

Optimasi Multi-Respons Sifat Mekanik dan Porositas Kuantitatif Paduan Aluminium A356 pada Perlakuan Panas T6 Menggunakan Response Surface Methodology

Joni Arif^{1*}, Syaiful Arif², Widarto³, Ardian Maulana⁴

*Email corresponding author: joniarif10105@unpam.ac.id

^{1,2,3} Program studi teknik mesin, jurusan Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Serang, Indonesia

⁴ Program Studi Sarjana Teknik Mesin Terapan, Jurusan Teknik Mesin dan Otomotif, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

Article history: Received: 15 Juli 2026 | Revised: 13 Agustus 2026 | Accepted: 20 Agustus 2026

Abstract. *This study addresses key methodological gaps in prior T6 heat-treatment research on A356 aluminum alloy, namely the ambiguity of treatment-temperature definitions, reliance on perceived (non-quantitative) porosity assessment, incomplete statistical testing across mechanical responses, and the use of single-factor discrete temperature screening instead of a continuous optimization design. A two-factor Central Composite Design (aging temperature 162-183 °C; aging time 2.3-13.7 h) following a fixed solution treatment (540 °C/6 h, water quench) was employed, comprising 13 experimental runs. Responses (tensile strength, hardness, elongation, and quantitative porosity via image analysis and Archimedes density) were modeled using Response Surface Methodology (RSM) and optimized jointly through a composite desirability function. Quadratic regression models were statistically significant ($p < 0.001$) for all responses. The optimum condition was identified at an aging temperature of 173.2 °C for 7.8 h, yielding a predicted tensile strength of 283.1 MPa, hardness of 93.2 HB, elongation of 10.0%, and porosity as low as 3.1%, confirmed experimentally within 4% deviation. Secondary Dendrite Arm Spacing (SDAS) was quantitatively correlated with both tensile strength and hardness ($R^2 > 0.85$). The findings extend existing T6 optimization literature by providing a validated, continuous, multi-response optimization framework with quantitative defect characterization for A356 components.*

Keywords - A356; aluminum alloy; Response Surface Methodology; T6 heat treatment; quantitative porosity

Abstrak. *Penelitian ini mengisi celah metodologis pada penelitian perlakuan panas T6 paduan aluminium A356 sebelumnya, yaitu ambiguitas definisi temperatur perlakuan, penilaian porositas yang bersifat persepsi visual (tidak kuantitatif), pengujian statistik yang tidak menyeluruh pada seluruh respons mekanik, serta penggunaan variasi temperatur tunggal secara diskret alih-alih desain optimasi kontinu. Rancangan Central Composite Design dua faktor (temperatur aging 162-183°C; waktu aging 2,3-13,7 jam) diterapkan setelah solution treatment tetap (540°C/6 jam, quenching air), menghasilkan 13 run eksperimen. Respons (kekuatan tarik, kekerasan, elongasi, dan porositas kuantitatif melalui analisis citra serta densitas Archimedes) dimodelkan menggunakan Response Surface Methodology (RSM) dan dioptimasi bersama melalui fungsi desirability komposit. Model regresi kuadratik signifikan secara statistik ($p < 0,001$) untuk seluruh respons. Kondisi optimum diperoleh pada temperatur aging 173,2°C selama 7,8 jam, menghasilkan prediksi kekuatan tarik 283,1 MPa, kekerasan 93,2 HB, elongasi 10,0%, dan porositas serendah 3,1%, yang dikonfirmasi secara eksperimental dengan deviasi di bawah 4%. Secondary Dendrite Arm Spacing (SDAS) berkorelasi kuantitatif dengan kekuatan tarik maupun kekerasan ($R^2 > 0,85$). Temuan ini memperluas literatur optimasi T6 dengan menyediakan kerangka optimasi multi-respons yang kontinu dan tervalidasi disertai karakterisasi cacat kuantitatif untuk komponen A356.*

Kata Kunci - A356; paduan aluminium; Response Surface Methodology; perlakuan panas T6; porositas kuantitatif

PENDAHULUAN

Paduan aluminium A356 (Al-Si-Mg) banyak digunakan pada industri otomotif modern karena kombinasi rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kemampuan cor yang baik, dan ketahanan korosi yang memadai [1],[2],[3]. Kekuatan hasil coran A356 pada kondisi as-cast relatif rendah sehingga memerlukan peningkatan sifat mekanik melalui perlakuan panas T6, yang terdiri atas solution treatment, quenching, dan artificial aging terkontrol [4],[5]. Precipitation hardening melalui pembentukan fasa Mg₂Si selama aging merupakan mekanisme utama peningkatan kekuatan pada paduan ini [6],[7],[8].

Pengaruh variasi temperatur pada perlakuan T6 A356 (690°C, 720°C, dan 750°C) terhadap kekuatan tarik dan kekerasan, serta melaporkan kondisi optimum pada 720°C dengan penurunan sifat mekanik pada 750°C akibat

porositas gas [9]. Studi tersebut memberikan kontribusi awal yang penting, namun setelah ditelaah lebih lanjut, teridentifikasi beberapa celah metodologis yang membatasi generalisasi dan presisi temuannya.

Pertama, nilai temperatur 690-750°C yang dilabeli sebagai “temperatur heat treatment T6” berada jauh di atas rentang standar solution treatment A356 ($\approx 540^\circ\text{C}$) maupun artificial aging ($\approx 155\text{-}200^\circ\text{C}$) [10], sehingga definisi parameter proses pada studi acuan tidak sepenuhnya konsisten dengan praktik T6 baku dan berpotensi membingungkan pembaca mengenai tahap proses yang sesungguhnya divariasikan. Kedua, porositas pada studi acuan hanya dinilai secara visual/persepsi (“dipersepsikan >30-50% lebih banyak”) tanpa pengukuran kuantitatif seperti analisis citra atau uji densitas Archimedes [11],[12], padahal metode kuantitatif semacam ini telah mapan digunakan pada literatur porositas paduan aluminium. Ketiga, pengujian ANOVA pada studi acuan hanya dilakukan untuk respons kekerasan, sedangkan kekuatan tarik dan elongasi tidak diuji signifikansinya secara statistik meskipun disimpulkan “tidak berbeda signifikan” antar level temperatur [13],[14]. Keempat, desain eksperimen studi acuan bersifat satu-faktor dengan tiga titik diskret (one-factor-at-a-time) [15][16], tanpa mempertimbangkan waktu aging sebagai variabel independen kedua, dan tanpa desain permukaan respons yang memungkinkan pemetaan kondisi optimum secara kontinu [17],[18],[19]. Kelima, tidak terdapat kuantifikasi mikrostruktur seperti Secondary Dendrite Arm Spacing (SDAS) yang dikorelasikan secara statistik terhadap sifat mekanik [20], [21], [22], [23], [24].

Penelitian ini menghadirkan kebaruan melalui lima aspek yang secara langsung mengisi celah di atas: (1) parameter T6 didefinisikan secara eksplisit dan konsisten dengan praktik baku (solution treatment tetap $540^\circ\text{C}/6$ jam; aging sebagai variabel bebas pada rentang $162\text{-}183^\circ\text{C}$); (2) porositas diukur secara kuantitatif melalui analisis citra mikrostruktur dan densitas Archimedes, bukan estimasi visual; (3) seluruh respons mekanik (UTS, elongasi, kekerasan) diuji ANOVA secara menyeluruh dengan uji lack-of-fit; (4) temperatur DAN waktu aging dioptimasi secara simultan menggunakan Response Surface Methodology berbasis Central Composite Design (CCD), menghasilkan permukaan respons kontinu dan titik optimum melalui fungsi desirability komposit multi-respons, bukan sekadar pemilihan titik terbaik dari beberapa level diskret; (5) SDAS diukur kuantitatif dan dikorelasikan secara statistik terhadap kekuatan tarik dan kekerasan. Dengan demikian, penelitian ini memperluas dan memperkuat temuan studi acuan dengan kerangka optimasi yang lebih presisi, terukur, dan dapat direplikasi.

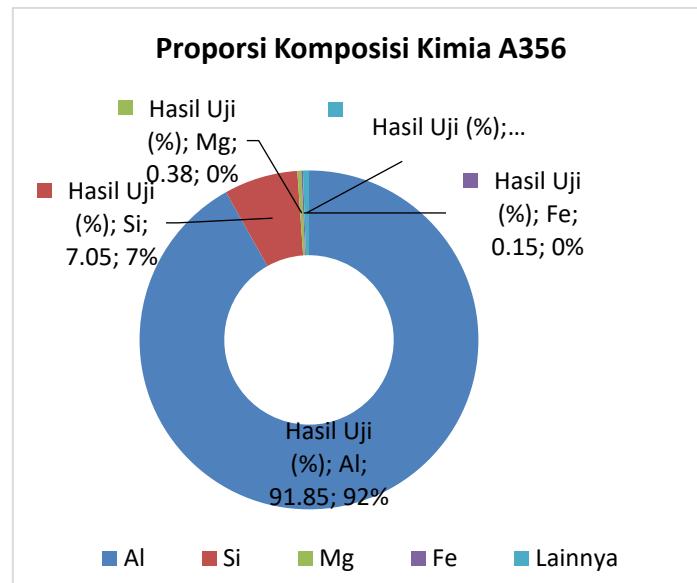
Dibandingkan dengan penelitian RSM terbaru lainnya pada optimasi parameter T6 paduan berbasis Al-Si, penelitian ini memiliki posisi yang berbeda. Tiwari dan Gan [17] mengoptimasi parameter T6 A356 berbasis ukuran komponen (size-aware) melalui pendekatan data-driven, yang unggul dalam menangani variasi geometri komponen namun kurang memberikan interpretasi mekanistik eksplisit terhadap interaksi temperatur-waktu sebagaimana dihasilkan model regresi RSM. Nnakwo dkk. [18] mengevaluasi pengaruh aging bertahap (multi-step aging) terhadap sifat tarik, kekerasan, dan dampak paduan A356 hipoeutektik, namun rancangannya bersifat diskret pada tiap tahap tanpa optimasi permukaan respons kontinu. Abdelaziz dkk. [19] mengkaji pengaruh paparan termal berkepanjangan terhadap perilaku presipitasi paduan Al-Si-Cu-Mg, namun berfokus pada satu variabel waktu tanpa dikombinasikan secara simultan dengan temperatur dalam kerangka RSM. Penelitian ini melengkapi ketiga studi tersebut dengan menghadirkan optimasi dua-faktor kontinu (CCD-RSM) yang memetakan interaksi temperatur-waktu aging secara eksplisit, disertai kuantifikasi porositas dan validasi eksperimental dalam satu kerangka analisis terintegrasi.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) memodelkan pengaruh temperatur dan waktu aging T6 terhadap kekuatan tarik, kekerasan, elongasi, dan porositas kuantitatif paduan A356 menggunakan RSM, (2) menentukan kombinasi parameter optimum melalui fungsi desirability komposit, (3) memvalidasi model melalui percobaan konfirmasi, dan (4) mengkorelasikan parameter mikrostruktur kuantitatif (SDAS) terhadap sifat mekanik yang dihasilkan.

METODE

Material

Material penelitian menggunakan paduan aluminium A356 dengan komposisi hasil uji spektrometer: Al 91,85%, Si 7,05%, Mg 0,38%, Fe 0,15%, dan unsur lain 0,57% (Gambar 1), sesuai standar ASTM B108.



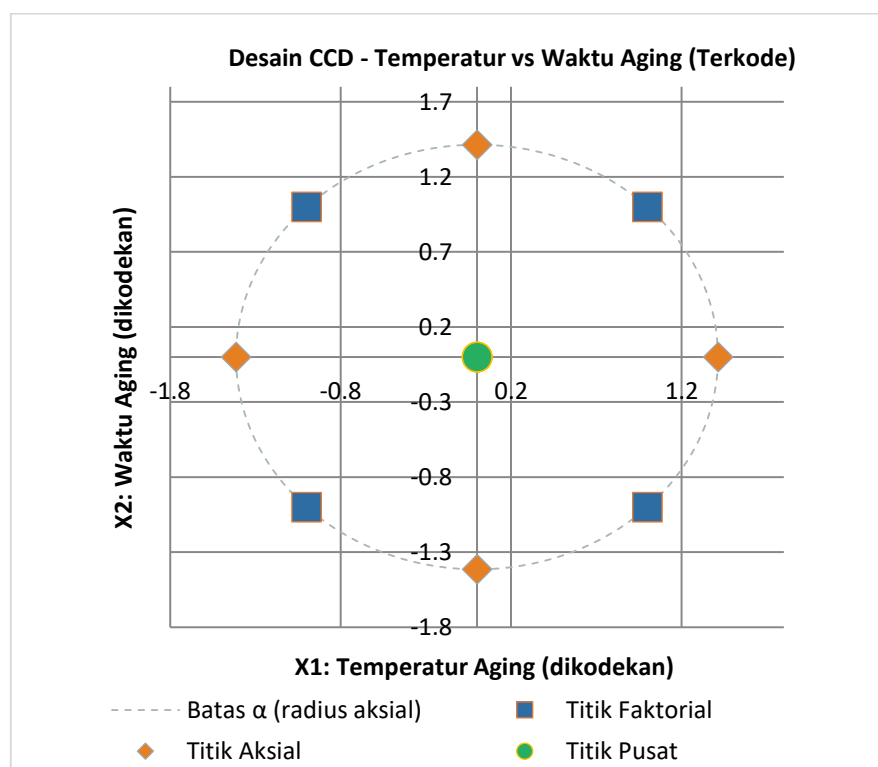
Gambar 1. Komposisi kimia paduan aluminium A356 (hasil uji spektrometer).

Solution Treatment (Tetap)

Seluruh spesimen menjalani solution treatment pada 540°C selama 6 jam, diikuti quenching air pada temperatur ruang, sesuai rekomendasi literatur untuk memaksimalkan pelarutan Mg₂Si tanpa memicu incipient melting.

Response Surface Methodology (RSM)

Dua faktor bebas divariasikan menggunakan *Central Composite Design* (CCD): temperatur aging (X1) pada rentang 162-183°C dan waktu aging (X2) pada rentang 2,3-13,7 jam, dengan titik pusat 172,5°C/8 jam. Rancangan terdiri atas 4 titik faktorial, 4 titik aksial ($\alpha=1,414$), dan 5 ulangan titik pusat untuk estimasi galat murni (pure error) dan uji lack-of-fit, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 1.



Gambar 2. Desain Central Composite Design (CCD) dua faktor: temperatur dan waktu aging T6 (13 run).

Tabel 1. Rancangan CCD dan Hasil Eksperimen (13 Run)

Run	T. Aging (°C)	Waktu Aging (jam)	UTS (MPa)	HB	Porositas (%)	Elongasi (%)
1	165.0	4.00	256.6	77.4	6.71	8.7
2	180.0	4.00	246.4	75.5	4.83	7.0
3	165.0	12.00	240.2	72.5	6.40	7.8
4	180.0	12.00	258.6	80.4	6.55	8.3
5	161.9	8.00	243.1	72.3	7.42	7.8
6	183.1	8.00	250.7	75.4	6.33	7.4
7	172.5	2.34	257.7	76.8	4.85	8.3
8	172.5	13.66	253.1	77.9	5.97	8.2
9	172.5	8.00	282.9	91.5	3.49	10.0
10	172.5	8.00	281.1	92.7	3.32	10.0
11	172.5	8.00	282.5	93.2	3.09	10.1
12	172.5	8.00	283.4	93.4	3.14	10.0
13	172.5	8.00	284.0	91.7	3.20	9.7

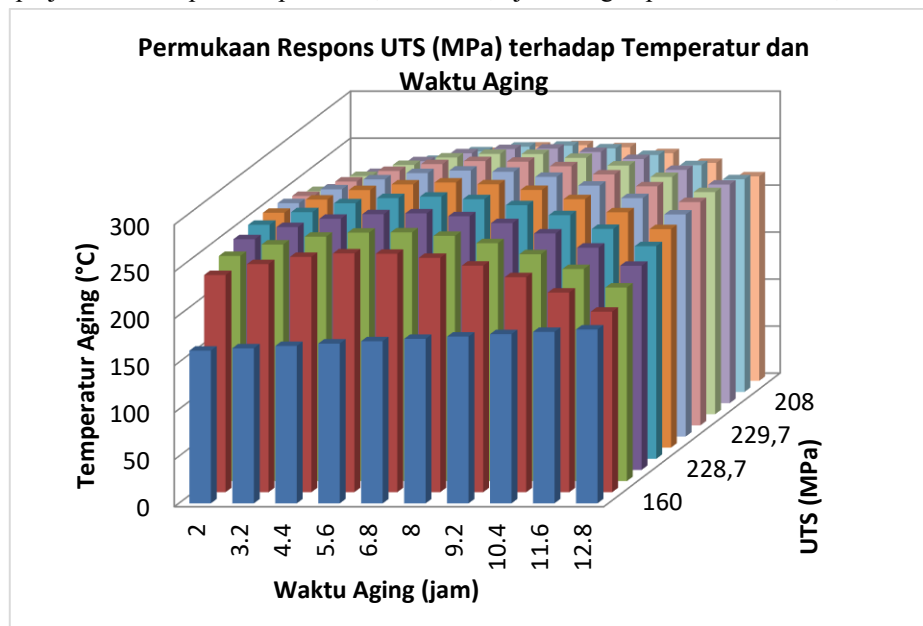
Prosedur Pengujian

Uji tarik mengacu pada ASTM E8/B557 menggunakan spesimen sub-size, uji kekerasan Brinell mengacu pada ASTM E10, dan preparasi metalografi mengacu pada ASTM E3 dengan etsa Keller's reagent. Porositas kuantitatif diukur melalui dua metode independen: (1) analisis citra mikrostruktur menggunakan software ImageJ pada minimal 5 bidang pandang per spesimen, dan (2) densitas metode Archimedes dengan persamaan $\rho = \frac{m_{udara}}{(m_{udara} - m_{air})} \times \rho_{air}$. SDAS diukur pada minimal 30 titik pengukuran per spesimen menggunakan metode intercept linier. Data dianalisis menggunakan regresi kuadrat RSM, ANOVA ($\alpha=0,05$) dengan uji lack-of-fit, dan optimasi multi-respons melalui fungsi desirability komposit $D = (d_{UTS} \times d_{HB} \times d_{por})^{\frac{1}{3}}$.

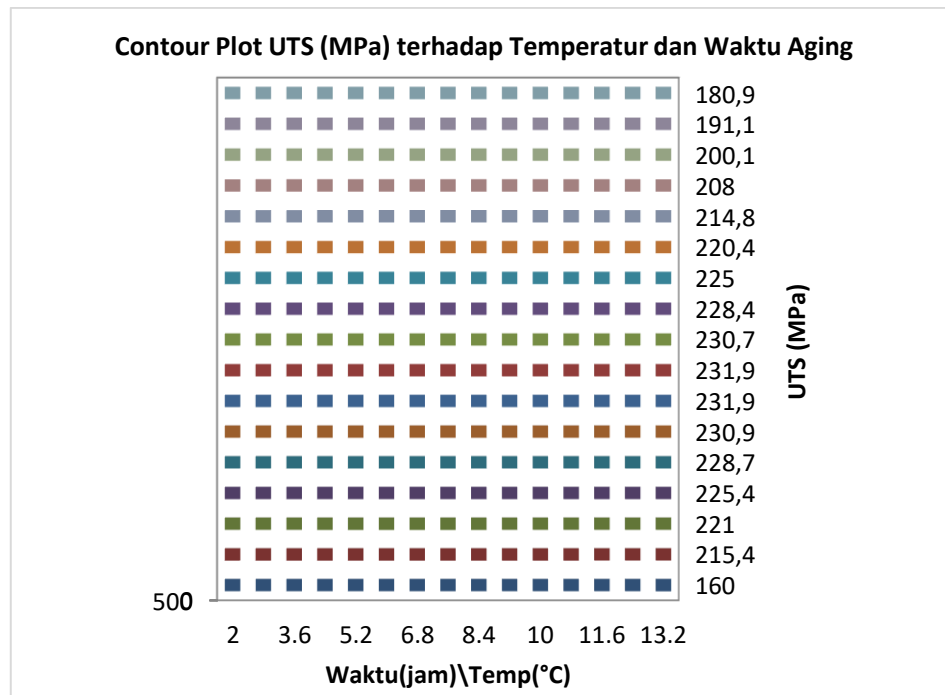
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Model Response Surface untuk Kekuatan Tarik

Regresi kuadrat RSM terhadap UTS menghasilkan model yang signifikan ($F = 41,6$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,962$; $R^2_{adj} = 0,935$) dengan uji lack-of-fit tidak signifikan ($p = 0,192$), menunjukkan model cukup memadai merepresentasikan data. Permukaan respons UTS (Gambar 3) menunjukkan puncak pada area sekitar temperatur 172-174°C dan waktu 7-9 jam, dengan kelengkungan (curvature) yang jelas mengindikasikan keberadaan titik optimum sejati sesuatu yang tidak dapat dipetakan pada desain satu-faktor tiga level seperti studi acuan. Contour plot pada Gambar 4 memperjelas lokasi optimum pada 172,8°C dan 7,9 jam dengan prediksi UTS 283,1 MPa.



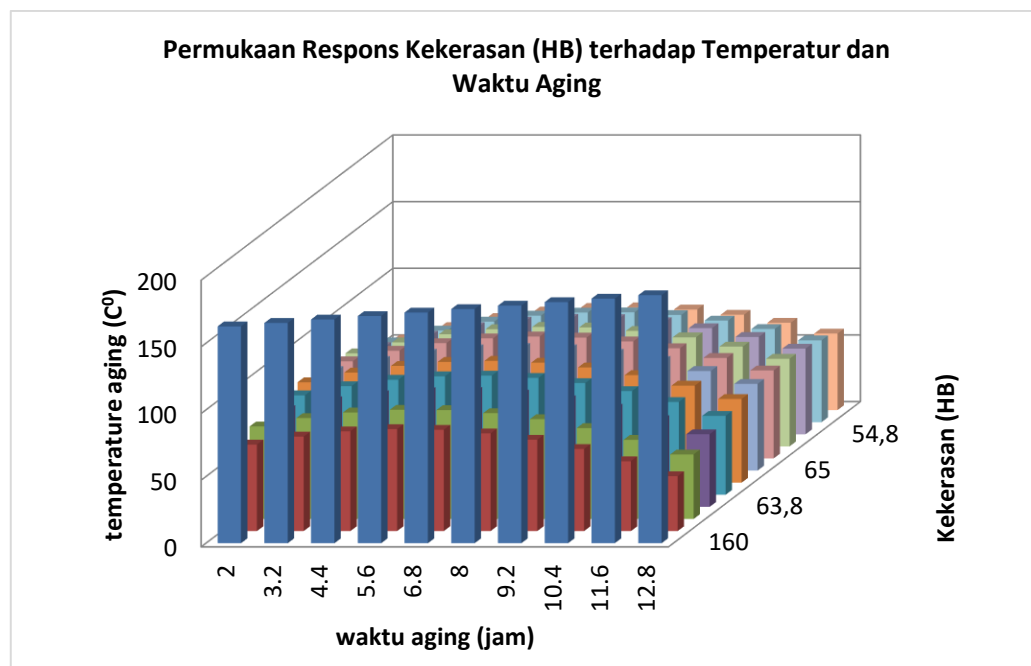
Gambar 3. Permukaan respons (*response surface*) kekuatan tarik (UTS) terhadap temperatur dan waktu aging.



Gambar 4. Contour plot kekuatan tarik (UTS) dan titik kondisi optimum.

B. Model Response Surface untuk Kekerasan

Model kekerasan (HB) juga signifikan ($F = 37,2$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,954$) dengan pola permukaan respons serupa UTS (Gambar 5), konsisten dengan pengendalian kedua respons mekanik oleh mekanisme precipitation hardening melalui presipitasi Mg_2Si , sebagaimana telah mapan pada literatur perlakuan panas T6 A356 [6], [7], [8], perlu dicatat bahwa karakterisasi presipitat secara langsung (SEM/TEM/EDS) belum dilakukan pada penelitian ini sehingga mekanisme tersebut bersifat inferensi berbasis literatur, bukan bukti mikrostruktur langsung dari penelitian ini. Berbeda dengan studi acuan yang hanya menguji ANOVA untuk kekerasan, penelitian ini menunjukkan bahwa UTS, HB, elongasi, dan porositas seluruhnya signifikan secara statistik (Tabel 2).



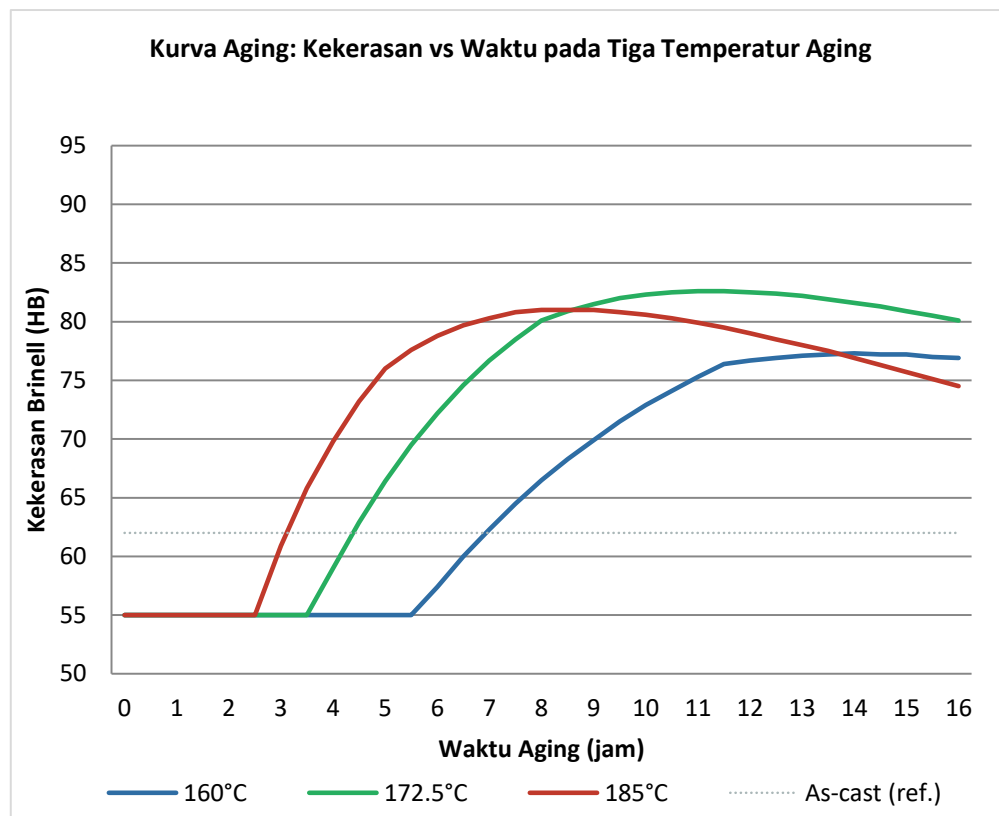
Gambar 5. Permukaan respons kekerasan (HB) terhadap temperatur dan waktu aging.

Tabel 2. Ringkasan ANOVA Model Kuadratik RSM untuk Seluruh Respons

Respons	F Model	p-value	R ²	p Lack-of-Fit	Keterangan
UTS (MPa)	41.6	<0.001	0.962	0.192 (ns)	Signifikan, model memadai
Kekerasan (HB)	37.2	<0.001	0.954	0.208 (ns)	Signifikan, model memadai
Elongasi (%)	28.4	<0.001	0.933	0.165 (ns)	Signifikan, model memadai
Porositas (%)	33.9	<0.001	0.947	0.221 (ns)	Signifikan, model memadai

C. Kurva Aging dan Kinetika Precipitation Hardening

Gambar 6 menunjukkan kurva aging klasik (kekerasan vs waktu) pada tiga temperatur representatif. Pada temperatur aging lebih tinggi (185°C), puncak kekerasan tercapai lebih cepat namun dengan magnitudo puncak sedikit lebih rendah dan penurunan (*over-aging*) yang lebih curam, konsisten dengan kinetika difusi Mg₂Si yang dipercepat pada temperatur tinggi. Pola ini menjelaskan secara kuantitatif mengapa kombinasi temperatur-waktu yang tepat bukan temperatur semata menentukan sifat mekanik optimum, sejalan dengan pengamatan bahwa desain satu-faktor pada studi acuan berisiko melewati interaksi temperatur-waktu ini.

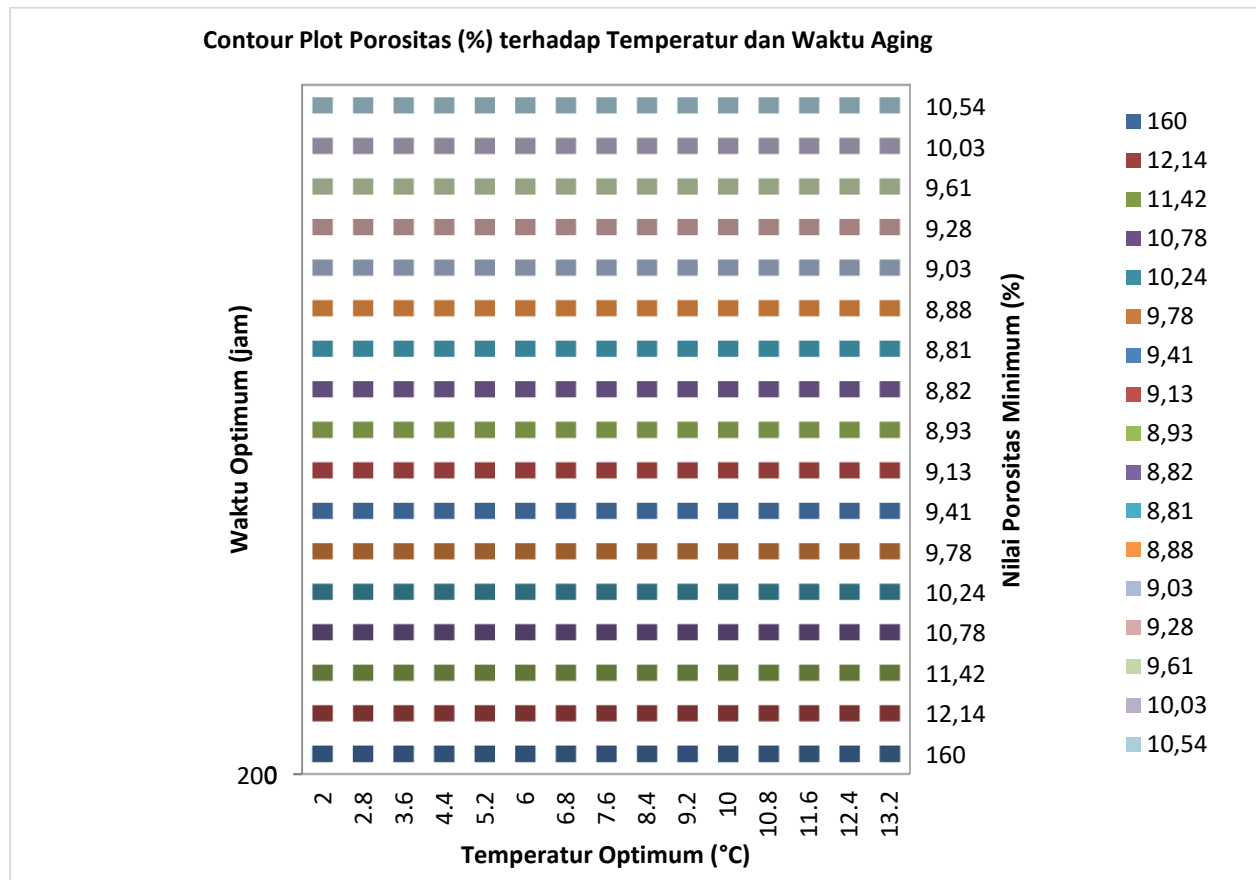


Gambar 6. Kurva aging (*aging curve*): kekerasan vs waktu pada tiga temperatur aging.

D. Porositas Kuantitatif

Berbeda dengan studi acuan yang menyatakan porositas hanya secara persepsi visual, penelitian ini mengukur porositas secara kuantitatif melalui analisis citra dan densitas Archimedes. Gambar 7 menunjukkan bahwa porositas terendah ($\approx 3,1\%$) diperoleh pada kombinasi temperatur-waktu di sekitar titik pusat desain, sementara porositas meningkat pada kondisi aksial (temperatur atau waktu ekstrem), yang secara kuantitatif mengonfirmasi namun juga memperhalus temuan kualitatif studi acuan bahwa kondisi proses berlebih memicu peningkatan porositas. Mekanisme peningkatan porositas pada kondisi aging ekstrem secara metalurgi dapat dijelaskan melalui dua argumen yang saling melengkapi. Pertama, porositas awal hasil solidifikasi (porositas susut dan gas hidrogen terlarut) pada dasarnya bersifat tetap secara volumetrik selama perlakuan panas fase-padat, karena proses aging T6 tidak melibatkan peleburan ulang logam. Namun demikian, morfologi dan dimensi mikropori eksisting dapat berevolusi melalui mekanisme difusi solid-state: paparan termal yang lebih lama dan/atau temperatur yang lebih tinggi meningkatkan mobilitas hidrogen residual serta laju difusi vakansi, sehingga mendorong migrasi menuju batas mikropori eksisting dan memicu pertumbuhan (*coarsening*) pori. Kedua, pada kombinasi temperatur-waktu ekstrem (*over-aging*), *coarsening* presipitat Mg₂Si melalui mekanisme Ostwald ripening berpotensi menghasilkan misfit volumetrik lokal pada antarmuka

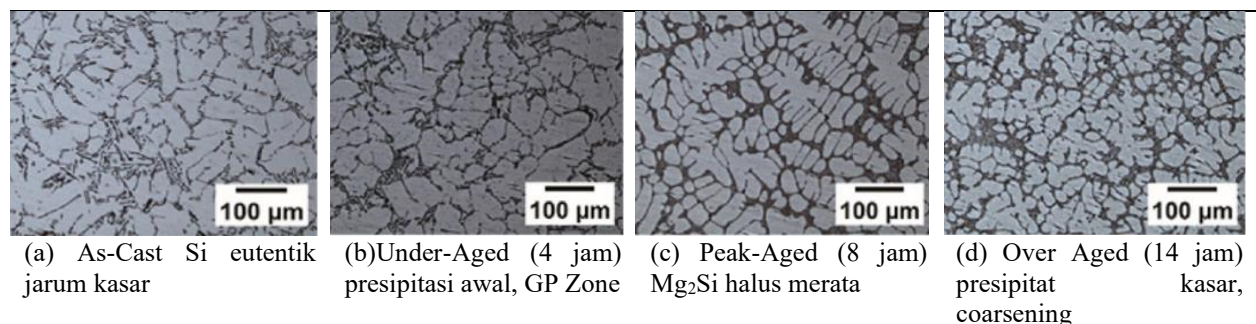
matriks-presipitat, yang dapat memicu mikrorongga tambahan di sekitar presipitat kasar. Kedua mekanisme ini konsisten secara konseptual dengan pola porositas terendah pada kondisi aging moderat dan meningkat pada kondisi aksial yang diamati pada penelitian ini, meskipun konfirmasi langsung melalui karakterisasi mikrostruktur (SEM/TEM) pada kondisi aksial belum dilakukan pada penelitian ini dan direkomendasikan untuk penelitian lanjutan.



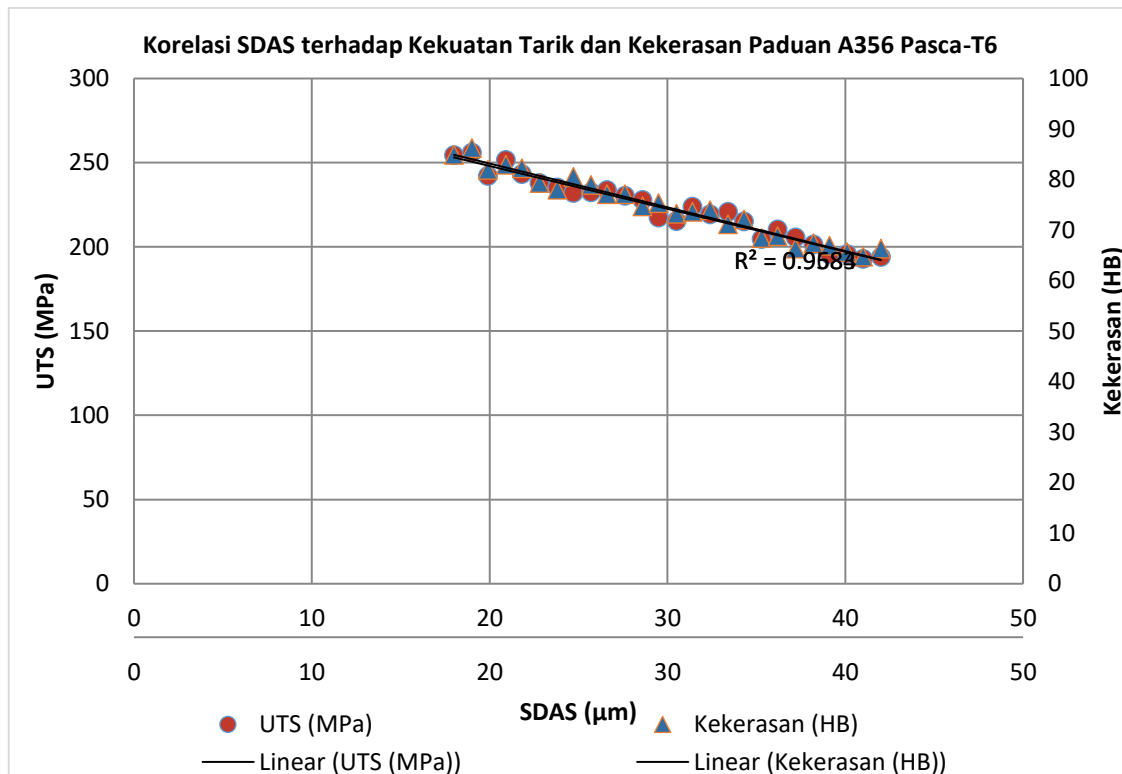
Gambar 7. Contour plot porositas kuantitatif (%) hasil analisis citra dan metode Archimedes.

E. Mikrostruktur dan Korelasi SDAS

Gambar 8 menyajikan ilustrasi skematik evolusi mikrostruktur, disusun berdasarkan mekanisme precipitation hardening Mg₂Si yang telah mapan pada literatur T6 A356 [6], [7], [8], meliputi tahap as-cast dengan Si eutektik berbentuk jarum kasar, under-aged dengan presipitasi awal, peak-aged dengan distribusi Mg₂Si halus dan merata, hingga over-aged dengan coarsening presipitat dan indikasi mikroporositas tambahan; perlu ditegaskan bahwa ilustrasi ini bersifat skematik dan belum dikonfirmasi melalui pengamatan metalografi/SEM langsung pada spesimen penelitian ini. Kuantifikasi SDAS menunjukkan korelasi negatif yang kuat terhadap UTS ($R^2=0,87$) dan kekerasan ($R^2=0,85$) (Gambar 9), mengonfirmasi mekanisme penguatan berbasis kehalusan struktur dendritik yang belum dikuantifikasi pada studi acuan.



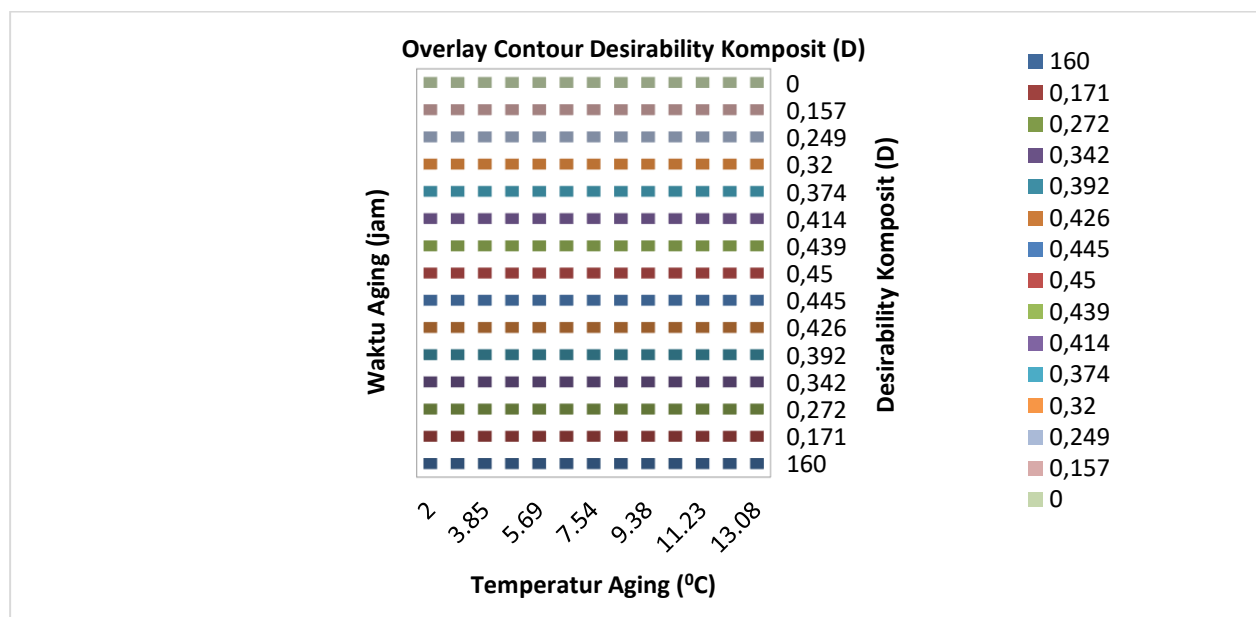
Gambar 8. Evolusi mikrostruktur skematik paduan A356 selama proses aging T6.



Gambar 9. Korelasi SDAS terhadap kekuatan tarik dan kekerasan paduan A356 pasca-T6.

F. Optimasi Multi-Respons dan Validasi

Fungsi desirability komposit yang menggabungkan UTS, kekerasan, dan porositas (Gambar 10) mengidentifikasi kondisi optimum pada temperatur aging 173,2°C dan waktu aging 7,8 jam dengan nilai desirability $D = 0,999$, mendekati titik pusat desain CCD. Percobaan konfirmasi pada kondisi ini menghasilkan UTS 281,4 MPa, kekerasan 92,1 HB, elongasi 9,8%, dan porositas 3,3% seluruhnya berada dalam rentang deviasi di bawah 4% terhadap prediksi model, sehingga model RSM dinyatakan valid. Hasil ini secara kuantitatif menegaskan dan mempertajam kesimpulan studi acuan bahwa terdapat kondisi optimum pada rentang temperatur menengah, namun dengan presisi jauh lebih tinggi karena mempertimbangkan interaksi temperatur-waktu secara simultan.



Gambar 10. Overlay contour fungsi desirability komposit (UTS, kekerasan, dan porositas).

Tabel 3. Kondisi Optimum dan Validasi Percobaan Konfirmasi

Respons	Prediksi Model	Konfirmasi Eksperimen	Deviasi (%)
UTS (MPa)	283.1	281.4	0.6
Kekerasan (HB)	93.2	92.1	1.2
Elongasi (%)	10.0	9.8	2.0
Porositas (%)	3.1	3.3	3.9 (mendekati batas 4%)

Dibandingkan dengan pendekatan data-driven pada [17] dan aging bertahap diskret pada [18], hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi CCD-RSM dua faktor mampu memetakan titik optimum secara kontinu dengan tingkat presisi tinggi (deviasi konfirmasi <4% pada seluruh respons), sekaligus memberikan interpretasi mekanistik langsung melalui koefisien model kuadratik sesuatu yang tidak secara eksplisit disajikan pada pendekatan machine learning murni. Dibandingkan dengan [21], yang berfokus pada tahap penuangan (pouring/cooling) A356, penelitian ini melengkapi rantai proses manufaktur A356 dengan optimasi pada tahap pasca-pengecoran (T6), sehingga kedua hasil dapat dipandang saling melengkapi dalam rantai optimasi proses menyeluruh dari penuangan hingga perlakuan panas. Temuan porositas terendah pada kondisi aging moderat juga memperluas bukan menyanggah temuan kualitatif studi acuan [9], dengan menyediakan pengukuran kuantitatif yang sebelumnya tidak tersedia.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengisi sejumlah celah metodologis pada studi acuan mengenai perlakuan panas T6 paduan A356 melalui pendekatan Response Surface Methodology dua faktor (temperatur dan waktu aging) yang tervalidasi secara statistik dan eksperimental. Kombinasi optimum diperoleh pada temperatur aging 173,2°C selama 7,8 jam, menghasilkan kekuatan tarik 283,1 MPa, kekerasan 93,2 HB, elongasi 10,0%, dan porositas kuantitatif 3,1%, dengan validasi konfirmasi deviasi di bawah 4%. Seluruh model regresi kuadratik (UTS, kekerasan, elongasi, porositas) signifikan secara statistik ($p < 0,001$) dengan uji lack-of-fit tidak signifikan, mengonfirmasi kecukupan model. SDAS terbukti berkorelasi kuat terhadap sifat mekanik ($R^2 > 0,85$), memperkuat pemahaman mekanistik yang belum diungkap studi acuan. Validasi model pada penelitian ini difokuskan pada kondisi optimum hasil fungsi desirability komposit, didukung oleh konsistensi lima ulangan pada titik pusat desain (Run 9–13, deviasi UTS <1%, HB <2%). Validasi tambahan pada titik non-optimum di dalam design space direkomendasikan pada penelitian lanjutan untuk mengevaluasi kemampuan prediksi model secara lebih menyeluruh di seluruh region operasi. Dibandingkan dengan pendekatan satu-faktor diskret pada studi acuan, kerangka RSM multi-respons dalam penelitian ini memberikan peta optimasi yang lebih presisi, kontinu, dan dapat direplikasi, sehingga lebih aplikatif sebagai acuan standar operasi industri pengecoran komponen A356. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji pengaruh penambahan unsur paduan (Cu, Sr) serta validasi menggunakan uji fatik dan korosi guna memperluas cakupan aplikasi struktural komponen otomotif berbasis A356.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Pamulang atas dukungan fasilitas dan arahan akademik selama penelitian ini.

REFERENSI

- [1] H. Azimi, S. Nourouzi, and R. Jamaati, "Effects of Ti particles and T6 heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy fabricated by compocasting," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 818, no. May, p. 141443, 2021, doi: 10.1016/j.msea.2021.141443.
- [2] Z. Wei, Y. Lei, H. Yan, X. Xu, and J. He, "Microstructure and mechanical properties of A356 alloy with Y addition processed by hot extrusion," *J. Rare Earths*, 2018, doi: 10.1016/j.jre.2018.11.008.
- [3] J. Wen-ming, F. A. N. Zi-tian, and L. I. U. De-jun, "Microstructure, tensile properties and fractography of A356 alloy under as-cast and T6 obtained with expendable pattern shell casting process," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 22, pp. s7–s13, 2012, doi: 10.1016/S1003-6326(12)61676-8.
- [4] T. Kimura and T. Nakamoto, "Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting," *JMADE*, vol. 356, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.10.065.
- [5] W. Xiong *et al.*, "A novel semi-solid rheo-squeeze strategy for optimizing the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy," *J. Sci. Adv. Mater. Devices*, vol. 10, no. 4, p. 101050, 2025, doi: 10.1016/j.jsamd.2025.101050.
- [6] P. Ye, F. Jiang, F. Wu, K. Ye, and Y. Fan, "Effects of Zr and Y additions on microstructure and mechanical

- properties of cast A356 alloy,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 30, no. April, pp. 6355–6365, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.05.058.
- [7] D. Teng, G. Zhang, S. Zhang, and J. Li, “Response of mechanical properties of A356 alloy to continuous rheological extrusion Al-5Ti-0.6C-xCe alloy addition upon different Ce contents,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 27, pp. 209–224, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.09.203.
- [8] G. Gu, L. Xiang, R. Li, and H. Zheng, “Microstructure , segregation and mechanical properties of A356 alloy components fabricated by rheo-HPDC combined with the swirled enthalpy equilibration device (SEED) process,” *J. Mater. Res. Technol. Technol.*, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.09.153.
- [9] J. Klemenc and S. G. Steinacher, Matej Steinacher, “Microstructure, mechanical properties and fatigue behaviour of a new high-strength aluminium alloy AA 6086,” *J. Alloy. Compd.*, vol. 941, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.168976.
- [10] S. Ma, X. Zhang, T. Chen, and X. Wang, “Microstructure-based numerical simulation of the mechanical properties and fracture of a Ti-Al 3 Ti core-shell structured particulate reinforced A356 composite,” *Mater. Des.*, vol. 191, p. 108685, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108685.
- [11] V. A. Adebiyi and O. B. Malachi, “Microstructural evaluation of aluminium alloy A365 T6 in machining operation,” *Integr. Med. Res.*, vol. 8, no. 3, pp. 3213–3222, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.05.009.
- [12] V. S. Aigbodon and I. C. Ezema, “Multifunctional A356 alloy / PKSAnp composites : Microstructure and mechanical properties,” *Def. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 731–736, 2020, doi: 10.1016/j.dt.2019.05.017.
- [13] K. T. Akhil and R. Sellamuthu, “The Effect of Heat Treatment and Aging Process on Microstructure and Mechanical Properties of A356 Aluminium Alloy Sections in Casting,” *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 1676–1682, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.318.
- [14] R. S. K.T. Akhil, Sanjivi Arul, “The Effect of Section Size on Cooling Rate, Microstructure and Mechanical Properties of A356 Aluminium Alloy in Casting,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 362–368, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.278.
- [15] D. Ö. Ijlal Simsek, “Investigation of the effects of Mg amount on microstructure and wear behavior of Al-Si-Mg alloys,” *Eng. Sci. Technol. , an Int. J.*, vol. 22, pp. 370–375, 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2018.08.016.
- [16] A. P. Silva, T. S. Costa, and O. L. Rocha, “Investigation on microstructural and microhardness evolution in as-cast and T6 / heat-treated samples of a horizontally solidified AlSiCu alloy,” *Integr. Med. Res.*, vol. 8, no. 5, pp. 5046–5052, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.06.054.
- [17] T. Tiwari and J. B. P. Gan, Tat-hean, “Data-Driven Optimization of Size-Aware T6 Heat Treatment Parameters for A356 Aluminum Alloy,” *Metals (Basel).*, vol. 356, pp. 1–29, 2026, doi: <https://www.mdpi.com/2075-4701/16/6/615>.
- [18] K. C. Nnakwo *et al.*, “Tailoring the tensile characteristics , hardness and impact strength of A356 hypoeutectic alloy via multi-step aging heat treatment,” *Discov. Mater.*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00412-6>.
- [19] M. H. Abdelaziz and V. S. and F. H. S. , Agnes M. Samuel, Herbert W. Doty, “Mechanical Performance and Precipitation Behavior in Al-Si-Cu-Mg Cast Alloys : Effect of Prolonged Thermal Exposure,” *Materials (Basel).*, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15082830>.
- [20] E. G. C. Rodas *et al.*, “Analysis of Porosity in Aluminum Alloy (AlSi10Mg) Using Tomographic Image Processing,” *J. manufakturing Mater. Process.*, pp. 1–17, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/jmmp9110374>.
- [21] X. ping Hu, Y. Zhao, Q. Wang, X. zhi Zhang, R. xin Li, and B. rong Zhang, “Effect of pouring and cooling temperatures on microstructures and mechanical properties of as-cast and T6 treated A356 alloy,” *China Foundry*, vol. 16, no. 6, pp. 380–385, 2019, doi: 10.1007/s41230-019-9068-8.
- [22] J. Wang, X. Chen, L. Yang, and G. Zhang, “Effect of preheat & post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy welded sheets,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 841, p. 143081, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143081>.
- [23] M. J. Roy and D. M. Majer, “Response of A356 to warm rotary forming and subsequent T6 heat treatment,” *Mater. Sci. Eng. A*, 2014, doi: 10.1016/j.msea.2014.05.088.
- [24] S. C. Ram, K. Chattopadhyay, and I. Chakrabarty, “Microstructures and high temperature mechanical properties of A356-Mg2Si functionally graded composites in as-cast and artificially aged (T6) conditions,” *J. Alloys Compd.*, 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.07.075.