

Prediksi dan Validasi Porositas Kipas Aluminium Hasil Pengecoran Dengan Simulasi dan Eksperimen Berbasis *Finite Difference Method*

Dedhy Prihtiantoro¹, Agus Lutanto^{2*}

^{1,2}Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Akademi Inovasi Indonesia

^{1,2}Jln. Hasanuddin Mangunsari, Sidomukti, Kota Salatiga, 50721, Indonesia

E-mail: dedhyprihtiantoro@inovasi.ac.id¹, aguslutanto@inovasi.ac.id²

Info Naskah:

Naskah masuk: 7 Juni 2025

Direvisi: 19 Juli 2025

Diterima: 23 Juli 2025

Abstrak

Porositas merupakan cacat yang sering terjadi dalam proses pengecoran aluminium, terutama pada komponen ber dinding tipis seperti kipas kompresor. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi dan memvalidasi porositas pada komponen kipas aluminium hasil pengecoran menggunakan pendekatan simulasi dan eksperimen. Metode simulasi dilakukan menggunakan *Finite Difference Method* (FDM) dengan bantuan perangkat lunak SOLIDCast dan FLOWCast untuk mengevaluasi distribusi logam cair, kriteria Niyama, dan waktu solidifikasi. Pengecoran eksperimen dilakukan menggunakan pasir silika dan paduan aluminium A319, yang kemudian dianalisis secara metalografi menggunakan foto mikroskopik. Hasil menunjukkan adanya korelasi tinggi antara prediksi simulasi dan hasil eksperimen, khususnya pada jenis mikroporositas, porositas gas, dan penyusutan lokal. Pendekatan ini terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas hasil pengecoran dan dapat dijadikan referensi untuk optimasi desain sistem tuang.

Keywords:

porosity;

aluminum casting;

finite difference method;

casting simulation;

experimental validation.

Abstract

Porosity is a common defect in the aluminum casting process, particularly in thin-walled components such as compressor fans. This study aims to predict and validate porosity in cast aluminum fan components using a combined simulation and experimental approach. The simulation was conducted using the Finite Difference Method (FDM) with the aid of SOLIDCast and FLOWCast software to evaluate molten metal distribution, Niyama criterion, and solidification time. The experimental casting was carried out using silica sand molds and Aluminum A319 alloy, followed by metallographic analysis under an optical microscope. The results show a strong correlation between the simulation predictions and experimental findings, especially in the identification of microporosity, gas porosity, and localized shrinkage. This approach has proven effective in improving casting quality and can serve as a reference for optimizing gating system design.

*Penulis korespondensi:

Agus Lutanto

E-mail: dedhyprihtiantoro@inovasi.ac.id

1. Pendahuluan

Proses pengecoran aluminium merupakan teknologi manufaktur yang banyak digunakan dalam industri otomotif dan dirgantara untuk memproduksi komponen dengan bentuk kompleks dan presisi tinggi [1]–[6]. Dalam perkembangannya, teknologi ini telah mengalami kemajuan signifikan, terutama dengan adopsi perangkat lunak simulasi seperti SOLIDCast dan FLOWCast yang memungkinkan prediksi cacat dan optimalisasi desain sebelum proses pengecoran dilakukan. Perangkat ini membantu meningkatkan efisiensi, menurunkan biaya, serta meningkatkan kualitas komponen hasil pengecoran [7], [8]. Namun demikian, salah satu tantangan utama yang masih dihadapi adalah terbentuknya porositas, yaitu adanya rongga udara atau gas dalam struktur logam padat yang dapat menurunkan sifat mekanik dan integritas struktural komponen. Porositas dapat terjadi akibat berbagai faktor, seperti kecepatan pengisian cetakan yang tinggi, suhu tuang yang tidak tepat, dan desain sistem saluran yang kurang optimal [9]–[12].

Beberapa studi sebelumnya telah mengkaji fenomena porositas dalam pengecoran aluminium. Misalnya, sebuah penelitian oleh Béraud et al. [12] mengembangkan model elemen hingga untuk memprediksi pembentukan porositas akibat perubahan volume kolam leleh dalam proses manufaktur aditif busur kawat aluminium. Penelitian ini menyoroti pentingnya pemantauan volume kolam leleh sebagai indikator porositas dalam proses manufaktur aditif aluminium. Namun, penelitian tersebut berfokus pada proses manufaktur aditif dan tidak mencakup proses pengecoran konvensional seperti pengecoran pasir.

Selain itu, Ali et al. [13] melakukan simulasi penyusutan pada paduan aluminium A413 selama proses pengecoran. Hasil simulasi menunjukkan bahwa optimasi posisi *riser* dan *in-gate* efektif mencegah terbentuknya rongga penyusutan. Validasi eksperimental mengonfirmasi bahwa desain cetakan yang dioptimalkan berhasil menghilangkan cacat penyusutan. Studi ini memberikan wawasan tentang karakteristik penyusutan pada paduan aluminium, namun tidak secara spesifik membahas porositas sebagai cacat dalam proses pengecoran.

Penelitian lain oleh Khalajzadeh dan Beckermann [14] mengusulkan model baru untuk mensimulasikan pembentukan porositas penyusutan selama pembekuan paduan logam. Model ini didasarkan pada penemuan terbaru bahwa porositas penyusutan terbentuk di daerah pengecoran di mana fraksi padatnya paling rendah. Meskipun model ini efektif dalam memprediksi berbagai jenis porositas penyusutan, penerapannya dalam konteks pengecoran aluminium dan validasinya melalui eksperimen masih perlu diteliti lebih lanjut.

Meskipun berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk memprediksi dan memahami pembentukan porositas dalam proses pengecoran aluminium, masih terdapat kesenjangan dalam hal penerapan metode simulasi berbasis metode beda hingga (*Finite Difference Method/FDM*) yang terintegrasi dengan perangkat lunak komersial seperti SOLIDCast dan FLOWCast. Selain itu, validasi eksperimental terhadap hasil simulasi tersebut, khususnya

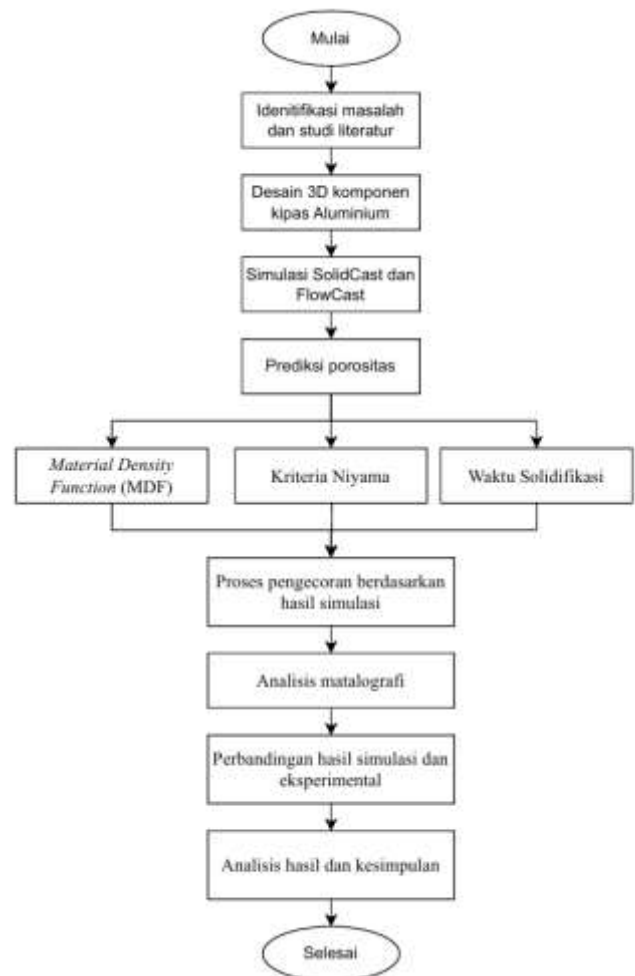
pada komponen kipas aluminium dengan geometri tipis dan kompleks, masih terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model simulasi berbasis FDM menggunakan perangkat lunak SOLIDCast dan FLOWCast untuk memprediksi pembentukan porositas pada komponen kipas aluminium. Selain itu, penelitian ini juga akan melakukan validasi eksperimen terhadap hasil simulasi tersebut untuk memastikan akurasi dan keandalannya dalam memprediksi porositas pada komponen kipas aluminium.

2. Metode

2.1 Alur Penelitian

Metodologi penelitian ini dilaksanakan sesuai dengan diagram alir yang ditampilkan pada Gambar 1.

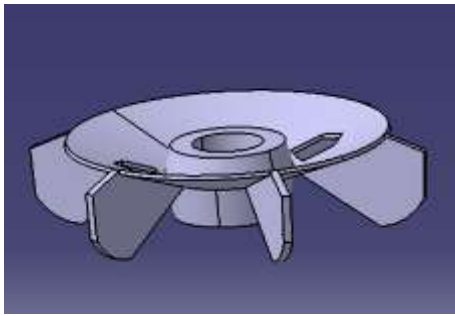


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Desain Komponen Kipas Aluminium

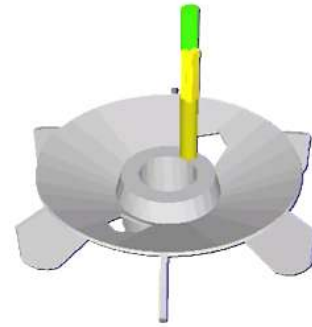
Komponen kipas yang digunakan dalam penelitian ini adalah kipas kompresor aluminium, yang memiliki geometri tipis dan kompleks. Desain komponen dimulai dengan pengukuran dimensi kipas yang ada, diikuti dengan pembuatan model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak CATIA. Model 3D ini kemudian diekspor ke dalam format STL untuk digunakan dalam perangkat lunak

simulasi. Gambar desain 3D komponen kipas dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Kipas Aluminium

dipilih untuk memastikan aliran logam cair yang lancar tanpa terjadi solidifikasi prematur.



Gambar 3. Model Saluran Tuang Pengecoran

2.3 Pemilihan Material dan Model Tuang

Paduan aluminium yang digunakan dalam penelitian ini adalah Aluminium A319, yang dipilih karena sifat mekaniknya yang mendekati paduan aluminium daur ulang, serta kemampuannya untuk menahan suhu operasional yang tinggi. Silika pasir digunakan sebagai bahan cetakan karena kemampuannya untuk membentuk geometri yang kompleks dengan biaya yang relatif rendah. Sistem *gating* dan saluran tuang, seperti ditunjukkan pada Gambar 3, dirancang menggunakan perangkat lunak SOLIDCast, di mana diameter *downsprue* sebesar 10 mm dan panjang 75 mm

2.4 Simulasi Menggunakan SOLIDCast dan FLOWCast

Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SOLIDCast untuk memodelkan proses pengecoran dari pengisian cetakan hingga fase solidifikasi [15], [16]. Pada tahap simulasi ini, beberapa parameter penting dianalisis, termasuk: *Material Density Function* (MDF): Untuk memprediksi distribusi porositas pada komponen kipas.



Gambar 4. Proses Pengecoran Komponen Kipas

Kriteria Niyama (N): Digunakan untuk menilai kualitas solidifikasi arah dan memprediksi kemungkinan terbentuknya cacat penyusutan. Kriteria ini didasarkan pada hubungan antara gradien suhu (G) dan laju pendinginan (R), yang secara matematis dinyatakan dengan rumus [17]:

$$N = \frac{G}{\sqrt{R}} \quad (1)$$

Waktu Solidifikasi: Untuk memantau waktu yang dibutuhkan agar logam padat sepenuhnya.

FLOWCast digunakan sebagai modul tambahan dalam SOLIDCast untuk mensimulasikan aliran logam cair melalui sistem *gating*, memastikan bahwa cetakan terisi penuh tanpa terjadi pengendapan gas atau pembentukan rongga [18], [19].

Parameter material dan termal yang digunakan dalam simulasi diambil dari data paduan Aluminium A319 yang tercantum pada Tabel 1. Parameter tersebut meliputi konduktivitas termal, kalor spesifik, kerapatan, suhu awal, suhu solidifikasi, rentang pembekuan, dan kalor laten fusi [20]. Pemilihan nilai-nilai ini sangat penting untuk memastikan akurasi simulasi dalam memodelkan proses solidifikasi dan prediksi pembentukan porositas [21], [22]. Dengan menggunakan parameter yang sesuai standar material, simulasi dapat merepresentasikan kondisi nyata pengecoran dengan lebih tepat sehingga hasil prediksi porositas menjadi valid dan dapat diandalkan untuk aplikasi industri.

Tabel 1. Parameter Material Paduan Aluminium A319 untuk Simulasi Pengecoran [20]

Parameter	Nilai	Satuan
Thermal Conductivity	110	W/m-K
Specific Heat	880	J/kg-K
Density	2900	kg/m ³
Initial Temperature	660	°C
Solidification Temperature	482	°C
Freezing Range	127	°C
Latent Heat of Fusion	480000	J/kg

2.5 Prosedur Eksperimen

Setelah tahap simulasi, dilakukan pengecoran eksperimental menggunakan proses pengecoran pasir. Cetakan disiapkan dengan mencetak komponen kipas dalam bentuk pasir silika yang dicampur dengan 8% bentonit dan 5% air untuk memastikan kekuatan cetakan yang baik. Tahapan proses pengecoran ditunjukkan pada Gambar 4.

Setelah proses penuangan, komponen kipas dikeluarkan dari cetakan dan dipotong menjadi beberapa bagian, seperti pada Gambar 5. Bagian tersebut diprediksi memiliki potensi cacat berdasarkan hasil simulasi, seperti bagian *disc* (1), *bushing* (2), dan *blade* (3).



Gambar 5. Area Potensi Cacat

Spesimen hasil pengecoran kemudian dianalisis menggunakan mikroskop foto pada pembesaran 200x untuk mendeteksi jenis porositas, termasuk mikroporositas, porositas gas, dan penyusutan lokal.

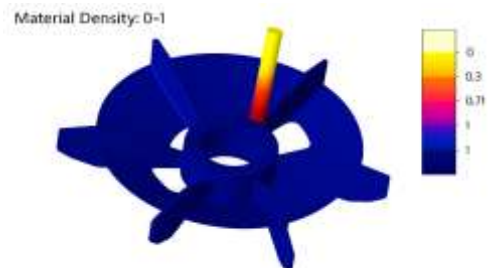
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Simulasi

Simulasi menggunakan perangkat lunak SOLIDCast dan FLOWCast menghasilkan beberapa informasi penting terkait dengan pembentukan porositas dalam komponen kipas aluminium. Berdasarkan hasil simulasi, terdapat beberapa zona dalam geometri kipas yang rawan terhadap pembentukan porositas. Berikut adalah hasil utama dari simulasi yang dilakukan:

Material Density Function (MDF)

Berdasarkan simulasi dengan menggunakan kriteria *Material Density Function* (MDF), seperti yang ditampilkan pada Gambar 6, diketahui bahwa sebagian besar area pada komponen kipas telah terisi logam padat secara optimal, dengan nilai densitas material mendekati angka maksimum, yaitu 1. Temuan ini menunjukkan bahwa aliran logam cair ke dalam cetakan terjadi dengan baik pada mayoritas volume kipas. Meskipun demikian, simulasi juga mendeteksi area rentan di sekitar bagian *bushing*, di mana densitas material tercatat lebih rendah dan diperkirakan mengalami porositas hingga mencapai 30%.



Gambar 6. Hasil Simulasi Densitas Material Kipas

Kondisi tersebut mengisyaratkan bahwa distribusi logam cair pada area sekitar *bushing* tidak merata selama

proses pengisian cetakan. Ketidakteraturan distribusi ini menyebabkan terbentuknya rongga saat proses solidifikasi berlangsung. Narayanana [23] juga menyatakan bahwa area dengan distribusi logam cair yang tidak merata selama proses pengisian cetakan cenderung mengalami porositas yang lebih tinggi, terutama di area dengan geometri kompleks. Fenomena ini kemungkinan besar terjadi akibat kurang optimalnya desain sistem saluran tuang atau posisi *riser* yang tidak mendukung aliran logam secara efisien. Oleh karena itu, informasi dari simulasi MDF ini sangat penting untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan desain pengecoran guna menghindari cacat porositas pada komponen akhir.

Kriteria Niyama

Kriteria Niyama digunakan untuk memprediksi kualitas solidifikasi arah dalam proses pengecoran. Berdasarkan hasil simulasi, seperti yang ditampilkan pada Gambar 7, nilai Niyama rata-rata pada bagian kipas menunjukkan adanya potensi pembentukan porositas dalam tingkat sedang. Kondisi ini paling dominan ditemukan pada area *blade* dan *disc*, yang umumnya memiliki geometri tipis. Geometri tersebut membuat daerah ini lebih rentan terhadap gangguan aliran panas selama proses pembekuan logam.

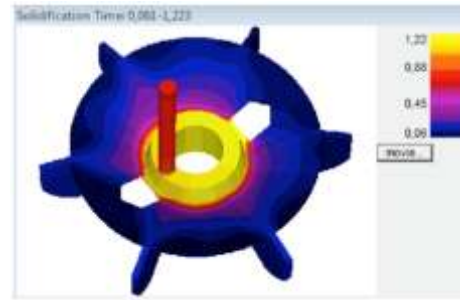


Gambar 7. Hasil Simulasi Kriteria Niyama pada Kipas

Nilai Niyama yang rendah pada area-area tersebut mengindikasikan adanya risiko tinggi terhadap terbentuknya porositas penyusutan. Penelitian dari Manjabacas dan Miguel [24] juga menyatakan bahwa nilai Niyama yang rendah berkorelasi dengan peningkatan ukuran porositas, terutama pada area dengan laju pendinginan tinggi dan gradien suhu rendah. Hal ini disebabkan oleh proses solidifikasi yang berlangsung secara tidak merata, sehingga menyebabkan akumulasi rongga dalam struktur logam. Dengan demikian, evaluasi menggunakan kriteria Niyama sangat penting untuk mengidentifikasi area kritis dan mengoptimalkan desain pengecoran guna meminimalkan cacat.

3.2 Waktu Solidifikasi

Proses solidifikasi memperlihatkan bahwa bagian *blade* dan *disc* membeku lebih cepat dibandingkan dengan area *bushing*. Fenomena ini terlihat pada distribusi warna hasil simulasi yang ditampilkan pada Gambar 8, di mana nilai waktu solidifikasi pada *blade* dan *disc* tercatat lebih rendah. Perbedaan waktu pembekuan ini erat kaitannya dengan geometri komponen. Bagian yang lebih tipis cenderung mengalami pelepasan panas lebih cepat, sehingga membeku lebih awal dibandingkan bagian yang lebih tebal.



Gambar 8. Distribusi Waktu Solidifikasi pada Kipas

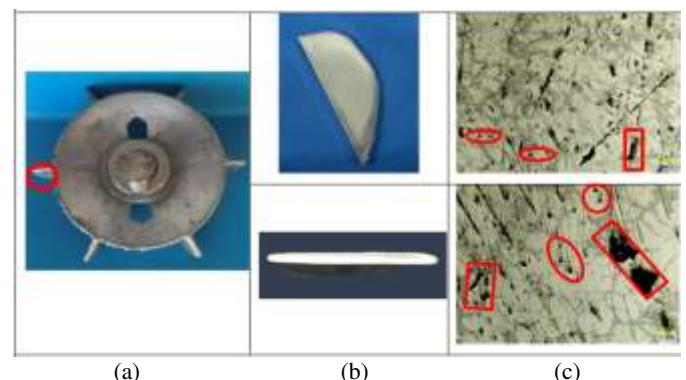
Waktu solidifikasi yang terlalu cepat pada bagian tipis tersebut dapat memicu pembentukan porositas mikroskopis. Proses pembekuan yang tidak merata ini berpotensi menghambat pelepasan gas atau menyisakan ruang kosong dalam logam padat. Hal ini sejalan dengan penelitian dari Colak et al. [25] yang mengkaji pengaruh waktu solidifikasi dan jumlah inokulan terhadap mikrostruktur dan kekerasan besi cor grafit lamelar. Hasilnya menunjukkan bahwa solidifikasi cepat pada bagian tipis dapat memicu porositas mikroskopis. Oleh karena itu, informasi ini penting untuk dijadikan pertimbangan dalam perbaikan desain cetakan, agar proses pendinginan dapat berlangsung lebih seragam dan mengurangi risiko terbentuknya cacat internal.

3.3 Hasil Eksperimen

Setelah melakukan pengecoran dan memotong komponen kipas, bagian-bagian yang diprediksi mengalami cacat porositas berdasarkan hasil simulasi dianalisis menggunakan mikroskop foto dengan pembesaran 200x. Hasil analisis menunjukkan bahwa:

Porositas Mikroskopis

Hasil pengamatan mikroskopis pada bagian *blade* dan *disc*, seperti pada Gambar 9, menunjukkan adanya mikroporositas, yaitu rongga-rongga kecil yang terbentuk dalam struktur logam. Cacat ini teridentifikasi melalui analisis menggunakan mikroskop foto pada pembesaran 200x. Mikroporositas tersebut ditemukan terutama pada area yang sebelumnya telah diprediksi mengalami cacat berdasarkan hasil simulasi.

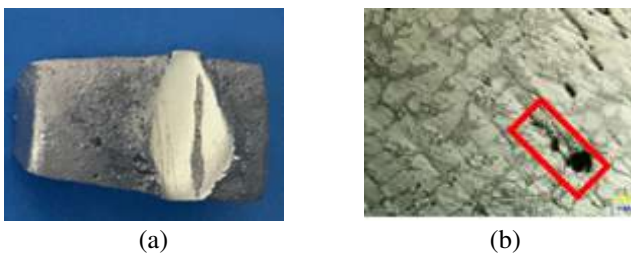


Gambar 9. Pengujian Porositas Mikroskopis (a) Lokasi Spesimen, (b) Potongan Spesimen Bagian *Blade*, dan (c) Hasil Mikrograf Porositas

Munculnya mikroporositas ini disebabkan oleh proses solidifikasi yang berlangsung secara cepat dan tidak merata di area tipis tersebut. Temuan ini mendukung hasil simulasi

yang menunjukkan bahwa *blade* dan *disc* mengalami pembekuan lebih cepat dibandingkan bagian lain, seperti *bushing*. Kecepatan pembekuan yang tinggi dapat menghambat pelepasan gas dan penyusutan volume logam, sehingga meningkatkan risiko terbentuknya porositas mikroskopis. Hasil ini sejalan dengan penelitian dari Kong et al. [26] dimana peningkatan laju pendinginan mempercepat solidifikasi dan membatasi pertumbuhan kristal bercabang, sehingga menghasilkan butiran yang lebih halus. Namun, solidifikasi yang terlalu cepat dapat menghambat pelepasan gas dan difusi partikel, sehingga meningkatkan risiko porositas mikroskopis dalam logam Porositas Gas

Pada bagian *bushing* komponen kipas, hasil analisis menunjukkan adanya inklusi gas yang terperangkap di dalam struktur logam. Cacat ini terjadi akibat pengendapan gas selama proses pengisian logam cair ke dalam cetakan, khususnya ketika aliran logam tidak stabil atau saat udara tidak sepenuhnya keluar dari rongga cetakan. Gambar 10 yang merupakan gambar hasil potongan dan pengamatan mikroskopis mendukung keberadaan porositas gas ini, yang tampak sebagai rongga atau titik hitam dalam struktur.



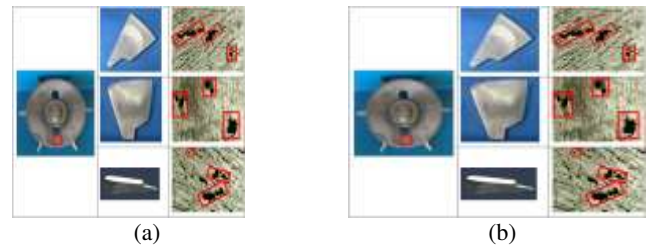
Gambar 10. Hasil Pengujian Porositas Gas (a) Potongan Spesimen bagian *Bushing* dan (b) Mikrograf Porositas Gas

Inklusi gas tersebut dapat berdampak negatif terhadap kualitas komponen, terutama dari sisi kekuatan dan ketahanan mekanik. Rongga gas yang tertinggal dapat menjadi titik lemah yang berpotensi memicu retak atau kegagalan struktur saat komponen bekerja di bawah beban. Oleh karena itu, penting untuk memperbaiki sistem saluran dan ventilasi cetakan guna meminimalkan kemungkinan terbentuknya porositas gas pada proses pengecoran berikutnya [26].

3.4 Penyusutan Lokal

Hasil observasi terhadap bagian dalam *disc* mengindikasikan adanya penyusutan lokal yang tergolong signifikan. Indikasi ini tampak nyata melalui analisis potongan melintang serta hasil pengamatan mikroskopis, yang memperlihatkan adanya rongga-rongga dengan bentuk tidak beraturan dalam struktur logam padat, seperti pada Gambar 11. Keberadaan rongga tersebut disebabkan oleh berkurangnya volume logam cair selama proses pembekuan berlangsung, khususnya pada area yang tidak menerima aliran logam secara optimal. Ketidaksempurnaan suplai logam cair ini menyebabkan sebagian rongga dalam cetakan tidak terisi sempurna, sehingga terbentuk cacat internal pada komponen hasil pengecoran. Khalajzadeh dan Beckermann [14] juga menyatakan bahwa porositas penyusutan terjadi ketika volume logam cair tidak lagi mencukupi untuk mengimbangi kontraksi selama solidifikasi, khususnya di

area dengan fraksi padat rendah. Ketidaksempurnaan suplai logam cair ke zona tersebut menyebabkan rongga tidak terisi sempurna, sehingga terbentuk cacat internal dalam komponen hasil pengecoran.



Gambar 11. Validasi Pengamatan Penyusutan Lokal (a) Potongan Spesimen Bagian *Disc* dan (b) Mikrograf Penyusutan Lokal

Penyusutan lokal terjadi ketika distribusi logam cair ke dalam cetakan tidak merata, sehingga sebagian area tidak sepenuhnya terisi sebelum proses solidifikasi berakhir. Hal ini menyebabkan terbentuknya rongga internal yang dikenal sebagai porositas penyusutan. Cacat semacam ini umumnya muncul pada area dengan desain geometri rumit atau perbedaan ketebalan signifikan, seperti pada bagian *disc* kipas aluminium. Meskipun fenomena ini telah banyak dikaji, sebagian besar penelitian sebelumnya hanya mengandalkan pendekatan simulasi tanpa validasi langsung melalui eksperimen [14], [23]. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengombinasikan simulasi berbasis kriteria Niyama dan verifikasi mikroskopis, guna memastikan akurasi prediksi porositas serta memberikan masukan konkret dalam optimasi sistem saluran dan penempatan *riser* secara aplikatif.

3.5 Analisis Hasil

Hasil simulasi menggunakan pendekatan *Finite Difference Method* (FDM) dengan SOLIDCast dan FLOWCast berhasil mengidentifikasi daerah-daerah rawan porositas pada komponen kipas aluminium, khususnya di area *bushing*, *blade*, dan *disc*. Tiga parameter utama simulasi yaitu *Material Density Function* (MDF), Kriteria Niyama, dan Waktu Solidifikasi menunjukkan konsistensi dalam memprediksi potensi cacat. MDF memperlihatkan distribusi logam cair yang tidak merata, terutama di sekitar *bushing*. Sementara itu, kriteria Niyama dan waktu solidifikasi mengonfirmasi bahwa bagian *blade* dan *disc*, dengan geometri tipis, lebih cepat membeku dan rentan terhadap porositas akibat solidifikasi yang tidak merata.

Validasi eksperimen mendukung hasil simulasi. Pengamatan mikroskopis pada spesimen hasil pengecoran mengkonfirmasi keberadaan tiga jenis porositas utama: mikroporositas, porositas gas, dan porositas penyusutan. Mikroporositas terdeteksi pada bagian *blade* dan *disc*, sejalan dengan hasil simulasi waktu solidifikasi. Inklusi gas ditemukan di area *bushing*, sesuai prediksi dari distribusi MDF yang rendah, dan porositas penyusutan tampak dominan pada area dalam *disc*, yang tidak sepenuhnya terisi logam saat solidifikasi berlangsung. Ketiga jenis cacat ini terbukti muncul di lokasi-lokasi yang telah dipetakan secara akurat oleh simulasi. Korelasi yang kuat antara prediksi simulasi dan hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode

simulasi berbasis FDM efektif dalam memetakan dan memprediksi porositas pada komponen dengan geometri kompleks. Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan simulasi ini dapat menjadi alat bantu yang handal dalam desain sistem pengecoran dan optimalisasi cetakan. Dengan memanfaatkan informasi dari simulasi, proses pengecoran dapat ditingkatkan melalui perbaikan desain *gating system*, penempatan *riser* yang strategis, serta pengaturan waktu tuang, sehingga risiko cacat dapat diminimalkan dan kualitas produk meningkat secara signifikan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan kombinasi simulasi menggunakan FDM melalui perangkat lunak SOLIDCast dan FLOWCast, serta validasi eksperimental melalui analisis metalografi, mampu secara efektif memetakan dan memprediksi porositas pada komponen kipas aluminium hasil pengecoran. Temuan ini membuktikan bahwa model simulasi yang digunakan dapat mengidentifikasi zona rawan cacat dengan akurasi yang baik dan relevan terhadap kondisi pengecoran aktual, khususnya pada bagian *blade*, *disc*, dan *bushing*. Penerapan pendekatan ini berkontribusi langsung terhadap perbaikan desain sistem saluran tuang dan strategi penempatan *riser* guna meningkatkan kualitas hasil coran secara menyeluruh. Oleh karena itu, metode ini sangat layak diterapkan dalam proses perancangan dan kontrol mutu pada industri pengecoran logam dengan geometri kompleks. Untuk pengembangan lebih lanjut, penelitian ini membuka peluang eksplorasi model simulasi multifisika yang menggabungkan aliran fluida, perpindahan panas, dan difusi gas secara simultan, serta penerapan kecerdasan buatan untuk optimasi desain cetakan secara otomatis dan adaptif terhadap variasi produk.

Daftar Pustaka

- [1] Z. sheng Xie *et al.*, "Effect of process parameters on microstructure and properties of superalloy turbine guide castings by a novel electromagnetic oscillation method," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 33, no. October, pp. 5671–5682, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.10.222.
- [2] K. CUI, L. JING, R. JIANG, L. YU, and X. GAO, "Core shift limitation in investment casting process of hollow turbine blade," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 37, no. 8, pp. 513–526, 2024, doi: 10.1016/j.cja.2023.12.001.
- [3] Ł. Rakoczy *et al.*, "Microstructure, stability and oxidation resistance of ex-situ Alloy 625 + TiC nanocomposites processed by suction casting intended for repair of aerospace components," *Mater Des*, vol. 254, no. May, 2025, doi: 10.1016/j.matdes.2025.114055.
- [4] Z. Li *et al.*, "Effect of Ca-enhanced AE81M magnesium alloy on melt oxidation during low-pressure die casting of automotive wheels," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 33, no. November, pp. 9820–9831, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.12.016.
- [5] P. Burggräf, G. Bergweiler, S. Kehrler, T. Krawczyk, and F. Fiedler, "Mega-casting in the automotive production system: Expert interview-based impact analysis of large-format aluminium high-pressure die-casting (HPDC) on the vehicle production," *J Manuf Process*, vol. 124, no. June, pp. 918–935, 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.06.028.
- [6] F. Mielke, D. Sulik, and X. Fang, "Influence of high-pressure die casting parameters on bonding characteristics of aluminium-steel hybrid-castings for automotive lightweight structures," *J Manuf Process*, vol. 143, no. January, pp. 351–368, 2025, doi: 10.1016/j.jmapro.2025.04.032.
- [7] S. Al-Alimi *et al.*, "Recycling aluminium for sustainable development: A review of different processing technologies in green manufacturing," Sep. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rineng.2024.102566.
- [8] A. Al Mahmood, M. A. Kader, M. B. Islam, and R. Hossain, "Sustainable transformation of waste Aluminium into high-performance composites: A review," Mar. 01, 2025, *KeAi Publishing Communications Ltd.* doi: 10.1016/j.ijlmm.2024.11.002.
- [9] A. Bhowmik *et al.*, "Casting of particle reinforced metal matrix composite by liquid state fabrication method: A review," *Results in Engineering*, vol. 24, no. October, p. 103152, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103152.
- [10] Zulfadhli, A. Akhyar, N. Ali, Arhami, and M. R. Pahlevi, "Variations in casting temperatures effect of re-melted 6061 aluminum alloy on tensile strength," *Results in Materials*, vol. 26, no. 7, p. 100691, 2025, doi: 10.1016/j.rinma.2025.100691.
- [11] Y. Li, J. M. Dias Filho, S. Dehgahi, S. U. Butt, H. Henein, and A. J. Qureshi, "Hybrid investment casting of Al-Cu-Sc alloy-based lattice structures: Material and process characterization," *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 10, no. October 2024, 2025, doi: 10.1016/j.aime.2025.100160.
- [12] N. Béraud, A. Chergui, M. Limousin, F. Villeneuve, and F. Vignat, "An indicator of porosity through simulation of melt pool volume in aluminum wire arc additive manufacturing," *Mechanics and Industry*, vol. 23, pp. 1–8, 2022, doi: 10.1051/meca/2021052.
- [13] R. Ali *et al.*, "Elimination of solidification shrinkage defects in the casting of aluminum alloy," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 36, no. 5, pp. 2345–2353, 2022, doi: 10.1007/s12206-022-0416-z.
- [14] V. Khalajzadeh and C. Beckermann, "Simulation of Shrinkage Porosity Formation During Alloy Solidification," *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*, vol. 51, no. 5, pp. 2239–2254, 2020, doi: 10.1007/s11661-020-05699-z.
- [15] T. M. Chen, J. Q. Wu, and J. T. Lin, "Classification of 3D Casting Models for Product Lifecycle Management and Corporate Sustainability," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 17, 2023, doi: 10.3390/su151712683.
- [16] H. Alrobei, R. A. Malik, F. Amjad, and I. AlBaijan, "Investigation of Structure and Mechanical Characteristics of a High Manganese Steel via SolidCast Simulation Method," *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–12, 2023, doi: 10.3390/met13030572.
- [17] W. Frieden Templeton, S. Hinnebusch, S. T. Strayer, A. C. To, P. C. Pistorius, and S. P. Narra, "A mechanistic explanation of shrinkage porosity in laser powder bed fusion additive manufacturing," *Acta Mater*, vol. 266, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.actamat.2023.119632.
- [18] S. Köse, M. Çolak, and E. E. Şüküroğlu, "Investigation of the Effects of Filling Speed, Casting Temperature and Metallurgical Quality on Fluidity of Lamellar Graphite Cast Iron at Different Section Thicknesses," *International Journal of Metalcasting*, vol. 19, no. 1, pp. 282–292, 2024, doi: 10.1007/s40962-024-01301-z.
- [19] J. Bhatt, D. Vyas, A. Rajput, M. Somasundaram, and U. Narendra Kumar, "A systematic review on methods of optimizing riser and gating system based on energy Nexus

- approach,” *Energy Nexus*, vol. 1, no. July, p. 100002, 2021, doi: 10.1016/j.nexus.2021.100002.
- [20] S. I. Bakhtiyarov, R. A. Overfelt, and S. G. Teodorescu, “Electrical and thermal conductivity of A319 and A356 aluminum alloys,” *Journal Of Materials Science*, pp. 4643–4648, 2001, doi: 10.1023/A:1017946130966.
- [21] T. C. Wahyudi and E. Budiyo, “Variasi temperatur pada proses squeeze casting berbahan magnesium semi solid terhadap hasil kekerasan,” *ARMATUR: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur*, vol. 2, no. 1, pp. 19–26, 2021, doi: 10.24127/armatur.v2i1.739.
- [22] S. Wang *et al.*, “Integrated predictions of the influence of mesh size, casting defects and SDAS on the fatigue life of aluminum alloy wheels,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 35, no. January, pp. 3956–3967, 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.02.091.
- [23] G. Narayanana, “Simulation of Porosity Fractions in Aluminum Cast Structure for Aero Engine Applications,” *Evolutions in Mechanical Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 1–6, Nov. 2021, doi: 10.31031/EME.2021.03.000575.
- [24] M. C. Manjabacas and V. Miguel, “A Methodology to Define the Niyama Criterion Reinforced with the Solid Fraction Analysis: Application to Sand Casting of Steel Bars,” *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 10, 2023, doi: 10.3390/met13101777.
- [25] M. Çolak *et al.*, “Investigation of the Effect of Solidification Time and Addition Amount of Inoculation on Microstructure and Hardness in Lamellar Graphite Cast Iron,” *Archives of Foundry Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 24–33, 2022, doi: 10.24425/afe.2022.140248.
- [26] X. Kong, Y. Wang, H. Fan, J. Wu, H. Xu, and H. Mao, “Effect of high cooling rate on the solidification microstructure of Al–Cu/TiB₂ alloy fabricated by freeze-ablation casting,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 25, pp. 593–607, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.05.215.