

PRODUKSI PROPELLER ALUMINIUM MEMANFAATKAN LIMBAH GERAM MESIN CNC PPNS

Gilang Yuka Prahara¹, Widya Emilia Primaningtyas^{1*}, Rizal Indrawan¹

¹Program Studi Teknik Desain dan Manufaktur, Jurusan Teknik Permesinan Kapal,
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

*Email: widyaemilia@ppns.ac.id

Abstrak

Propeller merupakan komponen vital dalam sistem propulsi kapal karena berfungsi mengubah energi kinetik menjadi gaya dorong. Penelitian ini bertujuan memanfaatkan limbah aluminium hasil pemesinan CNC dari Laboratorium CNC PPNS sebagai bahan baku alternatif pembuatan *propeller* dengan metode *sand casting*. Pemanfaatan limbah ini diharapkan dapat menekan biaya produksi sekaligus mendukung pengelolaan limbah industri berkelanjutan. Proses pengolahan limbah dilakukan melalui tahap pencucian menggunakan larutan sabun sebanyak empat kali untuk menghilangkan minyak *coolant*, serta pemisahan logam *ferro* dengan metode magnetik sebanyak dua kali pada setiap siklus pencucian. Setelah pengeringan, material dilebur pada suhu 800°C sebelum dituangkan ke dalam cetakan pasir. Untuk memastikan kualitas pengecoran, tiga konsep *gating system* dirancang dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak ProCast 2018. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konsep merupakan desain terbaik dengan berat total *layout* 34,52 gram, volume sistem saluran 6,30 cm³, waktu tuang 3 detik, total porositas 0,423 cm³ (3,31%), dan *yield casting* 65%. Validasi pengecoran aktual mendukung hasil simulasinya dengan ditemukannya cacat visual berupa *porosity* dan sirip cor yang masih dapat diperbaiki melalui penggerindaan. Namun, terjadi penurunan berat produk dari 17,9 gram menjadi 14,5 gram akibat cacat *porosity*. Penelitian ini menyimpulkan bahwa rancangan *gating system* yang baik dapat meningkatkan kualitas pengecoran limbah aluminium, meskipun optimalisasi proses pembersihan dan pengendalian parameter masih diperlukan agar material daur ulang ini dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk pembuatan *propeller* kapal.

Kata kunci: *gating system, porosity, propeller, sand casting, scrap aluminium*

Abstract

The propeller is a vital component in a ship propulsion system, functioning to convert kinetic energy into thrust. This study aims to utilize aluminium scrap from CNC machining at the CNC Laboratory of PPNS as an alternative raw material for propeller manufacturing using the sand casting method. The utilization of such scrap is expected to reduce production costs while supporting sustainable industrial waste management. The treatment process began with four cycles of washing using alkaline soap solution to remove coolant oil, followed by magnetic separation conducted twice in each washing cycle to eliminate ferrous contaminants. After drying, the material was melted at 800°C and poured into a sand mold. To ensure casting quality, three gating system concepts were designed and simulated using ProCast 2018 software. Simulation results indicated that concept was the best design, with a total layout weight of 34.52 grams, gating system volume of 6.30 cm³, pouring time of 3 seconds, total porosity of 0.423 cm³ (3.31%), and a casting yield of 65%. Validation through actual casting supported the simulation, showing visual defects such as porosity and flash that can be removed by grinding. However, the final product weight decreased from 17.9 grams to 14.5 grams due to porosity defects. This study concludes that a well-designed gating system can improve the casting quality of recycled aluminium scrap, although further optimization of cleaning treatment and process control is required to maximize its application in ship propeller manufacturing.

Keywords: *aluminum scrap, gating system, porosity, propeller, sand casting*

PENDAHULUAN

Pengolahan limbah material menjadi komoditas baru kini semakin penting dalam mewujudkan industri berkelanjutan. Salah satu limbah potensial adalah aluminium bekas pemesinan CNC, namun sering terkontaminasi cairan *coolant* berbasis minyak, sehingga sulit didaur ulang dan berdampak pada penurunan kualitas serta efisiensi pengelolaan limbah. Penelitian ini menggunakan limbah aluminium dari Laboratorium CNC PPNS, hasil samping aktivitas praktikum mahasiswa. Limbah ini memiliki potensi sebagai bahan baku alternatif yang ramah lingkungan jika diolah secara ilmiah melalui pendekatan teknik manufaktur dan simulasi, sejalan dengan upaya menuju industri berkelanjutan.

Aluminium adalah logam ringan dengan ketahanan korosi dan konduktivitas yang baik, menjadikannya ideal untuk komponen teknik seperti *propeller*. Namun, limbah aluminium dari laboratorium masih jarang dimanfaatkan dan berpotensi mencemari lingkungan. Melalui metode *sand casting*, limbah ini dapat diolah kembali secara ekonomis, meskipun tantangan seperti porositas dan penyusutan tetap perlu diatasi agar kualitas produk akhir terjaga. Pengolahan limbah aluminium diawali dengan pemilahan dan pencucian untuk menghilangkan minyak *coolant*, lalu dilanjutkan dengan pemisahan logam besi secara magnetik. Limbah yang telah bersih dilebur pada suhu $\pm 800^{\circ}\text{C}$ dan dituangkan ke dalam cetakan pasir. Desain sistem saluran logam divalidasi menggunakan simulasi ProCast untuk memastikan aliran logam cair berjalan lancar dan merata.

Penelitian ini mengeksplorasi pengolahan limbah aluminium CNC menjadi *propeller* kapal melalui metode *sand casting*, dengan fokus pada persiapan material, perancangan *gating system*, dan simulasi hasil coran. Tujuannya adalah menghasilkan produk fungsional sekaligus meningkatkan kesadaran akan pentingnya daur ulang dalam manufaktur modern.

TINJAUAN PUSTAKA

(A) Propeller Kapal Prototipe Fuel Engine

Propeller kapal merupakan salah satu komponen penting dalam kapal yang berfungsi sebagai penggerak agar bisa bergerak maju atau mundur. Gaya dorong atau yang biasa disebut *thrust* yang dihasilkan berasal dari mesin yang terhubung dengan *shaft* kemudian pada ujung *shaft* terhubung dengan *propeller* sehingga memiliki gaya yang cukup kuat untuk menggerakkan kapal. Spesifikasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi *Propeller*

Diameter	70 mm
Rake Angle	0 °
Number of Blades	3
Pitch Angle	90 °
Volume	4224 mm ³
Material	<i>Cast Aluminum</i>

(B) Material Pengecoran

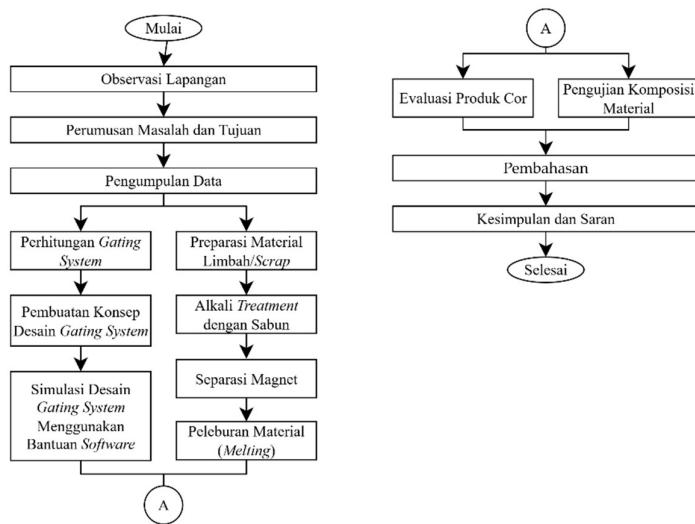
Aluminium merupakan logam *non-ferrous* yang ringan ($\rho \approx 2,7 \text{ g/cm}^3$), mudah dilebur ($T_m \approx 660^\circ\text{C}$), tahan korosi, dan memiliki konduktivitas termal tinggi, sehingga ideal untuk daur ulang melalui metode pengecoran pasir. Limbah aluminium dari pemesinan CNC di Laboratorium CNC PPNS memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan karena mengurangi limbah industri serta menghemat energi dibandingkan produksi primer. Dengan ketersediaan tinggi dan harga yang terjangkau, aluminium cocok untuk manufaktur berkelanjutan skala kecil maupun laboratorium. Dibandingkan kuningan ($\rho \approx 8,5 \text{ g/cm}^3$; $T_m \approx 900^\circ\text{C}$), aluminium lebih ringan dan membutuhkan energi proses lebih rendah, sehingga lebih efisien dan ramah lingkungan. Meski kuningan unggul dalam kekuatan tarik dan ketahanan korosi laut, aluminium bekas tetap mampu menghasilkan produk cor yang fungsional dan ekonomis jika didukung desain *gating system* dan kontrol proses yang baik.

(C) Treatment Material

Preparasi material adalah proses pembersihan dan pemisahan limbah aluminium sebelum pengecoran untuk mengurangi cacat. Proses ini meliputi pencucian dengan sabun untuk menghilangkan kotoran serta pemisahan logam asing menggunakan magnet, sehingga material menjadi lebih bersih dan siap dicor dengan hasil yang lebih baik.

(D) Casting

Proses pengecoran logam adalah suatu proses manufaktur yang menggunakan logam cair dan cetakan untuk menghasilkan *part* dengan bentuk yang mendekati bentuk geometri akhir produk jadi. Logam cair akan dituangkan atau ditekan ke dalam cetakan yang memiliki rongga sesuai dengan bentuk *pattern*. Setelah logam cair mengisi rongga dan mengeras kembali sesuai dengan rongga yang diisi, selanjutnya dilakukan proses *feeling* dan hasil cor dapat ke proses berikutnya (Campbell, 2015).

METODE**Gambar 1.** Diagram Alir Penelitian

(A) Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini terbagi menjadi dua bagian yaitu metode desain dan simulasi *gating system* dan metode *experimental* pada proses pengecoran logam yang berdasarkan dengan data pendukung dalam penyusunan penelitian ini yaitu:

- (1) Jenis pengecoran : pengecoran logam cetakan pasir (*sand casting*).
 (2) Desain produk : *propeller kapal fuel engine*.
 (3) Material produk : aluminium menggunakan limbah *scrap* dari Lab. CNC.
 (4) Temperatur penuangan: untuk pengecoran logam adalah $650\text{--}700^{\circ}\text{C}$.

Parameter yang menjadi fokus utama dalam penelitian ini adalah terbagi menjadi 3 poin penting yaitu:

- (1) Simulasi menunjukkan nilai *porosity* rendah, menandakan kualitas pengecoran baik.
 - (2) Nilai *shrinkage* minimum berhasil dicapai, sehingga mengurangi risiko cacat dimensi dan retakan produk.
 - (3) Distribusi aliran logam cair merata, memastikan rongga cetakan terisi sempurna tanpa bagian kosong atau udara terperangkap.

Berdasarkan data pendukung yang telah dikumpulkan dengan parameter yang digunakan untuk melakukan proses pengecoran terdapat beberapa langkah-langkah yang dilakukan. Berikut langkah-langkah yang digunakan:

- (1) Observasi Lapangan
 - (2) Perumusan Masalah dan Tujuan
 - (3) Pengumpulan Data
 - (4) Perhitungan *Gating System*
 - (5) Preparasi Material *Scrap*
 - (6) Pembuatan Konsep Desain *Gating System*
 - (7) Simulasi *Gating System* dengan Bantuan *Software*
 - (8) Pengujian Komposisi
 - (9) Evaluasi Hasil Produk Cor
 - (10) Pembahasan
 - (11) Kesimpulan dan Saran

HASIL DAN PEMBAHASAN

(A) Perhitungan Gating System

Pancangan *gating system* terlebih dahulu harus memperkirakan estimasi total berat coran dilakukan dengan membuat desain kasar *gating system* menggunakan *software* Solidworks 2021. Material logam cair yang digunakan adalah aluminium dengan massa jenis 2,7 gram/cm³. Berat dari desain kasar dapat diketahui melalui fitur *mass properties* pada Solidworks, yang menghasilkan berat sebesar 34,52 gram atau sekitar 0,03452 kg.

Perhitungan yang pertama yaitu menentukan waktu tuang (*pouring rate*) dengan menggunakan Persamaan 1 menurut Campbell (2015) yaitu:

Di mana:

R : pouring rate (kg/sec)

b : konstanta yang ditentukan dengan ketebalan benda

w : berat casting (kg)

Penentuan *pouring time* dengan menggunakan Persamaan 2 berikut:

Di mana:

t : waktu tuang (detik)

W : berat total coran (kg)

R : pouring rate (kg/sec)

Posisi dan tinggi *sprue* sangat menentukan kecepatan alir dari logam cair yang akan mengisi rongga cetakan. Model *sprue* yang digunakan pada kasus ini adalah *top gate*, perhitungan tinggi *sprue* efektif dari *top gate* dapat menggunakan Persamaan 3 yaitu menurut Rao (2013):

$$\text{Top gate} = H = h \dots \quad (3)$$

Di mana:

h : tinggi sprue (mm)

Jadi untuk tinggi *sprue* yang digunakan pada *gating system* konsep 1 ini adalah 30 mm dengan tinggi *pouring basin* 7 mm dan kemiringan 45°

Selanjutnya yaitu menghitung nilai *choke area*, bagian ini dirancang untuk merujuk pada bagian yang mengatur aliran logam cair ke dalam rongga cetakan. *Choke* dapat menggunakan Persamaan 4 menurut Erbul et al. (2017) yaitu:

Di mana:

C_A : choke area (cm^2)

W : berat coran (kg)

t : waktu tuang (detik)

C : discharge coefficient

G : gravitasi (9.8 m/s^2)

H : tinggi efektif penuangan (cm)
 $Area\ choke\ (C_A) = 0,65\ cm^2$ setelah itu dilanjutkan menghitung jari-jari dengan

$$D_{CA} = r \cdot 2 \equiv 0.9 \text{ cm}$$

Sehingga diperoleh diameter C_A sebesar 9 mm, selanjutnya diameter sprue.

$$A_s = \frac{0,9 \cdot \sqrt{3}}{2} \equiv 0,79 \text{ cm} = 8 \text{ mm}$$

Di mana:

As : diameter sprue atas

b : effective sprue height

Jika sudah menghitung nilai *choke area* selanjutnya menghitung nilai *riser* yang pertama yaitu menentukan berat logam cair yang ada di dalam *riser* dapat dilihat di Persamaan 6 menurut Eko (2022) yaitu:

Menentukan volume *riser* menggunakan Persamaan 7 sebagai berikut:

$$Vr = \frac{wf}{\rho} = \frac{14,38}{2,7} = 5,3 \text{ cm} - 50,3 \text{ mm} \quad (7)$$

Menentukan diameter *riser* menggunakan Persamaan 8 sebagai berikut:

$$d = \sqrt{\frac{V r x^4}{\pi x^4}} = \sqrt{\frac{50,3 x^4}{\pi x^4}} = 4,00 \text{ mm} \quad (8)$$

Di mana:

Wf : berat logam cair dalam *riser* (gr)

Wc : berat logam cor (gr)

C% : nilai modulus riser

ρ : densitas logam cair (gr/cm^3)

D : diameter riser (mm)

V_r = volume riser (cm³)

S% : nilai shrinkage

Modulus cor (*casting modulus*) merupakan sifat intrinsik pada proses pengecoran, yang berhubungan dengan waktu pembekuan cairan logam (Primaningtyas et al., 2024). Produk *propeller* memiliki nilai volume $6483,03 \text{ mm}^3$, *surface area* $5607,99 \text{ mm}^2$ dan berat 17,5 gram. Menurut Campbell (2015) untuk mengetahui *modulus casting* (produk cor) dapat menggunakan Persamaan 9 yaitu:

$$Mc = \frac{Vc}{Ac} = \frac{6483,03}{5607,99} = 1,15 \text{ cm}$$

Di mana:

Mc : modulus (mm)

Vc : volume (mm³)

Ac : luas permukaan (mm^2)

(B) Pembuatan Layout Gating System



Gambar 2. Desain Layout Gating System

Perancangan *layout gating system* dilakukan menggunakan SolidWorks 2021. Dari total volume coran sebesar 12,78534 cm³, *propeller* memiliki volume 6,48303 cm³ dan *gating system* sebesar 6,30231 cm³ hasil dari desain dapat dilihat pada Gambar 2.

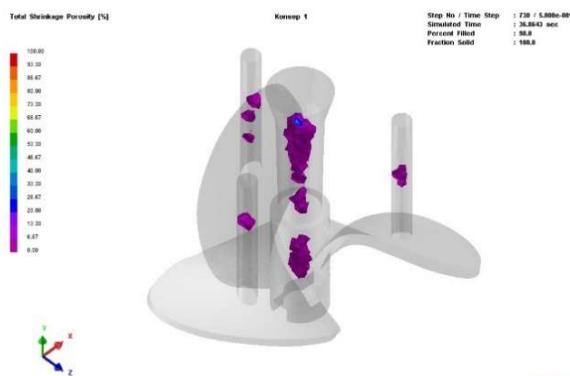
(C) Simulasi Pengecoran Logam

Simulasi pengecoran dilakukan menggunakan ProCast 2018, perangkat lunak CAE dari ESI Group yang dapat memodelkan proses pengecoran secara menyeluruh, mulai dari peleburan hingga pembekuan. Dengan fitur *New Advanced Porosity Module* (NAPM), perangkat ini mampu memprediksi total volume porositas (mikro dan makro) dalam satuan m³. Simulasi dilakukan dengan memasukkan parameter proses sesuai kondisi aktual di lokasi pengecoran seperti Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Simulasi

Proses	Sand Casting
Alloy Material (initial temp)	Aluminium (800°C)
Mold Material (initial temp)	Silica Sand (25°C)
Interface HTC Manager	AISI7Mg03-Silica Sand (h-750)
Heat (mold)	Air Cooling (Film Coeff = 10 W/m2K, T = 20°C)
Inlet (mass flow rate)	Pouring Rate (After Calculation)

Total volume coran sebesar 12,78534 cm³, *propeller* memiliki volume 6,48303 cm³ dan *gating system* sebesar 6,30231 cm³, sehingga menunjukkan rasio mendekati 1:1.



Gambar 3. Hasil Simulasi Layout Konsep

Tabel 3. Hasil Analisis Layout Gating System

Konsep 1	Total Porosity (cm ³)	Total Shrinkage (cm ³)
	0,423234	0,4769066

Analisis simulasi pada Gambar 3 menunjukkan nilai *defect total porosity* sebesar 3,31% dan *shrinkage* 3 % dari hasil total *defect* dibagi volume *gating system* dengan rasio *gating system* 1:1 dan dapat dilihat pada Tabel 3, desain memenuhi prinsip *non-pressurized gating system* untuk aluminium, yang menjaga aliran logam stabil dan minim turbulensi. Hasil ini sejalan dengan literatur yang menekankan kestabilan aliran sebagai kunci untuk mengurangi cacat seperti *porosity* dan oksidasi.

(D) Preparasi Material Aluminium

Proses ini bertujuan memisahkan material dari kotoran atau kontaminan yang tercampur, sehingga kualitas logam tetap terjaga saat peleburan. Metode yang digunakan adalah pencucian atau proses alkali dengan sabun untuk menghilangkan minyak *coolant* yang dapat mengganggu proses *melting*, seperti ditunjukkan pada gambar. Tahap berikutnya adalah separasi magnet untuk menghilangkan material *ferromagnetic* seperti besi yang dapat memengaruhi sifat mekanik hasil coran.

Dalam penelitian ini, pencucian dilakukan sebanyak 4 kali, dan pada setiap pencucian dilakukan penarikan magnet 2 kali untuk memaksimalkan pembersihan. Setelah penjemuran, dilakukan kembali penarikan magnet untuk memastikan tidak ada partikel *ferro* yang tersisa. Hasilnya, material aluminium menjadi lebih bersih, bebas dari minyak dan kontaminan logam lain, sehingga proses peleburan berlangsung lebih stabil dan risiko cacat coran dapat diminimalkan.

(E) Pengecoran Logam *Sand Casting*

Pengecoran logam *sand casting* menggunakan material aluminium dan menggunakan mesin *furnace*, komposisi cetakan yaitu pasir silika, *betonite*, air dengan perbandingan 1:3 dan 10% air. Untuk temperatur peleahan yaitu $\pm 800^{\circ}\text{C}$ selama 30 menit dan waktu *pouring* selama 3 detik. Untuk hasil pengecoran dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Pengecoran Logam dengan Menggunakan *Furnace*

(F) Pengujian Hasil Produk Pengecoran Logam

Hasil pengecoran dapat dilihat pada Tabel 4 yaitu pada percobaan pertama untuk bentuk akhir masih terdapat cacat kemudian dilakukan perbaikan segala aspek proses sehingga menghasilkan produk yang lebih baik dari sebelumnya.

Tabel 4. Hasil Produk Akhir

No	Casting	Keterangan
1		<ul style="list-style-type: none"> a. Tidak ada perubahan ukuran b. Suhu pada $\pm 700^\circ\text{C}$ c. Tanpa menggunakan komponen pendukung dari luar seperti <i>fluks/slag remover</i> d. Lama <i>melting</i> ± 60 menit e. Proses <i>melting</i> dengan gas <i>torch</i> f. Hasil produk <ul style="list-style-type: none"> - Produk belum terisi sempurna - Terdapat <i>defect porosity, fin and burn</i> dan <i>shrinkage</i>
2		<ul style="list-style-type: none"> a. Pada bagian bawah terdapat <i>sand burn</i> b. Ada perubahan ukuran dan bentuk <i>pattern</i> c. Suhu pada $\pm 800^\circ\text{C}$ d. Menggunakan komponen pendukung dari luar seperti <i>fluks/slag remover</i> sebesar 1 gram e. Lama <i>melting</i> ± 30 menit f. Proses <i>melting</i> dengan <i>furnace</i> g. Hasil produk <ul style="list-style-type: none"> - Produk belum terisi sempurna - Terdapat <i>defect porosity, fin and burn</i> dan <i>shrinkage</i> - Pada bagian bawah sudah tidak mengalami <i>sand burn</i>. - Telah dilakukan <i>grinding</i> - Namun masih terdapat cacat pada permukaan <i>blade</i> yaitu pengisian <i>molten metal</i> yang tidak sempurna

(1) Pengujian Secara Visual

Hasil pemeriksaan visual menunjukkan adanya *porosity* pada bagian tertentu produk yang menyebabkan perubahan bentuk, serta cacat *misrun* pada daun *propeller* sehingga tidak terisi sempurna. Cacat *porosity* ini terjadi akibat terperangkapnya gas atau penyusutan volume logam cair selama pendinginan, sedangkan *misrun* umumnya disebabkan oleh aliran logam yang kurang optimal. Namun, hasil simulasi menggunakan ProCast menunjukkan bahwa *porosity* hanya terletak pada bagian *hole* di dalam produk dan pada bagian dalam *sprue*, sedangkan cacat *misrun* dan *shrinkage* tidak terdeteksi dalam simulasi. Hal ini mengindikasikan adanya faktor eksternal lain dikarenakan proses pengecoran menggunakan limbah *scrap aluminium*, seperti kebersihan material, temperatur tuang, atau kualitas cetakan, yang memengaruhi terbentuknya cacat pada produk akhir.

(2) Pengujian Komposisi Material

Pada proses pengujian komposisi dilakukan dengan mesin *spectroscopy* dengan 3 kali percobaan penembakan laser dan hanya 1 sampel yang digunakan dan hasil dari pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Komposisi Material

	AI	SI	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
1	93.4	0.521	0.903	2.65	0.113	0.502	1.39	0.177	0.0216	0.0320
2	93.7	0.528	0.798	2.59	0.112	0.475	1.34	0.181	0.0218	0.0331
3	93.7	0.516	0.745	2.57	0.111	0.464	1.39	0.183	0.0197	0.0341
Ave	93.6	0.522	0.815	2.61	0.112	0.481	1.38	0.181	0.0210	0.0331

Hasil dari perbandingan komposisi antara material yang digunakan untuk produksi *propeller* dengan material standar yang sering digunakan pada perusahaan manufaktur yaitu komposisi material utama rancuh dan tidak sesuai standar yang digunakan sehingga memengaruhi proses pada saat *melting* dan juga solidifikasi saat setelah *pouring*. Komposisi jika dilihat pada Tabel 5 yang tidak sesuai standar antara Zn dengan nilai 1,38%, Fe 0,815%, Si 0,52%, Mg 0,48%, Cr 0,18%.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- (1) Limbah *scrap* aluminium hasil pemesinan CNC dari Laboratorium CNC PPNS berhasil diolah menjadi bahan baku pengecoran *propeller* melalui metode *sand casting*. Proses pengolahan meliputi pencucian dengan larutan sabun alkali untuk menghilangkan minyak *coolant*, separasi magnet untuk memisahkan partikel *ferro*, pengeringan, peleburan pada suhu ±800°C, dan penuangan ke dalam cetakan pasir. Tahapan ini memastikan material bebas dari kontaminan yang dapat menurunkan kualitas hasil pengecoran.
- (2) *Gating system* dirancang menggunakan konfigurasi *non-pressurized* dengan rasio 1:1, terdiri dari *sprue*, *runner*, dan *ingate*, yang dioptimalkan melalui simulasi ProCast 2018. Desain ini menghasilkan aliran logam cair yang stabil dan merata, meminimalkan turbulensi, serta memprediksi *porosity* total sebesar 3,31% yang terlokalisasi pada bagian *hole* produk dan area dalam *sprue*. Desain ini sejalan dengan prinsip pengecoran aluminium yang menekankan kestabilan aliran untuk mengurangi cacat.
- (3) Pengecoran dengan desain *gating system* yang telah dioptimalkan menghasilkan *propeller* dengan cacat *porosity* sesuai prediksi simulasi, sedangkan cacat *misrun* yang muncul pada daun *propeller* tidak terdeteksi dalam simulasi dan kemungkinan disebabkan oleh faktor eksternal seperti suhu tuang, kualitas cetakan, atau kebersihan material. Selain itu, hasil pengecoran juga dipengaruhi oleh komposisi material yang tidak sepenuhnya sesuai dengan standar pengecoran logam aluminium, sehingga berpotensi menurunkan kualitas mekanik dan memperbesar kemungkinan cacat.

REFERENSI

- Campbell, J. (2015). Complete Casting Handbook. *Complete Casting Handbook*. Doi:10.1016/c2014-0-01548-1
- Eko, J. (2022). Perancangan Gating System Pada Fender Melalui Pengecoran Pasir (Sand Casting). Skripsi, 1–40.
- Erbul, A., Vanli, A. S., Akdogan, A., & Durakbasa, N. (2017). *Gating System Design and Optimization in Sand Mold Casting of Cast Irons*. 173–190. Doi:10.2507/daaam.scibook.2017.14
- Primaningtyas, W. E., Purnomo, D. A., Ariani, S., Wulandari, K. D., Alfanda, B. D., & Baiti, R. N. (2024). Escalation of Capacity and Quality PS60 Casting Production by Gating System Modification. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*. 9(1), 30–38. Doi:10.12962/j25481479.v9i1.20125
- Rao, P. N. (2013). *pdf-div-class-2qs3tf-truncatedtext-module-wrapper-fg1km9p-classtruncatedtext-module-lineclamped-85ulhh-style-max-lines5manufacturing-technology-vol-1-by-p-n-rao-p-div_compress.pdf* (P. N. Rao (ed.); 4th ed.). McGraw Hill Education (India) Private Limited.