

## Karakterisasi pengecoran *connecting rod* dengan penambahan unsur paduan titanium-boron (Ti-B)

Andika Wisnujati<sup>1\*</sup>, Muhammad Abdus Shomad<sup>2</sup>, Mudjijana<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Otomotif, Program Vokasi Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, Indonesia

<sup>1</sup>Department of Computer Science and Information Engineering, Asia University Taiwan  
No. 500, Liufeng Rd., Wufeng District, Taichung City, Taiwan

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, Indonesia

\*Corresponding author: [andikawisnujati@umy.ac.id](mailto:andikawisnujati@umy.ac.id)

### Abstract

*Nowadays, motorcycles become a primary need for people, especially in Indonesia. This has resulted in the increasing number of motorcycle spare parts waste. The waste is in the form of motorcycle components such as wheels, tires, drums, canvas, gear, chains and pistons and many others. Until now, the community has not used this waste, especially the use of used pistons as raw material for casting connecting rods. Connecting rod itself is a motorcycle component made of aluminum. In this study, the authors wanted to analyze the physical and mechanical properties of the casting (imitation) connecting rods made from used pistons with the addition of Titanium Boron (Ti-B) elements. The characterization of the casting results was analyzed by observing the microstructure and Vickers hardness test. The results showed that the physical properties of the foundry material contained 81.6% aluminum and 13.09% silicon, while on microstructure observations with a magnification of 100x, the Al phase and Al-Si alloys were more dominant. In the Vickers hardness test, the hardness result was 79.59 VHN. This is due to the addition of Ti-B elements which can refine grains and reduce porosity in aluminum silicon (Al-Si) alloys for motorcycle connecting rod spare parts.*

**Keywords:** *Connecting rod, casting, Titanium Boron, microstructure, Vickers harness.*

### Abstrak

Kendaraan bermotor, khususnya sepeda motor pada abad ini sudah menjadi kebutuhan utama masyarakat, khususnya di Indonesia. Hal tersebut berdampak pada kebutuhan *spare part* sepeda motor. Selain itu juga banyak limbah berupa komponen-komponen sepeda motor seperti *velg*, ban, tromol, kampas, *gear*, rantai dan piston serta masih banyak lainnya. Rekayasa material untuk limbah tersebut saat ini masih sangat terbatas dilakukan oleh masyarakat khususnya pemanfaatan piston bekas sebagai bahan baku pengecoran *connecting rod*. *Connecting rod* sendiri merupakan komponen sepeda motor yang terbuat dari aluminium. Pada penelitian ini, penulis ingin menganalisa sifat fisik dan mekanik *connecting rod* hasil pengecoran (imitasi) berbahan baku piston bekas dengan penambahan unsur Titanium Boron (Ti-B). Karakterisasi hasil pengecoran dianalisa dengan pengamatan struktur mikro dan pengujian kekerasan Vickers. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat fisik material hasil pengecoran memiliki kandungan aluminium sebesar 81,6% dan silikon 13,09%, sedangkan pada pengamatan struktur mikro dengan perbesaran 100x terbentuk fasa Al dan paduan Al-Si yang lebih dominan. Pada pengujian kekerasan Vickers diperoleh hasil kekerasan sebesar 79,59 VHN. Hal tersebut dikarenakan adanya penambahan unsur Ti-B yang dapat memperhalus butir dan mengurangi porositas pada paduan aluminium silikon (Al-Si) untuk spare part *connecting rod* sepeda motor.

**Kata kunci:** Connecting rod, pengecoran, Titanium Boron, struktur mikro, kekerasan Vickers.

## Pendahuluan

Pertumbuhan kendaraan merupakan masalah yang tidak dapat dipisahkan dari transportasi yang berkelanjutan. Pada tahun 2014, jumlah kepemilikan kendaraan pribadi di Indonesia mencapai lebih dari 448 kendaraan per 1.000 orang. Khusus untuk mobil mencapai 324 kendaraan per 1000 orang. Pertumbuhan kepemilikan kendaraan pribadi sangat dipengaruhi oleh pertumbuhan ekonomi (salah satu ukuran pertumbuhan ekonomi adalah Produk Domestik Bruto - PDB). Seiring dengan pertumbuhan kepemilikan sepeda motor di Indonesia, maka kebutuhan akan spare part kendaraan pun akan semakin meningkat. [1, 2]. Perkembangan teknologi material maju sekarang ini telah dapat membuat berbagai macam produk dalam segala hal yang bertujuan memudahkan segala aktifitas manusia. Berbagai sarana transportasi tersedia, mulai dari darat, udara, dan laut. Sepeda motor adalah salah satu kendaraan yang diproduksi massal di Indonesia. Namun, sepeda motor kita pada umumnya memiliki umur yang lebih panjang dengan komponen sepeda motor yang didesain dengan efektif dan efisien, juga tergantung dari bahan atau material dari komponen tersebut.

Piston dan *connecting rod* memiliki hubungan yang linier dalam mesin kendaraan bermotor. Pada saat proses pembakaran terjadi didalam silinder, tenaga yang dihasilkan oleh gas pembakaran sangatlah tinggi. Jika piston dan kelengkapannya tidak mampu menahan daya ledak dari proses pembakaran tersebut, dapat dipastikan kalau piston dan *connecting rod* dapat mengalami kerusakan [3].

Penelitian mengenai logam (besi, baja, aluminium, dan lain-lain) telah banyak dilakukan diberbagai artikel ilmiah [4-8]. Namun, pemanfaatannya untuk saling menggantikan antara satu material dengan material dalam pembuatan sebuah komponen masih jarang dilakukan. Salah

satu komponen yang jarang dilakukan rekayasa material adalah *connecting rod*. Fungsi *connecting rod* sendiri didalam sepeda motor adalah untuk menyalurkan tenaga dari piston menuju *crankshaft* [5].

Bentuk produk atau *spare part* yang kompleks dapat dibuat dengan metode pengecoran. Jenis pengecoran menurut cetakan dibagi menjadi beberapa jenis diantaranya cetakan pasir (*Sand Casting*) dan cetakan logam (*Die Casting*). Pada penelitian ini digunakan metode *sand casting*. Pengecoran dengan *sand casting* ini digunakan untuk mengolah logam yang memiliki temperatur rendah, seperti besi, tembaga, aluminium, magnesium, dan nikel. Untuk jenis pasir yang digunakan, biasanya menggunakan pasir *silica* ( $\text{SiO}_2$ ) atau bisa juga dicampur dengan mineral lain seperti tanah lempung atau resin organik [9].



Gambar 1. *Connecting rod* sepeda motor

Penulis memiliki hipotesis jika dilakukan rekayasa terhadap bahan aluminium dengan penambahan Ti-B dengan kadar tertentu mampu menyaingi kekuatan dari baja. Jika hal tersebut terbukti maka fungsi baja dalam *connecting rod* akan dapat digantikan oleh aluminium. Pemilihan bahan aluminium dari piston bekas untuk proses pengecoran *connecting rod* karena bahan *recycle* tersebut jarang dimanfaatkan kembali. Pengecoran merupakan salah satu proses rekayasa material aluminium. Sehingga pencampuran material saat proses pengecoran berlangsung dapat lebih homogen dari pada dengan proses yang lain.

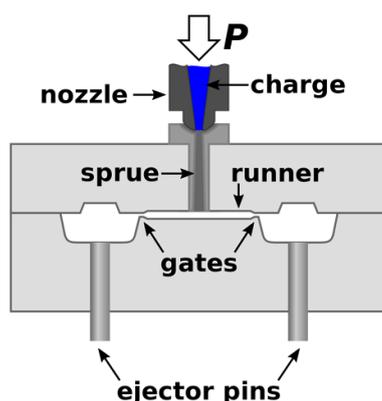
## Tinjauan Pustaka

Aluminium merupakan logam dalam kategori logam ringan yang memiliki sifat kekuatan yang tinggi, tahan terhadap karat dan merupakan penghantar listrik yang baik. Pada umumnya pemakaian logam aluminium sering digunakan dalam bidang kimia, listrik, bangunan, transportasi dan alat-alat penyimpanan [10, 11].

Tabel 1. Karakteristik aluminium [12]

Sifat-sifat	Aluminium murni tinggi
Struktur kristal	FCC
Densitas pada 20°C (sat. 103kg/m <sup>3</sup> )	2,689
Titik cair °C	660,1
Konduktifitas panas 20°C – 400°C (W/ (m.K))	238
Tahanan listrik 20°C (10 <sup>-8</sup> KΩm)	2,69
Modulus elastisitas (GPa)	70,5
Modulus kekakuan (GPa)	26,0

Penelitian yang dilakukan oleh Farid, dkk., [13] menunjukkan bahwa parameter *pouring* temperature dan tinggi *sprue* cetakan terhadap sifat logam cair di dalam cetakan pada pengecoran *connecting rod*. Variasi tinggi *sprue* yang digunakan adalah 20 mm, 60 mm, dan 100 mm. Sedangkan untuk variasi temperatur penuangan adalah 715°C, 740°C, dan 765°C.



Gambar 2. Pengecoran *die casting* [13]

Wisnujati [11] meneliti tentang penambahan unsur Ti-B sebesar 0,02% pada pengecoran *screw* (poros berulir). Didapatkan hasil pengujian maksimum terjadi pada bahan paduan Al-Si dengan penambahan TiB 0,02% dan pemanasan

suhu cetakan 400°C menghasilkan tegangan tarik maksimum sebesar 628,86 N/mm<sup>2</sup>, sedangkan untuk pengujian kekerasan menghasilkan angka kekerasan sebesar 114 VHN. Penelitian yang lain oleh Wisnujati [8] menyebutkan bahwa penambahan elemen Titanium Boron (Ti-B) dan Magnesium (Mg) pada material Aluminium Silicon (Al-Si) untuk pembuatan poros berulir menyebabkan peningkatan ketahanan terhadap korosi akibat perbedaan suhu selama proses penuangan logam cair.

Pada pengecoran *squeeze (direct squeeze casting)* pada paduan aluminium daur ulang dengan variasi temperatur 300°C dan 400°C. Tekanan diberikan pada saat pembekuan sebesar 0 MPa, 10 MPa, 20 MPa dan 30 MPa selama 100 detik. Pengurangan cacat, meningkatkan kekerasan hasil coran, membuat struktur butir paduan silicon semakin rapat dan halus merupakan salah satu hasil dari metode pengecoran *squeeze* [14].

Penentuan temperatur penuangan dan waktu tuang sangat berpengaruh terhadap proses pengecoran karena faktor-faktor tersebut ternyata memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil pengecoran yaitu terhadap penyusutan hasil coran. Variabel waktu tuang yang digunakan adalah 1, 5 dan 10 detik sedangkan temperturnya adalah 800°C, 900°C dan 1000°C. Pengujian yang dilakukan adalah pengukuran penyusutan spesimen. Hasil yang didapatkan adalah pada perlakuan waktu tuang 10 detik dan temperatur 1000°C. Penyusutan yang dihasilkan pada kondisi tersebut adalah 1,61 gr sedangkan pada temperatur tuang 1000°C penyusutannya sebesar 1,85 gr [15].

## Metode Penelitian

### Alat-alat dan bahan

Alat yang digunakan adalah dapur peleburan, alat uji komposisi kimia logam coran, alat uji struktur mikro dan uji kekerasan bahan dengan metode *Vickers*. Pengecoran dilakukan di IKM Pengecoran logam, Nitikan Umbulharjo, Yogyakarta. Sedangkan untuk pengujian spesimen

dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah aluminium dari piston bekas sepeda motor, titanium boron (Ti-B) dan gas CO<sub>2</sub>. Pembuatan *connecting rod* menggunakan metode pengecoran dengan cetakan *sand casting*. Jenis pengecoran metode ini paling sering digunakan dalam industri pengecoran, dikarenakan biaya produksi yang murah dan mudah dalam pembuatannya [16,18-21].



Gambar 3. Piston bekas



Gambar 4. Titanium Boron (Ti-B)

Pengujian kekerasan *Vickers* menggunakan penumbuk berupa piramida intan yang berbentuk bujur sangkar. Nilai kekerasan *Vickers* (VHN) adalah sebagai suatu beban dibagi dengan luas permukaan pijakan. Luasan dihitung melalui pengamatan dengan menggunakan mikroskop untuk mengetahui panjang diagonal jejak dengan persamaan sebagai berikut [17,22]:

$$VHN = \frac{1,854 \times P}{D^2} \quad (1)$$

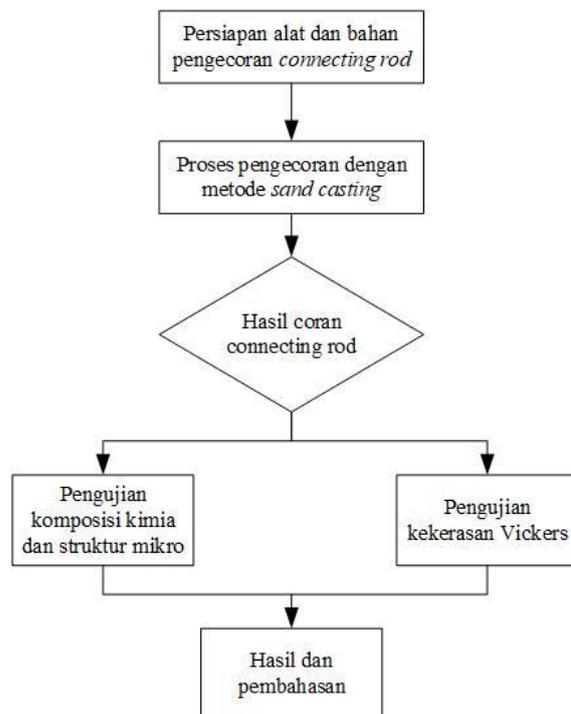
dengan P adalah beban injakan yang digunakan sebesar 30 kgf dan D adalah diameter rata-rata dari bekas injakan.

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dari material hasil pengecoran *connecting rod*. Dua permukaan atas dan bawah tegak lurus saat diletakkan di atas dudukan mikroskop optik. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan mikroskop metalurgi Olympus.



Gambar 5. Metallurgical Microscope Invertigo Type [8]

### Diagram alir penelitian



Gambar 6. Diagram alir penelitian

### Hasil dan Pembahasan

Pada proses pengecoran, paduan aluminium dari piston bekas dilebur dalam tungku peleburan logam kemudian setelah mencapai titik lebur, dituang kedalam

cetakan *sand casting*. Hasil dari proses pengecoran logam dengan menggunakan pasir cetak yang telah dilakukan pada Gambar 7.



Gambar 7. *Sand casting connecting rod*

Setelah bahan coran dalam dapur peleburan melebur sempurna, kemudian dimasukan unsur Ti-B sebesar 0,05% dan diaduk hingga bercampur (homogen). selanjutnya dituangkan kedalam cetakan. Tunggu beberapa saat hingga logam cair mengeras dan dapat dibongkar dari cetakan.



Gambar 8. Hasil pengecoran *connecting rod*

Pembuatan spesimen sama dengan pembuatan prototipe. Yang membedakan yaitu material dipotong bagian *big end* dan bagian *small end* untuk mempermudah saat proses pengujian spesimen.



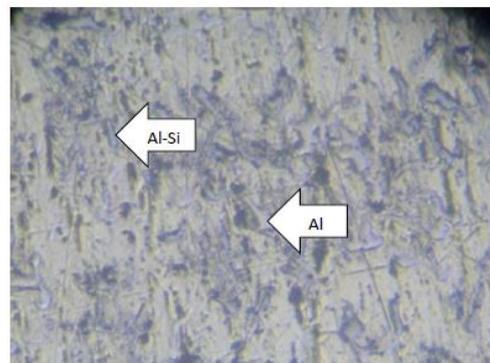
Gambar 9. Spesimen uji

Pada pengujian komposisi kimia logam, didapatkan hasil bahwa unsur utama dari penyusun *connecting rod* adalah aluminium sebesar 81,6% dan silikon sebesar 13,09%, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian komposisi kimia

No	Unsur	Komposisi (%)
1	Silikon (Si)	13,09
2	Besi (Fe)	0,844
3	Tembaga (Cu)	0,663
4	Mangan (Mn)	0,074
5	Magnesium (Mg)	2,631
6	Nikel (Ni)	0,827
7	Seng (Zn)	0,161
8	Titanium (Ti)	0,051
9	Timah (Sn)	0,014
10	Aluminium (Al)	81,60

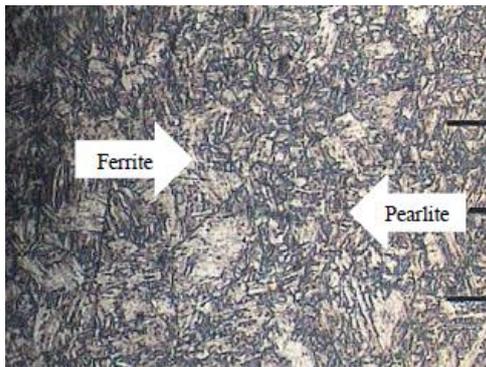
Pada data Tabel 2 aluminium dan silikon menjadi yang dominan dengan kandungan aluminium 81,60% dan silikon 13,0910%. Karena sifatnya yang tahan panas dan saat pembekuannya paduan ini hampir tidak memiliki keretakan pada permukaannya. Selain hal tersebut, paduan Al-Si memiliki karakteristik sangat ringan, dengan koefisien pemuaian yang kecil, dan menjadi penghantar panas yang baik. Karakterisasi paduan Al-Si dapat diperbaiki dengan dilakukan perlakuan panas dan penambahan material lain. Penambahan unsur Ti-B dalam paduan Al-Si dimaksudkan untuk memperhalus butir dan meningkatkan ketahanan aus material coran [8].



Gambar 10. Spesimen struktur mikro hasil coran *connecting rod*

Pengujian struktur mikro dilakukan pengamatan menggunakan alat uji mikroskop optik yang dapat melihat struktur

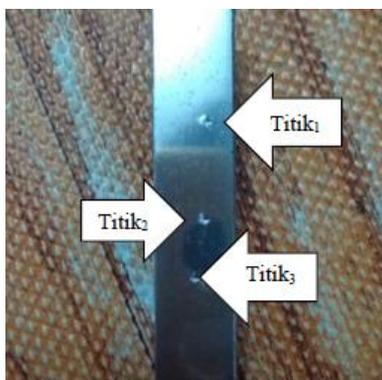
permukaan agar dapat diteliti atau dianalisa hasil pengecorannya.



Gambar 11. Struktur mikro *connecting rod* original

Pengujian ini menggunakan pembesaran 100x seperti yang terlihat pada Gambar 10 dan 11 diatas. Pada gambar 10 terlihat jelas bahwa adanya fasa Al sebagai larutan primer dalam hasil coran aluminium dan fasa Al-Si yang terbentuk karena jumlah prosentase Si (silikon) lebih banyak daripada unsur lainnya. Pada Gambar 11, Hasil dari struktur mikro *connecting rod* original menunjukkan bahwa adanya dua fasa yang terbentuk yaitu fasa *ferrite* yang ditunjukkan dengan adanya warna putih dan fasa *pearlite* yang ditunjukkan dengan adanya warna hitam. Fasa ini terbentuk karena kandungan karbon yang bervariasi seiring arah menuju inti dari *connecting rod* tersebut.

Pengujian kekerasan *Vickers* menggunakan beban statis. Hal tersebut digunakan untuk menganalisa nilai kekerasan bahan getas dimana kecenderungan menjadi patah sebanding dengan volume bahan yang ditegangkan.



Gambar 12. Distribusi acak pengujian kekerasan *Vickers*

Tabel 3. Hasil pengujian kekerasan *Vickers*

Distribusi kekerasan	D rata-rata	VHN	Rerata VHN
Acak	0,995	76,45	
Acak	0,96	81,31	79,59
Acak	0,955	81,3	

Pada Tabel 3 diatas diketahui bahwa nilai rata-rata kekerasan *Vickers* sebesar 79,59 VHN. Nilai kekerasan tersebut dipengaruhi oleh unsur Al-Si yang sifat umumnya meningkatkan tingkat kekerasan logam dan dapat menghambat lajur korosi pada spesimen.

### Kesimpulan

Hasil pengujian komposisi bahan menunjukkan unsur Al dan Si lebih dominan yang berpengaruh pada uji struktur mikro menunjukan adanya 2 fasa yang terbentuk yaitu fasa Al dan fasa Al-Si. Pengaruh penambahan Ti-B 0,05% juga dapat memperhalus butiran yang terlihat pada pengujian kekerasan dan pengujian struktur mikro. Sedangkan hasil pengujian kekerasan *Vickers* menunjukan nilai kekerasan sebesar 79,59 VHN. Untuk penelitian lanjutan dari rekayasa material ini dapat dilakukan dengan menggunakan *die casting* atau variabel penambahan unsur lain untuk pembuatan spare part kendaraan.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas Kerjasama dan bantuan yang diberikan dalam menyelesaikan penelitian ini kepada IKM Pengecoran Logam bapak Sujito di Nitikan, Umbulharjo, Yogyakarta dan Departement Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik UGM atas bantuannya dalam pengujian bahan.

### Referensi

- [1] S. Yagi, D. Nobel, and H. Kawaguchi, "Time series comparison of models of auto and motorcycle ownership and mode choice in a changing transportation environment: Jakarta, Indonesia,"

- Transportation research record*, vol. 2317, no. 1, pp. 40-50, 2012.
- [2] N. Kresnanto, "Model of relationship between car ownership growth and economic growth in Java," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 650, no. 1: IOP Publishing, p. 012047.
- [3] Z. Abidin and B. R. Rama, "Analisa distribusi tegangan dan defleksi connecting rod sepeda motor 100 cc menggunakan metode elemen hingga," *Jurnal Rekayasa Mesin Universitas Sriwijaya*, vol. 15, no. 1, pp. 30-39, 2015.
- [4] S. Suherman, S. Sarjianto, and N. Bahri, "Penambahan Sr pada Aluminium Paduan A356 dengan Metode Lost Foam Casting (LFC)," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 16, no. 2, pp. 249-254, 2021.
- [5] A. Pranata, A. M. Siregar, B. Dharma, W. S. Damanik, and A. R. Nasution, "Mamfaatkan Limbah Skrap Aluminium Untuk Knalpot Sepeda Motor Vega ZR Tahun 2011 Guna Mengurangi Polusi Udara," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 4, no. 2, pp. 160-168, 2021.
- [6] M. A. Shomad and A. A. Jordianshah, "Pengaruh Penambahan Unsur Magnesium pada Paduan Aluminium dari Bahan Piston Bekas," *Teknoin*, vol. 26, no. 1, pp. 75-82, 2020.
- [7] S. Suprpto, T. Sujitno, and T. Taufik, "Analisa Permukaan Material Aluminium Paduan (Alsicu) Hasil Nitridasi Ion," *Ganendra*, vol. 19, no. 2, pp. 65-74, 2016.
- [8] A. Wisnujati, M. Yusuf, and A. Hudiatma, "Karakterisasi Pengecoran Poros Berulir (Screw) Dengan Variabel Paduan Unsur Titanium Boron Dan Magnesium," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 29-36, 2022.
- [9] L. H. Damanik, A. H. Husodo, T. Gunawan, and P. Hadi, "Model Pengendalian Kesehatan Tenaga Kerja Pada Kegiatan Pengecoran Logam Tradisional Studi Kasus Di Kawasan Industri Batur Klaten-Jawa Tengah," *Jurnal Teknosains*, vol. 4, no. 2, 2015.
- [10] J. Hirsch, "Recent development in aluminium for automotive applications," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, no. 7, pp. 1995-2002, 2014.
- [11] A. Wisnujati and L. A. Hafiz, "Analisis Sifat Fisik dan Mekanik Poros Berulir (Screw) Untuk Pengupas Kulit Ari Kedelai Berbahan Dasar Aluminium Bekas dan Piston Bekas," *INTEK: Jurnal Penelitian*, vol. 4, no. 1, pp. 1-9, 2017.
- [12] T. Surdia and S. Saito, "Pengetahuan Bahan Teknik, PT," *Pradnya Paramita, Jakarta*, 2005.
- [13] F. M. Anwar, M. I. P. Hidayat, and M. Ramadhani, "Simulasi Aliran pada Proses Pengecoran Connecting Rod Berbahan Aluminium 7075 untuk Mesin Motor 150 cc dengan Variasi Tinggi Sprue Cetakan dan Temperatur Penuangan Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 9, no. 2, pp. F171-F176, 2021.
- [14] S. B. Respati, H. Purwanto, and M. Mauluddin, "Pengaruh tekanan dan temperatur cetakan terhadap struktur mikro dan kekerasan hasil pengecoran pada material aluminium daur ulang," in *Prosiding Seminar Nasional & Internasional*, 2010, vol. 3, no. 1.
- [15] W. Sujana and A. Setiawan, "Pengaruh Temperatur Tuang Dan Waktu Tuang Terhadap Penyusutan Silinder Coran Alumunium Dengan

- Cetakan Logam," *Jurnal Flywheel*, vol. 3, no. 2, pp. 17-23, 2010.
- [16] A. Wisnujati, M. Yusuf, and D. Fatimah, "Karakterisasi hasil quenching besi cor pada manufaktur roda gigi mesin tenun," *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, vol. 10, no. 1, 2021.
- [17] P. H. Tjahjanti, "Buku Ajar Pengetahuan Bahan Teknik," *Umsida Press*, pp. 1-119, 2019.
- [18] Drihandono, S., & Budiyanto, E. (2017). Pengaruh Temperatur Tuang, Temperatur Cetakan, dan Tekanan Pada Pengecoran Bertekanan (High Pressure Die Casting/HPDC) Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Aluminium Paduan Silikon (Al-Si 7, 79%). *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 5(1).
- [19] Nugroho, E., Budiyanto, E., & Firdaus, A. D. (2021). Pengaruh penambahan Silikon pada remelting piston motor bekas menggunakan tungku induksi terhadap kekuatan tarik dan kekerasan. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 10(2).
- [20] Budiyanto, E., Nugroho, E., & Zainudin, A. (2018). Uji ketahanan fatik aluminium scrap hasil remelting piston bekas menggunakan alat uji fatik tipe rotary bending. *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, 7(1).
- [21] Nugroho, E., Budiyanto, E., Kurniawan, R., & Sumosusilo, J. (2020). Uji ketahanan fatik aluminium hasil remelting piston bekas menggunakan metode pengecoran centrifugal casting. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 8(2).
- [22] Budiyanto, E. (2020). *Pengujian Material*. Laduny Alifatama.