



Paduan Aluminium Berdasarkan Sifat Mekanik: Studi Literatur Singkat

Yasmina Amalia^{1*}, Sudaryanto¹, Fitri Ayu Mardhatila¹, Rahmad Kristiardi¹, Yahya Jati Kuncoro²

¹Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan “Nasional” Veteran Yogyakarta, Indonesia

²Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

*Korespondensi: yasminaamalia@upnyk.ac.id

Info Artikel

Diterima 22 Juni
2022

Disetujui 19
Agustus 2022

Dipublikasikan 21
Agustus 2022

Keywords:
Aluminium;
Mekanik; Mineral
Struktur; Uji Tarik

© 2022 The
Author(s): This is
an open-access
article distributed
under the terms of
the Creative
Commons
Attribution
ShareAlike (CC BY-
SA 4.0)



Abstrak

Selama beberapa waktu terakhir paduan aluminium semakin banyak digunakan karena sifat-sifat yang menguntungkan. Kemudian, banyak proyek penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan lebih banyak pemahaman yang komprehensif tentang kinerja struktural untuk mengembangkan formula desain yang akurat dan andal. Ruang lingkup makalah ini adalah untuk memberikan tinjauan penelitian komprehensif yang dilaporkan pada paduan aluminium. Makalah ini menyajikan gambaran tentang studi penelitian tentang sifat mekanik dengan uji tarik dan uji kekerasan paduan aluminium, serta pengaruh penambahan Cu, Zn, dan Mg untuk memperkuat sifat mekanik dari Al. Hasilnya menunjukkan peningkatan efek penguatan dengan peningkatan kandungan Cu. Sedangkan kekuatan paduan menurun dengan meningkatkan rasio Zn/Mg. Saat kandungan Cu meningkat, kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan kekerasan penurunan dengan peningkatan rasio Zn/Mg.

Abstract

In recent times, aluminum alloys have been increasingly used because of their beneficial properties. After that, many research projects were carried out to gain a more comprehensive understanding of their structures performance and develop accurate design formulas. The scope of this paper is to provide a comprehensive research report on aluminum alloys. This paper presents an overview of the study of mechanical properties by tensile and hardness tests of aluminum alloys, as well as the effect of adding Cu, Zn, and Mg to strengthen the mechanical properties of Al. The results showed an enhanced effect with increasing Cu content. In contrast, the strength of the alloy decreases by increasing the ratio of Zn/Mg. As the Cu content increases, the tensile strength, yield strength, and elongation increase. Meanwhile, tensile strength, yield strength, and hardness decreased with increasing Zn/Mg ratio.

1. Pendahuluan

Aluminium banyak digunakan dalam beberapa tahun terakhir guna memenuhi kebutuhan yang semakin kompleks (Amalia & Samuel, 2020). Aluminium merupakan salah satu logam non ferrous yang memiliki banyak keunggulan dan bisa diaplikasikan hampir di semua bidang, sehingga industri aluminium memiliki produk yang banyak digunakan di masyarakat (A. S. F. Yasmina Amalia, 2021). Hal ini juga didukung karena paduan aluminium memiliki sifat yang menguntungkan. Salah satu yang dominan adalah tahan terhadap korosi dan memiliki keuletan yang tinggi (Georgantzia et al., 2021).

Dalam kerangka keberlanjutan kemajuan teknologi terkini menghasilkan sistem struktur aluminium inovatif yang lebih efisien dari sudut pandang lingkungan dan ekonomis dibandingkan dengan baja dan beton. Secara khusus, kemajuan dalam proses pembuatan paduan aluminium mengurangi energi yang dibutuhkan lebih dari 75% karena menurunkan jejak karbon industri hampir 40% (Radlbeck et al., 2006). Selanjutnya untuk penurunan emisi karbon dioksida mobil, paduan aluminium struktural 100% dapat didaur ulang, sehingga dapat dikatakan sebagai *green metal* (Aboulkhair et al., 2019).

Penerapan paduan aluminium sebagai bahan struktural meningkat selama beberapa tahun terakhir karena sifat menguntungkan, yaitu rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kemudahan fabrikasi, kemampuan kerja tingkat tinggi, keuletan yang cukup besar, konduktivitas termal yang sangat baik, ketahanan tinggi terhadap korosi dan penampilan menarik pada hasil akhir alami mereka. Karena itu, 25% dari produksi aluminium global saat ini digunakan di sektor konstruksi. Kemudahan dalam pembuatan paduan aluminium untuk bahan struktural memungkinkan produksi bentuk penampang yang kompleks. Paduan aluminium cocok untuk pengembangan struktur dibandingkan bahan konvensional seperti beton atau baja. Ketahanan korosi yang tinggi membuat aluminium sangat cocok diaplikasikan di lingkungan laut tanpa perlindungan permukaan serta biaya perawatan yang rendah. Daya tahan terhadap korosi menjadikan struktur aluminium dapat mempertahankan sifat mekaniknya bahkan dengan penambahan variasi suhu yang tinggi.

Aluminium merupakan logam ringan dan memiliki berat 34% dari besi dengan volume yang sama dibandingkan tembaga. Berat aluminium juga lebih berat 1,5 kali dibandingkan dengan magnesium. Aluminium murni memiliki sifat cor yang baik meskipun memiliki sifat mekanis yang buruk (A. B. Yasmina Amalia, 2021). Sebagaimana logam lain, untuk mengubah sifat aluminium lebih kuat, maka dipadu dengan unsur lain sesuai kebutuhan dan penggunaannya (Wang & Starink, 2005). Paduan aluminium banyak digunakan secara komersial karena mempunyai kekuatan lebih dibanding aluminium murni. Unsur yang biasa ditambahkan kedalam paduan aluminium adalah Zn, Mg, dan Cu (Ramesh et al., 2021).

Paduan aluminium sudah digunakan secara luas dalam berbagai bidang sebagai komponen struktur pendukung dan utama pada kegiatan konstruksi dan industri (Husna, 2008). Paduan Al-Zn-Mg-Cu adalah paduan yang telah digunakan secara luas untuk badan mobil, pesawat terbang, kereta api, dan bidang manufaktur maju lainnya (Liu et al., 2015). Performa komprehensif paduan Al-Zn-Mg-Cu dapat meningkat secara signifikan melalui desain komposisi dan optimasi perlakuan panas (Chiu et al., 2020).

Penerapan paduan aluminium tergantung pada hasil pengujiannya. Selain angka kekerasan, kekuatan tarik, titik luluh dan perpanjangan adalah sifat yang paling umum digunakan untuk menentukan pemanfaatan dari aluminium (Sulamet-Ariobimo et al., 2016). Literatur review pada paduan aluminium ini bertujuan untuk memberikan tinjauan komprehensif tentang gambaran umum paduan aluminium, struktur mikro, dan sifat mekanik pada material aluminium.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur yaitu menggunakan data yang didapat bukan dari observasi langsung. Data yang ditemukan diambil dari hasil penelitian sebelumnya, kemudian dilakukan kegiatan identifikasi dan analisis mengenai topik yang dibahas. Tujuan dari metode ini adalah mengulas beberapa jurnal terkait pemanfaatan paduan aluminium untuk struktur mekanik dengan data yang digunakan berupa kumpulan jurnal dan referensi terbaru.

Sumber data yang digunakan berupa jurnal penelitian yang telah dipublikasikan di beberapa database Elsevier, Google Scholar, dan Portal Garuda. Pencarian literatur dilakukan bulan Mei-Juli 2022. Pencarian literatur menggunakan strategi PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis). Pertama penulis mencari literatur di berbagai database dan telah ditemukan sebanyak 150 jurnal. Kemudian hasil keseluruhan jurnal difiltrasi berdasarkan kesesuaian judul. Selanjutnya jurnal yang memiliki judul yang relevan ditinjau berdasarkan abstrak. Dari tinjauan abstrak akan difiltrasi berdasarkan hasil dan pembahasannya. Pada tahap peninjauan hasil dan pembahasan, didapatkan sebanyak 24 jurnal yang berasal dari 22 database Elsevier dan 2 database Google Scholar dan Portal Garuda. Selain itu ada 4 buku yang digunakan untuk sumber data pendukung.

3. Hasil

Paduan aluminium telah banyak berkontribusi untuk aplikasi struktural, dimana aplikasi tersebut dapat memungkinkan pengurangan total berat struktural. Aplikasi aluminium struktural bersama dengan informasi singkat disajikan pada Tabel 1. Saat ini ada empat spesifikasi desain internasional untuk desain struktural paduan aluminium, seperti yang tercantum pada Tabel 2.

Tabel 1. Contoh Paduan Aluminium untuk Struktur Konstruksi (Georgantzia et al., 2021).

No.	Lokasi	Deskripsi
1.	The Sage Gateshead, Gateshead Quays, UK	Aluminium digunakan untuk mendukung <i>glazing system</i>
2.	Gaylord Texan Resort & Convention Center, Grapevine, Texas, USA	Atapnya terbuat dari rangka aluminium berlapis kaca
3.	Ferrari World, Abu Dhabi, UAE	Atap aluminium terbesar di dunia
4.	The Iceberg Skating Palace, Sochi, Russia	Aluminium adalah salah satu bahan utama yang digunakan untuk konstruksi.
5.	The Crystal, London, UK	Atapnya terbuat dari daur ulang aluminium.

Tabel 2. Spesifikasi Desain Internasional untuk Struktur Paduan Aluminium

No.	Standar Internasional	Judul Standar (deskripsi)
1.	Chinese Standard: GB 50429-2007 (Georgantzia et al., 2021)	Kode untuk desain aluminium struktur
2.	European Committee for Standardization: BS EN 1999:2007 (European Standard, 2009)	Desain untuk aluminium struktur
3.	Australian/New Zealand Standard: AS/NZS 1664:1997 (Standard, 1997)	Aluminium Struktur
5.	The Aluminum Association: AA 2020 (Becker et al., 2015)	Manual Desain Aluminium

Paduan aluminium dibagi menjadi 2 kategori yaitu kategori cor dan kategori tempa. Metode pemrosesan utama dari aluminium tempa dan paduannya meliputi pemrosesan panas, pemrosesan dingin, perlakuan panas larutan, dan perlakuan anil. Kode paduan aluminium adalah F (*fabricated*), O (*annealed*), H (*strain hardened*), W (*solution heat treated*) dan T (*heat treatment*) (tabel 3).

Tabel 3. Ringkasan metode pemrosesan untuk paduan aluminium (Davis & Park, 2001)

No	Metode Proses Paduan Aluminium	Sub divisi pada temper dasar
1.	<i>F (fabricated)</i> Kondisi termal selama proses kerja untuk mendapatkan sifat material tertentu dan tidak memerlukan perlakuan khusus.	-
2.	<i>O (annealed)</i> Proses pemanasan suatu paduan hingga mencapai suhu tertentu untuk mendapatkan kemampuan kerja optimal, ketangguhan, dan keuletan.	-
3.	<i>H (strain hardened)</i> Digunakan untuk paduan dengan proses pembentukan logam pada temperatur rendah untuk meningkatkan kekuatan.	Digit pertama menunjukkan jenis perlakuan panas dan digit kedua menunjukkan jumlah pengerasan regangan.
4.	<i>W (solution heat treated)</i> Pemanasan logam aluminium dengan temperature 550°C-560°C untuk menghasilkan sifat-sifat logam yang diinginkan.	-
5.	<i>T (heat treatment)</i> Digunakan untuk proses mengubah sifat logam dengan cara mengatur proses pemanasan dan kecepatan pendinginan dengan atau tanpa mengubah komposisi kimianya.	Digit pertama menunjukkan jenis perlakuan panas, digit kedua hingga kelima menunjukkan jumlah pengerasan regangan dan perlakuan khusus lainnya.

Komposisi kimia merupakan susunan yang terdiri dari zat penyusun, perbandingan zat penyusunnya, dan memiliki sifat-sifat zat penyusunnya. Komposisi kimia dari paduan aluminium tercantum pada tabel 4 dan tabel 5. Adapun sifat-sifat aluminium ditunjukkan pada tabel 6.

Tabel 4. Komposisi Kimia pada Pengujian Paduan Aluminium (Gao et al., 2022)

No	wt%				at%			
	Zn	Mg	Cu	Zn+Mg+Cu	Zn	Mg	Cu	Zn+Mg+Cu
1.	6.4 8	2.26	2.24	10.98	2.83	2.67	0.99	6.49
2.	7.9 1	1.98	2.18	12.07	3.48	2.36	0.97	6.81
3.	9.5 2	1.82	1.68	13.02	4.22	2.18	0.76	7.16

Tabel 5. Standar Kandungan Komposisi Unsur Paduan AA3104 (Caing, 2009)

No.	Unsur	AA3104
1.	Si	0,00-0,60
2.	Cu	0,05-0,25
3.	Fe	0,00-0,80
4.	Mn	0,80-1,40
5.	Mg	0,80-1,30
6.	Cr	0,00-0,06
7.	Zn	0,00-0,25
8.	Al	Sisanya

Tabel 6. Sifat-sifat Fisik Aluminium (Surdia & Saito, 1985)

No	Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)	
		99,96	>99,0
1.	Massa Jenis	2,6979	2,71
2.	Titik Cair	660,2	653-657
3.	Panas Jenis	0,2226	0,2297
4.	Hantaran Listrik	64,94	59
5.	Tahanan Listrik Koefisien Temperatur	0,00429	0,0115
6.	Koefisien Pemuaian	0,00002386	0,0000235
7.	Jenis kristal	FCC	FCC

Mengikuti konsep dan prinsip yang serupa dengan baja komposit, kemungkinan menggabungkan aluminium dengan beton telah diselidiki. (Zhou & Young, 2008) melakukan uji tekan aksial pada kolom aluminium yang diisi beton. Serangkaian pengujian berupa tabung aluminium yang berisi beton menggunakan persegi dan bagian berongga persegi panjang. Tabung aluminium lalu diberi beban aksial untuk menyelidiki struktur kinerja dari aluminium. Rasio kedalaman terhadap ketebalan keseluruhan dari bagian tabung aluminium berkisar dari 8,2 hingga 63,8. Berbagai kekuatan silinder beton 40, 70 dan 100 MPa diselidiki. Sebanyak 43 spesimen diuji. Kekuatan, beban aksial dan mode kegagalan juga dilakukan pengujian. Kesimpulan dari penelitian ini didapatkan hasil terbaik ada pada perbandingan komposisi beton berupa semen, air, agregat halus, dan agregat kasar sebesar 1:0,27:1,73:1,73. Nilai rata-rata kekuatan sebesar 108,6MPa.

Kemudian Zhou & Young (2009) memperpanjang penyelidikan eksperimental pada kolom diisi dengan beton dan mengembangkan kriteria desain dengan

mempertimbangkan interaksi material yang diamati. Pengujian aksial dilakukan untuk mengetahui kinerja struktural dari beton yang diisi aluminium. Rasio diameter ketebalan tabung aluminium berkisar antara 9,7 hingga 59,7. Berbagai beton kekuatan silinder 40, 70 dan 100 MPa diselidiki. Jumlah dari 42 spesimen kolom diuji. Kekuatan kolom, hubungan beban aksial, hubungan regangan beban-aksial dan mode kegagalan kolom telah disajikan.

Dalam studi yang lebih baru Zhou & Young (2018) melakukan pengujian pada aluminium dan beton dengan penampang berongga melingkar. Sebanyak 24 tes dilakukan untuk menyelidiki kinerja struktural dari kolom komposit. Tabung dibuat menggunakan paduan aluminium perlakuan panas 6061-T6 yang memiliki nilai nominal regangan 0,2% dan tegangan 240 MPa. Diameter ketebalan tabung luar berkisar antara 29,2mm hingga 60,3mm dan diameter ketebalan bagian dalam berkisar antara 15,7mm hingga 39,0mm. Berbagai silinder beton kekuatan 40, 70 dan 100 MPa diselidiki. Kekuatan pada aluminium, hubungan beban aksial, hubungan regangan beban aksial dan mode kegagalan kolom telah disajikan dalam penelitian tersebut. Kesimpulan dari penelitian ini bahwa hasil pengujian dan kekuatan kolom dari paduan aluminium menggunakan analisis elemen hingga (*finite element analysis*) memenuhi syarat untuk dimanfaatkan menjadi struktur konstruksi. Selanjutnya dapat diusulkan untuk mempertimbangkan perbandingan desain antara paduan aluminium untuk memprediksi kekuatannya.

4. Pembahasan

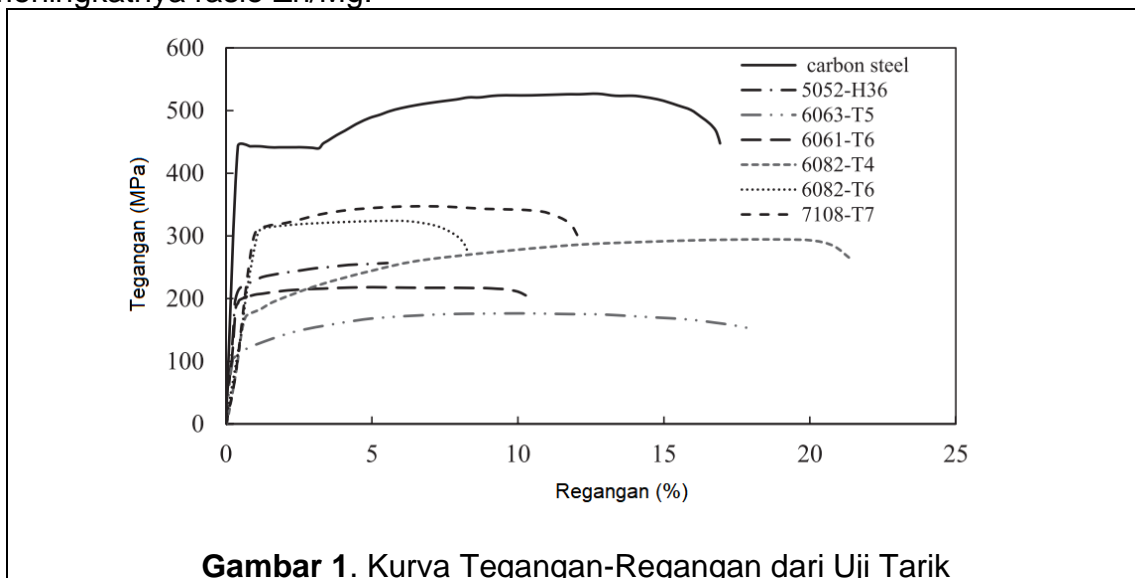
Sifat dari bahan aluminium murni dan aluminium paduan dipengaruhi oleh konsentrasi bahan dan perlakuan yang diberikan terhadap bahan tersebut. Serangkaian uji tarik telah dilakukan pada paduan aluminium. Uji tarik bertujuan untuk menyelidiki sifat materialnya. Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan serta deformasi plastis yang terjadi pada spesimen paduan. Sifat mekanik pada paduan aluminium diringkas dalam gambar 1 (Georgantzia et al., 2021). Tabel 7 merupakan perbandingan sifat mekanik dari paduan aluminium pada beberapa penelitian.

Tabel 7. Sifat Mekanik dari Paduan Aluminium pada Beberapa Penelitian

No	Penulis	Aluminium Grade	f _{0.2} [MPa]	f _u [MPa]	E [GPa]	f _{0.2} / f _u	n
1.	(Gao et al., 2022)	7056-T6	327.30	379.90	63.62	0.86	-
2.	(Alsanat et al., 2019)	5052-H36	211.6	257.8	64.2	0.82	-
3.	(Su et al., 2014)	6061-T6	234.0	248.0	66.0	0.94	12
4.	(Su et al., 2014)	6063-T5	179.0	220.0	69.0	0.81	10
5.	(Moen et al., 1999)	6082-T4	120.1	221.0	66.9	0.54	26
6.	(Moen et al., 1999)	6082-T6	312.2	324.2	66.7	0.96	74
7.	(Moen et al., 1999)	7108-T7	314.0	333.4	66.9	0.94	65

Li et al., (2022) melakukan penelitian aluminium dengan lima paduan yang pada tabel 8. Detail tentang sifat mekanik paduan ditampilkan pada Tabel 9 dan

Gambar 2. Kekuatan luluh dan kekuatan tarik paduan meningkat dengan meningkatnya kandungan Cu. Kekuatan tarik meningkat dari 527,4 MPa menjadi 558,3 MPa sehingga terjadi peningkatan sebesar 5,9%. Kekuatan luluh meningkat dari 396,8 MPa menjadi 456,2 MPa, sehingga terjadi peningkatan sebesar 15,0%. Perpanjangan dari paduan meningkat dari 15,6% menjadi 18,3%, sehingga terjadi peningkatan 17,3%. Kekuatan luluh dan kekuatan tarik paduan menurun dengan meningkatnya rasio Zn/Mg. Namun, pemanjangan paduan meningkat dengan meningkatnya rasio Zn/Mg.



Gambar 1. Kurva Tegangan-Regangan dari Uji Tarik

Tabel 8. Komposisi Paduan Aluminium (Li et al., 2022)

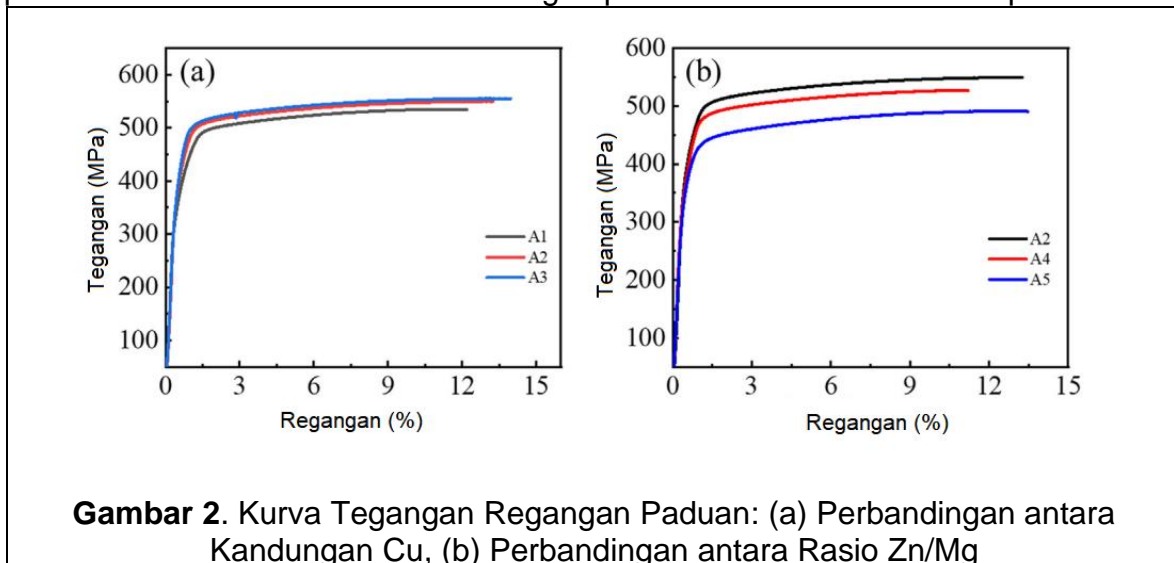
No	Kode Paduan	Zn (%)	Mg (%)	Cu (%)	Zr (%)	Zn/Mg
1.	A1	2,37	2,30	0,32	0,03	1,03
2.	A2	2,39	2,18	0,53	0,03	1,10
3.	A3	2,41	2,22	0,70	0,03	1,08
4.	A4	2,50	1,92	0,58	0,03	1,30
5.	A5	2,64	1,56	0,56	0,03	1,69

Tabel 9. Sifat mekanik dari paduan aluminium (Li et al., 2022)

No	Kode Paduan	Kuat Tarik (MPa)	Kuat Luluh (MPa)	Perpanjangan (%)
1.	A1	527.4	396.8	15.6
2.	A2	543.0	418.4	16.1
3.	A3	558.3	456.2	18.3
4.	A4	529.0	412.7	17.3
5.	A5	490.4	374.8	17.5

Kekuatan tarik menurun dari 543,0 MPa menjadi 490,4 MPa (9,7%) karena rasio Zn/Mg meningkat dari 1,1 menjadi 1,69; hasil kekuatan luluh menurun dari 418,4 MPa menjadi 374,8 MPa (10,4%). Perpanjangan paduan meningkat 8,7% dari 16,1% menjadi 17,5%. Nilai kekerasan meningkat dengan meningkatnya kandungan Cu. Nilai kekerasan menurun dengan meningkatnya rasio Zn/Mg.

Kekuatan tarik, kekuatan luluh, perpanjangan, dan kekerasan paduan meningkat dengan meningkatnya kandungan Cu. Ada empat cara untuk memperkuat paduan aluminium, yaitu *annealing*, *strain hardening*, *heat treatment*, dan *solution treatment* (table 3). Menurut (Stemper et al., 2020) Penambahan Cu dapat mengubah densitas dari *Guinier Preston Zones* dan komposisi partikel, sehingga membentuk nukleasi untuk fase menengah berikutnya selama presipitasi. Sedangkan meningkatnya rasio Zn/Mg menjadikan derajat rekristalisasi menurun. Menurut (Ge et al., 2010) bahwa *Guinier Preston Zones* paduan Al, Zn, dan Mg dicirikan oleh pola difraksi elektronnya. *Guinier Preston Zones* terbentuk pada suhu larutan ke suhu kamar dengan paduan dalam keadaan kompleks.



Gambar 2. Kurva Tegangan Regangan Paduan: (a) Perbandingan antara Kandungan Cu, (b) Perbandingan antara Rasio Zn/Mg

Penulis mengamati dari perbedaan setiap paduan Al, Zn, Mg, dan Cu dapat ditentukan komposisi yang optimum untuk menghasilkan paduan dengan karakteristik terbaik. Pengaruh setiap elemen terhadap pengerasan paduan dapat diketahui dengan dilakukannya proses perlakuan panas (*heat treatment*).

Menurut Li et al., (2022) ketika *heat treatment* secara bersamaan ditingkatkan, maka kepadatan dislokasi dalam paduan meningkat. Kepadatan dislokasi dalam paduan rendah untuk larutan padat. Perubahan rasio Zn/Mg tidak mengubah kandungan unsur terlarut karena jumlah total Zn dan Mg tetap stabil. Efek ketika *solution treatment* tidak berubah, maka ukuran butir menurun karena Zn/Mg rasio meningkat (Gambar 2).

Penulis mengamati perubahan kandungan Cu berdampak kecil, tetapi perubahan dalam Rasio Zn/Mg berpengaruh signifikan. Kisaran peningkatan kekerasan paduan menurun dengan meningkatnya rasio Zn/Mg. Ini karena peningkatan rasio Zn/Mg menyebabkan peningkatan ukuran endapan dan penurunan efek penguatan.

5. Kesimpulan

Studi ini meninjau karya penelitian yang dilaporkan tentang struktur aluminium, memberikan pandangan lengkap tentang sifat mekanik dan paduannya. Penyelidikan aluminium struktural relatif sedikit, dengan demikian penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mendapatkan pemahaman menyeluruh tentang perilakunya. Kesimpulan secara keseluruhan menunjukkan bahwa desain aluminium saat ini tidak memberikan hasil yang akurat dalam memprediksi

kekuatan bahan, sehingga bertentangan dengan filosofi desain yang ekonomis dan efisien. Hal tersebut terkait dengan fakta bahwa formula desain aluminium didasarkan pada hasil eksperimental dan numerik.

Ruang lingkup pekerjaan di masa depan adalah untuk menjembatani kesenjangan antara teoritis dan dunia nyata, menjadikan paduan aluminium sebagai konstruksi alternatif material, mampu menjawab tantangan secara efisien ditemui dalam struktur kehidupan nyata. Paduan aluminium berdasarkan Sifat Mekanik Zn, Mg, dan Cu dengan perbedaan kandungan Cu dan rasio Zn/Mg menyimpulkan saat kandungan Cu meningkat, kekuatan tarik, hasil kekuatan, dan perpanjangan meningkat. Kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan kekerasan menurun dengan peningkatan rasio Zn/Mg. Sementara itu, perpanjangan meningkat dengan meningkatnya rasio Zn/Mg.

6. Ucapan Terima Kasih

Terimakasih diucapkan untuk Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Fakultas Teknologi Mineral Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, dan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta atas dana hibah dan kesempatan yang diberikan.

Daftar Pustaka

- Aboulkhair, N. T., Simonelli, M., Parry, L., Ashcroft, I., Tuck, C., & Hague, R. (2019). 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting. *Progress in Materials Science*, 106(May), 100578. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578>
- Alsanat, H., Gunalan, S., Guan, H., Keerthan, P., & Bull, J. (2019). Experimental study of aluminium lipped channel sections subjected to web crippling under two flange load cases. *Thin-Walled Structures*, 141, 460–476. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.050>
- Amalia, Y., & Samuel, R. (2020). Pengaruh Parameter Pengecoran Alumunium Cookware Pada Hasil Produk WL Alumunium. *Journal of Metallurgical Engineering and Processing Technology*, 1(1), 17–23.
- Becker, F. G., Cleary, M., Team, R. M., Holtermann, H., The, D., Agenda, N., Science, P., Sk, S. K., Hinnebusch, R., Hinnebusch A, R., Rabinovich, I., Olmert, Y., Uld, D. Q. G. L. Q., Ri, W. K. H. U., Lq, V., Frxqwu, W. K. H., Zklfk, E., Edvhg, L. V, Wkh, R. (2015). Aluminium Design Manual. *Syria Studies*, 7(1), 37–72. https://www.researchgate.net/publication/269107473_What_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civil_wars_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625
- Caing. (2009). *Pengaruh Titanium Pada Paduan Aluminium AA3104 Terhadap Mampu Bentuk dan Kekuatan Kemasan Kaleng Dengan Proses Drawn Wall Ironing*.
- Chiu, Y. C., Du, K. T., Bor, H. Y., Liu, G. H., & Lee, S. L. (2020). The effects of Cu, Zn and Zr on the solution temperature and quenching sensitivity of Al–Zn–Mg–Cu alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 247(December 2019),

122853. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122853>
- Davis, J. R., & Park, M. (2001). Edited by. *JR. Alloying: Understanding the Basics. Materials Park (OH): ASM International.*
- European Standard. (2009). *Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1 : General structural rules.* 1(2005).
- Gao, R., Li, Y., Li, Z., Li, X., Wen, K., Zhang, Y., & Xiong, B. (2022). Quantitative relationship between microstructure and tensile properties of Al–Zn–Mg–Cu alloys with various alloying degrees. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 5394–5405. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.153>
- Ge, F., Moshe, Z., Li, J., & Tan, L. (2010). FAST TCP performance under perturbation imposed queueing delay in equilibrium. *Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication, ICFCC 2010*, 3(2001), 3443–3451. <https://doi.org/10.1109/ICFCC.2010.5497611>
- Georgantzia, E., Gkantou, M., & Kamaris, G. S. (2021). Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Engineering Structures*, 227, 111372. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372>
- Husna, M. (2008). *Aluminium Fero Nikel Dengan Penguatan Fasa Kedua Dan Struktur Butir.* 1–10.
- Li, Y., Wang, Y., Lu, B., Yu, W., Wang, H., Xu, G., & Wang, Z. (2022). Effect of Cu Content and Zn/Mg Ratio on Microstructure and Mechanical Properties of Al–Zn–Mg–Cu Alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 3451–3460. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.059>
- Liu, M., Zhang, L., Wang, P., & Chang, Y. (2015). Buckling behaviors of section aluminum alloy columns under axial compression. *Engineering Structures*, 95, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.064>
- Moen, B. L. A., Matteis, G. De, Hopperstad, O. S., Langseth, M., & Landolfo, R. (1999). . *ii: n. August*, 921–929.
- Radlbeck, C., Dienes, E., & Kosteas, D. (2006). Aluminium structures - A sustainable future? *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, 16(4), 339–344. <https://doi.org/10.2749/101686606778995146>
- Ramesh, S., Anne, G., Naik, G. M., Jagadeesh, C., & Nayaka, H. S. (2021). Microstructural and mechanical characterisation of Al–Zn–Mg–Cu alloy processed by multi-directional cryo-forging. *Materials Today: Proceedings*, 46(xxxx), 5752–5756. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.709>
- Standard, A. Z. (1997). *Aluminum structures Part 1: Limit state design.*
- Stemper, L., Tunes, M. A., Oberhauser, P., Uggowitz, P. J., & Pogatscher, S. (2020). Age-hardening response of AlMgZn alloys with Cu and Ag additions. *Acta Materialia*, 195, 541–554. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.05.066>
- Su, M.-N., Young, B., & Gardner, L. (2014). Testing and Design of Aluminum Alloy Cross Sections in Compression. *Journal of Structural Engineering*, 140(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000972](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000972)

- Sulamet-Ariobimo, R. D., Soedarsono, J. W., Sukarnoto, T., Rustandi, A., Mujalis, Y., & Prayitno, D. (2016). Tensile properties analysis of AA1100 aluminium and SS400 steel using different JIS tensile standard specimen. *Journal of Applied Research and Technology*, 14(2), 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.03.006>
- Surdia, T., & Saito, S. (1985). *Pengetahuan Bahan Teknik*.
- Wang, S. C., & Starink, M. J. (2005). Precipitates and intermetallic phases in precipitation hardening Al-Cu-Mg-(Li) based alloys. *International Materials Reviews*, 50(4), 193–215. <https://doi.org/10.1179/174328005X14357>
- Yasmina Amalia, A. B. (2021). Pengaruh Kandungan Seng (Zn) Terhadap Cacat Porositas yang dihasilkan dalam Produk Pengecoran Aluminium di WL Aluminium. *Journal of Metallurgical Engineering and Processing Technology*, 1(2), 86–89. https://www.researchgate.net/publication/269107473_What_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civil_wars_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625
- Yasmina Amalia, A. S. F. (2021). Pengaruh Kandungan Silicon (Si) Terhadap Cacat Hot Tearing yang Dihasilkan dalam Produk Aluminium. *Journal of Metallurgical Engineering and Processing Technology*, 2(1), 1–5.
- Zhou, F., & Young, B. (2008). Tests of concrete-filled aluminum stub columns. *Thin-Walled Structures*, 46(6), 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.01.003>
- Zhou, F., & Young, B. (2009). Concrete-filled aluminum circular hollow section column tests. *Thin-Walled Structures*, 47(11), 1272–1280. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.03.014>
- Zhou, F., & Young, B. (2018). Concrete-filled double-skin aluminum circular hollow section stub columns. *Thin-Walled Structures*, 133(March), 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.09.037>