

Analisis proses lost PLA casting untuk manufaktur propeller kapal cepat tanpa awak melalui studi dummy dengan material timah

Moh. Nor Ali Aziz^{a,1}, Ekky Julian^{a,2}, Arief Harosono^{a,3}, Gusti M Mufid Daffa A^{a,4}

^a Program Studi Teknik Mesin, Universitas 17 Agustus 1945, Kota Surabaya, 60118

¹Email korespondensi: aliaziz@untag-sby.ac.id

Abstrak. Perkembangan teknologi yang pesat dalam berbagai bidang seperti robotika, mekatronika, semikonduktor, dan pembuatan prototipe telah membawa perubahan signifikan. Salah satu kemajuan ini adalah meningkatnya minat dan kebutuhan akan prototipe kapal cepat tanpa awak. Penelitian ini berfokus pada penggunaan metode Lost PLA Casting dalam pembuatan propeller untuk kapal cepat tanpa awak. Metode ini memungkinkan produksi komponen kompleks dengan tingkat presisi yang tinggi dan dengan jumlah banyak. Desain propeller dicetak dengan 3D printing menggunakan bahan PLA (Polylactic Acid) sebagai pola cetakan. Penelitian ini secara khusus mengeksplorasi pengaruh penggunaan alat vakum yang divariasikan, yaitu 0,3 bar, 0,6 bar, 0,9 bar dan tanpa alat vakum, dengan temperatur tuang pada 250 °C, 275 °C, 300 °C menggunakan bahan timah, dengan analisis cacat pada produk. Secara keseluruhan, hasil pengamatan pada produk menunjukkan masih ada cacat porositas rongga gas, tetapi pada tekanan alat vakum 0,9 bar dengan temperatur tuang 250 °C, 275 °C, 300 °C memiliki produk yang lebih baik dan pada tekanan alat vakum 0,3 bar, 0,6 bar, dan tanpa alat vakum dengan temperatur tuang 250 °C, 275 °C, 300 °C masih memiliki cacat seperti cacat oksidasi, cacat salah alir, cacat retakan. Sehingga penggunaan alat vakum yang divariasikan tidak berpengaruh pada produk dan temperatur tuang tidak begitu berbeda sampai pada penggunaan alat vakum.

Kata kunci: *Lost PLA Casting, Propeller, Alat vakum, Temperatur tuang*

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/c913zs17>

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang pesat dalam berbagai bidang seperti robotika, mekatronika, semikonduktor, dan pembuatan prototipe telah membawa perubahan signifikan dalam dunia global. Salah satu manifestasi dari kemajuan ini adalah meningkatnya minat dan kebutuhan akan prototipe kapal cepat tanpa awak. Kapal-kapal ini dirancang dengan berbagai tipe dan model untuk memenuhi beragam kegunaan, yang pada gilirannya mempermudah dan membantu manusia dalam berbagai bidang pekerjaan, terutama yang berkaitan dengan eksplorasi dan pengawasan maritim [1]. Dalam pengembangan prototipe kapal cepat tanpa awak, salah satu komponen kunci yang mendapat perhatian khusus adalah propeller atau baling-baling. Propeller berfungsi sebagai penggerak utama dan penerus daya kapal, sehingga efisiensi dan kinerja propeller sangat mempengaruhi performa kapal secara keseluruhan. Pemilihan material untuk propeller menjadi sangat krusial, dengan mempertimbangkan berbagai sifat mekanik dan kimia seperti kekerasan, kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap korosi. Karakteristik-karakteristik ini sangat penting mengingat lingkungan operasional kapal yang sering kali menantang dan korosif [2].

Desain propeller itu sendiri merupakan suatu tantangan teknis yang menarik. Propeller harus memiliki bentuk geometris yang dapat diukur dengan presisi, memiliki wujud yang jelas, dan dapat

didefinisikan secara pasti. Hal ini penting untuk memastikan kinerja hidrodinamis yang optimal dan efisiensi energi yang tinggi. Desain yang tepat dapat meningkatkan daya dorong kapal sekaligus mengurangi turbulensi dan gesekan air, yang pada akhirnya berdampak positif pada kecepatan dan konsumsi bahan bakar kapal [3]. Dalam upaya untuk memproduksi propeller dengan tingkat presisi dan kompleksitas tinggi, metode Lost PLA Casting telah muncul sebagai solusi yang menjanjikan. Metode ini memanfaatkan teknologi cetak 3D komputer untuk membuat model propeller dari bahan PLA (Polylactic Acid), yang kemudian digunakan sebagai pola untuk proses pengecoran logam. Teknik ini memungkinkan produksi benda-benda logam dengan detail yang halus dan bentuk rumit yang sulit dicapai dengan menggunakan teknik pengecoran konvensional. Oleh karena itu, Lost PLA Casting sangat cocok untuk pembuatan komponen mesin presisi seperti propeller. Namun, perlu dicatat bahwa proses ini memerlukan keahlian dan ketelitian tingkat tinggi untuk mencapai hasil yang optimal [4]. Salah satu aspek penting dalam metode Lost PLA Casting adalah penggunaan sistem vakum. Sistem ini berperan krusial dalam menghilangkan udara yang terperangkap di dalam cetakan dan memfasilitasi pengaliran logam cair saat dituang. Dengan menerapkan teknik vakum, aliran logam

menjadi lebih lancar dan merata, yang pada gilirannya meningkatkan kualitas produk hasil akhir secara keseluruhan. Penggunaan vakum juga membantu mengurangi porositas dan cacat lainnya yang mungkin timbul selama proses pengecoran, sehingga menghasilkan propeller dengan struktur internal yang lebih padat dan kuat [5].

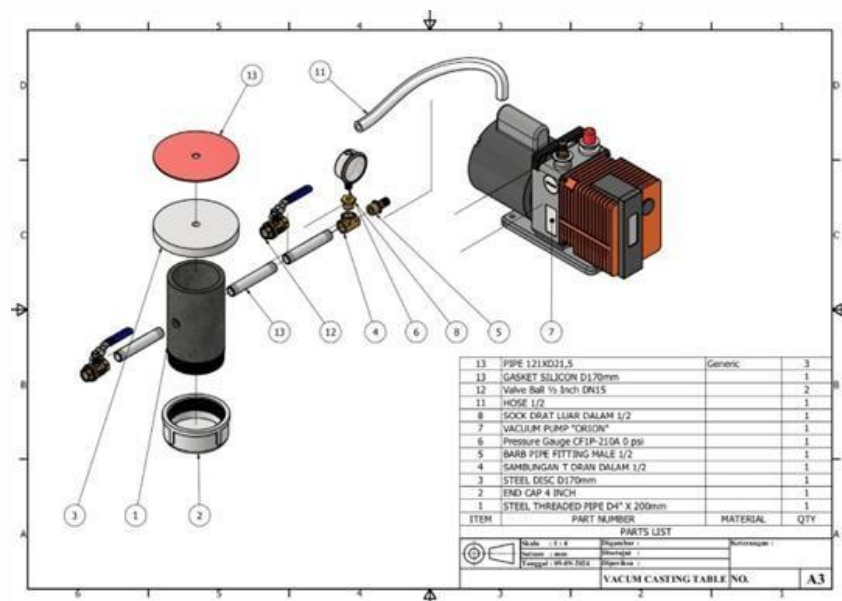
Dengan demikian, penelitian dan pengembangan lebih lanjut dalam bidang ini tidak hanya akan meningkatkan kualitas dan kinerja propeller untuk kapal cepat tanpa awak, tetapi juga berpotensi membawa inovasi yang dapat diterapkan dalam industri maritim secara lebih luas. Hal ini pada akhirnya dapat berkontribusi pada efisiensi energi

yang lebih baik, pengurangan dampak lingkungan, dan peningkatan keamanan dalam operasi maritim.

METODOLOGI

Pembuatan Alat Vakum

Pembuatan alat vakum dilakukan berdasarkan desain yang telah ditentukan dan kemudian disambungkan dengan mesin pompa vakum merek ORION ¼ HP (lihat Gambar 1). Fungsi dari penggunaan alat vakum ini adalah untuk menghisap udara yang terdapat di dalam cetakan sehingga dapat mengurangi terbentuknya porositas atau gelembung udara pada hasil pengecoran. Penggunaan vakum pada proses pengecoran dapat meningkatkan kualitas hasil cor dengan meminimalkan cacat akibat udara yang terperangkap di dalam cetakan [6].



Gambar 1. Desain alat vakum dan mesin pompa vakum

Desain Pola Induk

Pola induk yang digunakan adalah propeller kapal cepat tanpa awak dengan diameter 40 mm, diameter shaft tengah 8 mm, panjang 14 mm dan tebal bilah 1 mm dengan panjang 16 mm. Desain propeller kapal tanpa awak dibuat dengan mempertimbangkan efisiensi dan karakteristik hidrodinamika yang sesuai dengan kebutuhan operasi kapal tanpa awak. Desain yang telah dibuat kemudian dicetak menggunakan mesin 3D printing Ender-6 dengan material Polylactic Acid (PLA). Teknologi 3D printing memungkinkan pembuatan geometri yang kompleks dengan tingkat presisi yang baik sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pola pada proses investment casting [7].

Desain Pola Aliran dan Perakitan Pohon

Assembly

Pola aliran memiliki diameter 70 mm dengan ketebalan 4 mm, diameter batang 8 mm dengan panjang 60 mm, serta diameter tangkai 5 mm dengan panjang 20 mm dengan kemiringan 45°. Sistem saluran pada proses pengecoran berfungsi untuk mengarahkan aliran logam cair menuju rongga cetakan secara terkendali sehingga proses pengisian cetakan berlangsung stabil. Desain sistem saluran yang tepat dapat mengurangi kecepatan aliran yang berlebihan serta meminimalkan terjadinya turbulensi yang dapat menyebabkan cacat pengecoran seperti porositas dan oksida terperangkap pada hasil coran.[8].

Pembuatan Cetakan Dengan Ceramic Slurry

Ceramic slurry dibuat dari campuran gypsum dan air dengan perbandingan 2,6 : 1. Pada penelitian ini digunakan takaran 395 ml gypsum dan 150 ml air untuk pembuatan cetakan propeller kapal tanpa awak. Gypsum merupakan material mineral berbasis kalsium sulfat yang banyak digunakan sebagai bahan cetakan dalam proses pengecoran karena mampu menghasilkan detail permukaan yang baik serta memiliki stabilitas dimensi yang cukup baik pada proses pembentukan cetakan [9]. Setelah pola induk dimasukkan ke dalam wadah cetakan, bubur gypsum dituangkan hingga seluruh pola tertutup. Selanjutnya dilakukan proses vakum menggunakan vacuum chamber untuk menghilangkan gelembung udara yang terperangkap di dalam slurry sehingga dapat meningkatkan kualitas permukaan dan mengurangi cacat pada hasil coran. Setelah proses tersebut selesai, dibiarkan selama kurang lebih 24 jam hingga mengering dan memperoleh kekuatan yang cukup sebelum digunakan pada proses pengecoran [9].

Pemanasan Pola

Setelah cetakan gypsum mengering, proses selanjutnya adalah pemanasan untuk mencairkan pola induk agar menghasilkan rongga cetakan. Pemanasan awal membutuhkan temperatur 150 °C selama 60 menit kemudian dinaikkan ke temperatur 420 °C dengan waktu 120 menit untuk melelehkan PLA dan memperkuat rongga cetakan agar tidak terjadi kerusakan pada saat penuangan logam cair. Sebelum proses penuangan logam dilakukan, sistem vakum diatur menggunakan dial indikator sesuai dengan variasi tekanan vakum yang digunakan dalam penelitian, yaitu 0,3 bar, 0,6 bar, dan 0,9 bar. Penggunaan vakum pada proses pengecoran bertujuan untuk membantu aliran logam cair mengisi rongga cetakan secara lebih merata serta mengurangi kemungkinan terjadinya cacat pengecoran seperti porositas akibat udara yang terperangkap di dalam cetakan.

Penuangan Logam Cair

Peleburan logam dilakukan menggunakan tungku listrik dengan bahan logam berupa timah hitam (Sn) yang memiliki titik leleh sekitar 23 °C. Sebanyak 1 kg logam dilebur hingga mencair, kemudian temperatur penuangan divariasikan menjadi 250 °C, 275 °C, dan 300 °C sebelum dituangkan ke dalam cetakan menggunakan sistem vakum selama 3 menit. Temperatur penuangan merupakan parameter penting dalam proses pengecoran karena mempengaruhi kemampuan aliran logam cair dan proses pengisian cetakan serta potensi terbentuknya cacat pengecoran [10]. Setelah penuangan selesai, logam didiamkan hingga mengalami pembekuan selama kurang lebih 15 menit sebelum proses selanjutnya dilakukan.

Mengeluarkan Hasil Produk dari Cetakan

Setelah logam membeku, produk dikeluarkan dari cetakan dengan cara merendam cetakan gypsum ke dalam air sehingga material gypsum melunak dan dapat dilepas dari produk cor. Proses ini harus dilakukan secara hati-hati agar tidak merusak hasil coran yang telah terbentuk.

Finishing

Tahap finishing dilakukan dengan memotong dan meratakan saluran masuk menggunakan gerinda mini. Penggunaan gerinda mini sesuai untuk pengerjaan komponen berukuran kecil karena memberikan kontrol pemotongan yang lebih presisi.

Pengujian Tak Merusak

Pengujian dilakukan pada dua jenis produk, yaitu produk dengan penggunaan vakum dan tanpa penggunaan vakum. Metode pengujian yang digunakan adalah *Non-Destructive Testing* (NDT) dengan metode Dye Penetrant. Metode ini merupakan teknik inspeksi yang digunakan untuk mendeteksi cacat permukaan seperti retak, porositas, atau diskontinuitas pada material logam maupun nonlogam tanpa merusak material yang diuji. Prinsip pengujian ini memanfaatkan cairan penetrant yang masuk ke dalam celah atau retakan kecil pada permukaan material melalui aksi kapilaritas sehingga cacat dapat terlihat setelah proses pengembangan [11].

Perhitungan Penyusutan

Perhitungan penyusutan dilakukan secara teoritis dengan dua metode pengukuran, yaitu menggunakan metode displacement air untuk menentukan volume serta pengukuran massa menggunakan timbangan dengan ketelitian 0,001 gram. Metode ini digunakan untuk mengetahui perubahan volume antara pola induk dan produk hasil pengecoran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis menggunakan alat vakum dan tanpa menggunakan alat dengan temperatur tuang. Hasil dari pemeriksaan secara visual jika produk terbentuk secara utuh 99% maka dilakukan proses selanjutnya analisis cacat pada setiap produk dengan pengujian dye penetrant dan perhitungan penyusutan yang dijelaskan sebagai berikut:

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa cacat porositas (lihat gambar 2) muncul baik pada produk dengan maupun tanpa vakum. Porositas ini terjadi akibat gelembung udara yang masih terperangkap di dalam cetakan, sehingga permukaan produk tampak tidak rata. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas alat vakum chamber belum maksimal dalam mengeluarkan udara dari rongga cetakan. Dari sisi teori pengecoran, porositas umumnya timbul karena laju pengisian logam cair tidak seimbang dengan laju

pengeluaran gas dari cetakan. Pada kondisi ini, meskipun sistem vakum digunakan, jika tekanan tidak optimal atau rongga cetakan kurang kedap,

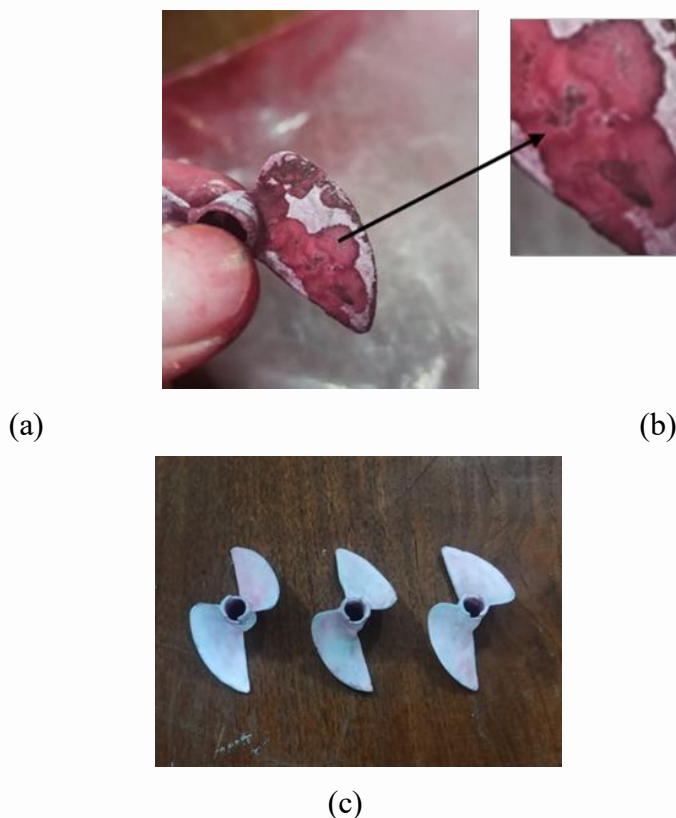
gelembung tetap terbentuk. Artinya, diperlukan perbaikan pada desain cetakan dan sistem vakum agar hasil coran lebih padat.



Gambar 2. Cacat porositas rongga gas



Gambar 3. Cacat oksidasi (a) temperatur tuang 275 °C (b) temperatur tuang 300 °C



Gambar 4. (a) cacat salah alir (b) cacat retakan (c) tidak terdapat cacat

Pada temperatur tuang 275 °C dan 300 °C tanpa penggunaan vakum, ditemukan cacat oksidasi (lihat gambar 3) yang ditandai dengan perubahan warna pada permukaan produk. Hal ini terjadi karena adanya oksigen yang bereaksi dengan logam cair pada temperatur tinggi. Tanpa vakum, udara terjebak dalam cetakan dan kontak oksigen dengan logam lebih besar, sehingga proses oksidasi semakin kuat. Secara teori, semakin tinggi temperatur tuang, semakin cepat pula reaksi oksidasi berlangsung. Oleh karena itu, penggunaan sistem vakum terbukti penting untuk meminimalkan kontak logam cair dengan oksigen selama proses penuangan.

Pada kondisi tertentu, khususnya tekanan vakum rendah (0,3–0,6 bar) dan tanpa vakum, ditemukan cacat salah alir (lihat gambar 4a). Hal ini terjadi karena udara tidak sepenuhnya keluar dari rongga cetakan, sehingga aliran logam cair tidak sempurna dan menghasilkan produk dengan rongga kosong.

Sementara itu, cacat retakan (lihat gambar 4b) muncul pada tekanan vakum 0,6 bar dan 0,9 bar pada temperatur rendah. Retakan ini dipicu oleh tegangan sisa akibat pendinginan yang tidak merata, sehingga logam membeku dengan cepat pada bagian tertentu sementara bagian lain masih dalam fase cair. Secara teoritis, pendinginan tidak seragam akan menghasilkan tegangan tarik internal yang memicu retakan. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa pengaturan temperatur tuang yang lebih tinggi dapat membantu mengurangi potensi salah alir maupun retakan dengan menjaga fluiditas logam cair tetap baik. Sedangkan pada tekanan alat vakum 0,3 bar; 0,6 bar; 0,9 bar dengan temperatur tuang 300 °C. Produk tidak menunjukkan indikasi cacat (lihat gambar 4c).

Hasil pengambilan data pada 36 spesimen lalu dicari nilai rata-rata dan dilakukan perhitungan untuk mencari volume pola induk dan volume pola induk didapatkan:



Tabel 1. Pengambilan data

Temperatur tuang (°C)	Tekanan alat vakum (bar)	Nilai (g/cm ³)
250	0,3	6,9
	0,6	6,3
	0,9	6,7
275	0,3	7
	0,6	6,9
	0,9	7
300	0,3	6,9
	0,6	6,9
	0,9	7
250, 275, 300	Tanpa alat vakum	7

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Di mana :

V = volume (cm³)

M = massa g/cm³

ρ = massa jenis g/cm³

Volume pola induk

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{0,79}{1,1} = 0,71 \text{ cm}^3$$

Volume hasil produk

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{6,9}{10} = 0,69 \text{ cm}^3$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{6,3}{10} = 0,63 \text{ cm}^3$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{6,7}{10} = 0,67 \text{ cm}^3$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{7}{10} = 0,7 \text{ cm}^3$$

Setelah mendapat nilai dari volume pola induk dan produk, dihitung penyusutan :

$$S = \frac{(V \text{ asli} - V \text{ produk})}{V \text{ asli}} \times 100\%$$

Di mana:

S = presentase penyusutan

V asli = volume benda asli

V produk = volume produk

$$S = \frac{0,71 - 0,69}{0,71} \times 100\%$$

$$= 2,8 \%$$

$$S = \frac{0,71 - 0,63}{0,71} \times 100\%$$

$$= 11,2 \%$$

$$S = \frac{0,71 - 0,67}{0,71} \times 100\%$$

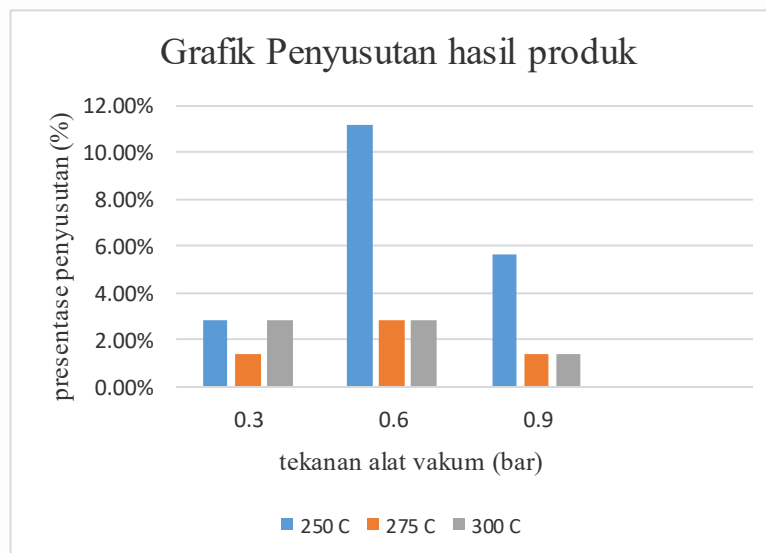
$$= 5,6 \%$$

$$S = \frac{0,71 - 0,7}{0,71} \times 100\%$$

$$= 1,4 \%$$

Tabel 2. Hasil perhitungan penyusutan

Temperatur tuang (°C)	Tekanan alat vakum (bar)		
	0,3	0,6	0,9
250	2,8 %	11,2 %	5,6 %
275	1,4 %	2,8 %	1,4 %
300	2,8 %	2,8 %	1,4 %



Gambar 5. Grafik hasil penyusutan

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penyusutan bervariasi antara 1,4% hingga 11,2%. Penyusutan terbesar terjadi pada temperatur tuang 250 °C dengan tekanan vakum 0,6 bar (11,2%), sedangkan penyusutan terkecil sebesar 1,4% terjadi pada

temperatur 275 °C–300 °C dengan beberapa variasi vakum. Besarnya penyusutan pada temperatur rendah disebabkan oleh viskositas logam cair yang masih tinggi, sehingga rongga cetakan tidak terisi sempurna dan menghasilkan volume akhir produk lebih kecil

dari pola induk. Sebaliknya, pada temperatur tuang yang lebih tinggi, fluiditas logam meningkat, aliran lebih lancar, dan pengisian cetakan lebih optimal, sehingga penyusutan dapat ditekan. Grafik penyusutan memperlihatkan pola yang tidak linier, menandakan bahwa selain temperatur, pengaruh tekanan vakum juga harus diperhitungkan. Namun, dari tren data terlihat bahwa temperatur tuang merupakan faktor dominan yang mengendalikan penyusutan, sementara tekanan vakum lebih berfungsi untuk mengurangi porositas dan memperbaiki detail cetakan.

KESIMPULAN

Prosedur Lost PLA Casting berhasil dikembangkan secara komprehensif dengan mengintegrasikan teknologi 3D printing dan teknik pengecoran presisi sehingga mampu menghasilkan propeller dengan geometri kompleks dan toleransi yang tinggi.

Penerapan metode ini juga terbukti meningkatkan efisiensi manufaktur, ditunjukkan dengan waktu produksi yang lebih singkat, biaya yang lebih rendah, serta tingkat kepresisian yang lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi temperatur tuang (250 °C, 275 °C, 300 °C) menghasilkan pola penyusutan yang tidak linier, dengan penyusutan tertinggi terjadi pada 250 °C dan terendah pada 300 °C. Penggunaan alat bantu vakum berperan penting dalam mengurangi porositas, mengoptimalkan pengisian detail cetakan, serta meningkatkan kualitas struktur logam hasil cor. Selain itu, temperatur tuang terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap struktur mikrometrik, laju pendinginan, dan tegangan internal yang menjadi variabel kunci dalam menentukan kualitas akhir hasil pengecoran.

REFERENSI

- [1] D. Kurniawan, G. S. Santyadiputra, dan G. A. Pradnyana, "Pengembangan Prototipe Kapal Tanpa Awak Untuk Pemantauan Daerah Perairan Berbasis Ardupilot," *Kumpul. Artik. Mhs. Pendidik. Tek. Inform.*, vol. 11, no. 2, hal. 175–181, 2022.
- [2] N. Martini, A. Hendra, C. Pasha, dan I. Alfian, "Analisa Pengaruh Variasi Jenis Material Propeller Dan Jarak Propeller Di Dalam Air Terhadap Performansi Mesin Motor Perahu Nelayan," *Mekanika*, vol. 2, no. 1, hal. 1–7, 2016.
- [3] A. K. Putera, A. Suprihanto, dan Y. Umardani, "Perancangan dan Pembuatan Propeller Perahu Nelayan Dengan Metode Investment Casting Pola Lilin dan Cetakan Pasir," *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 5, no. 2, hal. 100–113, 2022, doi: 10.18196/jmpm.v5i2.11774.
- [4] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley & Sons, 2010.
- [5] N. Jono Adj, A. Kurniawan, dan I. H. Siahaan, "Pemanfaatan mesin vacuum casting semi otomatis untuk kebutuhan pembuatan produk perhiasan," *J. Tek. Mesin*, vol. 20, no. 1, hal. 24–30, 2023.
- [6] Paryono, T. Jurusan Mesin, P. Negeri, S. H. Jl, dan S. H. Sudarto, "Aplikasi Tekanan Vakum Pada Cetakan Logam Sistem Gravitasi Untuk Menurunkan Porositas Pada Pengecoran Paduan Aluminium Alsicu," hal. 0–3, 2015, [Daring]. Tersedia pada: <http://www.learneasy.info/index.html>
- [7] L. Szabo, G. Deak, D. Nyul, and S. Keki, "Flexible investment casting wax pattern for 3D printing: Their rheological and mechanical characterizations," 2022.
- [8] M. Brúna, M. Galcik, R. Pastircak, and E. Kantorikova, "Effect of Gating System Design on the Quality of Aluminum Alloy Castings," *Metals (Basel)*, vol. 14, no. 3, 2024, doi: 10.3390/met14030312.
- [9] Z. Zhao, G. Zhou, S. Zhang, and B. Xiao, "Research on alloy form characteristics based on gypsum molding," *Open Mater. Sci. J.*, vol. 5, hal. 147–151, 2011, doi: 10.2174/1874088X01105010147.
- [10] S. Namchanthra, C. Suvanjumrat, W. Chookaew, W. Wijitdamkerng, and M. Promtong, "A CFD Investigation Into Molten Metal Flow and Its Solidification Under Gravity Sand Moulding in Plumbing Components," *Int. J. GEOMATE*, vol. 22, no. 92, hal. 100–108, 2022, doi: 10.21660/2022.92.gxi319.
- [11] M. Inês Silva, E. Malitckii, T. G. Santos, and P. Vilaça, "Review of conventional and advanced non-destructive testing techniques for detection and characterization of small-scale defects," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 138, no. June, 2023, doi: 10.1016/j.pmatsci.2023.101155.