

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 aluminum 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 untuk 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</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>
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</i> <i>Paduan</i>	<i>Kekuatan</i> <i>Tarik</i> <i>(Kgf/mm²)</i>	<i>Kekuatan</i> <i>Mulur</i> <i>(Kgf/mm²)</i>	<i>Perpanjangan</i> <i>(%)</i>	<i>Kekerasan</i> <i>Brinell</i>	<i>Batas</i> <i>Lelah</i> <i>(Kgf/mm²)</i>
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

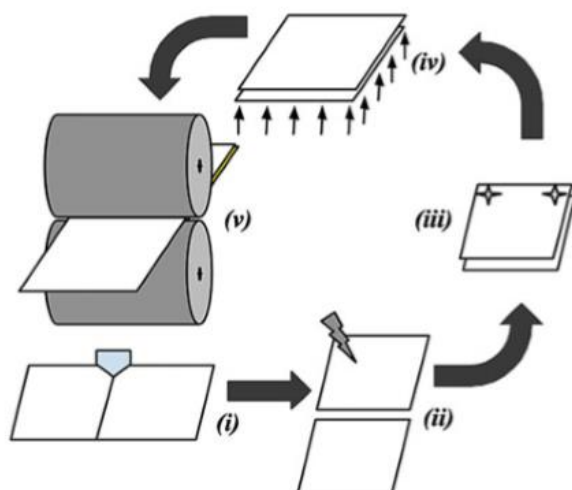
dampak termal. Dengan *metal cladding*, permukaannya bisa mengalami ketahanan aus yang cukup. Metode ini cocok untuk bentuk kompleks juga.

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.

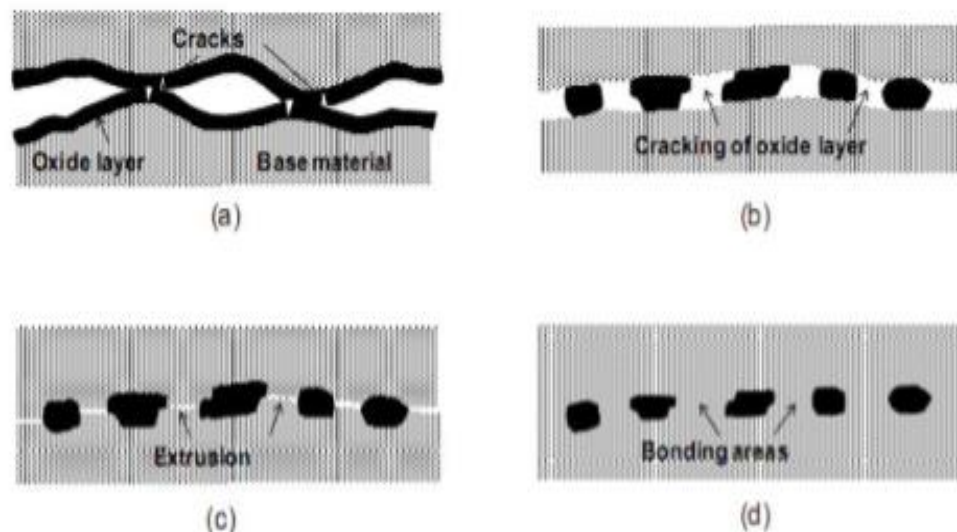


Gambar 2.1 Proses roll bonding
 Sumber: Narayanan (2015)

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*

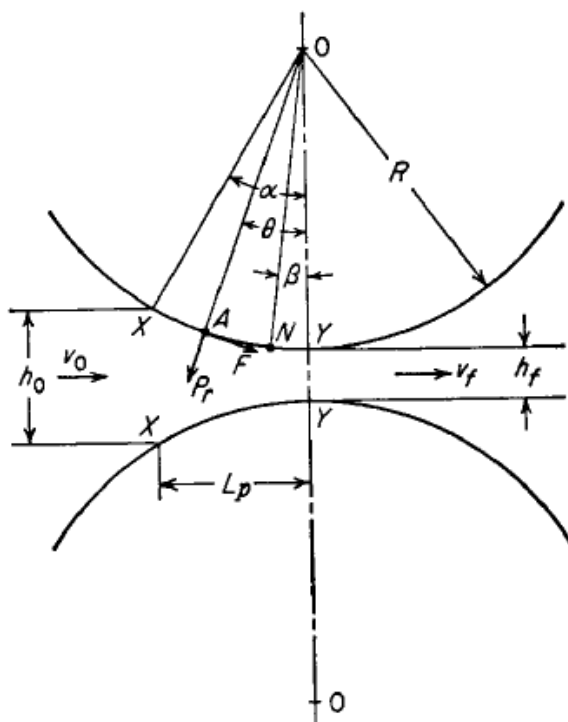
Ada beberapa faktor penting yang mempengaruhi mekanisme *roll bonding*. Faktor-faktor tersebut adalah *mechanical interlocking*, *capitavating of energy barrier*, ikatan antar permukaan dan rekristalisasi selama proses *annealing* dari plat *bonding*. Manesh dan Taheri (2004), mengungkapkan bahwa lapisan 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:

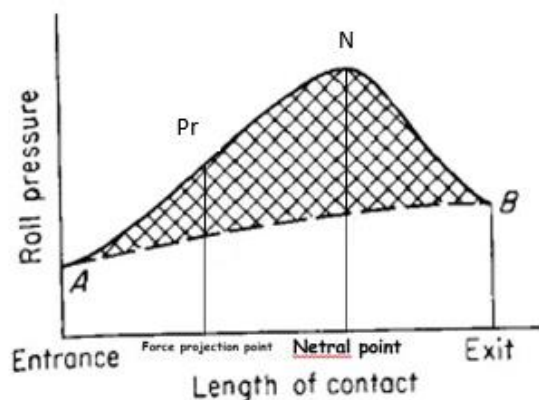
$$N = \frac{4.\pi.a.P.n}{60000} (kW) \dots\dots\dots (2-4)$$

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:

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

dengan:

pth : *Theoretical density* (gr/cm²)

$\rho_{Al} \rho_{Cu} \rho_{Fe} etc$: *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:

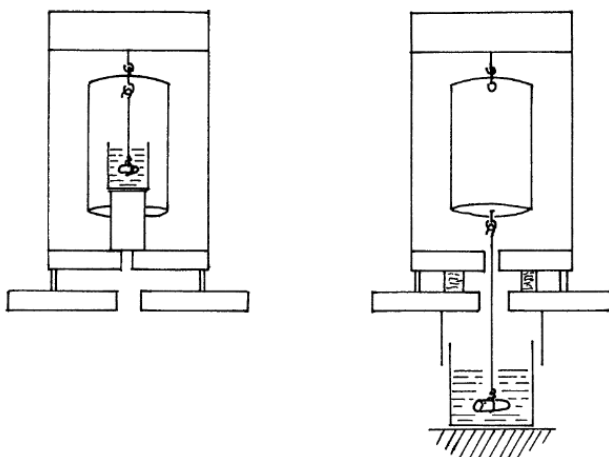
ρ_s : *Apparent density* (gr/cm³)

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 piknometri
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 (%)

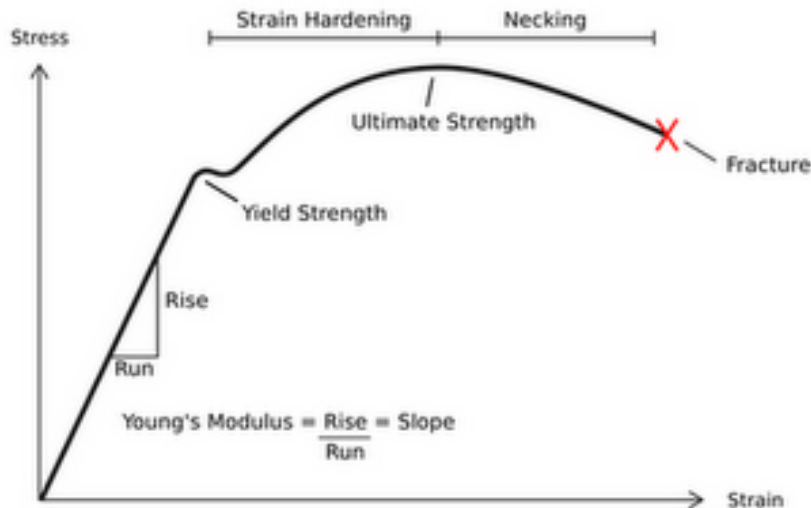
l_0 = Panjang awal (mm)

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*.

