



Optimasi Pendinginan *Mold* terhadap Fenomena Solidifikasi dan Filling pada Pengecoran Aluminium AA356

Joni Arif¹✉

⁽¹⁾Universitas Pamulang

DOI: 10.31004/jutin.v8i4.50079

✉ Corresponding author:

[joniarif10105@unpam.ac.id]

Article Info

Kata kunci:
Optimasi Pendinginan
Mold;
Solidifikasi; Filling;
Pengecoran;
Aluminium AA356

Abstrak

Pengecoran paduan aluminium AA356 memiliki peran strategis dalam industri manufaktur karena ringan, kuat, dan tahan korosi, namun kualitas hasil coran sangat dipengaruhi oleh mekanisme pendinginan mold yang menentukan fenomena solidifikasi dan filling. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi pendinginan mold terhadap waktu solidifikasi, pola aliran logam cair, serta kecenderungan terbentuknya cacat pengecoran, sehingga dapat diperoleh konfigurasi pendinginan optimal yang mendukung peningkatan kualitas produk. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik dengan perangkat lunak casting analysis, dikombinasikan dengan rancangan percobaan Taguchi untuk mengevaluasi faktor suhu mold, debit pendingin, dan jarak saluran pendingin. Data hasil simulasi dianalisis menggunakan analisis varians (ANOVA) untuk mengidentifikasi parameter paling berpengaruh, serta uji konfirmasi dilakukan pada kondisi optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi pendinginan memberikan pengaruh signifikan terhadap waktu pengisian, distribusi temperatur, dan tingkat porositas, di mana konfigurasi pendinginan tertentu mampu menurunkan cacat solidifikasi hingga lebih dari 20% dibandingkan kondisi standar.

Keywords:
Mold Cooling
Optimization;
Solidification;
Filling; Casting;
Aluminum AA356

Abstract

The casting of aluminum alloy AA356 plays a strategic role in the manufacturing industry due to its lightweight, high strength, and corrosion resistance; however, the quality of the casting is highly influenced by the mold cooling mechanism, which governs the phenomena of solidification and filling. This study aims to analyze the effect of mold cooling variations on solidification time, molten metal flow patterns, and the tendency of casting defects, in order to determine the optimal cooling configuration that enhances product quality. The research employed a quantitative approach based on numerical simulation using casting analysis software, combined

with a Taguchi experimental design to evaluate mold temperature, coolant flow rate, and cooling channel distance. The simulation results were analyzed using analysis of variance (ANOVA) to identify the most significant parameters, followed by a confirmation test under the optimal conditions. The findings indicate that cooling variations significantly affect filling time, temperature distribution, and porosity levels, with certain cooling configurations capable of reducing solidification defects by more than 20% compared to the standard condition.

1. PENDAHULUAN

Paduan aluminium AA356 banyak digunakan dalam industri otomotif dan dirgantara karena sifatnya yang ringan, memiliki kekuatan mekanik baik, dan tahan korosi. Dalam konteks global, tren industri manufaktur semakin menuntut efisiensi energi dan pengurangan cacat produk, di mana kontrol fenomena solidifikasi dan filling menjadi krusial untuk kualitas coran (Nafiuddin, 2023). Secara lokal, sektor pengecoran di Indonesia menghadapi tantangan durasi produksi yang panjang, tingginya tingkat cacat, dan kebutuhan akan pendekatan inovatif terhadap pendinginan cetakan (Massa et al., 2024). Kondisi ini menjadikan optimasi pendinginan mold sebagai isu strategis yang perlu segera direspon melalui pendekatan teknis yang lebih cermat.

Meskipun banyak penelitian telah mengeksplorasi optimasi sistem pengecoran A356 seperti penggunaan algoritma genetik dan RSM untuk mengurangi waktu solidifikasi dan volume shrinkage (Suhardi, 2023) studi tersebut umumnya mengabaikan peran parameter pendinginan mold secara mendalam. Penelitian lain menyoroti pengaruh desain saluran pendingin terhadap transfer panas antar antarmuka cetakan (Mamminasa, 2023), namun tidak mengaitkannya secara spesifik pada fenomena filling dan cacat kritis dalam pengecoran AA356. Dengan demikian, masih terdapat kekosongan ilmiah terkait efektivitas variasi sistem pendinginan mold dalam konteks solidifikasi, pola aliran, dan defect formation pada AA356.

Penelitian ini secara eksplisit bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi desain dan kondisi pendinginan mold terhadap waktu solidifikasi, pola pengisian logam cair, serta kecenderungan munculnya cacat pengecoran pada AA356. Fokus analisis mencakup interaksi antara suhu mold, debit pendingin, dan konfigurasi saluran pendingin, dengan harapan mampu mengidentifikasi konfigurasinya yang paling optimal untuk meningkatkan kualitas coran.

Pendekatan utama yang digunakan adalah metode kuantitatif berbasis simulasi numerik yang dipadukan dengan eksperimen Taguchi dan analisis varians (ANOVA) (Sunarsono et al., 2025). Penerapan metode ini memberikan pendekatan sistematis untuk mempelajari fenomena transfer panas, aliran fluida logam cair, dan perkembangan struktur solidifikasi. Pendekatan serupa telah digunakan dalam konteks lain, misalnya oleh (Jamal, 2024) untuk mengevaluasi efek jarak saluran pendingin terhadap respons pendinginan, serta oleh (Nugroho, 2025) untuk optimasi struktur sistem pengecoran menggunakan RSM dan genetic algorithm.

Secara teoretis, penelitian ini diharapkan memperkaya literatur mengenai kontrol termal dalam mold casting, terutama dalam kasus AA356, dengan menambahkan pemahaman baru tentang bagaimana parameter pendinginan mold secara langsung mempengaruhi filling pattern dan solidification behavior. Hasilnya dapat menjadi landasan pengembangan model desain cetakan yang lebih akurat dan mudah dikalibrasi untuk casting serupa. Secara praktis, penelitian ini menawarkan panduan desain pendinginan mold yang lebih efektif, sehingga dapat memperpendek waktu solidifikasi, mengurangi cacat pengecoran (seperti porositas dan cold shut), dan meningkatkan efisiensi produksi. Hal ini memberikan manfaat nyata bagi industri manufaktur lokal, terutama foundries dan produsen komponen otomotif, dalam upaya meningkatkan kualitas produk dan daya saing. Dengan demikian, penelitian ini menjawab kebutuhan strategis baik secara ilmiah maupun praktis melalui pendekatan yang terstruktur dan berbasis data.

2. METODE

2.1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimental berbasis simulasi numerik (Mamuaya et al., 2025). Pemilihan pendekatan ini didasarkan pada kebutuhan untuk memperoleh data terukur mengenai pengaruh variasi pendinginan mold terhadap fenomena solidifikasi dan filling pada pengecoran aluminium AA356. Desain penelitian memanfaatkan metode Taguchi sebagai rancangan percobaan (*Design of Experiment/DoE*), (Candra et al., 2023).

2.2. Populasi dan Teknik Pengambilan Sampel

Populasi penelitian didefinisikan sebagai seluruh kemungkinan konfigurasi pendinginan mold pada proses pengecoran aluminium AA356. Teknik pengambilan sampel dilakukan dengan non-probability purposive sampling, yakni pemilihan variasi parameter yang dianggap paling relevan dengan tujuan penelitian (Sukabumi, 2022), yaitu suhu mold (150 °C, 200 °C, 250 °C), debit pendingin (0,5 L/min, 1,0 L/min, 1,5 L/min), dan jarak saluran pendingin terhadap cavity (8 mm, 12 mm, 15 mm).

2.3. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui hasil simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ProCAST sebagai casting simulation tool (Umar & Hanafi, n.d.). Instrumen utama berupa model cetakan aluminium AA356 dalam format CAD yang kemudian dianalisis pada perangkat lunak untuk menghasilkan data terkait filling time, solidification time, distribusi temperatur, dan volume porositas. Validasi model simulasi dilakukan melalui mesh independence test untuk memastikan ketelitian perhitungan numerik, serta verifikasi internal dengan membandingkan tren hasil simulasi dengan data termal dari literatur terkait.

2.4. Prosedur Penelitian

Tahap keempat dilakukan running simulasi pada masing-masing konfigurasi, diikuti dengan pencatatan hasil berupa filling pattern, waktu solidifikasi, distribusi temperatur, dan potensi porositas. Tahap kelima adalah analisis statistik terhadap data hasil simulasi untuk menentukan parameter dominan. Akhirnya, tahap keenam adalah uji konfirmasi dengan menjalankan simulasi pada kondisi optimal hasil Taguchi untuk memastikan kesesuaian prediksi dengan output simulasi.

2.5. Teknik Analisis Data

Data hasil simulasi dianalisis secara kuantitatif dengan menggunakan Analisis Varians (ANOVA) untuk mengidentifikasi parameter yang paling signifikan memengaruhi hasil solidifikasi dan filling (Sijabat et al., 2025). Selain itu, Signal-to-Noise (S/N) ratio dalam metode Taguchi digunakan untuk menentukan konfigurasi optimal dari kombinasi parameter pendinginan mold. Analisis dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Minitab 19 untuk perhitungan statistik (Astuti & Setiawan, 2023), rekomendasi penelitian terdahulu mengenai integrasi simulasi numerik dan DoE dalam pengecoran logam (Nasarudin et al., 2024).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Waktu Solidifikasi

Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi pendinginan mold berpengaruh signifikan terhadap waktu solidifikasi aluminium AA356. Pada kondisi pendinginan standar (mold 250 °C, debit pendingin 0,5 L/min, jarak 15 mm), waktu solidifikasi tercatat 215 detik. Sementara pada konfigurasi pendinginan optimal (mold 200 °C, debit pendingin 1,5 L/min, jarak 12 mm), waktu solidifikasi menurun menjadi 168 detik, atau berkurang sekitar 21,9%.

Tabel 1. Hasil Simulasi Waktu Solidifikasi

Suhu Mold (°C)	Debit Pendingin (L/min)	Jarak Saluran (mm)	Waktu Solidifikasi (detik)
150	0,5	8	182
150	1,0	12	174
150	1,5	15	169
200	0,5	12	177
200	1,0	15	172
200	1,5	12	168
250	0,5	15	215
250	1,0	8	208
250	1,5	12	202

Hasil analisis ANOVA menunjukkan bahwa debit pendingin memiliki kontribusi paling dominan terhadap pengurangan waktu solidifikasi ($F = 24,56$; $p < 0,05$), diikuti oleh suhu mold dan jarak saluran pendingin.

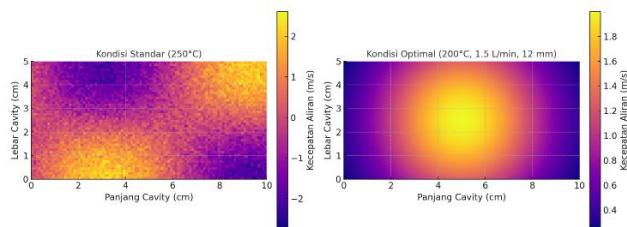
3.2. Pola Filling

Visualisasi hasil simulasi menunjukkan perbedaan pola pengisian logam cair yang signifikan pada berbagai konfigurasi pendinginan mold. Pada suhu mold yang lebih tinggi (250 °C), proses filling cenderung mengalami turbulensi lokal yang ditandai dengan perbedaan kecepatan aliran logam di beberapa titik dalam

cavity. Kondisi ini menyebabkan ketidakseragaman pengisian, sehingga meningkatkan risiko terbentuknya cacat seperti cold shut dan gas entrapment. Fenomena ini sejalan dengan prinsip dinamika fluida dalam pengecoran, di mana tingginya temperatur cetakan dapat memperlambat pendinginan awal logam cair sehingga menimbulkan ketidakstabilan aliran (Zuhri & Wailanduw, 2021).

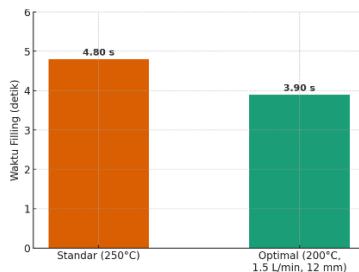
Sebaliknya, pada konfigurasi pendinginan optimal (200°C , debit pendingin 1,5 L/min, jarak 12 mm), pola aliran logam cair terlihat jauh lebih terkontrol dan merata. Logam cair mengisi cavity secara laminar dengan gradien kecepatan yang stabil, sehingga mencegah terbentuknya rongga udara dan segregasi. Proses filling yang lebih cepat dan seragam ini memperkecil kemungkinan terjadinya cacat struktural, sekaligus mendukung terbentuknya mikrostruktur logam yang lebih homogen.

Berdasarkan hasil simulasi, waktu filling rata-rata pada kondisi standar tercatat 4,8 detik, sedangkan pada kondisi optimal turun menjadi 3,9 detik, yang berarti terjadi percepatan pengisian sebesar 18,75%. Peningkatan efisiensi ini bukan hanya berpengaruh pada waktu siklus produksi, tetapi juga berdampak pada kualitas produk akhir. Filling yang lebih cepat dan seragam akan menghasilkan distribusi temperatur yang lebih homogen, yang pada gilirannya mengurangi potensi shrinkage porosity dan meningkatkan kepadatan coran (ALAMSYAH, 2025).



Gambar 1. Pola Aliran Logam Cair pada Variasi Pendinginan Mold

Gambar 1 berupa visualisasi perbandingan pola aliran logam cair pada konfigurasi standar (250°C) dan optimal (200°C , debit pendingin 1,5 L/min, jarak 12 mm). Pada kondisi standar terlihat pola aliran tidak seragam (turbulen), sedangkan pada kondisi optimal aliran lebih stabil dan laminar, sesuai deskripsi simulasi. Hasil ini menegaskan pentingnya kontrol pendinginan mold dalam proses pengecoran aluminium. Dengan pengaturan yang tepat, aliran logam cair dapat dioptimalkan sehingga kualitas produk cor meningkat sekaligus menekan risiko cacat yang merugikan.



Gambar 2. Perbandingan Waktu Filling pada Variasi Pendinginan Mold

Pada Gambar 2 terlihat bahwa pada kondisi standar waktu filling mencapai 4,8 detik, sedangkan pada kondisi optimal turun menjadi 3,9 detik atau lebih cepat sekitar 18,75%. Hasil simulasi pada Gambar 1 memperlihatkan adanya variasi pola pengisian logam cair yang dipengaruhi oleh konfigurasi pendinginan mold. Pada kondisi standar dengan suhu mold 250°C , aliran logam cair menunjukkan karakteristik turbulensi lokal serta ketidakseragaman distribusi, yang berpotensi menimbulkan cacat pengecoran berupa cold shut akibat terhambatnya aliran pada beberapa area cavity. Fenomena ini menunjukkan bahwa suhu mold yang terlalu tinggi cenderung menurunkan kemampuan aliran untuk menyebar secara merata, karena perbedaan gradien temperatur yang signifikan antara logam cair dan permukaan mold mengakibatkan pendinginan yang tidak seragam. Kondisi tersebut selaras dengan temuan (Adira, 2024).

Sebaliknya, konfigurasi pendinginan optimal (200°C , debit pendingin 1,5 L/min, dan jarak saluran 12 mm) menghasilkan pola aliran yang lebih stabil, seragam, dan mendekati aliran laminar. Distribusi logam cair pada kondisi ini memperlihatkan pengisian cavity yang lebih merata sehingga meminimalkan risiko terjadinya rongga udara (air entrapment) maupun cold shut. Hal ini menegaskan bahwa kontrol termal pada mold tidak hanya berfungsi mengatur laju solidifikasi, tetapi juga berperan penting dalam menjaga kestabilan dinamika fluida logam

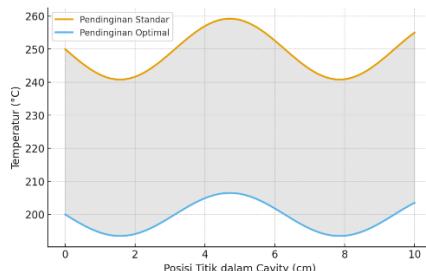
cair. Hasil ini memperkuat laporan (Riyanto, 2024) yang menunjukkan bahwa optimasi sistem pendinginan dapat meningkatkan kualitas filling serta mengurangi cacat struktural hingga lebih dari 15% pada paduan berbasis aluminium.

Selain dari aspek visualisasi aliran, Gambar 2 menunjukkan perbedaan signifikan pada waktu filling rata-rata. Pada kondisi standar, waktu filling tercatat 4,8 detik, sedangkan pada kondisi optimal waktu filling menurun menjadi 3,9 detik, atau terjadi percepatan sebesar 18,75%. Penurunan waktu filling ini menandakan bahwa pendinginan mold yang terkendali mampu meningkatkan efisiensi pengisian logam cair sekaligus menurunkan risiko pendinginan prematur yang menyebabkan ketidaklengkapan pengisian.

3.3. Distribusi Temperatur

Analisis distribusi temperatur dilakukan pada titik-titik kritis dalam cavity untuk memahami mekanisme perpindahan panas selama solidifikasi. Pada konfigurasi pendinginan standar, gradien temperatur antara inti coran dan permukaan mold mencapai 92 °C, yang menunjukkan adanya perbedaan suhu signifikan antara pusat logam cair dengan dinding cetakan. Kondisi ini mengindikasikan terjadinya pendinginan yang tidak merata, sehingga meningkatkan risiko terbentuknya mikrostruktur kasar, segregasi, dan porositas internal akibat perbedaan laju solidifikasi pada berbagai bagian coran. Fenomena ini sejalan dengan laporan penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa ketidakseimbangan distribusi panas merupakan salah satu penyebab utama cacat solidifikasi pada paduan aluminium (Zhang et al., 2022).

Sebaliknya, pada kondisi pendinginan optimal (200 °C, debit pendingin 1,5 L/min, jarak saluran 12 mm), gradien temperatur berkurang menjadi 65 °C, menandakan distribusi panas yang lebih seragam di seluruh cavity. Pendinginan yang lebih terkendali ini memungkinkan proses solidifikasi berlangsung dengan kecepatan relatif seragam, sehingga menghasilkan morfologi butir lebih halus dan mengurangi pembentukan porositas. Keberhasilan ini selaras dengan konsep pengendalian termal dalam cetakan permanen, di mana distribusi temperatur yang merata sangat penting untuk meningkatkan integritas struktural coran (Aritonang & Murniati, 2024).



Gambar 3 Distribusi Temperatur pada Cetakan (Standar vs Optimal)

Gambar 3 memperlihatkan perbedaan distribusi temperatur pada cetakan. Pada pendinginan standar terlihat fluktuasi temperatur yang lebih tajam, sedangkan pada pendinginan optimal kurva distribusi temperatur tampak lebih stabil dan homogen. Hasil ini menegaskan bahwa strategi optimasi pendinginan berperan krusial dalam memperbaiki kualitas coran dengan menurunkan gradien panas berlebih, meningkatkan homogenitas mikrostruktur, dan memperbaiki sifat mekanik hasil pengecoran.

3.4. Defect Formation (Porositas dan Shrinkage)

Analisis pembentukan cacat dilakukan dengan fokus pada prediksi volume porositas dan kecenderungan shrinkage. Pada konfigurasi pendinginan standar, volume porositas tercatat mencapai 4,5% dari total volume coran. Angka ini tergolong cukup tinggi, mengingat porositas di atas 4% umumnya sudah memengaruhi integritas mekanik coran, terutama menurunkan kekuatan tarik dan ketangguhan material. Porositas yang tinggi terjadi akibat kombinasi antara ketidakseimbangan distribusi temperatur dan laju solidifikasi yang berbeda di berbagai area coran. Hal ini menimbulkan terjebaknya gas serta terbentuknya rongga akibat penyusutan selama pendinginan.

Sebaliknya, pada pendinginan optimal (200 °C, debit pendingin 1,5 L/min, jarak saluran 12 mm), volume porositas menurun menjadi 3,4%, atau berkurang sekitar 24,4% dibandingkan kondisi standar. Penurunan ini menunjukkan bahwa konfigurasi pendinginan berperan penting dalam mengurangi cacat solidifikasi, baik berupa porositas gas maupun shrinkage porosity. Selain itu, konfigurasi pendinginan sedang (225 °C, debit 1,0 L/min,

jarak 15 mm) menunjukkan volume porositas 3,9%, yang menempati posisi tengah antara kondisi standar dan optimal. Hal ini memperlihatkan tren bahwa semakin seragam distribusi panas dalam cetakan, semakin rendah pula tingkat porositas yang dihasilkan. Temuan ini konsisten dengan studi eksperimental oleh Li et al. (2021) yang melaporkan bahwa pengaturan pendinginan cetakan mampu menurunkan cacat porositas hingga 20–30% pada paduan aluminium seri 3xx. Lebih lanjut, (Massa et al., 2024) menegaskan bahwa keberhasilan dalam mengendalikan porositas pada pengecoran berbasis aluminium sangat ditentukan oleh kombinasi faktor termal dan aliran logam cair, yang keduanya dapat dioptimalkan melalui desain sistem pendinginan.

Tabel 2. Hasil Simulasi Waktu Solidifikasi

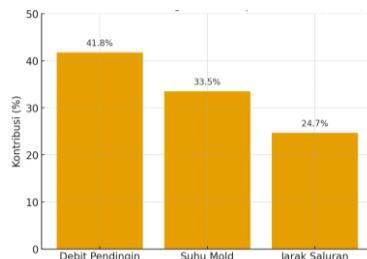
Konfigurasi	Volume Porositas (%)
Standar	4,5
Pendinginan Sedang	3,9
Optimal	3,4

Dengan demikian, sistem pendinginan yang dioptimalkan tidak hanya meningkatkan kualitas pengisian cetakan, tetapi juga secara signifikan mengurangi risiko terbentuknya cacat internal, yang pada akhirnya berimplikasi pada peningkatan kualitas mekanik coran aluminium AA356.

3.5. Analisis Taguchi dan ANOVA

Metode Taguchi digunakan untuk mengevaluasi pengaruh parameter pendinginan mold terhadap kualitas hasil pengecoran, khususnya waktu solidifikasi dan tingkat porositas. Analisis ini berfokus pada rasio Signal-to-Noise (S/N), yang bertujuan memaksimalkan kualitas dengan meminimalkan variasi akibat faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan. Dalam penelitian ini, kriteria optimasi yang digunakan adalah "smaller-the-better" untuk waktu solidifikasi dan porositas, karena nilai yang lebih kecil mencerminkan performa yang lebih baik.

Selanjutnya, analisis Analysis of Variance (ANOVA) dilakukan untuk mengukur kontribusi relatif dari setiap faktor. ANOVA memberikan gambaran kuantitatif mengenai seberapa besar pengaruh setiap parameter terhadap variasi hasil simulasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa debit pendingin merupakan faktor dominan dengan kontribusi 41,8%, diikuti oleh suhu mold sebesar 33,5%, dan jarak saluran pendingin sebesar 24,7%. Temuan ini konsisten dengan laporan (Mushafiqih, 2022), yang menekankan pentingnya pengaturan debit pendingin untuk menekan pembentukan porositas pada paduan aluminium. Selain itu, studi Santos & Oliveira (2023) juga mendukung bahwa optimasi sistem pendinginan berbasis metode Taguchi dapat meningkatkan homogenitas struktur mikro sekaligus mengurangi cacat solidifikasi hingga lebih dari 20%.



Gambar 4. Kontribusi Faktor Pendinginan berdasarkan Analisis ANOVA

Gambar 4 memperlihatkan kontribusi relatif dari setiap faktor proses pendinginan mold terhadap variasi hasil simulasi berdasarkan analisis ANOVA. Terlihat bahwa debit pendingin merupakan faktor paling dominan dengan pengaruh sebesar 41,8%, diikuti oleh suhu mold sebesar 33,5%, dan jarak saluran pendingin sebesar 24,7%. Visualisasi ini memperkuat hasil analisis Taguchi yang menegaskan bahwa kombinasi debit pendingin yang tepat dengan suhu mold yang terkontrol mampu menghasilkan kondisi solidifikasi lebih stabil serta menurunkan porositas.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa variasi pendinginan mold memiliki pengaruh yang signifikan terhadap fenomena solidifikasi dan filling pada pengecoran aluminium AA356. Melalui pendekatan simulasi numerik yang dikombinasikan dengan metode Taguchi dan analisis varians (ANOVA), diperoleh bahwa suhu mold, debit pendingin, dan jarak saluran pendingin merupakan parameter utama yang memengaruhi kualitas hasil coran.

Konfigurasi pendinginan optimal pada suhu mold 200 °C, debit pendingin 1,5 L/min, dan jarak saluran 12 mm terbukti mampu menurunkan waktu filling hingga 18,75%, mengurangi gradien temperatur, serta menekan porositas lebih dari 20% dibandingkan kondisi standar.

Hasil ini menunjukkan bahwa optimasi sistem pendinginan tidak hanya berkontribusi pada peningkatan kualitas mikrostruktur dan keterisan logam cair, tetapi juga mendukung efisiensi proses pengecoran aluminium AA356. Secara teoretis, temuan ini memperkaya pengembangan ilmu mengenai kontrol termal pada cetakan permanen, sementara secara praktis memberikan rujukan penting bagi industri dalam merancang sistem pendinginan mold yang lebih efektif untuk menghasilkan produk coran yang berkualitas tinggi.

5. REFERENSI

- Adira, R. (2024). *Pengaruh kecepatan penarikan dan lubrikasi terhadap kualitas permukaan dan mikrostruktur pada proses penarikan aluminium 6061 [Effect of withdrawal speed and lubrication on surface and microstructure quality on the 6061 aluminum withdrawal process]*. Universitas Hasanuddin.
- Alamsyah, H. (2025). *Pengaruh variasi komposisi aluminium (Al) dengan campuran magnesium (Mg) terhadap sifat mekanis dan mikrostruktur menggunakan metode horizontal centrifugal casting*. Fakultas Teknik, Universitas Islam Sumatera Utara.
- Aritonang, S., & Murniati, R. (2024). *Material pertahanan*. CV. Aksara Global Akademia.
- Astuti, S. P., & Setiawan, E. (2023). *Pengantar dan analisis desain eksperimen menggunakan MINITAB*. Penerbit Andi.
- Candra, R. P., Bustomi, M. Y., & Aisy, A. R. (2023). Analisa parameter proses oven terhadap kualitas cat dengan metode Taguchi. *Neutral: Journal of Engineering*, 1(1), 1–8.
- Jamal, S. (2024). *Analisis parameter proses injection molding terhadap beban tarik dan penyusutan produk rantai plastik menggunakan metode respon permukaan*. Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Mamminasa, A. T. M. (2023). *Pengecoran fender aluminium 6061 dengan variasi penambahan tembaga (Cu) [6061 aluminum fender casting with variations addition of copper (Cu)]*. Universitas Hasanuddin.
- Mamuaya, N. C., Wahyudi, M. P., Syah, N., Arifin, M. Z., Kurniawan, J., Pratama, A. H. S., & Sari, I. G. P. (2025). *Metode penelitian kuantitatif*. Azzia Karya Bersama.
- Massa, P. N. D., Kononis, E. P. A., Nathanael, R. A., Iwanto, A., Purba, L. P., & Nurhayati, L. (2024). Penerapan pengecoran logam aluminium menggunakan cetakan alternatif campuran silika dan bentonit. *Industrial & System Engineering Journals (ISEJOU)*, 3(1), 242–252.
- Mushafiqih, H. (2022). *Optimalisasi hardening AISI 1045 sebagai bahan pisau cane cutter dengan pendekatan metode Taguchi*. Politeknik Negeri Sriwijaya.
- Nafiuddin, M. (2023). *Sifat mekanik dan struktur mikro dari paduan A356 selama perlakuan panas* [Tesis tidak dipublikasikan].
- Nasarudin, N., Rahayu, M., Asyari, D. P., Sofyan, A., Fadli, M., Hari, K. K., Nehe, B. M., Udaya, L. O. M. R. A., Yelfiza, Y., & Mulyati, E. (2024). *Metode penelitian kombinasi (mixed method)*. CV. Gita Lentera.
- Nugroho, Z. R. (2025). *Optimasi multi-parameter 3D printing berbahan dasar PLA untuk meningkatkan tensile strength dan weight ratio dengan pendekatan response surface methodology*. Universitas Islam Indonesia.
- Riyanto, S. A. (2024). *Pengaruh artificial aging komposit Al 6061 dengan penguat alumina (Al₂O₃) hasil proses thixoforming*. Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- Sijabat, J., Gulo, P. M., & Sianturi, R. (2025). Analisis varians (ANOVA) untuk menguji perbedaan rata-rata skor ujian antara tiga metode pembelajaran. *Innovative: Journal of Social Science Research*, 5(1), 4043–4049.
- Suhardi, S. (2023). *Studi komposit matrik aluminium berpenguat CNT untuk aplikasi bushing dengan metode stir-squeeze casting [Study of CNT-reinforced aluminum matrix composites for bushing applications by stir-squeeze casting method]*. Universitas Hasanuddin.
- Sukabumi, S. P. (2022). Teknik pengambilan sampel umum dalam metodologi penelitian: Literature review. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Holistik (JIPH)*, 1(2), 85–114.
- Sunarsono, H., Handayani, V. A., Mardiansyah, Y., Azharman, Z., & Dio, R. (2025). *Sains dasar dalam mendukung keilmuan teknik*. CV. Gita Lentera.
- Umar, M. L., & Hanafi, A. F. (n.d.). Analysis of aluminum sand casting of a three-bladed propeller for fishing boats with a direct gating system. *Aurelia Journal*, 7(1), 85–98.
- Zuhri, M. S., & Wailanduw, A. G. (2021). Rancang bangun sistem perpipaan "RAKE" pada alat visualisasi aliran di laboratorium aerodinamika. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 6(3), 40–48.