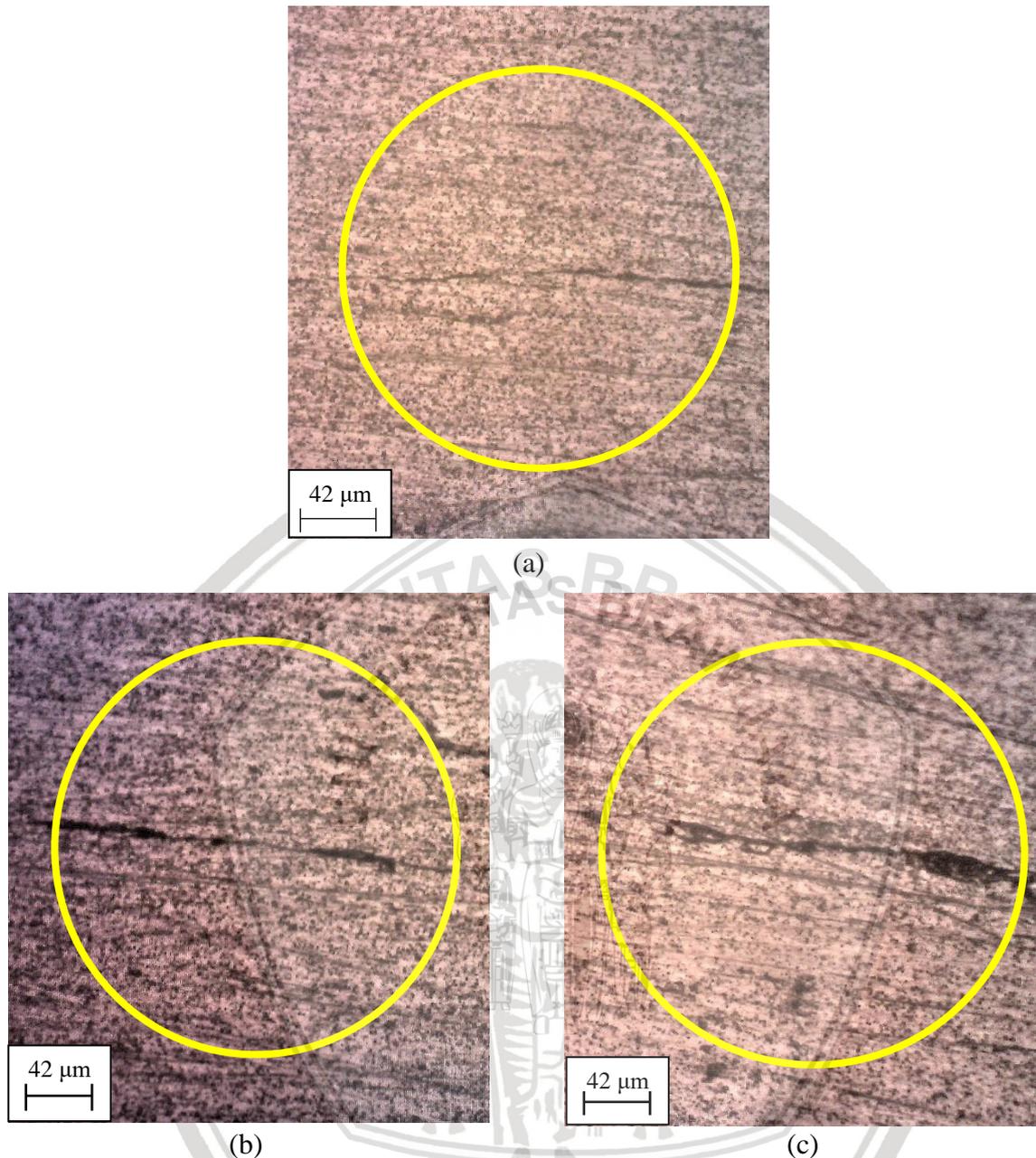
Gambar 4.7 menunjukkan foto makro dari patahan spesimen setelah proses pengujian kekuatan tarik.



Gambar 4.7 Foto Makro Patahan (a) Spesimen 10 rpm, (b) Spesimen 15 rpm , (c) Spesimen 20 rpm

Gambar 4.7 menunjukkan foto makro dari patahan spesimen dengan kekuatan tarik tertinggi yaitu pada gambar 4.7 (a) spesimen 10 rpm dan kekuatan tarik terendah yaitu pada gambar 4.7 (c) spesimen 20 rpm. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa kedua spesimen tersebut bersifat ulet (*ductile*). Fenomena ini ditunjukkan dengan adanya deformasi plastis yang luas di sekitar patahan yang diakibatkan spesimen mengalami mulur dan ditunjukkan pada patahan yang berserabut dan berwarna kelabu serta mengalami *necking*. Proses mulur ini terjadi cukup lama dengan ditunjukkan pada gambar 4.6 dimana penurunan gaya yang terjadi setelah gaya mencapai gaya maksimum tidaklah drastis. Hal ini menandakan bahwa material melakukan perlawanan terhadap mulur kecuali apabila tegangan yang terjadi diperbesar.

Pada gambar 4.8 menunjukkan nilai kekerasan yang terjadi pada tiap variasi kecepatan dalam proses *roll bonding*.



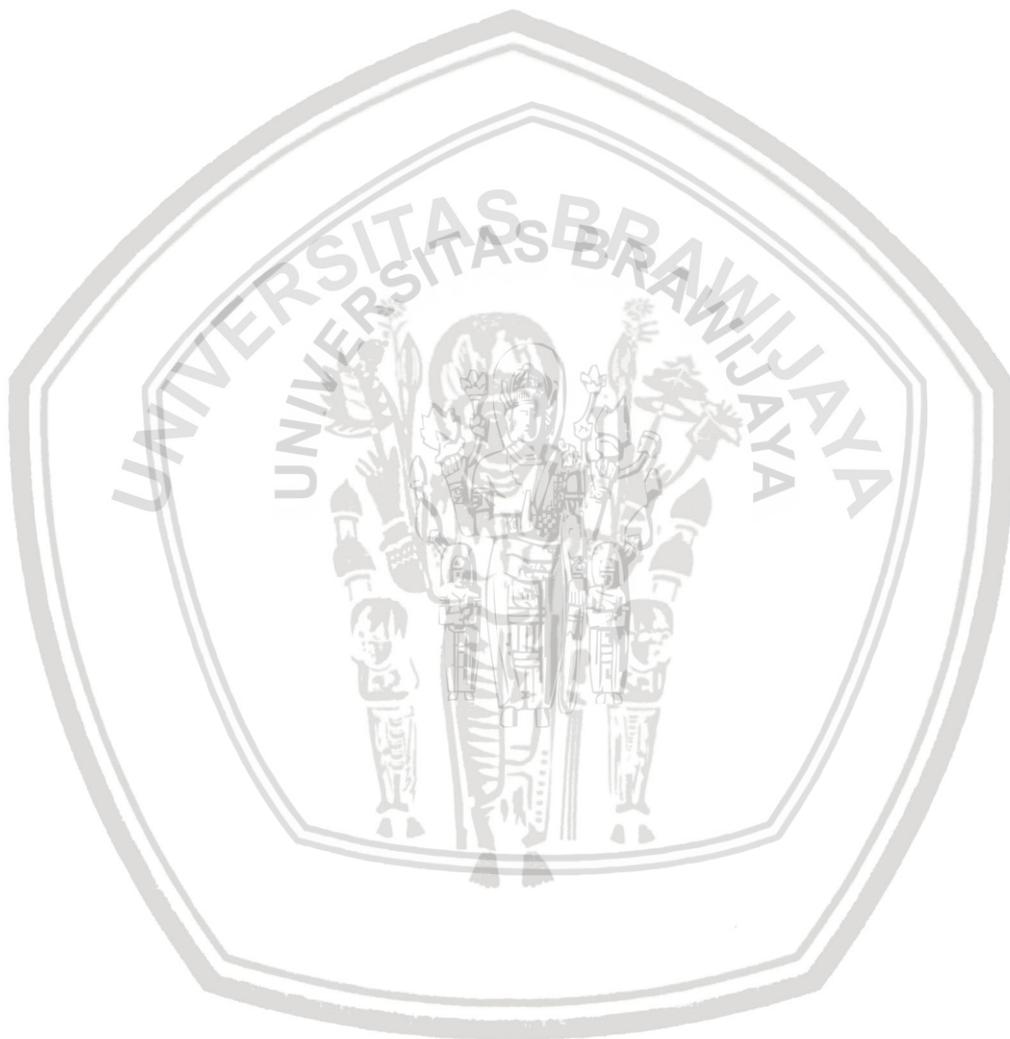
Gambar 4.8 Foto Mikrostruktur Pada Tiap Variasi Kecepatan (a) Spesimen 10 rpm, (b) Spesimen 15 rpm, (c) Spesimen 20 rpm

Gambar 4.8 menunjukkan hasil dari foto mikrostruktur pada tiap variasi kecepatan hasil *roll bonding*. Setelah melakukan penghitungan besar butir menggunakan metode planimetri (Jeffries) sesuai dengan ASTM E 112-96, didapatkan hasil bahwa semakin tinggi kecepatan putaran *roller* maka semakin besar pula diameter butir pada spesimen tersebut.

Dari perhitungan besar butir didapatkan hasil bahwa pada kecepatan 10 rpm nilai diameter butir rata rata pada spesimen adalah 13,3 μm dan dengan jumlah butir didalam lingkaran adalah 729 butir serta di *intercept* lingkaran adalah 57 butir. Nilai tersebut merupakan nilai terkecil dibandingkan dengan variasi lainnya yang mana pada kecepatan 15

rpm memiliki nilai diameter butir rata rata sebesar 15,9 μm dan jumlah butir didalam lingkaran adalah 567 butir serta di *intercept* lingkaran adalah 63 butir serta pada kecepatan 20 rpm memiliki nilai diameter butir rata rata sebesar 18,9 μm dan jumlah butir didalam lingkaran adalah 375 butir serta di *intercept* lingkaran adalah 55 butir.

Dari hasil mikrostruktur tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai kekuatan tarik dengan besar butir berbanding lurus yang mana semakin bertambahnya kecepatan putaran *roller* mengakibatkan semakin berkurangnya nilai kekuatan tarik serta besar butirnya pun bertambah besar dan jumlah butirnya pun semakin berkurang.





BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dapat disimpulkan dari penelitian ini bahwa menggunakan variasi kecepatan putaran *roller* pada penelitian *roll bonding* A1100 dengan A6061 mempengaruhi nilai porositas dan kekuatan tarik pada benda hasil pengerolan.

1. Nilai porositas rata-rata terendah terjadi pada kecepatan putaran *roller* 10 rpm dengan nilai porositas 0,04% dan nilai porositas tertinggi terjadi pada kecepatan putaran *roller* 20 rpm dengan nilai porositas sebesar 0,15%
2. Nilai kekuatan rata-rata tertinggi terdapat pada spesimen dengan kecepatan putaran *roller* 10 rpm dengan nilai kekuatan tarik 135,73 MPa dan nilai kekuatan tarik rata-rata terendah terdapat pada spesimen dengan kecepatan putaran *roller* 20 rpm dengan nilai kekuatan tarik 122,32 MPa.

5.2 Saran

1. Diperlukan perbaikan untuk mesin *roll* yang lebih baik dan canggih supaya proses *roll bonding* akan lebih akurat hasilnya dan bisa menggunakan putaran rpm yang lebih besar.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai *roll bonding*.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk variasi parameter *roll bonding* yang berbeda agar bisa mengetahui parameter yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Akroma, Boy Harpit (2011). Jurnal Meningkatkan Sifat Mekanis Aluminium Komersil Untuk Bahan Konstruksi Atap Dengan Metode *Accumulative Roll-Bonding*. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Alil, Ana., Popovic, Miljana., Radetic, Tamara., Romanji, Endhre., (2014). *Journal Influence of an Accumulative Roll Bonding (ARB) Process on The Properties of AA5083 AL-MG Alloy Sheets*. Belgrade: Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade.
- ASM Aerospace Specification Metals Inc. (2015).
- ASTM (2010). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material*, ASTM E8/E8M-16a. West Conshohocken: ASTM International
- ASTM (2010). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material*, ASTM E112-96. West Conshohocken: ASTM International
- Avner, S. H. (1997). *Introduction to Physical Metallurgy, second edition*. New York: McGraw-Hill.
- Baumeister, Theodore., Avallone, Eugene A., Baumeister III, Theodore., (1996). *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers, 8th Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Brala, James G. (1997). *Handbook of Manufacturing Process*. New York: Industrial Press, Inc.
- Dieter, George E. (1986). *Mechanical Metallurgy, third edition*. New York: McGraw-Hill.
- Elmer J.W., and Kautz, D.D., (1993). *The ASM Handbook, Welding, Brazing, and Soldering*. Fundamentals of Friction Welding, Lawrence Livermore National Laboratory. Vol.6.
- Irawan, Yudy Surya., Hagiwara, Yoshihiko., Ohya, Shin-ichi., (2006). *Effects of Rolling Ratios, Microstructures and Crystal Orientations on Peculiar Fatigue Crack Growth Paths in Anisotropic Cold-Rolled Pure Aluminium Sheets*. *Journal of The Society of Materials Science Japan*, Vol.55, No.4, 2006, pp.402-408. Jepang: *The Society of Materials Science Japan*.
- Imansyah, Muhammad., Wiyono, Slamet., Milandia, Anistasia., (2015). Jurnal Sintesa Awal Komposit Aluminium Hasil Proses *Cross Section Accumulative Roll Bonding (C-ARB)* Untuk Aplikasi Peralatan Militer. Cilegon: Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

- Kalpakjian, Serope., Schmid, Steven R., (2009). *Manufacturing Engineering and Technology Sixth Edition in SI Units*. London: Pearson.
- Kissel, J. R, Ferry, R. L (2002). *Aluminum Structure A Guide to Their Specification and Design Second Edition*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Lauvdal, Steinar (2011). *Journal Experimental Studies of Cold Roll Bonded Aluminum Alloys*. Norwegia: Norwegian University of Science and Technology.
- Lenard, John G. (2007). *Journal Primer of Flat Rolling*. Oxford: Elsevier.
- Li, Long., Nagai, Kotobu., Yin, Fuxing., (2008). *Journal Progress in cold roll bonding of metals*. Tsukuba: Innovative Materials Engineering Laboratory, National Institute for Materials Science.
- Narayanan, R. Ganesh., Dixit, Uday Shanker., (2002). *Topics in Mining and Materials Engineering*. New Delhi: Springer.
- Manesh, H. Danesh., Taheri, A. Karimi., (2003). *Study of Mechanism of Cold Roll Welding of Aluminium Alloy to Steel Strip*. Oxford: Taylor & Francis Group.
- Prakosa, Tri (2010). *Rolling of Metal*. Bandung: Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung.
- Sagala, Ahmad Rifai M. Nur (2011). *Meningkatkan Sifat Mekanis Tembaga Komersil Untuk Bahan Propeller Kapal Nelayan Dengan Metode Accumulative Roll-Bonding*. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Sardar, Suprim., Mandal, Atanu., Kanta Pal, Surjya., Singh, Shiv Brat., (2014). *Journal Accumulative Roll Bonding of AA6005 and AA1060 Metal Strip: Study on Microstructure, Mechanical Properties and Evaluation of Minimum Bonding Criteria*. Kharagpur: Department of Metallurgical & Materials Engineering, IIT.
- Surdia, Tata., Saito, S., (1995). *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- Tsuji, Nobuhiro., Y. Saito., S. H. lee., Y. Minamino., (2003). *ARB (Accumulative Roll-Bonding) and Other New Techniques to Produce Bulk Ultrafine Grained Materials*. Weinheim: Advanced Engineering Materials.
- Wright PK, Snow DA, Tay CK (1978). *Interfacial Conditions and Bond Strength in Cold Pressure Welding by Rolling*. Mooresville: Metallurgical Technologies, Inc.
- Zacharias, Petrus., Al Hasa, M. Husna., Hersubeno, JB., Sardjono., (1996). *Jurnal Pengaruh Kecepatan Perolan Terhadap Kekuatan Ikatan Metalurgik Antarmuka Pelat AIMg-2*. Jakarta: Pusat Elemen Bakar Nuklir.