



ANALISIS PENGECORAN ALUMINIUM SAND-CASTING PROPELLER BERDAUN TIGA UNTUK PERAHU NELAYAN DENGAN SISTEM SALURAN LANGSUNG

ANALYSIS OF ALUMINUM SAND CASTING OF A THREE-BLADED PROPELLER FOR FISHING BOATS WITH A DIRECT GATING SYSTEM

Mega Lazuardi Umar*, Agung Fauzi Hanafi

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Banyuwangi
Jalan Raya Jember KM 13 Banyuwangi 68461, Jawa Timur, Indonesia

*Korespondensi: megalazuardiumar@poliwangi.ac.id (ML Umar)

Diterima 17 Februari 2025 – Disetujui 28 April 2025

ABSTRAK. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi dan verifikasi proses pengecoran material aluminium menggunakan metode sand casting dengan sistem saluran langsung untuk perahu nelayan tradisional. Simulasi numerik dilakukan untuk memprediksi aliran logam cair, pembekuan, dan potensi cacat coran yaitu penyusutan porositas. Menggunakan metode simulasi, terlihat daerah shrinkage porosity berada pada titik tengah poros propeller dan juga berada pada ujung daun propeller. Hasil yang seragam juga diverifikasi oleh eksperimen. Agar hasil pengecoran menjadi lebih baik, rekomendasi pengecoran dengan saluran langsung ditampilkan namun masih menunjukkan shrinkage porosity yaitu pada bagian riser, poros, dan ujung daun propeller. Namun jika dibandingkan dengan hasil sebelum perbaikan menunjukkan pengurangan cacat penyusutan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai optimasi desain sistem saluran pada pengecoran propeller menggunakan metode sand casting sehingga dapat meningkatkan kualitas produk dan mengurangi potensi cacat pada propeller yang digunakan untuk perahu nelayan tradisional.

KATA KUNCI: Aluminium, pengecoran, propeller, simulasi

ABSTRACT. This research aims to simulate and verify the aluminum material casting process using the sand casting method with a top gating system for traditional fishing boats. Numerical simulations were conducted to predict molten metal flow, solidification, and potential casting defects, specifically shrinkage porosity. Using the simulation method, the shrinkage porosity area was observed at the central point of the propeller shaft and also at the tips of the propeller blades. Consistent results were also verified by experiments. To improve the casting results, direct gating casting recommendations are presented but still show shrinkage porosity in the riser, shaft, and propeller blade tips. However, when compared to the results before the improvement, a reduction in shrinkage defects is evident. This research is expected to provide a better understanding of the optimization of gating system design in propeller casting using the sand casting method, thereby improving product quality and reducing the potential for defects in propellers used for traditional fishing boats.

KEYWORDS: Aluminum, casting, propeller, simulation

1. Pendahuluan

Propeller atau baling-baling kapal adalah sebuah alat yang digunakan untuk menghasilkan gaya dorong yang berasal dari transmisi gerakan rotasi poros pada mesin menjadi daya dorong (Jin *et al.*, 2023). Propeller banyak digunakan perahu nelayan tradisional untuk menggerakkan kapal mencari ikan. Propeller perahu nelayan dapat terbuat dari berbagai macam material, yang paling umum digunakan adalah propeller paduan aluminium dengan cara teknik pembuatan menggunakan peleburan logam yang kemudian dicetak sesuai dengan bentuk dan ukuran (Ezanno *et al.*, 2015). Tipe propeller banyak sekali macamnya diantaranya adalah: *Fixed Pitch Propellers*; *Ducted Propellers*; *Podded and Azimuthing Propulsion*; *Contra-Rotating Propellers*; *Overlapping Propellers*; *Tandem Propellers*; dan lain sebagainya. (Shreyash *et al.*, 2020) sedangkan tipe propeller yang sering digunakan pada perahu nelayan adalah tipe *Fixed Pitch Propellers* berdaun 3 sebagaimana yang ditampilkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Fixed Pitch Propellers Berdaun Tiga (Endrawan et al., 2019).

Beberapa penelitian terdahulu tentang pengecoran logam pada propeller telah dilakukan diantaranya adalah Chuodhari *et al.* (2019) melakukan observasi solidifikasi dengan bantuan software, mendapatkan hasil bahwa dengan melakukan modifikasi, *yield* dapat meningkat 15%, dan mengurangi uji coba eksperimen pengecoran yang mahal dan *time consuming*. Karim *et al.* (2021) melakukan eksperimen pengecoran dengan menggunakan aluminium menemukan bahwa variasi temperatur penuangan berpengaruh terhadap ukuran cacat porositas pada pengecoran. Ukuran porositas pada pengecoran dapat terminimalisir apabila temperatur tuang diatur pada 740oC. Endrawan (Endrawan *et al.*, 2019) melakukan modifikasi sistem saluran pengecoran dengan tinggi 50 dan 100 mm dan mendapatkan cacat shrinkage berada pada rentang 0.83-1.73%, menurutnya masih perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk meminimalisir shrinkage. Fachrie (2015) membuat rancang bangun dan analisa simulasi sistem saluran dan penambah (*riser*) terhadap cacat penyusutan (*shrinkage*), didapatkan bahwa perlu penentuan dimensi yang efektif untuk menghindari penyusutan. Malysza *et al.* (2022), melakukan analisis bahwa perubahan desain pada teknologi pengecoran memungkinkan untuk menghilangkan cacat. Akhyar *et al.* (2022), melakukan eksperimen untuk mengetahui cacat pengecoran pada propeller kapal dengan tujuan untuk mendeteksi chemical composition, dan mengetes sifat-sifat mekanik dengan quality inspection.

Pada penelitian ini konsep *Finite Elemen Analysis* (FEA) (Chen *et al.*, 2022). Beberapa *software* yang sering digunakan untuk memecahkan persoalan FEA pada pengecoran adalah ANSYS, open FOAM, Flow3D Cast, SolidCast, ProCast, dan lain sebagainya. Pada pengecoran logam, persamaan matematika yang digunakan adalah *Volume of Fluid* (VOF). Metode VOF menyediakan cara yang sederhana dan ekonomis untuk melacak batas bebas dalam grid dua atau tiga dimensi, dan lebih fleksibel dan efisien dalam menangani masalah yang melibatkan highly complex free surface configurations. Sebagaimana yang dideskripsikan pada persamaan Navier–Stokes berikut (Hirt *et al.*, 1981):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \varepsilon \frac{A_y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \partial u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \varepsilon \frac{A_y u v}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \partial u_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \partial u_s) \end{aligned} \quad (1)$$

dimana:

- U = (u, v, w)-fluid velocity
- P = pressure
- G = Percepatan gravitasi

- t = viscosity tensor of effort
 KU = koefisien gesekan
 $RSOR U/r$ = acceleration caused by the injected mass of aluminum at zero speed;
 F = Gaya

Adapun perhitungan untuk mendeskripsikan konsep dan proses solidifikasi yaitu perubahan fasa dari liquid menjadi padat ditunjukkan pada persamaan 2 berikut ini (Rajkumar *et al.*, 2021):

$$V_{F_{i,j,k}} \cdot \frac{(\rho I)_{ijk}^{n+1} - (\rho I)_{ijk}^n}{\sigma t^{n+1}} = X_{ijk}^n - \sum_{faces} \frac{Ak}{\sigma} (T_{ijk}^n - T_{adjacent}^n) - h_{ijk} WA (T_{ijk}^n - TW_{ijk}^n) \quad (2)$$

dimana:

- T = temperatur fluida;
 TW = temperature cetakan;
 H = heat transfer coefficient;
 WA = an interfacial area;
 A = a cell-face area;
 K = rata-rata konduktivitas panas;
 δ = an appropriate spatial increment.

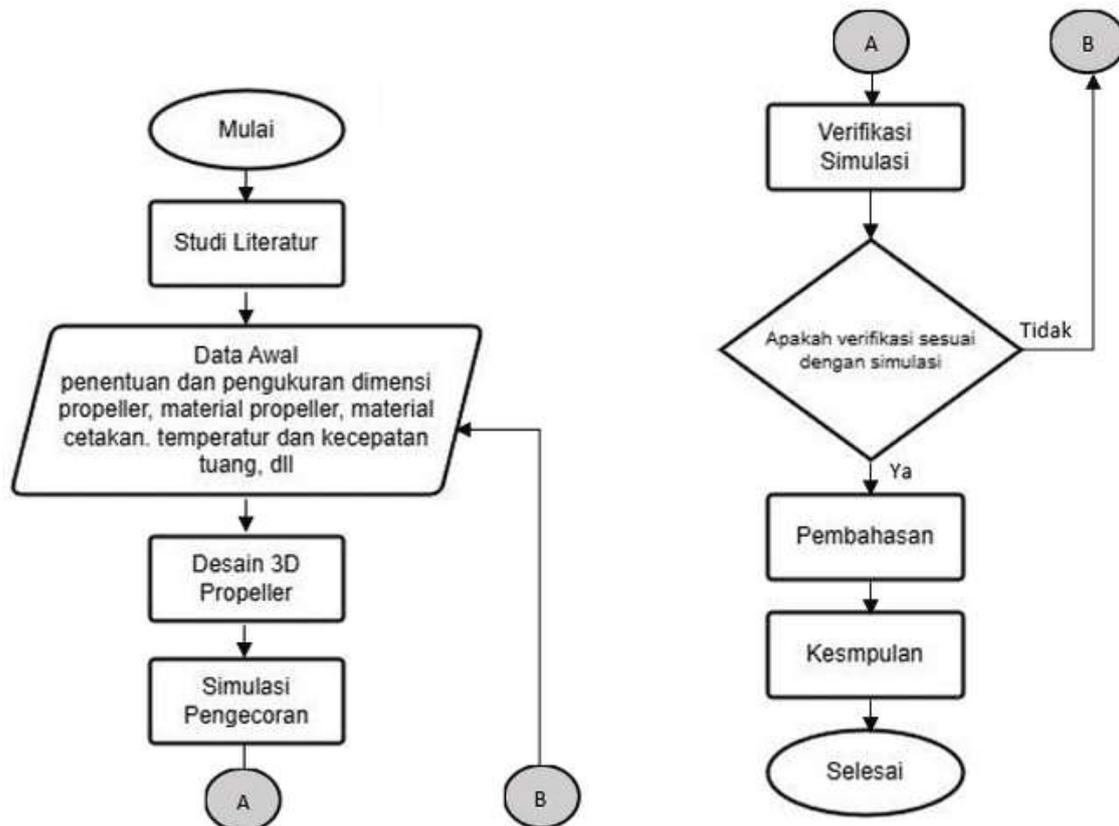
Berdasarkan uraian yang telah diulas sebelumnya oleh beberapa saintis. Perancangan untuk casting design telah lama dipelajari untuk memperoleh produk yang bebas cacat. Dengan menggunakan konsep FEA, dapat diprediksi hasil yang akan keluar sebelum dilakukannya pengecoran sebenarnya. Permasalahan yang sering terjadi pada propeller kapal yaitu banyak baling-baling dari nelayan yang mengalami kegagalan (patah) ketika digunakan, salah satunya adalah karena kesalahan dalam desain pengecoran (*casting design*) (Mehta *et al.*, 2018; Choudhari *et al.*, 2019).

Proses pengecoran dibagi menjadi lima langkah yaitu melting, molding, casting design, heat treatment and testing (Campbell *et al.*, 2015) Penelitian ini berfokus hanya pada dua tahap yaitu tahap casting design dan testing, dengan tujuan untuk mengetahui fenomena solidifikasi dan cacat penyusutan pada propeller berdaun tiga yang sering digunakan oleh nelayan. Tahap casting design dilakukan dengan bantuan software pengecoran dengan menggunakan konsep FEA untuk mengetahui fenomena 1) solidifikasi dan 2) cacat penyusutan. Tahap testing dilakukan dengan eksperimen langsung pengecoran logam menggunakan metode sand casting untuk memverifikasi proses casting design menggunakan sistem saluran langsung. Diharapkan hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk merancang ulang casting design sehingga produk menjadi bebas cacat kedepannya.

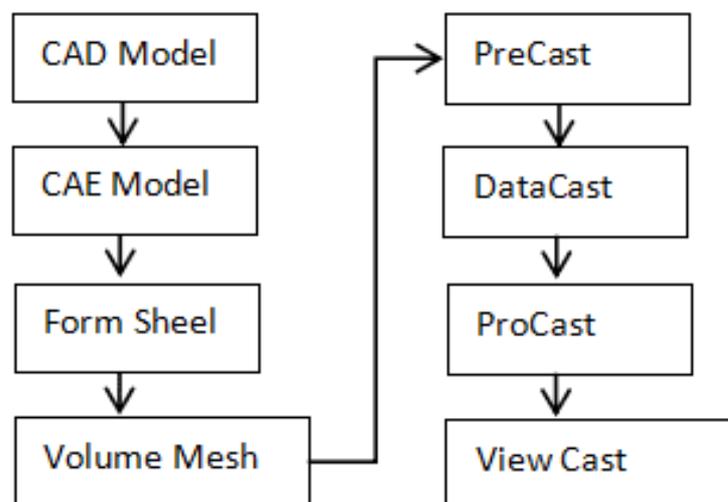
2. Metode Penelitian

2.1 Diagram Alir Penelitian

Secara umum tahapan penelitian diawali dengan studi literatur, yakni pengumpulan dan pembelajaran berbagai literatur atau buku-buku referensi yang berkaitan dengan proses pengecoran logam dan juga perangkat lunak pengecoran. selanjutnya ditetapkan suatu permasalahan untuk diteliti. Masalah tersebut adalah bagaimana melihat fenomena solidifikasi dan penyusutan (*shrinkage*) pada produk propeller kapal nelayan dengan menggunakan metode FEA. Adapun software yang digunakan pada simulasi adalah Procast, Selanjutnya dipilih tipe dan dimensi propeller yang sering digunakan oleh nelayan di pesisir pantai yaitu propeller berdaun tiga material paduan aluminium, dan proses manufaktur yang digunakan untuk memverifikasi hasil simulasi. *Flowchart* simulasi menggunakan *software procast* ditampilkan pada **Gambar 3**.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.



Gambar 3. Flowchart Simulasi Software Procast.

Pada tahap pertama sampai Pre-Cast, model entitas 3-D propeller dibuat menggunakan perangkat lunak Solidwork dengan format ParaSolid dan diimpor ke ProCAST, kemudian menggunakan mesh tetrahedral 3-D dipilih untuk menghasilkan *surface mesh*, *shell*, dan *volume mesh*. Modul PreCAST menangani geometri model dan menentukan kondisi seperti material, *initial condition*, pengaturan kondisi batas, penentuan proses, dll. Modul DataCAST mengelola data, termasuk mengubah file teks yang dihasilkan oleh modul PreCAST ke format biner. Perhitungan FEM (Finite Element Method) dilakukan di modul ProCAST dan hasilnya seperti persebaran temperature, solidifikasi, dan cacat penyusutan divisualisasikan oleh modul ViewCAST.

2.2 Aluminium ADC12

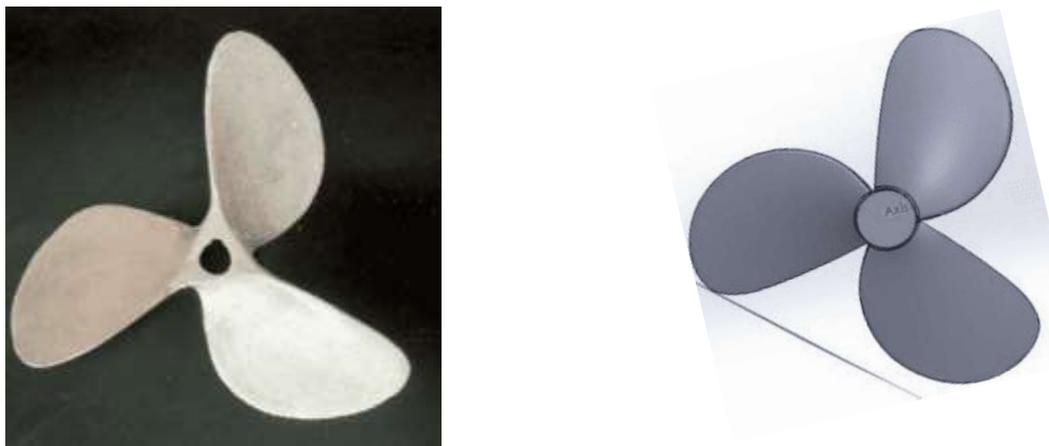
Pada proses simulasi dan verifikasi, aluminium ingot ADC12 digunakan sebagai material propeller. spesifikasi Aluminium ADC 12 sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 1.**(European Standard EN 1706)

Tabel 1. Properties Alumunium ADC12.

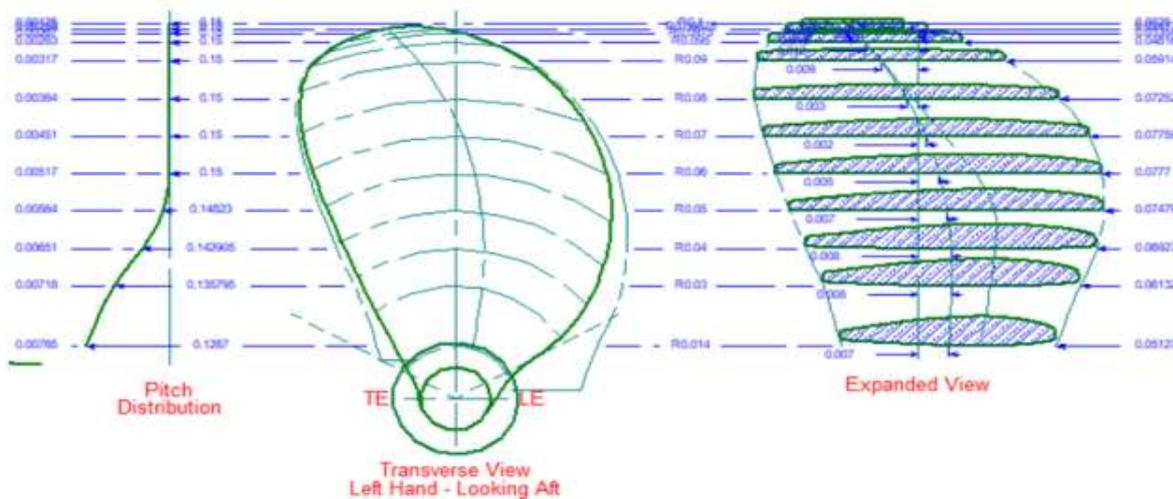
Properties Aluminium ADC12	Nilai
Komposisi (Al, Si, Cu, Fe, Lainnya)	82, 11, 2, 1.1, 3.9%
Density	2788 kg/m ³
Temperatur Liquidus	616.6 °C
Temperature Solidus	439.9 °C

2.3 Desain Saluran dan Propeller Berdaun Tiga

Dimensi dari propeller berdaun tiga mengambil referensi pada propeller yang digunakan oleh perahu nelayan sebagaimana yang ditampilkan pada **Gambar 4** yang kemudian didesain ulang dengan penyesuaian menggunakan bantuan *software* PropCad dan Solidworks sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 5**. Adapun dimensi propeller secara detail ditampilkan pada **Gambar 6** dimana tipe dari *propeller* adalah B-Series dengan detail dimensi diameter *propeller* adalah 0.2m, *nominal pitch* adalah 0.15m, *rake* adalah 12° *Expanded BAR* 0.568, dan *skew angle* 25.9°.



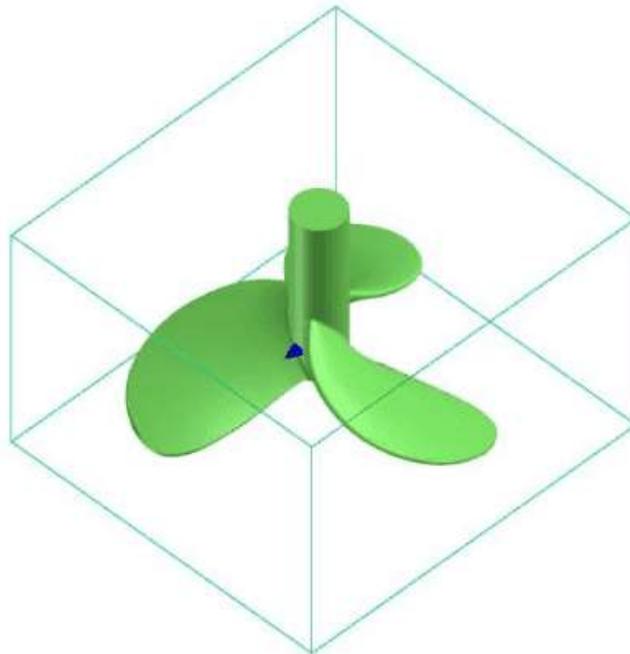
Gambar 4. Propeller dan Desain 3D Perahu Nelayan Berdaun Tiga.



Gambar 5. Detail Dimensi Propellers Berdaun Tiga.

2.4 Desain Saluran dan Propeller Berdaun Tiga

Desain dimensi saluran langsung dibuat sama dengan ukuran diameter hub propeller, adapun tinggi saluran adalah 8 cm sebagaimana yang ditampilkan pada **Gambar 6**. Aluminium ADC12 digunakan dengan temperatur penuangan adalah 650 °C. simulasi akan berhenti jika temperature aluminium telah mencapai titik solidusnya dikurang 10° C. Temperature cetakan pasir diasumsikan sama dengan temperatur lingkungan yaitu 25 °C menggunakan pilihan properties *greensand mold* pada software ProcCast. *Properties* dari aluminium sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 1** dan the *properties* dari *greensand* sebagaimana mengikuti referensi Procast, (2021). Inlet dari logam cair diasumsikan memiliki diameter 5 mm dengan kecepatan konstan yaitu *mass flow rate* 0.15 kg/s dan kecepatan gravitasi adalah 9.8 m/s². semua parameter tersebut kemudian dimasukkan dalam software dan ukuran mesh saat simulasi adalah 1mm. Gambar saluran dan cetakan pasir oleh *software* simulasi ditampilkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Desain Saluran Langsung dan Cetakan Pada Software Simulasi.

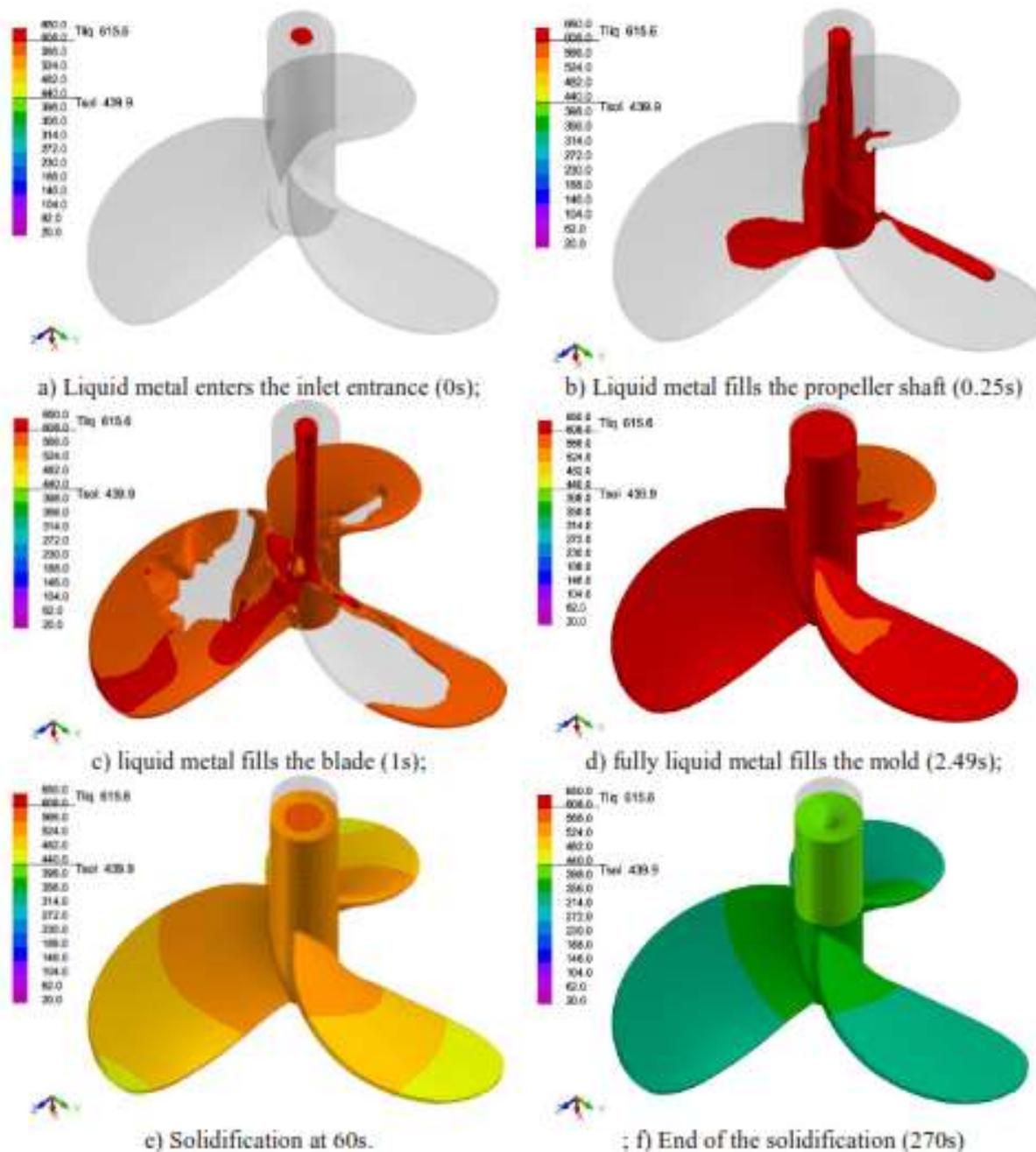
2.5 Verifikasi Eksperimen

Verifikasi pengecoran dilakukan dengan eksperimen langsung menggunakan cetakan pasir silika dengan ukuran mesh 80-100. Adapun komposisi pasir, bentonite, dan air adalah 80, 15, dan 5%. Aluminium ingot ADC12 dicairkan dan dituang dengan kondisi semirip mungkin dengan simulasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Fenomena Casting Filling dan Solidifikasi

Pada proses casting filling dan solidifikasi dapat dibagi menjadi 6 tahapan, yaitu: a) *Liquid metal enters the inlet entrance*; b) *Liquid metal fills the propeller shaft*; c) *Liquid metal fills the blade*; d) *Fully liquid metal filling the mold*; e) *Solidification at 60s*, and; f) *End of the solidification*. Kriteria akhir solidifikasi diatur jika temperature aluminium mencapai solidus temperature dikurangi 10°C. gambar perubahan temperatur saat casting filling proses dan solidifikasi pada setiap casting design sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 7**.



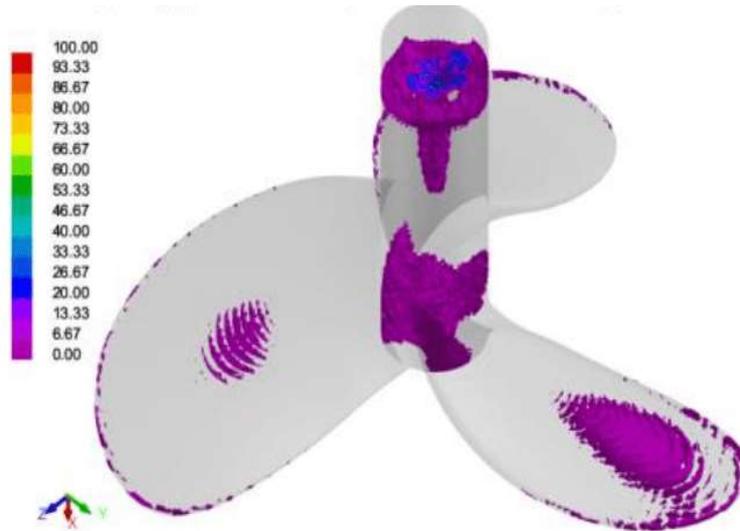
Gambar 7. Casting Filling dan Solidifikasi.

pada desain sebagaimana yang ditunjukkan oleh **Gambar 7**. Massa aluminium yang dibutuhkan untuk mengisi pola adalah 0.380kg, sedangkan waktu yang dibutuhkan molten metal untuk mengisi pola adalah 2.4s. Waktu sampai berakhirnya solidifikasi adalah 270s.

3.2 Cacat Penyusutan (*shrinkage porosity*)

Logam pasti mengalami penyusutan saat terjadi penurunan temperatur (Mehta *et al.*, 2018). penyusutan yang terlalu ekstrim dapat menyebabkan terjadinya cacat porositas. Menurut Chakravarti *et al.* (2023) nilai *shrinkage porosity* pada logam aluminium tidak boleh melebihi dari 6%. Sehingga pada penelitian kali ini Nilai *cut off value* untuk *shrinkage porosity* diset pada angka <6%. Gambar cacat *shrinkage*

porosity sebagaimana yang ditunjukkan pada **Gambar 8**. Terlihat daerah *shrinkage porosity* berada pada titik tengah poros propeller dan juga berada pada ujung daun propeller.



Gambar 8. Lokasi Shrinkage Porosity (*Cut Off Value* <6%).

3.3 Verifikasi Eksperimen Pengecoran Logam Aluminium Berdaun Tiga

Verifikasi dilakukan untuk mengetahui kesesuaian hasil simulasi dengan eksperimen. proses eksperimen dilakukan dengan tahapan sebagaimana yang ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Tahapan Proses Eksperimen.

No	Keterangan Proses Verifikasi Eksperimen	Dokumentasi
1	Pencampuran cetakan pasir yang terdiri dari pasir silika dengan mesh 100, dengan campuran 85%, bentonite 10%, dan air 5%.	
2	Menuangkan pasir ke dalam sebuah pola dan cetakan	

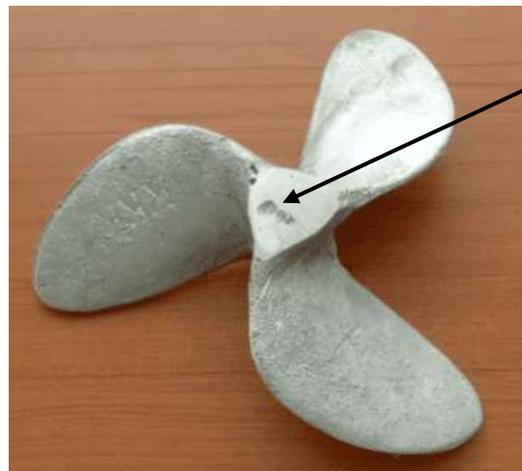
No	Keterangan Proses Verifikasi Eksperimen	Dokumentasi
3	Memasang saluran dengan dimensi yang sama dengan poros	
4	memberikan bubuk magnesium silikat dengan tujuan agar cetakan dapat mudah terlepas	
5	Memanaskan logam aluminium ingot ADC12 hingga mencapai lebih dari temperatur lelehnya (650°C)	
6	Setelah dituang produk dikeluarkan dari cetakan	

Hasil dari pengecoran ditampilkan pada **Gambar 9**. Pembongkaran spesimen dari cetakan dilakukan pada detik ke 270 untuk mengkonfirmasi hasil dari simulasi, yaitu 1) logam aluminium ADC12 telah sepenuhnya menjadi solid pada detik ke 270 dan seterusnya; 2) logam ADC12 telah sepenuhnya mengisi pola, namun cacat porositas tidak terlihat karena hasil dari simulasi menunjukkan cacat berada di poros propeller dan ujung daun propeller namun berada di bagian tengah. Untuk mengkonfirmasi hasil

tersebut spesimen kemudian dipotong dengan gerinda pada bagian poros dan menunjukkan cacat porositas sebagaimana yang ditampilkan pada **Gambar 10**.



Gambar 9. Hasil Verifikasi Pengecoran.



Gambar 10. Shrinkage Porosity.

Adapun pada penelitian ini, perlu menjadi catatan bahwa eksperimen hanya dapat melihat lokasi cacat porositas, bukan mendeteksi berapa banyak nilai penyusutan (%) pada daerah tersebut. penelitian mengenai hal itu akan menjadi *concern* pada penelitian selanjutnya. Secara umum dapat disimpulkan bahwa hasil dari eksperimen sesuai dan mengkonfirmasi hasil dari simulasi.

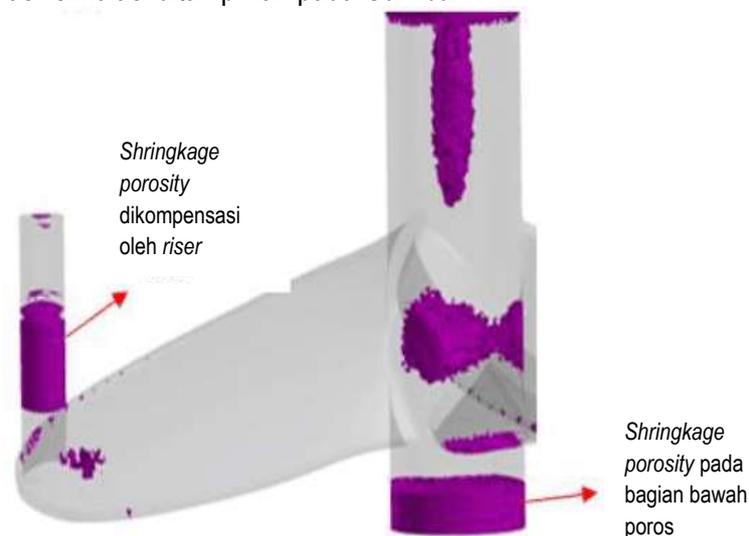
3.4 Pembahasan dan Rekomendasi Perbaikan Desain Saluran

Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen pengecoran material aluminium metode *sand casting* menggunakan sistem saluran langsung pada *propeller* berdaun tiga untuk perahu nelayan tradisional ditemukan cacat penyusutan pada bagian poros dan ujung daun propeller berdaun tiga. Hal ini bisa disebabkan oleh

- 1) Sistem saluran yang kurang optimal. Pada saluran langsung aliran logam lurus hingga ke poros propeller mengakibatkan aliran logam mengalami perubahan arah aliran yang tiba-tiba ke arah daun propeller sebagaimana pada **Gambar 8(b)**, aliran berubah dari vertikal ke arah horizontal, hal ini dapat menyebabkan turbulensi dan memerangkap udara atau gas. Hal ini sejalan menurut Gaspar *et al.* (2021), aliran yang berubah bisa menyebabkan terbentuknya porositas akibat udara yang terperangkap

- 2) Perlu penggunaan penambah (riser). Riser perlu ditempatkan secara strategis di area cetakan yang cenderung mengalami volume penyusutan terbesar. Riser bisa ditambahkan di bagian ujung daun propeller untuk mengurangi penyusutan. Kumar *et al.* (2023) merekomendasikan dalam artikelnya bahwa untuk mengurangi porositas atau kekosongan dapat menambahkan riser dengan ukuran dan jumlah tertentu.
- 3) Kontrol proses pengecoran yang kurang tepat, temperatur tuang yang terlalu tinggi dapat meningkatkan penyusutan dan kelarutan gas dalam logam cair, sementara temperatur yang terlalu rendah dapat menyebabkan aliran yang buruk dan pengisian yang tidak sempurna. perbedaan temperatur tuang dan temperatur cetakan juga bisa menyebabkan cacat porositas. Menurut Ike (2018) Sebaiknya temperatur cetakan mendekati temperatur logam tuang untuk mengurangi cacat porositas.

Oleh karena itu, berdasarkan beberapa alasan diatas, dilakukan simulasi ulang dengan tetap menggunakan saluran langsung namun dengan mengubah beberapa *initial condition* diantaranya 1) menambah panjang poros pada bagian propeller dengan tujuan untuk mengurangi turbulensi akibat berubahnya aliran dari vertikal ke horizontal; 2) menambah *riser* pada ujung daun propeller dengan tujuan meng mengurangi penyusutan pada bagian ujung daun propeller; dan 3) menaikkan temperatur cetakan dari 25°C ke 50°C. Hasil simulasi ditampilkan pada **Gambar 11**.



Gambar 11. Rekomendasi Perbaikan Desain Saluran.

Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa masih terdapat cacat *shrinkage porosity* (*cut of value* <6%) yaitu pada bagian riser, poros, dan ujung daun propeller. Namun jika dibandingkan dengan hasil sebelum perbaikan pada **Gambar 9**, menunjukkan pengurangan cacat penyusutan. Lokasi cacat *shrinkage porosity* yang sebelumnya berada di ujung propeller dikompensasi dengan berpindah ke riser. Hal yang sama juga terjadi pada bagian poros, cacat *shrinkage porosity* pada bagian poros juga berpindah dan dikompensasi pada bagian bawah poros. Hal ini tidak menjadi masalah karena pada bagian bawah poros dan riser akan dipotong, dimanfaatkan untuk dicor ulang, dan tidak digunakan menjadi propeller. Adapun desain modifikasi bentuk saluran, riser, temperatur tuang tidak dibahas pada penelitian ini dan masih akan menjadi *concern* pada penelitian yang akan datang.

4. Kesimpulan

Simulasi dan verifikasi pengecoran menggunakan saluran langsung pada Aluminium ADC12 untuk propeller berdaun tiga pada perahu nelayan telah dilakukan pada penelitian ini. Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan hasil yang seragam. Lokasi cacat dengan simulasi diidentifikasi berada di tengah dan ujung daun propeller dan dikonfirmasi oleh eksperimen. Agar hasil pengecoran menjadi lebih

baik, rekomendasi pengecoran dengan saluran langsung ditampilkan diantaranya menambah panjang poros pada bagian propeller, menambah riser pada ujung daun propeller, dan menaikkan temperatur cetakan. Hasil rekomendasi masih menunjukkan *shrinkage porosity* yaitu pada bagian riser, poros, dan ujung daun propeller. Namun jika dibandingkan dengan hasil sebelum perbaikan menunjukkan pengurangan cacat penyusutan. Adapun diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi pelaku industri pengecoran dan modifikasi bentuk saluran, riser, temperatur tuang tidak dibahas pada penelitian ini dan masih akan menjadi concern pada penelitian yang akan datang.

Daftar Pustaka

- Akhyar, I., Hasanuddin, M., Ibrahim, A., Farhan, Z., & Jalil, Z. (2022). Evaluation Of Cast Defects in Ship Propeller of Recycled Aluminum Alloy. *Metalurgija*, 61(2), 309-312.
- Campbell, J. (2015). *Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design* (Second Edition, pp. 1-1028).
- Chakravarti, S., & Sen, S. (2023). An investigation on the solidification and porosity prediction in aluminium casting process. *J. Eng. Appl. Sci.*, 70(21).
- Chen, Z., Li, Y., Zhao, F., Li, S., & Zhang, J. (2022). Progress in numerical simulation of casting process. *Measurement and Control*, 55, 257-264.
- Choudhari, C. M., Narkhede, B. E., & Mahajan, S. E. (2014). Casting Design and Simulation of Cover Plate using AutoCAST-X Software for Defect Minimization with Experimental Validation. *Procedia Materials Science*, 6, 786-797.
- Endrawan, T., Dionisius, F., Sifa, A., & Kusuma., B. H. (2019). Analisis Perbedaan Tinggi Sprue Pada Top Gating System Untuk Pengecoran Propeller Yang Bermaterial Paduan Aluminium Dari Limbah Propeller Perahu. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 28-35.
- European Standard EN 1706. Equivalent Standards for Die Casting: USA AA 383.0 Japan JIS ADC12Z. Properties originally computed with Computherm/Scheil method.
- Ezanno, A., Doudard, C., Moyne, S., Calloch, S., Millot, T., & Bellèvre, D. (2015). Validation of a high-cycle fatigue model via calculation/test comparisons at structural scale: Application to copper alloy sand-cast ship propellers. *International Journal of Fatigue*, 74, 38-45.
- Fachrie, Y. (2015). *Rancang Bangun Dan Analisa Simulasi Sistem Saluran Dan Penambah (Riser) Terhadap Cacat Penyusutan (Shrinkage) Pada Pembuatan Rumah Transmisi Mobil Listrik Brajawahana Dengan Pengecoran Pasir (Sand Casting)* (Tugas Akhir). Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.
- Gašpár, Š., Majemík, J., & Kolínský, J. (2021). Analysis of Causes of Porosity Change of Castings under the Influence of Variable Biscuit Height in the Filling Chamber. *Materials*, 14(22), 6827.
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225.
- Ike Widyastuti. (2008). VARIASI TEMPERATUR PEMANASAN AWAL CETAKAN PADA PENGEORAN Al-Si BEKAS. *TRANSMISI*, IV(2), 441-450.
- Jin, Z., Wang, P., Dong, H., An, X., & Xia, H. (2023). Numerical prediction of ducted propeller performance based on a BEM-RANS coupling method. *Ocean Engineering*, 271, 113761.
- Karim, I, J, A., Umar, K., & Asri, S. (2021). Analisa Cacat Coran Pembuatan Propeller Dengan Metode Sand Casting. *Jurnal Dinamika*, 5, 1-5.
- Kumar, R., Maurya, S. K., Choubey, M., et al. (2024). Optimization and empirical studies of riser design in sand casting process using different mould properties. *Int J Interact Des Manuf*, 18, 3473–3484.
- Małyszka, M., Zuczek, R., Wilk-Kołodziejczyk, D., Jaśkowiec, K., Głowacki, M., Długosz, P., & Dudek, P. (2022). Technological Optimization of the Stirrup Casting Process with the Use of Computer Simulations. *Materials*, 15(19), 6781.

- Mehta, N., Gohil, A., & Doshi, S. J. (2018). Innovative Support System for Casting Defect Analysis –A Need of Time. *Materials Today: Proceedings*, 5, 4156-4161.
- Rajkumar, I., & Rajini, N. (2021). Metal casting modeling software for small scale enterprises to improve efficacy and accuracy. *Mater. Today Proc.*, 46, 7866–7870.
- Shreyash, G., Aditya, P., Shashank, S., & Dheeraj, A. (2020). Performance Analysis and Enhancement of Marine Propeller. *International Journal of Engineering Research and*, V9.

