



2580-2798 (e)
2588-6225 (p)

Inovtek Polbeng: Jurnal Inovasi Teknologi Politeknik Negeri Bengkalis
(Bengkalis State Polytechnic Technology Innovation Journal)

journal homepage: <https://jurnal.polbeng.ac.id/index.php/IP/index>

PERHITUNGAN KEKUATAN MEKANIK DARI PEMANFAATAN LIMBAH ALUMINIUM UNTUK PEMBUATAN *BRACKET* PADA MESIN TEMPEL KAPAL PATROLI

David Indrawan¹⁾, Tritiandinda Permata¹⁾, Arus Samudro¹⁾

¹⁾ Politeknik Negeri Madura, Jl. Raya Camplong No. Km.4, Sampang, Jawa Timur, Indonesia 69281

Corresponding Author: david.indrwn@gmail.com

Article Info

Abstract

Keywords:

Aluminum, Sandcasting, Bracket, Mechanical Strength, Kapal patroli

Abstrak

Aluminium adalah material yang sering digunakan pada industri kelautan. Memiliki keunggulan seperti ringan, kuat, tahan korosi, dan dapat di daur ulang. Pada tahun 2020, kapasitas industri aluminium nasional mencapai 250 ribu ton pertahun. Kebutuhan aluminium nasional pada tahun tersebut mencapai 1 juta ton, yang mana 748 ribu ton tersebut hasil dari impor, sehingga turut menimbulkan limbah aluminium. Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), volume limbah B3 di Indonesia pada tahun 2022 aluminium menyumbang sekitar 10% atau setara dengan 240 ribu ton. Limbah aluminium yang tidak ditangani dengan baik dapat menjadi ancaman bagi lingkungan. Sehingga didapatkan rumusan masalah tentang pengolahan daur ulang limbah aluminium sebagai pembuatan bracket mesin tempel pada kapal patroli, dengan bahan baku utama limbah kampas rem yang dilebur bersama kuningan dengan tujuan mencari material alternatif dari limbah. Metode pengolahan menggunakan peleburan dan pengecoran *sand casting*. Untuk mengetahui kekuatan mekanik dari limbah tersebut dilakukan dengan pengujian tarik sehingga dihasilkan nilai rata-rata tegangan sebesar 115,10 N/mm², nilai rata-rata regangan sebesar 0,013, dan nilai rata-rata modulus elastisitas sebesar 9857,77 N/mm². Harapannya penelitian ini dapat memberikan manfaat dalam pengolahan limbah, sehingga dapat mengurangi pencemaran lingkungan.

Article history:

Received: 11/11/24
Last revised: 29/11/24
Accepted: 29/11/24
Available online: 30/11/24
Published: 30/11/24
DOI:[https:// 10.35314/az3dd191](https://10.35314/az3dd191)

Abstract

Aluminum is a material that is often used in the marine industry. It has advantages such as light weight, strength, corrosion resistance, and recyclability. In 2020, the national aluminum industry had a capacity of 250 thousand tons per year, while the national aluminum demand reached 1 million tons, with 748 thousand tons being imported. This resulted in aluminum waste, which contributed to hazardous waste in Indonesia, accounting for around 10% or 240 thousand tons. Improper handling of aluminum waste can be harmful to the environment. Therefore, the text focuses on the recycling of aluminum waste to produce outboard engine brackets on patrol boats by using brake lining waste melted together with brass. The processing method involves melting and sand casting. Tensile testing was conducted to determine the mechanical strength of the waste, revealing average values of 115.10 N/mm² for stress, 0.013 for strain, and 9857.77 N/mm² for the elastic modulus. The goal of this research is to contribute to waste processing and reduce environmental pollution.

1. PENDAHULUAN

Aluminium adalah material yang paling populer dalam berbagai bidang salah satunya industri kelautan. Dikarenakan memiliki keunggulan-keunggulan seperti ringan, kuat, tahan korosi, dan dapat di daur ulang [1].



Gambar 1. Aluminium [2]



Gambar 2. Limbah Aluminium [6]

Pada tahun 2020, kapasitas industri aluminium nasional mencapai 250 ribu ton pertahun. Kebutuhan aluminium nasional pada tahun tersebut mencapai 1 juta ton, yang mana 748 ribu ton tersebut hasil dari impor [3]. Sehingga penggunaan aluminium ini juga turut menimbulkan jumlah limbah aluminium yang dihasilkan. Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), volume limbah B3 di Indonesia pada tahun 2022 mencapai 2,4 juta ton. Dari jumlah tersebut, limbah aluminium menyumbang sekitar 10% atau setara dengan 240 ribu ton [4].

Limbah aluminium dapat berasal dari berbagai sumber, seperti limbah pabrik, limbah elektronik, dan limbah otomotif. Limbah aluminium yang tidak ditangani dengan baik dapat menjadi ancaman bagi lingkungan. Dampak negatif limbah aluminium bagi lingkungan dikelompokkan menjadi dua, yaitu dampak primer dan dampak sekunder [5].

Dampak limbah aluminium dapat berupa pencemaran tanah, air, dan udara. Limbah aluminium yang dibuang ke tanah dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan menurunkan kualitas tanah. Begitu juga atau aluminium yang dibakar dapat melepaskan polutan ke udara dapat membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan [5].

Pengelolaan limbah aluminium di Indonesia diatur oleh Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Limbah aluminium termasuk dalam kelompok limbah berbahaya dan beracun, maka pengelolaan limbahnya harus dilakukan dengan memperhatikan aspek keamanan dan keselamatan lingkungan [7]. Dari kondisi tersebut perlu adanya upaya pengolahan limbah aluminium seperti peleburan, pencairan, dan mekanis [8].

a. Penelitian Sbelumnya

Pada tahun 2017, Afif Ardian Aziz, Kiryanto, Ari Wibawa Budi Santosa, melakukan pembuatan komponen jendela kapal dari aluminium flat bar dan kampas rem menggunakan cetakan pasir dan hasil dari uji tarik, spesimen cetakan dengan rata-rata kekuatan tarik sebesar 12,86 kg/mm² [9].

Penelitian yang telah dilakukan oleh Rendi, Muhammad Abduh, Saifullah Arief, (2023), berhasil membuat baling-baling perahu menggunakan limbah pully kipas CVT dan limbah aluminium kampas rem. Hasil studi menunjukkan bahwa komposisi campuran antara limbah kampas rem dengan limbah CVT yang paling mendekati kekerasan baling-baling yang dijual dipasaran adalah komposisi 35 persen limbah kampas rem dan 56 persen limbah CVT [10].

Tahun 2023 David Dwi Putra dkk, meneliti pemanfaatan limbah aluminium melalui proses pengecoran menggunakan tungku krusibel. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perbedaan kekerasan limbah aluminium yang berasal dari kaleng aluminium bekas, panci aluminium bekas dan

kabel aluminium bekas yang dilebur pada tungku krusibel. Hasil pengujian kekerasan Rockwell pada limbah kaleng aluminium memiliki nilai rata-rata 71,38 HRB dengan lama waktu lebur rata-rata, pada limbah panci aluminium memiliki nilai rata-rata 71,68 HRB, dan pada limbah kabel aluminium memiliki nilai rata-rata sebesar 53,02 HRB [11].

b. Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mencari material alternatif pengganti baja dan plastik dengan memanfaatkan limbah aluminium sebagai pembuatan bracketudukan mesin tempel pada kapal patroli, yang selanjutnya akan di uji tarik untuk mengetahui kekuatan material hasil peleburan tersebut.

2. METODE

2.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Identifikasi masalah merupakan tahap awal dimana peneliti mencari berbagai sumber informasi tentang sebuah permasalahan yang sedang dihadapi oleh masyarakat salah satunya ialah tentang pengolahan limbah kampas rem supaya bisa dimanfaatkan kembali. Penelitian ini mencari rumusan masalah proses daur ulang limbah kampas rem dan hasil uji mekanik[15].

2.2 Studi Literatur dan Studi Lapangan

Pada penelitian ini menggunakan dua metode yaitu studi literatur dan studi lapangan, dimana yang harus dilakukan adalah mencari referensi dari buku dan jurnal sebagai acuan bahwa penelitian ini bisa dilakukan dan diaplikasikan, didalam pencarian studi literatur dimulai dari mencari data kandungan kampas rem, kandungan unsur-unsur paduan, nilai elektrolisis paduan terhadap kampas rem, proses pembuatan cetakan, proses peleburan, pengecoran dan pengujian mekanik.

Selanjutnya sebagai pengembangan dan implementasi teori agar bisa di aplikasikan di lapangan dilakukan survei meliputi survei lokasi yang banyak limbah kampas rem, dan ditemukan tempat yaitu paling banyak menghasilkan limbah kampas rem adalah di bengkel-bengkel sepeda motor[12]. Survei terakhir yang dilakukan ialah mencari bengkel tempat peleburan logam atau usaha UMKM yang melayani jasa peleburan.

2.3 Proses Daur Ulang Limbah Kampas Rem

Proses daur ulang dilakukan untuk memilih material yang masih layak digunakan dengan kriteria masih utuh, tidak patah, dan belum berkarat agar didapatkan lebih banyak kandungan aluminium didalam limbah tersebut[13].



Gambar 3. Pembersihan Kampas Rem

Limbah kampas rem didapatkan dari beberapa bengkel dan pengepul logam, selanjutnya dilakukan pemisahan material dan pembersihan kampas rem dari kotoran, oli, dan bahan berbahaya

lainnya, selanjutnya menghilangkan material komposit dari sepatu kampas (Brake Shoe) karena material tersebut tidak ikut dilebur[14].

2.4 Alat dan Bahan

Ayakan pasir (*mesh*), palu, sarung tangan, jangka sorong, mesin bor, ampelas, kikir, gerinda tangan, panci tuang, tungku, *thermogun*, cetok, kampas rem, pasir res, minyak tanah.

2.5 Proses Pembuatan Cetakan

a. Proses pengayakan pasir

Bertujuan untuk menyamakan ukuran butiran pasir dan membersihkan dari kotoran.



Gambar 4. Pengayakan Pasir

b. Pemberian minyak tanah

Minyak tanah digunakan sebagai bahan pengikat dan pengeras resin dengan pasir melewati proses pembakaran untuk pengerasan cetakan atau curing.



Gambar 5. Penambahan Minyak Tanah

c. Pembuatan pola

Pola disesuaikan dengan bentuk bracket dengan skala 1:1 sehingga akan didapatkan bentuk cetakan yang sama dan presisi. Ada dua bagian utama dari cetakan: cetakan atas (*cope*) dan cetakan bawah (*drag*). Kemudian setelah cetakan terbentuk angkat pola secara perlahan supaya cetakan pasir tetap dalam posisi dan tidak hancur.



Gambar 6. Pembuatan Pola

d. Pembakaran cetakan

Proses pembakaran dilakukan agar resin yang terkandung dalam pasir mengeras sehingga cetakan menjadi padat, keras, dan tidak mudah pecah. Pembakaran dilakukan dengan waktu sekitar 3-5 menit sampai warna pasir berubah warna kuning kecokelatan.



Gambar 7. Pembakaran Cetakan

e. Penambahan saluran tuang dan buang.

Saluran keluar masuk cairan atau rinner dan riser sebagai penghubung saluran penuangan dengan rongga cetakan didalamnya. Dengan diameter lubang saluran tuang 120 mm, dan lubang saluran buang 100 mm. Setelah saluran lubang terpasang cetakan siap untuk digunakan



Gambar 8. Penambahan Saluran Tuang dan Buang

f. Hasil cetakan

Cetakan terbagi menjadi dua, yaitu bagian atas (*cope*) dan cetakan bawah (*drag*), nanti keduanya akan di satukan menggunakan perekat, dengan posisi bagian permukaan datar berada dibawah dan pola bagian inti berada di atas.



Gambar 9. Hasil Cetakan

2.6 Proses Peleburan dan Pengecoran

Dalam proses peleburan limbah kampas rem yang telah bersih kemudian dimasukkan ke dalam tungku peleburan, tungku peleburan biasanya terbuat dari baja dan dipanaskan dengan bahan bakar gas. Pada saat dipanaskan, aluminium akan meleleh pada suhu sekitar 660- 700°C, setelah aluminium kampas rem dan kuningan cair selanjutnya dituangkan ke dalam cetakan pasir yang sebelumnya telah dibuat, proses penuangan cairan kedalam cetakan dinamakan pengecoran.

a. Peleburan

Proses memasukkan dan pemanasan material limbah kampas rem ditambah kuningan hingga mencapai titik leleh sehingga berubah menjadi bentuk cair. Waktu proses peleburan antara 45 menit sampai 1 jam, dengan suhu didih $\pm 660-700$ °C.



Gambar 10. Peleburan

b. Persiapan tempat cetakan

Cetakan yang sudah dibuat awal dari pasir RCS disiapkan di lantai datar, kemudian ditutup dan ditambah lagi dengan pasir pengikat pasir silika ditambah bentonit supaya cetakan padat tidak memuai dan tidak terjadi kebocoran pada saat penuangan.



Gambar 11. Penataan Cetakan

Selanjutnya cetakan dipanaskan 3-5 menit terlebih dahulu untuk mencegah pendinginan logam cair yang terlalu cepat, yang bisa menyebabkan cacat pada produk akhir.

c. Penuangan

Proses ini harus dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari pembentukan gelembung udara dan memastikan logam cair tersebar merata dalam cetakan.

Setelah aluminium sudah cair dan mendidih, cairan langsung dituangkan kedalam cetakan, untuk menghindari proses pembekuan yang tidak maksimal, sehingga tidak boleh ada jeda waktu.



Gambar 12. Penuangan Cairan

d. Pendinginan

Setelah cetakan terisi penuh, selanjutnya dibiarkan dingin dan mengeras, proses pendinginan ini menggunakan pendinginan udara atau suhu ruang ± 20 menit atau sering disebut dengan metode *normalizing*.



Gambar 13. Pendinginan

e. Pembongkaran

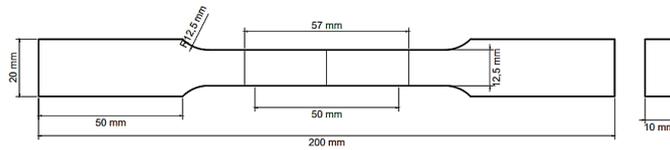
Proses Pembongkaran atau pelepasan, setelah sepenuhnya mengeras, produk dilepaskan dari cetakan dan akan dihasilkan produk sesuai dengan model yang telah dibuat diawal.



Gambar 14. Pembongkaran

2.7 Pembuatan Spesimen Uji Tarik

Pembuatan spesimen di peroleh dari material limbah kampas rem yang sudah dilebur dan dicetak dalam bentuk lembaran plat, dari bentuk lembaran plat kemudian dibentuk lagi menggunakan mesin frais sampai membentuk desain yang telah ditentukan oleh standart ASTM-E8/E8M.



Gambar 15. Spesimen Uji Tarik

Keterangan :

<i>Gage length (G)</i>	: 50,0 mm
<i>Length of reduced section (A)</i>	: 57 mm
<i>Width (W)</i>	: 12,5 mm
<i>Thickness (T)</i>	: 10 mm
<i>Radius of fillet (R)</i>	: 12,5 mm
<i>Overall length (L)</i>	: 200 mm
<i>Width of grip section (C)</i>	: 20 mm
<i>Length of grip section (B)</i>	: 50 mm

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah spesimen selesai dibuat, pengujian tarik pada hasil pengecoran limbah kampas rem berdasarkan ASTM-E8/E8M seperti pada Gambar 16.



Gambar 156. Pengujian Tarik

Setelah spesimen selesai akan terlihat bagian patahan dari spesimen tersebut seperti pada Gambar 17.



Gambar 167. Spesimen Uji Tarik

Berdasarkan ASTM-B209/B209M (*Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate*). Dari hasil pengujian spesimen pada gambar 13 akan didapatkan nilai tegangan, regangan, dan modulus elastisitas.

3.1 Persamaan Matematika

$$\sigma = \frac{P \text{ max}}{\text{Lebar} \times \text{Tebal}} = \frac{P}{A} \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{\ell_1 - \ell_0}{\ell_0} \tag{2}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{3}$$

Dimana:

σ adalah tegangan tarik maksimum (N/mm²)

P adalah beban tarikan (N)

A adalah luas penampang awal (mm²).

ε adalah regangan

ℓ_0 adalah panjang mula (mm)

ℓ_1 adalah panjang sesudah patah (mm)

E adalah elastisitas (N/mm²)

3.2 Tabel Hasil Pengujian Tarik

Tabel 1. Tegangan Tarik Maksimum

No Spesimen	A (mm ²)	P Max (N)	σ Max (N/mm ²)
1	156.25	17735	113.50
2	147.50	16446	111.50
3	122.50	13985	114.16
4	128.64	15368	119.47
5	113.28	14006	123.64
6	123.60	14385	116.38
7	135.72	14528	107.04
σ rata-rata (N/mm²)			115.10

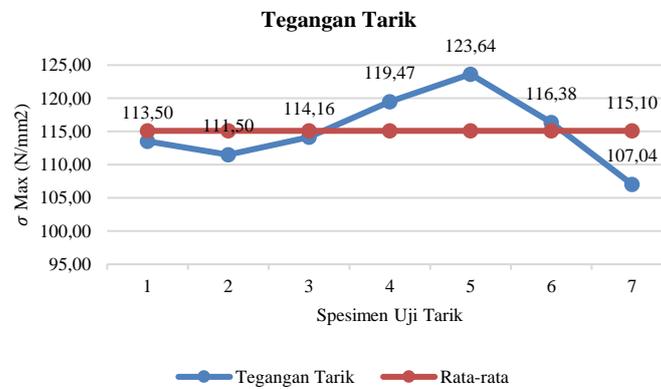
Tabel 2. Regangan Tarik Maksimum

No Spesimen	ℓ_0 (mm)	ℓ_1 (mm)	$\Delta \ell$ (mm)	Regangan
1	202.3	205.3	3.00	0.015
2	202.0	205.3	3.30	0.016
3	201.6	204.2	2.60	0.013
4	202.2	204.8	2.60	0.013
5	202.0	204.0	2.00	0.010
6	202.7	204.7	2.00	0.010
7	202.6	204.8	2.20	0.011
Regangan rata-rata				0.013

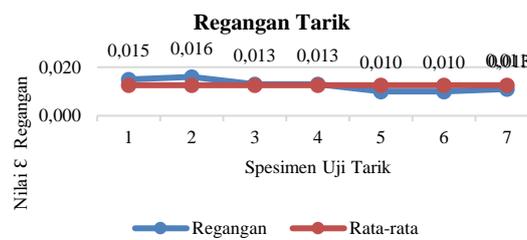
Tabel 3. Modulus Elastisitas

No Spesimen	Tegangan Maksimum (N/mm ²)	Regangan	E (N/mm ²)
1	113.50	0.015	7653.95
2	111.50	0.016	6825.05
3	114.16	0.013	8852.04
4	119.47	0.013	9290.71
5	123.64	0.010	12487.69
6	116.38	0.010	11795.47
7	107.04	0.011	9857.77
E rata-rata			9537.53

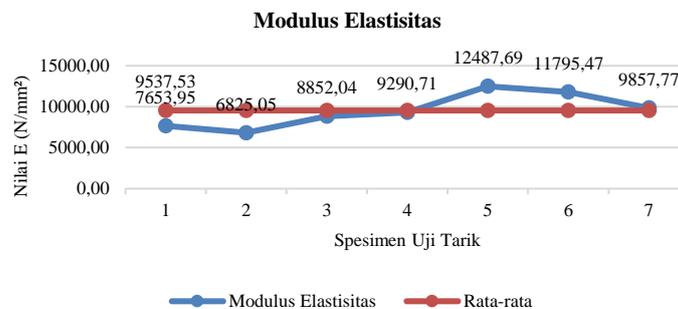
3.3 Grafik Hasil dan Rata-Rata Pengujian Tarik



Gambar 18. Grafik Tegangan Tarik Maksimum



Gambar 19. Grafik Regangan Tarik Maksimum



Gambar 20. Grafik Modulus Elastisitas

4. KESIMPULAN

Daur ulang dilakukan dengan mengidentifikasi limbah sepatu kampas rem yang masih utuh, dan tidak berkarat untuk didapatkan lebih banyak kandungan aluminium. Selanjutnya dilakukan peleburan bersama logam kuning yang merupakan logam paduan antara tembaga dan seng.

Pemilihan unsur tembaga dan seng sebagai paduan berdasarkan nilai deret volta mendekati unsur kromium sebagai logam dengan keunggulan sifat anti korosi. Proses pemanasan untuk menghasilkan logam paduan baru yang lebih anti korosi menggunakan metode *normalizing*.

Uji mekanik dilakukan dengan pengujian tarik sehingga dihasilkan nilai rata-rata tegangan sebesar 115,10 N/mm² dengan nilai tertinggi pada spesimen 5 sebesar 123,64 N/mm². Nilai rata-rata regangan sebesar 0,013 dengan nilai tertinggi pada spesimen 2 sebesar 0,016. Nilai rata-rata modulus elastisitas sebesar 9857.77 N/mm² dengan nilai tertinggi pada spesimen 5 sebesar 12487.69 N/mm².

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih disampaikan kepada kedua orang tua yang telah membantu secara moral maupun moril, terimakasih disampaikan kepada ibu Rika dan bapak Arus yang telah membimbing pada penelitian ini. Terimakasih juga disampaikan kepada kampus Politeknik Negeri Madura yang telah berkenan memberikan fasilitas penelitian melalui tugas akhir tahun 2024, serta teman-teman dan semua pihak yang sudah membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W.Wibowo, "Studi Eksperimental Pengendalian Laju Korosi Fatik Pada Aluminium 2024-T3 Di Lingkungan Air Laut Melalui Penambahan Inhibitor Kalium Kromat (K₂CrO₄)," *J. Sains Dan Teknol. Marit.*, vol. 5, no. 1, pp. 10–16, 2017, doi: 10.33556/jstm.v0i1.155.
- [2] RRSJA, "Plate Aluminium 5083 Marine," *rrsentosajaya.com*. Accessed: Jan. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.rrsentosajaya.com/2021/06/16/jual-plate-aluminium-5083-marine/>
- [3] C. I. Anisatul Umaha, "Punya Harta Karun Bauksit, RI Impor Aluminium 748.000 Ton," *cncbindonesia.com*. Accessed: Jan. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.cncbindonesia.com/news/20211001121330-4-280670/punya-harta-karun-bauksit-ri-impor-aluminium-748000-ton>
- [4] S. Wahyuni, L. Hakim, and F. Hasfita, "Pemanfaatan limbah kaleng minuman aluminium sebagai penghasil gas hidrogen menggunakan katalis natrium hidroksida (NaOH)," vol. 1, pp. 92–104, 2016.
- [5] L. T. Indriyati, B. Nugroho, and F. Hazra, "Detoksifikasi Aluminium dan Ketersediaan Fosforus dalam Tanah Masam Melalui Aplikasi Bahan Organik," *J. Ilmu Pertan. Indones.*, vol. 28, no. 1, pp. 10–17, 2022, doi: 10.18343/jipi.28.1.10.
- [6] S. Aang, "Lima Tahun Dagang Spare Part Motor Rongsokan," *merahputih.com*. Accessed: Jan. 04, 2024. [Online]. Available: <https://merahputih.com/post/read/lima-tahun-dagang-spare-part-motor-rongsokan>
- [7] I. Republik, *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. Indonesia, 2014, pp. 1–233.
- [8] Muhammad Nur Panghurian and Nukman Nukman, "Uji Sifat Mekanik Hasil Peleburan Aluminium Kaleng Minuman Bekas dengan Bahan Bakar Minyak Pelumas Bekas Diberi Perlakuan Panas dengan Dapur Listrik dan Tungku Krusibel," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 20, no. 2, pp. 35–40, 2021, doi: 10.36706/jrm.v20i2.67.

- [9] A. A. Aziz, Kiryanto, and A. W. B. Santosa, "Analisa Kekuatan Tarik, Kekuatan Tekuk, Komposisi dan Cacat Pengecoran Paduan Aluminium Flat Bar dan Limbah Kampas Rem dengan Menggunakan Cetakan Pasir dan Cetakan Hidrolik sebagai Bahan Komponen Jendela Kapal Afif," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 1, pp. 97–103, 2017.
- [10] , R., M. Abduh, and S. Arief, "Analisa Sifat Mekanik Baling-Baling Perahu Ketinting Berbahan Dasar Limbah Alumunium Kampas Rem dan Limbah Alumunium CVT," *Al Jazari J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 36–39, 2023, doi: 10.31602/al-jazari.v8i1.10594.
- [11] D. Dwi Putra, F. Haqqoni, M. Nurhilal, and U. Ulikaryani, "Pengaruh Jenis Limbah Aluminium Pada Proses Pengecoran Menggunakan Tungku Krusibel Terhadap Nilai Kekerasannya," *Infotekmesin*, vol. 14, no. 2, pp. 413–417, 2023, doi: 10.35970/infotekmesin.v14i2.1948.
- [12] Zhang, M., Guo, X., Tian, B., Wang, J., Qi, S., Yang, Y., & Xin, B. (2019). Improved bioleaching of copper and zinc from brake pad waste by low-temperature thermal pretreatment and its mechanisms.. *Waste management*, 87, 629-635 . <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.02.047>.
- [13] Aizawa, T., Luangvaranunt, T., & Kondoh, K. (2002). Solid State Recycling of Recyclable Aluminum Wastes with In-Process Microstructure Control. *Materials Transactions*, 43, 315-321. <https://doi.org/10.2320/MATERTRANS.43.315>.
- [14] Tamayo, A., Rubio, F., Pérez-Aparicio, R., Saiz-Rodríguez, L., & Rubio, J. (2021). Preparation and Properties of Sustainable Brake Pads with Recycled End-of-Life Tire Rubber Particles. *Polymers*, 13. <https://doi.org/10.3390/polym13193371>.
- [15] Hu, X., Ning, W., Pan, P., & Bai, T. (2017). Performance evaluation of asphalt mixture using brake pad waste as mineral filler. *Construction and Building Materials*, 138, 410-417. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.02.031>.