



Optimalisasi Deformasi Canai Dingin untuk Meningkatkan Sifat Mekanik Paduan Al-Mg-Si

Venty Lestari

Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya, Indonesia

*Penulis Korespondensi: ventylestari@unsri.ac.id

Abstract. The demand for lightweight materials with high mechanical strength has driven the development of aluminum alloys, particularly Al-Mg-Si, through deformation processes such as cold rolling. This study aims to analyze the effect of varying degrees of cold rolling deformation on the grain aspect ratio and macrohardness of homogenized Al-Mg-Si alloys. Deformation was applied at three thickness reduction levels—5%, 10%, and 20%—followed by microstructural characterization using optical microscopy and macrohardness testing in accordance with ASTM E-18 standards. The results show that increasing deformation levels lead to elongated grain morphology, with the grain aspect ratio rising from 1.16 to 2.07 and macrohardness increasing from 46.64 HRE to 62 HRE. The emergence of slip lines and grain flattening indicates the occurrence of intense plastic deformation, while work hardening results from dislocation accumulation that impedes further slip motion. These findings confirm a strong correlation between microstructural evolution and mechanical property enhancement in cold-deformed Al-Mg-Si alloys. This research contributes to the optimization of cold rolling parameters to produce engineering materials with a desirable balance of strength, formability, and fatigue resistance for applications in the mining and heavy manufacturing industries.

Keywords: Al-Mg-Si; Cold Rolling; Hardness; Microstructure; Plastic Deformation.

Abstrak. Kebutuhan akan material yang ringan namun memiliki kekuatan tinggi mendorong pengembangan paduan aluminium, khususnya Al-Mg-Si, melalui proses deformasi seperti canai dingin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi derajat deformasi canai dingin terhadap rasio deformasi butir dan kekerasan makro pada paduan Al-Mg-Si hasil homogenisasi. Proses deformasi dilakukan pada tiga tingkat reduksi ketebalan, yaitu 5%, 10%, dan 20%, kemudian dilanjutkan dengan karakterisasi struktur mikro menggunakan mikroskop optik serta pengujian kekerasan makro sesuai standar ASTM E-18. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan derajat deformasi menyebabkan elongasi butir kristal dengan rasio deformasi butir yang meningkat dari 1,16 menjadi 2,07 dan peningkatan nilai kekerasan makro dari 46,64 HRE menjadi 62 HRE. Munculnya *slip line* dan pemipihan butir mengindikasikan terjadinya deformasi plastis yang intensif, sedangkan fenomena pengerasan regang terjadi akibat akumulasi dislokasi yang menghambat pergerakan *slip* lanjutan. Temuan ini mengonfirmasi adanya hubungan yang kuat antara evolusi struktur mikro dan peningkatan sifat mekanik pada paduan Al-Mg-Si yang dideformasi secara dingin. Hasil penelitian ini berkontribusi pada optimalisasi parameter canai dingin untuk menghasilkan material teknik dengan kombinasi sifat kekuatan, formabilitas, dan ketahanan terhadap fatik yang sesuai untuk aplikasi di industri pertambangan dan manufaktur berat.

Kata kunci: Al-Mg-Si; Canai Dingin; Deformasi Plastis; Kekerasan; Mikrostruktur.

1. LATAR BELAKANG

Dalam beberapa dekade terakhir, kebutuhan akan material struktural yang ringan namun memiliki kekuatan mekanik tinggi telah mendorong perkembangan paduan berbasis aluminium, terutama dalam sektor transportasi, konstruksi, dan industri berat. Paduan aluminium dikenal memiliki rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, serta kemudahan dalam proses pembentukan (*formability*) (Kaufman & Rooy, 2004). Salah satu kelas paduan yang banyak digunakan adalah paduan seri 6xxx, seperti Al-Mg-Si, yang dapat diperkuat melalui mekanisme presipitasi dan deformasi mekanik.

Paduan Al-Mg-Si secara luas digunakan dalam bentuk ekstrusi dan pelat untuk aplikasi struktural. Dalam industri pertambangan, paduan ini diaplikasikan pada komponen kendaraan *hauling*, sistem penyangga *conveyor*, dan struktur ringan lainnya yang membutuhkan kombinasi antara densitas ringan dan kekuatan tinggi (Totten & MacKenzie, 2003). Karakteristik formabilitas tinggi dan kemampuan deformasi plastis menjadikannya ideal untuk dibentuk melalui proses seperti canai dingin.

Canai dingin merupakan salah satu proses deformasi plastis logam yang dilakukan di bawah temperatur rekristalisasi. Proses ini mampu meningkatkan densitas dislokasi dan mengakibatkan pengerasan regangan (*strain hardening*). Selama proses ini, struktur butir logam mengalami perubahan morfologi menjadi memanjang searah dengan arah rol (Li et al., 2011). Perubahan ini dapat dikarakterisasi secara kuantitatif melalui parameter rasio deformasi butir, yaitu perbandingan antara panjang dan lebar butir kristal. Peningkatan rasio ini mencerminkan derajat deformasi plastis yang dialami material.

Secara mekanik, canai dingin menghasilkan peningkatan kekerasan dan kekuatan tarik, namun disertai dengan penurunan keuletan akibat terakumulasinya dislokasi yang menghambat pergerakan bidang *slip* (Bay et al., 1992). Oleh karena itu, kontrol terhadap derajat deformasi menjadi penting untuk memastikan keseimbangan antara kekuatan dan formabilitas, khususnya untuk aplikasi teknik berat seperti pertambangan, yang mengharuskan komponen bekerja pada beban dinamis dan lingkungan ekstrem.

Namun demikian, kajian literatur menunjukkan adanya *research gap* dalam hal kuantifikasi hubungan antara persen deformasi canai dingin dengan parameter mikrostruktur seperti rasio deformasi butir, serta pengaruhnya terhadap kekerasan pada paduan Al-Mg-Si pasca homogenisasi. Beberapa penelitian sebelumnya lebih banyak menyoroti aspek makro dari canai dingin tanpa mengaitkan perubahan mikrostruktur secara sistematis terhadap sifat mekanik secara spesifik.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh deformasi canai dingin terhadap rasio deformasi butir pada paduan Al-Mg-Si hasil homogenisasi, mengkaji perubahan kekerasan makro sebagai akibat dari peningkatan deformasi, dan menjelaskan keterkaitan antara karakteristik mikrostruktur dan sifat mekanik dalam konteks *strain hardening*.

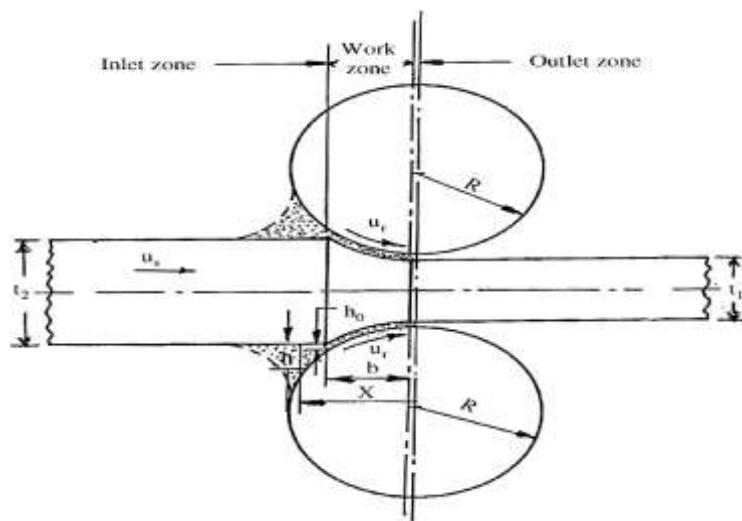
Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap optimasi parameter deformasi dingin untuk menghasilkan material teknik yang memiliki kombinasi sifat formabilitas, kekuatan, dan ketahanan fatik yang sesuai dengan kebutuhan industri pertambangan dan manufaktur berat. Pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh

canai dingin terhadap struktur mikro dan kekerasan akan membantu perancangan komponen yang lebih efisien, memiliki performa tinggi, dan umur pakai yang lebih panjang.

2. KAJIAN TEORITIS

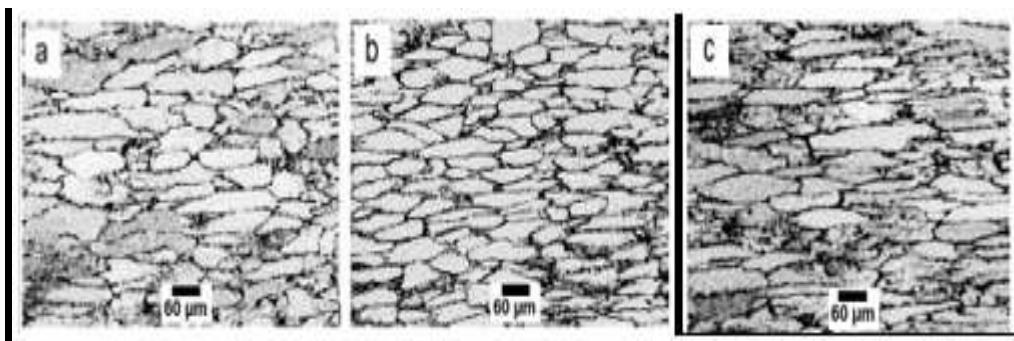
Proses Pencanaian

Proses pencanaian (*rolling*) merupakan salah satu metode deformasi plastis di mana material logam dilewatkan di antara dua rol yang berputar. Tekanan yang diberikan oleh rol menyebabkan terjadinya reduksi ketebalan material secara bertahap (Callister & Rethwisch, 2011). Selama proses berlangsung, struktur butir logam mengalami perubahan dari bentuk awal yang umumnya *equiaxed* menjadi butir yang terdeformasi atau terelongasi akibat regangan plastis. Berdasarkan kondisi temperaturnya, proses pencanaian diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu canai dingin (*cold rolling*) dan canai panas (*hot rolling*). Skema umum proses pencanaian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses pencanaian (Singh et al., 2008).

Selama proses pencanaian, struktur butir logam mengalami perubahan yang signifikan, dari bentuk awal yang menyerupai *equiaxed* menjadi butir yang terdeformasi dan memanjang akibat regangan plastis. Pada proses canai dingin, deformasi dilakukan pada temperatur di bawah temperatur rekristalisasi—umumnya pada temperatur ruang—sehingga material mengalami mekanisme *strain hardening*. Semakin besar persentase reduksi ketebalan yang diberikan, semakin tinggi pula tingkat anisotropi yang muncul pada material. Gambaran struktur mikro material setelah mengalami proses canai dingin disajikan pada Gambar 2.

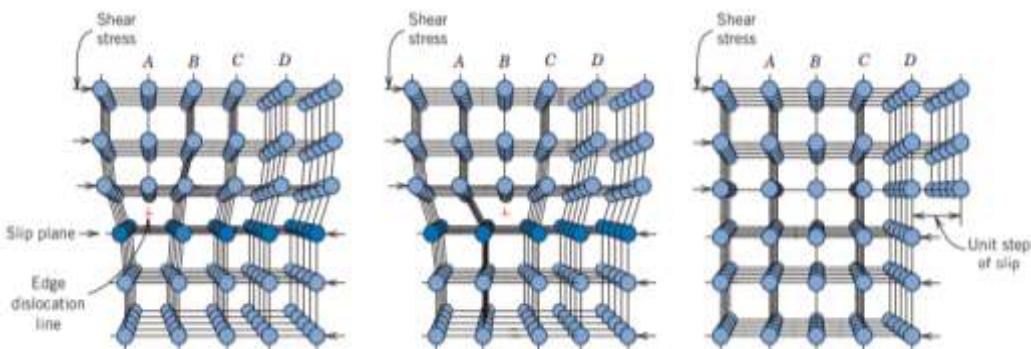


Gambar 2. Struktur mikro paduan paduan Al-0,98Mg-0,63Si (% berat) hasil canai dingin dengan reduksi (a) 50 %, (b) 60 %, dan (c) 70 % (Alhamidi & Dewi, 2018).

Proses Deformasi Plastis

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau dimensi material yang terjadi akibat adanya pembebanan. Secara umum, deformasi diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Pada deformasi elastis, beban yang diberikan masih berada pada tingkat rendah sehingga pergeseran atom yang terjadi bersifat sementara; atom-atom akan kembali ke posisi semula setelah beban dilepaskan. Sebaliknya, pada deformasi plastis, pergeseran atom bersifat permanen sehingga material tidak dapat kembali ke bentuk asal meskipun pembebanan dihentikan (Sofyan, 2021).

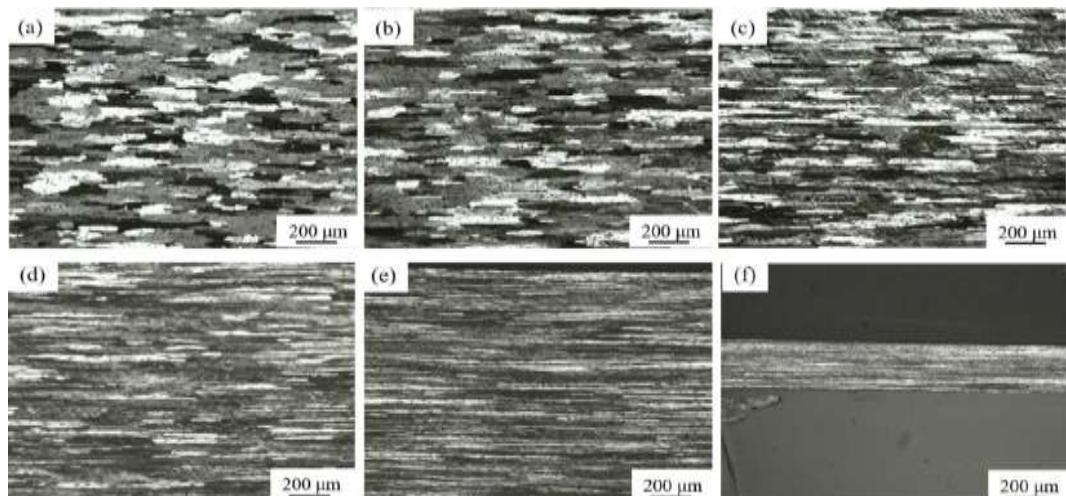
Fenomena deformasi plastis sangat berkaitan dengan mekanisme pergerakan dislokasi. Dislokasi didefinisikan sebagai perpindahan satu baris atom sepanjang arah tertentu untuk mengakomodasi regangan akibat pembebanan. Proses deformasi plastis yang terjadi melalui pergerakan dislokasi dikenal sebagai *slip* (Sofyan, 2021). Bidang tempat berlangsungnya *slip* disebut bidang *slip* (*slip plane*), sedangkan arah pergerakannya dinamakan arah *slip* (*slip direction*). Slip pada logam cenderung terjadi pada bidang dan arah kristalografi yang memiliki kerapatan atom tertinggi, karena konfigurasi tersebut membutuhkan energi minimum untuk menggerakkan atom-atom tersebut. Mekanisme pergerakan dislokasi ini disebut *glide*. Ilustrasi pergerakan dislokasi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi pergerakan dislokasi (Sofyan, 2021).

Penelitian Sebelumnya

Penelitian Zhou (Zhou et al., 2018) menunjukkan bahwa proses canai dingin pada paduan Al-1Mg-0,6Si dengan variasi reduksi 10–90% menyebabkan perubahan morfologi butir menjadi terelongasi searah canai, dengan tingkat elongasi yang meningkat seiring besarnya deformasi. Struktur mikro juga memperlihatkan keberadaan partikel intermetalik berukuran kasar (3–10 μm) dan halus (<1 μm), berupa Mg_2Si dan $\text{Al}(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}$.



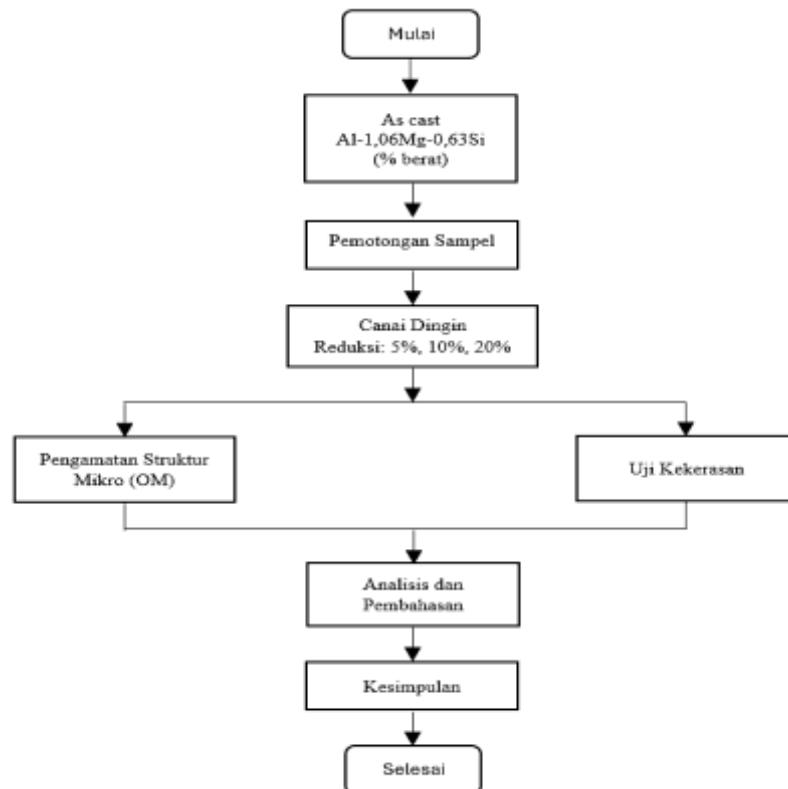
Gambar 4. Struktur mikro paduan Al-1Mg-0,6Si (% berat) di bagian tengah; (a) kondisi diberi perlakuan anil dan hasil canai dingin dengan deformasi (b) 10%, (c) 30%, (d) 50%, (e) 70%, (f) 90% (Zhou et al., 2018).

Penelitian Kurnia pada paduan Al-4,7Zn-1,8Mg mengonfirmasi bahwa deformasi 5–20% menghasilkan peningkatan elongasi butir serta munculnya *slip band* dan *cross slip* pada deformasi tinggi (20%) (Kurnia, 2016). Nilai kekerasan meningkat signifikan mengikuti persentase reduksi, sebagai akibat dari mekanisme pengerasan regang melalui akumulasi dislokasi.

3. METODE PENELITIAN

Diagram Alir Penelitian

Tahap penelitian dilakukan dilakukan secara bertahap sebagaimana digambarkan pada diagram alir penelitian pada Gambar 5.

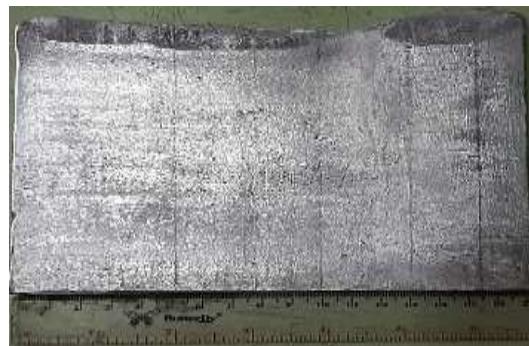


Gambar 5. Diagram alir penelitian.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi mesin potong logam dan timbangan digital untuk persiapan sampel, serta mesin canai *Onoroll* untuk proses pencanaian dingin. Karakterisasi dilakukan menggunakan mikroskop optik *Zeiss Pritomech* dan mesin uji kekerasan *Rockwell E*.

Bahan yang digunakan adalah sampel *as-cast* Al-Mg-Si (Gambar 6). Bahan pendukung untuk karakterisasi meliputi kertas amplas *grit* #120 hingga #2000, pasta alumina sebagai media pemoles, dan larutan etsa *Keller*.



Gambar 6. Sampel *as cast* Al-Mg-Si.

Metodologi

Pemotongan Sampel

Skema pemotongan pelat berukuran $17 \times 15 \times 1,5$ cm disesuaikan dengan bentuk cetakan, sehingga diperoleh beberapa sampel dengan ukuran berbeda. Sampel untuk proses pencanaian dingin memiliki dimensi $60 \times 20 \times 10$ mm. Pemotongan dilakukan menggunakan gergaji tangan untuk menghindari terjadinya perubahan struktur mikro.

Jumlah sampel yang digunakan untuk proses pencanaian dingin adalah tiga buah. Persiapan sampel yang terkendali pada tahap ini penting untuk memastikan bahwa perubahan struktur mikro dan sifat mekanik yang diamati pada tahap berikutnya benar-benar berasal dari perlakuan canai dingin, bukan dari variabilitas sampel awal.

Proses Canai Dingin

Proses pencanaian dingin dilakukan menggunakan mesin canai *Onoroll* tipe *two-high mills* merek ONO, yang memiliki kapasitas penekanan 20 tonF, kecepatan operasi 8 mm/menit, serta jari-jari rol sebesar 52 mm, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Setelah sampel menjalani perlakuan homogenisasi dan mencapai temperatur ruang, sampel dipotong menjadi dimensi $60 \times 20 \times 10$ mm, kemudian dibersihkan dari pengotor permukaan menggunakan amplas untuk memastikan kualitas deformasi yang seragam.

Tahap selanjutnya adalah menyiapkan mesin canai dan mengatur celah antar-rol sesuai dengan besarnya reduksi yang diinginkan. Pengaturan ini penting untuk menghasilkan distribusi regangan yang konsisten selama proses deformasi. Proses pencanaian dilakukan dengan metode satu arah (*unidirectional rolling*), sehingga regangan yang dihasilkan terfokus dalam satu orientasi deformasi. Hal ini memungkinkan evaluasi yang lebih akurat terhadap perubahan struktur mikro maupun sifat mekanik akibat deformasi dingin pada paduan Al-Mg-Si.



Gambar 7. Mesin canai *Onoroll*.

Berikut persamaan matematika dan perhitungan deformasi proses canai dingin yang digunakan dalam penelitian ini, ditunjukkan pada (3.1) dan (3.2).

$$\% \text{ reduksi} = \frac{H_o - H_f}{H_o} \times 100 \% \quad (3.1)$$

$$F = 1,155 \cdot \sigma_y \cdot w \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (3.2)$$

Perhitungan jumlah pass untuk proses canai dingin: $\Delta h = 0,52 \text{ mm}$

Tabel 1. Jumlah *pass* untuk tiap sampel.

Deformasi	Jumlah Pass
5%	$0,96 = 1 \text{ kali pass}$
10%	$1,92 = 2 \text{ kali pass}$
20%	$3,8 = 4 \text{ kali pass}$

Pengamatan Struktur Mikro

Sebelum dilakukan pengujian, sampel melalui tahap preparasi permukaan untuk memastikan kualitas observasi struktur mikro. Proses preparasi dimulai dengan pengamplasan bertahap menggunakan kertas amplas dengan *grit* #120 hingga #2000 untuk menghilangkan ketidakteraturan permukaan dan menghasilkan topografi yang seragam. Setelah pengamplasan, sampel dipoles menggunakan bubuk alumina AP-A berukuran $0,3 \mu\text{m}$ dengan media kain beludru. Tahap pemolesan ini bertujuan untuk memperoleh permukaan yang halus, reflektif, dan bebas goresan sehingga memungkinkan identifikasi fitur mikrostruktural secara lebih akurat. Selanjutnya, sampel diberikan perlakuan etsa menggunakan larutan *Keller* selama 60–120 detik. Sampel yang telah dietsa kemudian dibilas dengan air mengalir, direndam dalam alkohol untuk menghilangkan sisa larutan etsa, dan dikeringkan agar siap untuk diamati.

Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik *Zeiss Pritomech* (Gambar 8). Pada sampel proses canai dingin, pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengevaluasi perubahan morfologi butir yang terjadi sebagai akibat dari deformasi plastis. Analisis ini bertujuan untuk memahami respons mikrostruktur terhadap regangan yang diberikan, terutama terkait pemanjangan butir dan pembentukan anisotropi. Untuk mendukung evaluasi tersebut, dilakukan perhitungan rasio deformasi butir (L/d), yang merepresentasikan perbandingan antara panjang butir (L) dan diameter butir (d) sebagai parameter kuantitatif perubahan bentuk butir setelah deformasi.



Gambar 8. Mikroskop optik *Zeiss Pritomech*.

Pengukuran rasio L/d dilakukan menggunakan aplikasi *Labscope* dengan menarik enam garis pengukuran untuk masing-masing parameter L dan d pada setiap citra struktur mikro. Metode pengukuran berulang ini diterapkan untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif, sehingga interpretasi pengaruh pencanaian dingin terhadap evolusi struktur mikro dapat dilakukan secara lebih akurat dan reliabel.

Pengujian Kekerasan

Penelitian ini menggunakan metode pengujian kekerasan makro untuk mempelajari perubahan sifat mekanik pada sampel *as-cast* yang telah diberi perlakuan homogenisasi. Pengujian kekerasan makro dilakukan untuk memperoleh gambaran mengenai ketahanan material terhadap deformasi plastis lokal pada skala yang lebih besar, serta untuk menilai homogenitas kekerasan di seluruh bagian sampel.

Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji kekerasan *Hoytom Minor 69* yang memenuhi standar ASTM E-18. Instrumen ini dilengkapi dengan *indenter* bola baja berdiameter 1/8 inci dan beban uji sebesar 100 kgf, sehingga menghasilkan nilai kekerasan yang stabil dan dapat dibandingkan pada tiap sampel. Untuk meningkatkan keandalan data, pengukuran dilakukan pada lima titik berbeda pada setiap sampel, sehingga variabilitas lokal

dapat dianalisis dan tingkat keseragaman kekerasan dapat dievaluasi. Mesin pengujian yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 9. Mesin pengujian kekerasan *Hoytom Minor 69*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Aktual Proses Canai Dingin

Berikut hasil aktual dari proses canai dingin dengan deformasi 5, 10, dan 20% pada penelitian ini yang ditunjukkan pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Tabel 2. Perhitungan canai dingin deformasi 5%.

Pass ke-	H_o (mm)	Δh (mm)	H_f (mm)
1	10	0,5	9,5

Tabel 3. Perhitungan canai dingin deformasi 10%.

Pass ke-	H_o (mm)	Δh (mm)	H_f (mm)
1	10	0,5	9,5
2	9,5	0,5	9

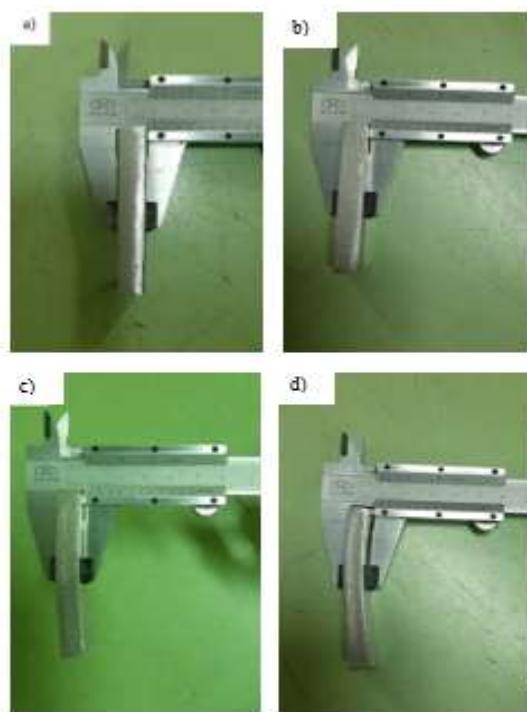
Tabel 4. Perhitungan canai dingin deformasi 20%.

Pass ke-	H_o (mm)	Δh (mm)	H_f (mm)
1	10	0,5	9,5
2	9,5	0,5	9
3	9	0,5	8,5
4	8,5	0,5	8

Berdasarkan data pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4, diketahui bahwa nilai celah roll (Δh) yang terbentuk adalah 0,5 mm, bukan 0,52 mm sebagaimana nilai yang diatur secara nominal. Perbedaan ini disebabkan oleh keberadaan pegas (*spring effect*) pada mesin canai *Onoroll*, sehingga celah aktual yang terbentuk tidak sepenuhnya bersifat kaku (*rigid*) dan

mengalami sedikit deviasi selama proses pencanaian. Fenomena ini umum terjadi pada mesin canai tipe *two-high mills*, di mana gaya balik elastis dan deformasi rol menyebabkan penyimpangan nilai celah aktual terhadap nilai teoritis (Karhausen & Korhonen, 2018; Ray, 2015; Samodurova et al., 2020).

Gambar 10 menunjukkan perubahan morfologi sampel sebelum dan sesudah proses pencanaian dingin pada variasi reduksi 5%, 10%, dan 20%. Pada reduksi 5%, sampel tidak menunjukkan perubahan bentuk yang signifikan setelah deformasi, yang mengindikasikan bahwa regangan yang terjadi masih dalam batas elastis-plastis awal sehingga tidak menghasilkan perubahan geometri yang mencolok. Sebaliknya, pada reduksi 10% dan 20%, sampel tampak mengalami kelengkungan. Kecenderungan ini umumnya disebabkan oleh distribusi deformasi yang tidak seragam sepanjang panjang sampel, yang dapat dipengaruhi oleh kondisi gesekan pada permukaan rol, variasi kekasaran permukaan sampel, atau ketidaksejajaran gaya selama proses pencanaian (Dieter, & Rethwisch, 1987; Hosford, & Caddel, 2011).



Gambar 10. (a) Sampel *as cast* sebelum dideformasi dan (b-d) sampel hasil proses canai dingin setelah dideformasi dengan reduksi 5, 10 dan 20%.

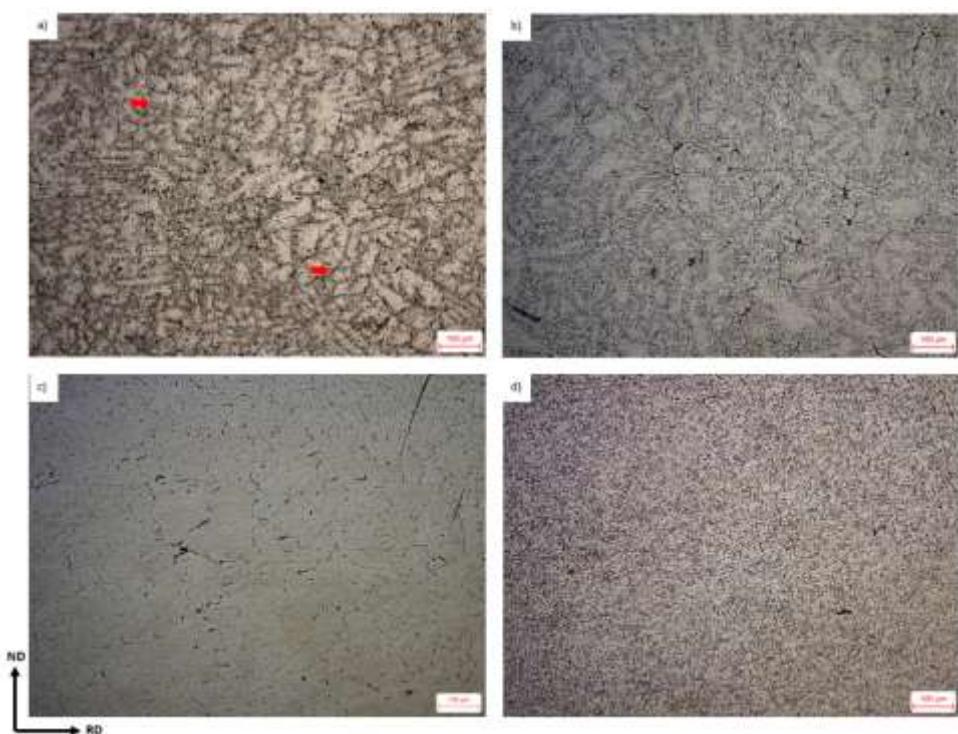
Kelengkungan yang muncul pada reduksi lebih besar menunjukkan bahwa peningkatan regangan plastis menghasilkan perubahan geometri yang lebih nyata, serta dapat mengindikasikan terbentuknya gradien regangan pada bagian tertentu dari sampel. Hal ini

menjadi penting dalam mengevaluasi efek deformasi terhadap evolusi struktur mikro dan potensi anisotropi mekanik pada material (Humphreys & Hatherly, 2004).

Analisis Struktur Mikro dan Deformasi Butir

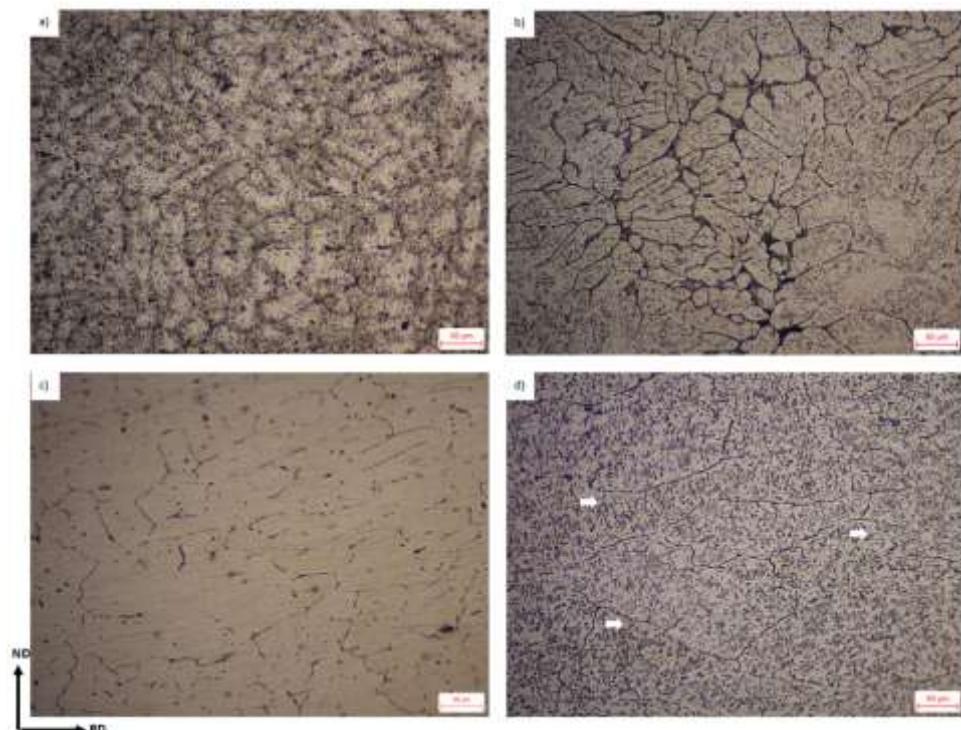
Gambar 11(a) dan Gambar 12(a) menunjukkan struktur mikro paduan pasca homogenisasi yang memperlihatkan morfologi dendritik dengan ukuran *Secondary Dendrite Arm Spacing* (SDAS) sebesar 36,88 μm . Terlihat pula adanya fasa interdendritik berwarna gelap yang ditunjukkan oleh panah merah. Keberadaan fasa ini umumnya diidentifikasi sebagai fasa eutektik atau intermetalik yang terbentuk selama proses pembekuan awal sebelum homogenisasi (Radetić et al., 2022).

Sementara itu, Gambar 11(b-d) dan 12(b-d) menyajikan evolusi struktur mikro paduan setelah perlakuan canai dingin dengan tingkat deformasi sebesar 5%, 10%, dan 20%, masing-masing pada pembesaran $100\times$ dan $200\times$. Pada deformasi 5%, morfologi butir relatif masih utuh, dengan sedikit perubahan orientasi. Hal ini disebabkan oleh rendahnya energi deformasi plastis yang diberikan, yang belum cukup untuk menginisiasi perubahan signifikan dalam struktur mikro. Energi ini sebagian besar tersimpan dalam bentuk energi regangan internal yang diasosiasikan dengan peningkatan densitas dislokasi (Callister & Rethwisch, 2011).



Gambar 11. Struktur mikro paduan Al-1,06Mg-0,63Si (% berat) (a) pada kondisi setelah homogenisasi dan setelah canai dingin (b) 5%, (c) 10%, dan (d) 20%. Panah merah menunjukkan fasa interdendritik.

Perubahan mulai terlihat pada tingkat deformasi 10%, di mana butir-butir menunjukkan kecenderungan pemipihan searah dengan arah canai. Ini menunjukkan bahwa energi deformasi telah cukup untuk mengaktifkan gerakan dislokasi secara lebih intensif. Namun, *slip line* masih belum tampak jelas pada pembesaran $200\times$, sebagaimana terlihat pada Gambar 12(c). Hasil kuantifikasi deformasi mikro menunjukkan bahwa rasio deformasi butir (*grain aspect ratio*, L/d) meningkat dari 1,16 menjadi 1,56, sebagaimana tercatat dalam Tabel 4.2, yang diperoleh melalui aplikasi *Labscope*.



Gambar 12. Struktur mikro paduan Al-1,06Mg-0,63Si (% berat) (a) pada kondisi setelah homogenisasi dan setelah canai dingin (b) 5%, (c) 10%, dan (d) 20%. Panah putih menunjukkan *slip line*.

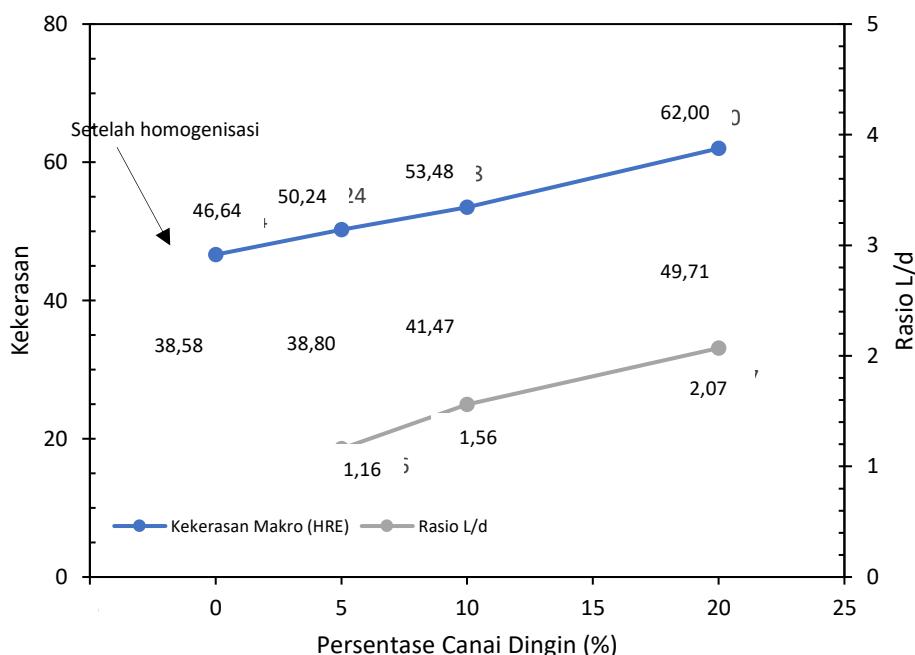
Peningkatan deformasi hingga 20% menghasilkan struktur mikro dengan pemipihan butir yang lebih nyata dan elongasi searah canai. Namun, pada Gambar 11(d), keberadaan fasa kedua seperti partikel eutektik Si dan fasa intermetalik Fe-rich mengganggu kejelasan morfologi pemipihan butir. Kehadiran fasa-fasa tersebut dapat berperan sebagai penghambat pergerakan dislokasi serta meningkatkan kekerasan paduan. Sementara itu, Gambar 12(d) mengindikasikan terbentuknya *slip line* dan rasio deformasi butir meningkat signifikan menjadi 2,07 (Tabel 5), menunjukkan intensifikasi deformasi plastis dan arah orientasi butir yang lebih jelas.

Tabel 5. Pengaruh persentase canai dingin terhadap rasio deformasi butir paduan *as cast* Al-Mg-Si.

Percentase Canai Dingin (%)	Rasio Deformasi Butir (L/d)
5	1,16
10	1,56
20	2,07

Analisis Nilai Kekerasan Paduan

Hasil pengujian kekerasan makro serta rasio deformasi butir pada paduan *as cast* sebelum dan sesudah proses pencanaian dingin dengan tingkat deformasi 5%, 10%, dan 20% ditunjukkan pada Gambar 13. Pada tingkat deformasi 5%, terjadi peningkatan nilai kekerasan makro dibandingkan kondisi awal sebelum dilakukan pencanaian. Peningkatan ini berkaitan dengan fenomena pengerasan regang (*work hardening*), di mana deformasi plastis menyebabkan akumulasi dislokasi yang saling berinteraksi dan saling menghambat pergerakannya, sehingga material menunjukkan peningkatan kekerasan dibandingkan keadaan awal (Sofyan, 2021). Besarnya peningkatan kekerasan yang diamati mencapai 7,7%, dari 46,64 HRE menjadi 50,24 HRE.



Gambar 13. Pengaruh persentase canai dingin terhadap kekerasan dan rasio L/d paduan *as cast* Al-Mg-Si.

Seiring dengan meningkatnya derajat deformasi hingga 10%, nilai kekerasan makro paduan menunjukkan kenaikan, meskipun peningkatannya tidak terlalu signifikan. Hal ini diduga disebabkan oleh distribusi deformasi yang tidak merata pada seluruh bagian sampel,

yang tercermin dari peningkatan rasio deformasi butir yang relatif kecil. Pada kondisi ini, kekerasan makro meningkat sebesar 6,5%, yaitu dari 50,24 HRE menjadi 53,48 HRE.

Pada derajat deformasi 20%, kekerasan makro juga mengalami peningkatan. Fenomena ini sesuai dengan mekanisme pengerasan regang, di mana deformasi plastis menyebabkan peningkatan kerapatan dislokasi dan regangan kisi. Akumulasi dislokasi tersebut menghasilkan hambatan yang lebih besar terhadap pergerakan dislokasi baru, sehingga paduan menunjukkan peningkatan kekerasan seiring bertambahnya persen deformasi (Alhamidi & Dewi, 2018). Pada kondisi ini, peningkatan kekerasan yang diperoleh mencapai 16%, dari 53,48 HRE menjadi 62 HRE.

Secara keseluruhan, seluruh sampel paduan yang mengalami pencanaian dingin menunjukkan tren peningkatan kekerasan seiring bertambahnya derajat deformasi, konsisten dengan teori pengerasan regang dan hasil-hasil penelitian sebelumnya. (Alhamidi & Dewi, 2018) melaporkan bahwa deformasi plastis melalui proses canai dingin meningkatkan energi internal material melalui kenaikan kerapatan dislokasi. Peningkatan ini menghasilkan regangan kisi dan ketidakteraturan struktur kristal, yang pada akhirnya memicu peningkatan nilai kekerasan paduan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi derajat deformasi pada proses canai dingin sebesar 5%, 10%, dan 20% terhadap perubahan struktur mikro, rasio deformasi butir, serta sifat mekanik berupa kekerasan pada paduan *as-cast* Al-Mg-Si. Proses ini ditujukan untuk mengevaluasi sejauh mana deformasi plastis tanpa perlakuan panas mampu meningkatkan performa material secara mikrostruktural maupun mekanik.

Namun, studi ini memiliki sejumlah keterbatasan, antara lain belum dilakukannya analisis kristalografi lanjutan seperti pengamatan tekstur atau misorientasi butir menggunakan EBSD, serta karakterisasi mikrostruktur yang masih terbatas pada pengamatan optik konvensional. Selain itu, faktor-faktor seperti kecepatan canai (*strain rate*) dan variasi suhu selama proses deformasi tidak dijelaskan secara eksplisit.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa peningkatan deformasi canai dingin menghasilkan efek signifikan terhadap evolusi struktur mikro dan peningkatan kekerasan material. Pada deformasi 5%, struktur mikro belum menunjukkan perubahan besar, sementara deformasi 10% dan 20% menyebabkan pemipihan butir yang lebih jelas dan munculnya *slip line*, serta peningkatan rasio deformasi butir dari 1,16 menjadi 2,07. Hal ini menunjukkan terjadinya deformasi plastis yang semakin intensif. Sejalan dengan perubahan struktur mikro

tersebut, nilai kekerasan paduan juga meningkat secara bertahap, yakni sebesar 7,7% pada deformasi 5%, 6,5% pada deformasi 10%, dan mencapai 16% pada deformasi 20%. Peningkatan ini berkaitan erat dengan mekanisme pengerasan regang (*work hardening*), di mana akumulasi dislokasi akibat deformasi plastis menghasilkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi baru, sehingga meningkatkan resistansi material terhadap deformasi lanjutan.

Untuk pengembangan penelitian berikutnya, perlu dilakukan karakterisasi mikrostruktur menggunakan SEM dan EBSD guna memperoleh gambaran komprehensif mengenai orientasi butir, tekstur kristal, serta distribusi fasa kedua. Selain itu, kajian terhadap variabel proses seperti *strain rate*, arah deformasi, dan perlakuan anil setelah deformasi penting dilakukan untuk memahami mekanisme evolusi mikrostruktur secara lebih detail. Penelitian lanjutan juga direkomendasikan untuk memasukkan pengujian mekanik tambahan, meliputi uji tarik, impak, dan fatik agar performa material hasil canai dingin dapat dinilai secara lebih menyeluruh dalam konteks aplikasi industri.

DAFTAR REFERENSI

- Alhamidi, A., & Dewi, M. (2018). Microstructural and mechanical properties AA6061 processed by cold rolling and aging. *VANOS Journal of Mechanical Engineering Education*, 3(1), 59–68. <https://doi.org/10.30870/vanos.v3i1.3686>
- Bay, B., Hansen, N., & Kuhlmann-Wilsdorf, D. (1992). Microstructural evolution in rolled aluminium. *Materials Science and Engineering: A*, 158(2), 139–146. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(92\)90002-I](https://doi.org/10.1016/0921-5093(92)90002-I)
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2010). *Materials science and engineering* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Dieter, G. E. (1987). *Metalurgi mekanik* (S. Djaprie, Trans.). Erlangga.
- Hosford, W. F., & Caddell, R. M. (2011). *Metal forming: Mechanics and metallurgy* (4th ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976940>
- Humphreys, F. J., & Hatherly, M. (2004). *Recrystallization and related annealing phenomena* (2nd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008044164-1/50016-5>
- Karhausen, K. F., & Korhonen, A. S. (2018). Rolling of aluminum. In *Handbook of aluminum* (Vol. 2). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781351045636-140000436>
- Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2004). *Aluminum alloy castings: Properties, processes, and applications*. ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.aacppa.9781627083355>
- Kurnia, R. (2016). *Studi pengaruh canai dingin dan temperatur anil terhadap rekristalisasi serta sifat mekanik paduan Al-4.7Zn-1.8Mg (% berat) hasil squeeze casting* (Skripsi). Universitas Indonesia.
- Li, H. L., Yuan, X. G., Wu, M. F., & Huang, H. J. (2011). Effect of rolling process on the microstructure of AlMgSi alloy. *Advanced Materials Research*, 399–401, 40–45. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.399-401.40>
- Radetić, T., Popović, M., Alić, A., Markoli, B., Naglić, I., & Romhanji, E. (2022). Effect of homogenization temperature on microstructure and mechanical properties of Al–Mg–

- Si alloy containing low-melting point elements. *Journal of Alloys and Compounds*, 902, 163719. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163719>
- Ray, S. (2016). *Principles and applications of metal rolling*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139879293>
- Samodurova, M. N., Karandaeva, O. I., & Khramshin, V. R. (2020). Calculating power parameters of rolling mill based on model of deformation zone with four-roll passes. *Machines*, 8(4), 73. <https://doi.org/10.3390/machines8040073>
- Singh, P., & Nath, Y. (2008). An efficient thermal analysis for the prediction of minimum film thickness in inlet zone at high speed lubricated cold strip rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 205(1-3), 238-249. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.010>
- Sofyan, B. T. (2021). *Pengantar material teknik* (2nd ed.). UNHAN RI Press.
- Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (2003). *Handbook of aluminum: Volume 1—Physical metallurgy and processes*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203912591>
- Zhou, D., Du, W., Wen, X., Qiao, J., Wei, L., & Yang, F. (2018). Local deformation and texture of cold rolled AA6061 aluminium alloy. *Materials*, 11(10), 1866. <https://doi.org/10.3390/ma11101866>