

Karakterisasi Ketangguhan Impak Paduan Aluminium–Seng Daur Ulang Hasil Pengecoran Menggunakan Metode Charpy

Jagodang Harahap^{1*}, Indra Mawardi², Sumardi³, Andi Sudirman⁴,
Arya Rudi Nasution⁵.

^{1) 2) 3) 4)} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Kota Lhokseumawe, Aceh

⁵⁾ Jurusan Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Kota Medan

*E-mail: jagodang@pnl.ac.id

ABSTRACT

This study aims to evaluate the effect of zinc scrap additional on the impact toughness of cast aluminum alloys. The composition variations used include 95% aluminum–5% zinc, 85% aluminum–15% zinc, and 70% aluminum–30% zinc. Impact properties were tested using the Charpy method according to ASTM E23 standards, while the fracture surface characteristics were analyzed macroscopically to determine the material failure mechanism. The results showed that increasing zinc scrap content was followed by an increase in the alloy's ability to absorb impact energy. The impact energy values were 1.97 J, 2.24 J, and 3.80 J, respectively, while the impact price increased from 24,625 J/m² to 28,041.7 J/m² and reached 47,500 J/m² at the 70% aluminum–30% zinc composition. Macroscopic observations show that all specimens have brittle fracture characteristics, but differences in alloy compositions cause changes in fracture surface characteristics that correlate with increased impact toughness. Based on these results, it can be concluded that the addition of scrap zinc up to 30% can increase the impact toughness of scrap aluminum alloys from castings, so that they have the potential to be used as an alternative recycled-based material for applications requiring resistance to shock loads.

Keywords: Scrap Aluminium, Scap Zinc, Alumnum-Zinc Allow Casting, Charpy Impact

PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan material logam pada sektor manufaktur mendorong berkembangnya pemanfaatan material yang tidak hanya memiliki performa mekanik yang baik, tetapi juga mendukung efisiensi sumber daya dan keberlanjutan lingkungan. Aluminium menjadi salah satu logam yang memiliki peran penting karena menawarkan kombinasi sifat berupa massa jenis yang rendah, ketahanan korosi yang baik, konduktivitas termal yang tinggi, serta kemudahan dalam proses pembentukan dan pengecoran. Karakteristik tersebut menjadikan aluminium banyak diaplikasikan pada industri otomotif, permesinan, konstruksi, dan berbagai produk rekayasa lainnya. Seiring meningkatnya konsumsi aluminium, jumlah limbah aluminium juga mengalami peningkatan sehingga pemanfaatan kembali melalui proses daur ulang menjadi alternatif yang semakin penting.

Daur ulang aluminium memberikan manfaat dari aspek ekonomi dan lingkungan karena mampu mengurangi konsumsi bahan baku primer serta menekan kebutuhan energi dalam proses produksi. Meskipun demikian, penggunaan aluminium daur ulang masih menghadapi tantangan, terutama terkait konsistensi sifat mekanik produk hasil pengecoran. Perbedaan komposisi bahan baku, keberadaan unsur pengotor, proses peleburan, dan kondisi solidifikasi dapat memengaruhi struktur mikro yang terbentuk sehingga berdampak pada karakteristik mekanik material. Oleh sebab itu, diperlukan upaya untuk meningkatkan kualitas aluminium daur ulang agar mampu memenuhi kebutuhan aplikasi teknik yang memerlukan sifat mekanik tertentu[1].

Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah melalui pembentukan paduan aluminium dengan penambahan seng (Zn). Dalam sistem paduan aluminium, seng berperan sebagai unsur paduan yang dapat memengaruhi pembentukan fasa, distribusi presipitat, dan mekanisme penguatan material. Pengendalian kadar seng menjadi faktor penting karena perubahan komposisi paduan dapat menghasilkan respons mekanik yang berbeda. Penambahan seng pada kadar tertentu berpotensi meningkatkan kemampuan material dalam menahan beban, sedangkan penambahan

yang tidak sesuai dapat menyebabkan terbentuknya fasa yang bersifat lebih getas sehingga mengurangi kemampuan material menyerap energi saat menerima pembebanan kejut.[2]

Selain komposisi paduan, proses pengecoran juga memiliki pengaruh yang besar terhadap kualitas produk. Selama proses pembekuan logam cair, berbagai fenomena metalurgi seperti pembentukan ukuran butir, segregasi unsur, porositas, dan cacat pengecoran akan menentukan sifat akhir material. Kondisi tersebut menyebabkan material dengan komposisi yang sama dapat menunjukkan perilaku mekanik yang berbeda apabila diproduksi melalui parameter pengecoran yang berbeda. Oleh karena itu, evaluasi terhadap sifat mekanik hasil pengecoran perlu dilakukan untuk mengetahui kualitas material yang dihasilkan [3], [4], [5], [6].

Berbagai penelitian mengenai paduan aluminium telah banyak dilakukan, namun sebagian besar masih berfokus pada pengaruh komposisi terhadap kekuatan tarik, kekerasan, atau ketahanan korosi. Penelitian yang secara khusus mengkaji ketangguhan impak paduan aluminium–seng berbahan daur ulang hasil pengecoran masih relatif terbatas, terutama yang menghubungkan perubahan komposisi paduan dengan kemampuan material menyerap energi impak. Keterbatasan tersebut menunjukkan masih adanya kebutuhan akan penelitian yang mampu memberikan pemahaman mengenai perilaku impak paduan aluminium–seng daur ulang sebagai dasar pengembangan material alternatif yang memiliki performa mekanik lebih baik[2].

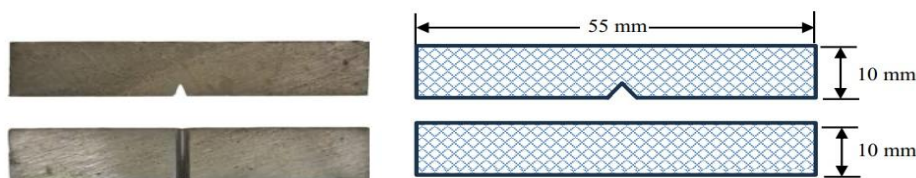
Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkarakterisasi ketangguhan impak paduan aluminium–seng daur ulang hasil pengecoran menggunakan metode Charpy. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pengaruh komposisi paduan terhadap kemampuan serap energi impak serta menjadi referensi dalam pengembangan material berbasis daur ulang yang memiliki nilai tambah, layak diaplikasikan pada komponen teknik, dan mendukung prinsip efisiensi sumber daya serta keberlanjutan industri[7], [8]

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkarakterisasi ketangguhan impak paduan aluminium–seng daur ulang hasil pengecoran menggunakan metode Charpy. Paduan dibuat dengan memvariasikan komposisi seng bekas sebesar 5%, 15%, dan 30%, yang masing-masing dipadukan dengan aluminium daur ulang sebesar 95%, 85%, dan 70%. Variasi komposisi tersebut dipilih untuk mengevaluasi pengaruh penambahan seng terhadap kemampuan material dalam menyerap energi impak setelah proses pengecoran. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai hubungan antara komposisi paduan aluminium–seng daur ulang dan ketangguhan impaknya, sehingga dapat menjadi dasar dalam pengembangan material hasil daur ulang yang memiliki performa mekanik lebih baik, bernilai ekonomis, dan berpotensi diaplikasikan sebagai material alternatif pada berbagai komponen teknik[9].

METODE PENELITIAN

Persiapan Material

Menyiapkan Adalah pengujian dengan menggunakan pembebanan yang cepat (*rapid loading*). Dalam Pengujian Mekanik, terdapat perbedaan dalam pemberian jenis beban kepada material. Untuk uji impak, tiga spesimen uji ASTM E23 untuk masing-masing empat variasi. Sampel diatur memiliki panjang 55 mm, lebar 10 mm, dan ketebalan 10 mm[10]



Gambar 1. Spesimen Uji Impak

Uji Impak Charpy digunakan untuk mengukur kemampuan suatu material menyerap energi selama patahan. Uji Impak Charpy dilakukan dengan memukul spesimen berlekuk menggunakan pendulum yang berayun. Jumlah energi yang diserap selama benturan ditentukan oleh perbedaan ketinggian sebelum dan sesudah ayunan. Uji ini bertujuan untuk menilai kekuatan impak suatu material, khususnya ketahanannya terhadap patahan getas pada laju regangan tinggi. Uji impak Charpy sangat penting untuk memahami bagaimana material bekerja dalam kondisi dunia nyata

(suhu ekstrem atau di bawah benturan tiba-tiba). Uji Charpy mengukur ketangguhan material dengan menguji responsnya terhadap gaya tiba-tiba.[11], [12]

- Persiapan Spesimen : Mulailah dengan memotong spesimen material sesuai dimensi yang dibutuhkan, yaitu bentuk persegi panjang standar, pastikan spesimen tersebut bebas dari cacat permukaan. Spesimen harus diposisikan di mesin uji dengan sisi yang berlekuk menghadap menjauh dari pendulum yang berayun. Persiapan spesimen yang tepat sangat penting untuk mendapatkan hasil yang akurat dalam prosedur uji Charpy.
- Orientasi Takik: Takik harus disejajarkan secara tepat, karena lokasi dan orientasinya memengaruhi hasil. Takik ditempatkan di tengah spesimen dan harus menghadap menjauh dari arah benturan. Orientasi takik yang benar sangat penting untuk prosedur uji benturan Charpy material
- Pengujian Benturan Bandul : Lepaskan bandul dari ketinggian tertentu sehingga berayun ke bawah dan membentur spesimen yang telah diberi takik. Gaya yang diterapkan pada spesimen selama benturan menyebabkan spesimen tersebut retak, dan ketinggian bandul berkurang sesuai dengan itu. Langkah ini merupakan bagian dari prosedur uji benturan yang digunakan untuk mensimulasikan gaya mendadak pada material.
- Pengukuran Energi : Ukur perbedaan ketinggian pendulum sebelum dan sesudah mengenai spesimen setelah tumbukan. Energi yang diserap oleh spesimen dihitung menggunakan perbedaan ketinggian, massa pendulum, dan gravitasi. Langkah ini mengakhiri prosedur uji tumbukan Charpy, menentukan ketangguhan dan ketahanan material terhadap tumbukan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian kuantitatif memberikan data terukur, yang dinyatakan dalam joule, yang mewakili jumlah energi yang diserap oleh spesimen selama benturan. Nilai ini digunakan untuk menentukan kekuatan benturan Charpy material dan kemampuannya untuk menahan patahan di bawah tekanan. Hasil kuantitatif membantu membandingkan berbagai material dalam hal ketangguhan dan ketahanan benturan. Hasil kuantitatif adalah data yang didasarkan pada nilai numerik. Data kuantitatif biasanya berupa energi yang diserap selama patahan sampel dalam uji impak Charpy. Suhu Transisi Ulet-ke-Rapuh (DBTT) diperkirakan dengan menguji beberapa sampel pada beberapa suhu untuk melihat di mana terjadi peningkatan drastis pada energi impak yang dibutuhkan.

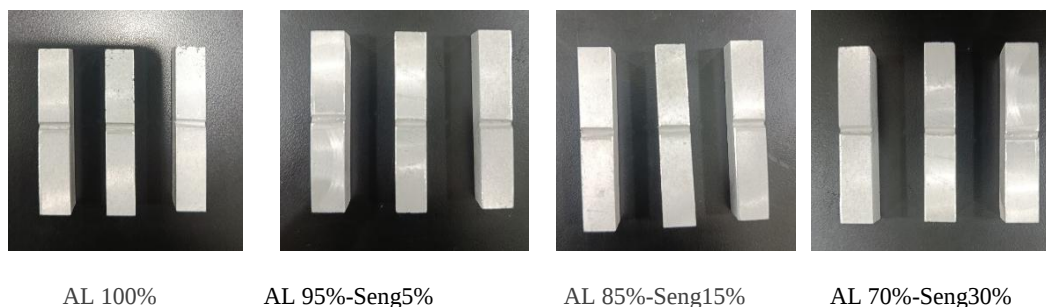
Karakterisasi ketangguhan impak dilakukan menggunakan metode Charpy sesuai standar ASTM E23. Pengujian menggunakan spesimen berukuran 55 mm × 10 mm × 10 mm dengan takik V (V-notch) sedalam 2 mm, sudut 45°, dan jari-jari dasar takik 0,25 mm[10]. Dimensi tersebut dipilih agar seluruh spesimen memiliki kondisi pengujian yang seragam sehingga perbedaan hasil yang diperoleh terutama dipengaruhi oleh variasi komposisi paduan, bukan oleh perbedaan geometri spesimen.



Gambar 2. Proses penimbangan komposisi material yang akan dileburkan



Gambar 3. Hasil Pengecoran dari ke 4 variasi komposisi paduan Aluminium-seng bekas



Gambar 4. Spesimen yang akan dilakukan uji impact

Pada penelitian ini digunakan tiga variasi komposisi paduan, yaitu aluminium 95%–seng 5%, aluminium 85%–seng 15%, dan aluminium 70%–seng 30%. Energi impact yang diperoleh dari mesin uji kemudian digunakan untuk menghitung harga impact berdasarkan luas penampang efektif spesimen pada daerah takik menggunakan persamaan:

$$E = m \cdot g \cdot (H_1 - H_2) = 3.54 \text{ joule}$$

m adalah massa pendulum, g adalah percepatan gravitasi, H_1 sudut awal dan H_2 adalah sudut akhir pendulum

$$HI = \frac{E}{A} = \frac{3.54}{0.0008} = 44,250 \text{ joule/m}^2$$

dengan HI adalah harga impact (J/m^2), E merupakan energi impact (J), dan A adalah luas penampang efektif spesimen (m^2).

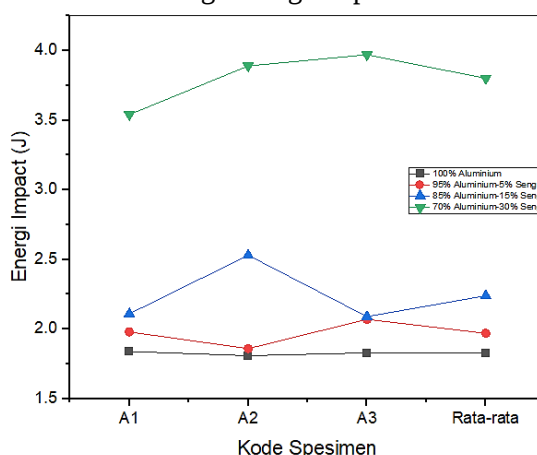
Hasil rata-rata pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai rata-rata energi impact dan harga impact

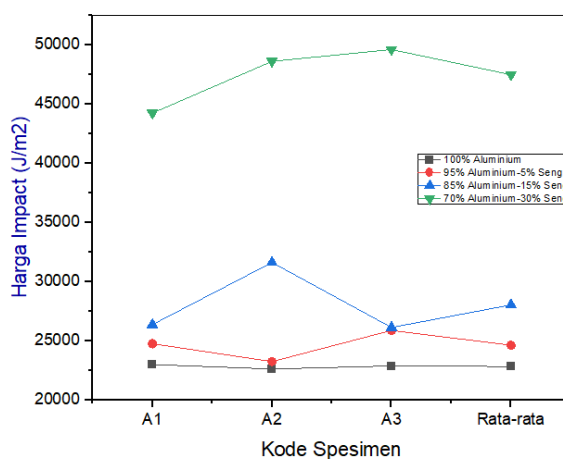
Komposisi Paduan	Spesimen	Energi Impact (J)	A (m^2)	Harga Impact (J/m^2)	Impact
------------------	----------	-------------------	--------------------	---------------------------------	--------

Komposisi Paduan	Spesimen	Energi Impact (J)	A (m^2)	Harga (J/m^2)	Impact
Aluminium 100%	1	1.84	0.00008	23.000	
	2	1.81	0.00008	22.625	
	3	1.83	0.00008	22.875	
	Rata-rata	1.83		22.83333	
Aluminium 95%-Seng 5%	1	1.98	0.00008	24.750	
	2	1.86	0.00008	23.250	
	3	2.07	0.00008	25.875	
	Rata-rata	1.97		24.625	
Aluminium 95%-Seng 15%	1	2.11	0.00008	26.375	
	2	2.53	0.00008	31.625	
	3	2.09	0.00008	26.125	
	Rata-rata	2.24		28.0417	
Aluminium 95%-Seng 30%	1	3.54	0.00008	44.250	
	2	3.89	0.00008	48.625	
	3	3.97	0.00008	49.625	
	Rata-rata	3.80		47.500	

Data pada Tabel 1 di atas menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan nilai energi impact dan harga impact dari hasil pengecoran aluminium bekas tanpa tambahan paduan seng bekas. seiring bertambahnya persentase seng dalam paduan. Pada komposisi aluminium 95%–seng 5%. rata-rata energi impact yang diperoleh sebesar 1.97 J dengan harga impact 24.625 J/m^2 . Ketika kandungan seng dinaikkan menjadi 15%. energi impact meningkat menjadi 2.24 J. sedangkan harga impact mencapai 28.0417 J/m^2 . Nilai tertinggi diperoleh pada komposisi aluminium 70%–seng 30%. yaitu energi impact sebesar 3.80 J dengan harga impact 47.500 J/m^2 .



Gambar 5. Diagram Energi Yang Diserap



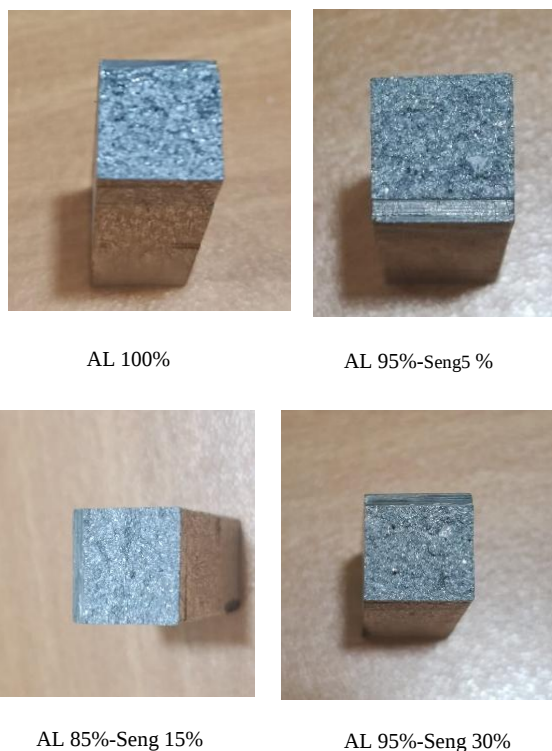
Gambar 6. Diagram Harga Impact

Kenaikan tersebut memperlihatkan bahwa penambahan seng memberikan pengaruh terhadap kemampuan paduan dalam menyerap energi benturan 7.65% Dibandingkan komposisi aluminium 95%–seng 5%. peningkatan energi impact pada komposisi aluminium 85%–seng 15% mencapai sekitar 22.40%. sedangkan pada komposisi aluminium 70%–seng 30% meningkat hingga sekitar 107.6%. Tren yang sama juga terlihat pada harga impact. yang meningkat sekitar 7.84%. 22.81% dan 108% pada masing-masing komposisi tersebut.

Peningkatan ketiga parameter tersebut menunjukkan bahwa material memerlukan energi yang semakin besar untuk mengalami perpatahan ketika kandungan seng ditingkatkan. Dengan kata lain, kemampuan material dalam menahan propagasi retak akibat beban kejut menjadi lebih baik. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi komposisi paduan berpengaruh terhadap karakteristik mekanik hasil pengecoran. Secara metalurgi, perubahan tersebut diduga berkaitan dengan modifikasi struktur mikro selama proses pembekuan logam cair.

Selain pengaruh komposisi paduan, kualitas hasil pengecoran juga mempunyai peranan penting terhadap ketangguhan material. Kehadiran porositas, rongga penyusutan, inklusi, maupun segregasi unsur dapat bertindak sebagai lokasi konsentrasi tegangan yang mempercepat terbentuknya retak. Sebaliknya, hasil pengecoran dengan struktur yang lebih homogen akan memberikan hambatan yang lebih besar terhadap propagasi retak sehingga meningkatkan kemampuan material menyerap energi benturan. Menariknya, peningkatan energi impact yang cukup signifikan pada komposisi aluminium 70%–seng 30% kemungkinan tidak hanya dipengaruhi oleh peningkatan kadar seng, tetapi juga oleh karakteristik kimia seng bekas yang digunakan sebagai bahan paduan[1], [13], [14].

Seng hasil daur ulang umumnya berasal dari berbagai sumber sehingga berpotensi mengandung unsur-unsur lain, seperti besi (Fe), silikon (Si), tembaga (Cu), atau magnesium (Mg). Unsur-unsur tersebut dapat ikut berperan selama proses solidifikasi dan memengaruhi pembentukan struktur mikro paduan. Salah satu dugaan yang dapat diajukan adalah adanya kandungan besi (Fe) pada seng bekas yang turut memberikan kontribusi terhadap peningkatan ketangguhan impact. Meskipun demikian, interpretasi tersebut masih bersifat hipotesis karena penelitian ini belum mencakup analisis komposisi kimia bahan baku maupun paduan hasil pengecoran. Oleh sebab itu, penelitian lanjutan perlu dilengkapi dengan pengujian komposisi kimia menggunakan Optical Emission Spectroscopy (OES).



Gambar 7. Foto Makro permukaan patahan spesimen uji impact

Hasil pengamatan makroskopis terhadap permukaan patahan spesimen setelah pengujian impact Charpy menunjukkan bahwa seluruh variasi paduan memiliki karakteristik patahan getas (*brittle fracture*). Karakteristik ini ditunjukkan oleh permukaan patahan yang tampak mengilap dengan tekstur kristalin serta tidak ditemukannya deformasi plastis yang nyata sebelum spesimen mengalami kegagalan. Bentuk penampang pada daerah patahan juga tetap mempertahankan dimensinya tanpa gejala penyempitan (*necking*), yang menunjukkan bahwa proses patah berlangsung dalam waktu relatif singkat setelah material menerima beban impact. Pada spesimen aluminium bekas tanpa penambahan seng dalam jumlah tinggi, permukaan patahan terlihat memiliki tekstur granular dengan penyebaran kristal yang kurang seragam. Selain itu, masih dijumpai beberapa indikasi cacat pengecoran, seperti bercak gelap yang diduga berasal dari porositas maupun inklusi oksida. Keberadaan cacat tersebut dapat menjadi lokasi awal terbentuknya retak sehingga memengaruhi perilaku patahan ketika material dikenai pembebanan kejut [15], [16], [17].

Penambahan seng bekas memberikan perubahan terhadap karakteristik permukaan patahan. Pada komposisi aluminium 85%–seng 15%, permukaan patahan tampak lebih homogen dan memiliki kilau yang lebih merata dibandingkan komposisi aluminium 95%–seng 5%. Perubahan tersebut semakin terlihat pada komposisi aluminium 70%–seng 30%, di mana permukaan patahan menunjukkan struktur kristalin yang lebih seragam. Meskipun mekanisme patah yang terjadi masih tergolong patahan getas, perubahan morfologi ini menunjukkan bahwa penambahan seng memengaruhi respons material terhadap pembebanan impact.

Hasil pengamatan makroskopis tersebut selaras dengan data pengujian impact. Peningkatan persentase seng bekas dalam paduan aluminium diikuti oleh kenaikan nilai energi impact maupun harga impact pada setiap variasi komposisi. Komposisi aluminium 70%–seng 30% menghasilkan performa terbaik dengan nilai energi impact dan harga impact tertinggi dibandingkan komposisi lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan seng bekas dalam rentang komposisi yang digunakan mampu meningkatkan kemampuan material dalam menyerap energi benturan sebelum terjadi patahan. Dengan demikian, pemanfaatan seng bekas sebagai unsur paduan pada aluminium bekas memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan ketangguhan impact material hasil pengecoran tanpa mengubah mekanisme patahan yang tetap didominasi oleh patahan getas.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, variasi komposisi seng bekas memberikan pengaruh terhadap sifat impact paduan aluminium bekas hasil pengecoran. Peningkatan kadar seng dari 5% menjadi 30% diikuti oleh kenaikan nilai energi impact dan harga impact, dengan performa terbaik diperoleh pada komposisi aluminium 70%–seng 30%, yaitu energi impact sebesar 3.80 J dan harga impact sebesar 47.500 J/m². Pengamatan makroskopis terhadap permukaan patahan menunjukkan bahwa seluruh spesimen memiliki karakteristik patahan getas. Meskipun demikian, hasil pengujian membuktikan bahwa penambahan seng bekas hingga 30% mampu meningkatkan kemampuan material dalam menyerap energi benturan. Oleh karena itu, paduan aluminium–seng berbasis material daur ulang memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai material pengecoran dengan ketangguhan impact yang lebih baik dibandingkan paduan dengan kadar seng yang lebih rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Srivastava, M. Baruah, and R. Kumar, "NUMERICAL EVALUATION OF CHARPY IMPACT TEST PERFORMANCE FOR ALUMINIUM ALLOY," *INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY (IJMET)*, vol. 16, no. 4, pp. 13–26, Jul. 2025, doi: 10.34218/ijmet_16_04_002.
- [2] J. M. Pereira, D. M. Revilock, B. A. Lerch, and C. R. Ruggeri, "Impact Testing of Aluminum 2024 and Titanium 6Al-4V for Material Model Development," 2013. [Online]. Available: <http://www.sti.nasa.gov>

- [3] A. Affandi, I. Tanjung, A. R. Nasution, and A. M. Siregar, "The effect of the tempering process on the hardness and impact strength on NS 4340 steel," 2023, p. 040011. doi: 10.1063/5.0156743.
- [4] C. Li, S. Rasheed, A. Malik, F. Nazeer, and J. Long, "Study on ballistic impact behavior of Al alloys against two different shapes of steel core projectiles," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 2489–2500, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.052.
- [5] T. Wang *et al.*, "Upcycled high-strength aluminum alloys from scrap through solid-phase alloying," *Nature Communications*, vol. 15, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-53062-2.
- [6] M. S. Hossain Shawon *et al.*, "Effect of low TiO₂ additions on the microstructure and mechanical properties of stir-cast Al–Zn composites," *RSC Adv.*, vol. 16, no. 18, pp. 16703–16717, 2026, doi: 10.1039/d6ra00784h.
- [7] Sunarno, "85 Analisis Uji Impact Pada Bahan Logam Baja Dan Alumunium," 2022.
- [8] H. Zainuddin, M. B. Ali, K. A. Zakaria, L. H. Paijan, M. F. Mamat, and M. H. A. Bakar, "Investigation of Impact Properties under Instrumented Charpy Test," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 56, no. 3, pp. 329–339, Jun. 2024, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.3.2.
- [9] M. Unal and I. S. Dalmis, "A PROTOTYPE CHARPY AND IZOD IMPACT TESTER DESIGN AND IMPACT TEST ANALYSIS OF DIFFERENT ALUMINUM ALLOYS," *Turkiye*, Nov. 2022.
- [10] A. Society for Testing, "ASTM E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials," 1982.
- [11] J. A. Frutos Martínez, R. R. Ambriz, M. Naït-Abdelaziz, and D. Jaramillo, "Impact test behavior of aluminum alloys welded joints: Experimental and numerical analysis," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 44, no. 8, pp. 2119–2134, Aug. 2021, doi: 10.1111/ffe.13482.
- [12] O. ALTUNTAŞ, "Enhancement of impact toughness properties of Al 7075 alloy via double aging heat treatment," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 10, no. 2, pp. 195–202, Jun. 2022, doi: 10.29109/gujsc.1108116.
- [13] G. Prevati, F. Ballo, M. Gobbi, and G. Mastinu, "Radial impact test of aluminium wheels-numerical simulation and experimental validation," 2018.
- [14] N. D. Alexopoulos, "Impact properties of the aircraft cast aluminium alloy Al-7Si0.6Mg (A357)," in *EPJ Web of Conferences*, EDP Sciences, Jun. 2010. doi: 10.1051/epjconf/20100602002.
- [15] N. F. Ismail, M. A. Zulkipli, K. H. Yusof, E. Sundari, and E. Putri, "Effect of Zinc (Zn) addition on Impact and Hardness Properties of Aluminium (Al) scrap," *International Journal of Mechanics, Energy Engineering and Applied Science (IJMEAS)*, vol. 1, no. 1, pp. 19–24, Oct. 2023, doi: 10.53893/ijmeas.v1i1.216.
- [16] Y. Amalia, S. Sudaryanto, F. A. Mardhatila, R. Kristiardi, and Y. J. Kuncoro, "Paduan Aluminium Berdasarkan Sifat Mekanik," *Sang Pencerah: Jurnal Ilmiah Universitas Muhammadiyah Buton*, vol. 8, no. 3, pp. 722–732, Aug. 2022, doi: 10.35326/pencerah.v8i3.2479.
- [17] A. Q. Ahmed *et al.*, "Effect of Zn content on microstructure evolution in Al–Zn alloys processed by high-pressure torsion," *J. Mater. Res.*, vol. 38, no. 14, pp. 3602–3612, Jul. 2023, doi: 10.1557/s43578-023-01088-5.