

PENGARUH VARIASI SUHU PADA PERLAKUAN ARTIFICIAL AGING TERHADAP SIFAT KEKERASAN DAN KEKUATAN TEKAN CLOSED-CELL AL/CA FOAM

Dewi Puspitasari^{*)}, Andita Nataria Fitri Ganda, Wildan Mufti Wirdana, Muhammad Mukhid Almudakir

Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya

^{*)}Corresponding author: dewipuspitasari@unesa.ac.id

ABSTRACT

Aluminum foam is a porous material that is increasingly used in lightweight structural and energy-absorbing applications due to its high stiffness-to-weight ratio and excellent impact absorption capability. Nevertheless, its mechanical performance is highly dependent on post-processing thermal treatments, particularly the artificial aging process. This study evaluates the effect of artificial aging temperature variation on aluminum foam's hardness and compressive strength based on an Al/Ca alloy. The aluminum foam samples were commercially obtained and manufactured using a gas-induced casting process with TiH_2 as a blowing agent to produce a closed-pore structure. Aging treatments were conducted at three different temperatures—165°C, 208°C, and 250°C—for 6 hours each, following solution heat treatment and water quenching. Vickers hardness and compressive strength tests showed that aging at 165°C resulted in the most significant improvement, with hardness reaching 58.4 HV and compressive strength of 2.39 MPa. In contrast, higher aging temperatures (208°C and 250°C) led to a decline in mechanical properties due to overaging phenomena. Microstructural analysis supported these findings, showing fine and uniformly distributed precipitates at 165°C, whereas coarsened precipitates were observed at higher temperatures. Therefore, 165°C is recommended as the optimal aging condition to enhance the mechanical performance of aluminum foam for lightweight structural and energy-absorbing applications.

Keywords: Aluminum foam, Artificial aging, Hardness, Compressive strength, Microstructure

ABSTRAK

Aluminium foam merupakan material berpori yang semakin banyak digunakan dalam aplikasi struktural ringan dan penyerap energi karena memiliki rasio kekakuan terhadap berat yang tinggi serta kemampuan serap benturan yang baik. Meskipun demikian, performa mekanik Aluminium foam sangat bergantung pada perlakuan termal pasca-produksi, khususnya proses artificial aging. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi suhu perlakuan artificial aging terhadap sifat kekerasan dan kekuatan tekan busa aluminium berbasis paduan Al/Ca. Sampel busa aluminium diperoleh secara komersial dan diproses melalui gas-induced casting menggunakan agen pembusa TiH_2 untuk menghasilkan struktur pori tertutup. Perlakuan aging dilakukan pada tiga suhu berbeda, yaitu 165°C, 208°C, dan 250°C, masing-masing selama 6 jam setelah proses solution heat treatment dan quenching. Hasil uji kekerasan Vickers dan uji tekan menunjukkan bahwa suhu 165°C menghasilkan peningkatan paling signifikan, dengan kekerasan sebesar 58,4 HV dan kekuatan tekan 2,39 MPa. Sebaliknya, peningkatan suhu aging hingga 208°C dan 250°C menyebabkan penurunan sifat mekanik akibat fenomena overaging. Analisis struktur mikro

mendukung hasil tersebut, di mana presipitat halus dan merata terlihat pada suhu 165°C, sedangkan pertumbuhan presipitat berlebih diamati pada suhu yang lebih tinggi. Dengan demikian, suhu aging 165°C direkomendasikan sebagai kondisi optimal untuk meningkatkan performa mekanik busa aluminium pada aplikasi struktural ringan dan penyerap energi.

Kata Kunci: Aluminium foam, Artificial aging, Kekerasan, Kekuatan tekan, Struktur mikro

PENDAHULUAN

Aluminium foam merupakan material berpori ringan dengan struktur seluler khas yang menawarkan keunggulan berupa rasio kekakuan terhadap berat yang tinggi, kemampuan serap energi, serta insulasi termal dan akustik. Dibandingkan aluminium padat, material ini lebih efisien untuk aplikasi struktural ringan tanpa mengorbankan stabilitas mekanik [1]. Aluminium foam kini semakin banyak digunakan karena memiliki sifat mekanik yang menguntungkan, terutama bobot yang ringan dan kemampuan menyerap energi yang tinggi. Hal ini menjadikannya sebagai pilihan menarik untuk berbagai kebutuhan rekayasa, seperti di industri otomotif, dirgantara, dan konstruksi [2], [3]. Struktur seluler dari aluminium foam membantu meningkatkan kekuatan mekanik sekaligus memberikan manfaat tambahan sebagai isolator panas dan suara yang efektif [4], [5]. Kombinasi sifat-sifat ini (seperti rasio kekakuan terhadap berat yang tinggi dan kemampuan menyerap energi saat terjadi benturan) membuat aluminium foam sering digunakan sebagai peredam tumbukan dalam kendaraan, serta sebagai panel insulasi ringan pada bangunan [4], [6].

Kinerja aluminium foam sangat dipengaruhi oleh sifat mekaniknya, seperti kekerasan dan kekuatan tekan. Kedua sifat ini penting untuk menentukan seberapa besar ketahanan material terhadap beban statis maupun dinamis yang biasa terjadi dalam berbagai kondisi operasional [7], [8]. Para peneliti menyatakan bahwa peningkatan sifat mekanik memerlukan pendekatan yang terarah, mengingat sifat aluminium foam yang kompleks dan tidak seragam [9], [10]. Optimalisasi sifat seperti modulus Young dan tegangan plateau dapat dipengaruhi secara signifikan oleh beberapa faktor, termasuk tingkat porositas, bentuk pori, dan parameter proses pembuatannya [10], [11]. Sebagai contoh, pengendalian ukuran dan sebaran pori menjadi hal yang krusial (karena pori yang terlalu kecil bisa membuat kemampuan serap benturan menjadi tidak optimal), sedangkan pori yang terlalu besar dapat melemahkan kekuatan struktur secara keseluruhan [12], [13].

Namun, karena struktur foam bersifat kompleks dan tidak homogen, upaya peningkatan sifat mekanik memerlukan pendekatan yang sistematis dan terukur. Salah satu pendekatan yang efektif dalam peningkatan sifat mekanik material logam, termasuk aluminium foam, adalah melalui proses perlakuan panas atau heat treatment. Proses perlakuan panas, terutama *artificial aging* merupakan pendekatan yang sangat penting dan efektif dalam meningkatkan sifat mekanik busa aluminium [11]. Dalam konteks aluminium foam, artificial aging dilakukan untuk mengoptimalkan mikrostruktur melalui pengendalian suhu dan waktu, yang berpengaruh langsung terhadap distribusi dan morfologi presipitat penguat dalam matriks logam [11]. Penelitian Zhao et al. menunjukkan bahwa suhu aging yang tepat, seperti 175 °C, menghasilkan presipitat Al₂Cu yang berperan sebagai fase penguat utama dalam paduan Al-Cu-Ca, sedangkan suhu yang lebih rendah menghasilkan presipitat yang belum berkembang secara optimal [14].

Dengan mempertimbangkan interaksi kompleks yang dikaitkan dengan suhu aging, studi eksperimental yang meneliti pengaruh variasi suhu aging terhadap sifat mekanik aluminium foam sangat dibutuhkan. Penelitian yang dilakukan oleh Hangai dan kolega menunjukkan bahwa periode dan suhu aging yang tepat sangat penting dalam memaksimalkan kekuatan dan kekerasan material [15]. Selain suhu, laju pemanasan juga dapat memainkan peran penting, seperti yang diungkapkan oleh Neu dan rekan-rekan. Mereka menunjukkan bahwa perlakuan laju pemanasan yang lambat dapat meningkatkan kekuatan mekanik melalui pengendapan fasa [16].

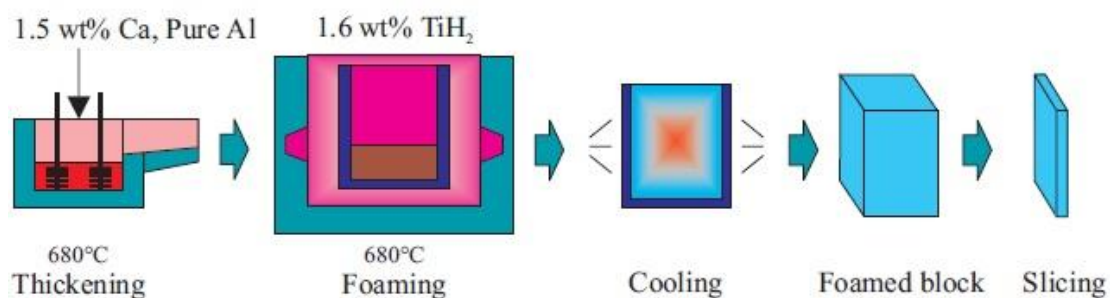
Temperatur aging yang optimal memainkan peranan penting dalam efektivitas perlakuan ini. Adanya variasi suhu dapat menggulirkan perbedaan signifikan dalam pengembangan dan distribusi presipitat, yang pada gilirannya berdampak pada peningkatan kekerasan dan kekuatan mekanik. Selain itu, suhu yang terlalu tinggi berisiko menyebabkan proses overaging, yang dapat memperbesar ukuran presipitat sehingga mengurangi efektivitas penguatan [14]. Oleh karena itu, studi eksperimental lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi dampak variasi suhu aging buatan terhadap sifat mekanik spesifik dari busa aluminium. Di sisi lain, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan fenomena overaging, di mana presipitat mengalami pertumbuhan berlebihan yang mengakibatkan kehilangan kemampuan penguatnya. Xu et al. menjelaskan bahwa ketika suhu penuaan buatan mencapai 200°C, penurunan kekerasan material mulai terlihat, menandakan terjadinya pelunakan [17]. Penelitian oleh Zhao et al. menunjukkan bahwa variasi suhu dalam proses aging dapat menghasilkan gradien kekuatan pada aluminium foam, yang berimplikasi untuk aplikasi teknik [14].

Oleh karena itu, diperlukan studi eksperimental untuk mengevaluasi secara sistematis pengaruh variasi suhu artificial aging terhadap sifat mekanik aluminium foam. Dengan memahami respon material terhadap suhu aging yang berbeda, proses optimasi dapat dilakukan untuk mencapai kombinasi kekerasan dan kekuatan tekan yang ideal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kuantitatif pengaruh variasi suhu artificial aging terhadap kekerasan dan kekuatan tekan aluminium foam. Studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode pemrosesan termal yang lebih efektif untuk busa logam, serta memperluas pemahaman mengenai hubungan antara parameter perlakuan panas dan performa mekanik material berpori. Hasil dari penelitian ini akan berguna sebagai dasar pertimbangan dalam aplikasi struktural yang membutuhkan kombinasi antara ringan dan kuat, khususnya pada desain produk yang mengutamakan efisiensi energi dan keselamatan struktural.

METODE

1. Bahan dan Persiapan Sampel

Aluminium foam yang digunakan dalam penelitian ini adalah produk komersial dari Bao-tong (Shandong) Import and Export Co. Ltd. Proses pembuatannya menggunakan metode *gas-induced casting*, yaitu dengan mencampurkan zat pembentuk gas (TiH_2) ke dalam aluminium cair untuk menghasilkan busa dengan pori-pori tertutup dijelaskan pada Gambar 1. Bahan busa yang digunakan merupakan campuran aluminium dan kalsium (Al/Ca), dengan komposisi 65,40% aluminium, 18,70% kalsium, 3,44% titanium, dan 2,29% seng. Komposisi ini tergolong standar dan cukup baik dari segi kekuatan dan kemudahan proses pengecoran, sehingga cocok digunakan dalam struktur dan aplikasi penyerap energi.

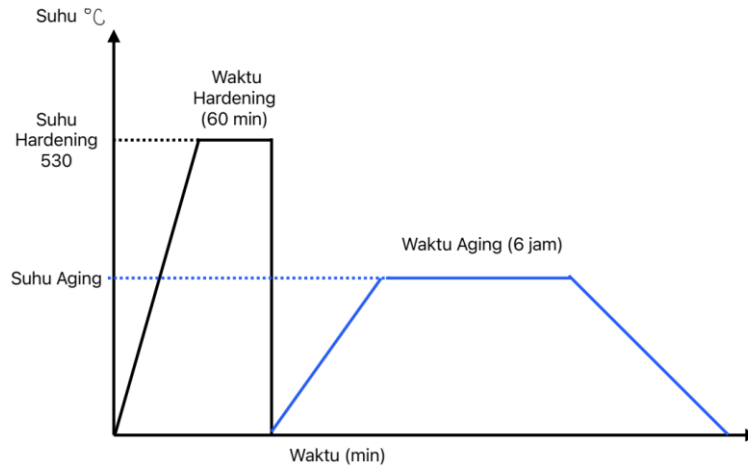


Gambar 1. Proses produksi Aluminium foam [18]

Sampel dipotong menjadi ukuran standar uji sesuai ASTM E9 untuk uji tekan dan ASTM E384 untuk uji kekerasan mikro-Vickers. Seluruh sampel kemudian diberi perlakuan *solution heat treatment* awal pada suhu 530°C selama 60 menit dan didinginkan cepat dengan media air (quenching).

2. Prosedur Perlakuan Artificial Aging

Sampel yang telah menjalani quenching kemudian diberi perlakuan *artificial aging* pada tiga variasi suhu, yaitu 165°C, 208°C, dan 250°C, masing-masing selama 6 jam. Pemilihan suhu aging didasarkan pada rentang temperatur penuaan untuk paduan aluminium seri 6000 [19]. Proses aging dilakukan dalam furnace dengan kontrol suhu otomatis untuk memastikan kestabilan temperatur selama proses berlangsung. Metode artificial aging dijelaskan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skematik diagram untuk proses *artificial aging* pada Aluminium Foam

3. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers untuk mengevaluasi kekerasan busa aluminium, sesuai dengan standar ASTM E92 yang digunakan untuk mengukur kekerasan material berpori. Alat yang digunakan adalah *microhardness tester* model LM24AT, dengan beban sebesar 150 kN dan waktu penekanan selama 15 detik. Setiap sampel diuji pada lima titik, lalu nilai rata-ratanya dihitung sebagai nilai kekerasan akhir (dalam satuan HV). Pemilihan beban kecil dan penekan (*indenter*) yang kecil bertujuan agar pengukuran hanya mengenai dinding sel, tanpa dipengaruhi oleh keberadaan pori pada busa [20].

4. Pengujian Kekuatan Tekan

Uji tekan dilakukan dengan menggunakan mesin uji universal (*Universal Testing Machine/UTM*) dengan kecepatan pembebanan sebesar 1 mm/min. Parameter yang diamati meliputi tegangan maksimum (*ultimate compressive strength*) dan karakteristik deformasi busa. Nilai kekuatan tekan dianalisis untuk mengidentifikasi korelasi antara suhu aging dan ketahanan struktural material.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Pengujian Kekerasan dan Kekuatan Tekan

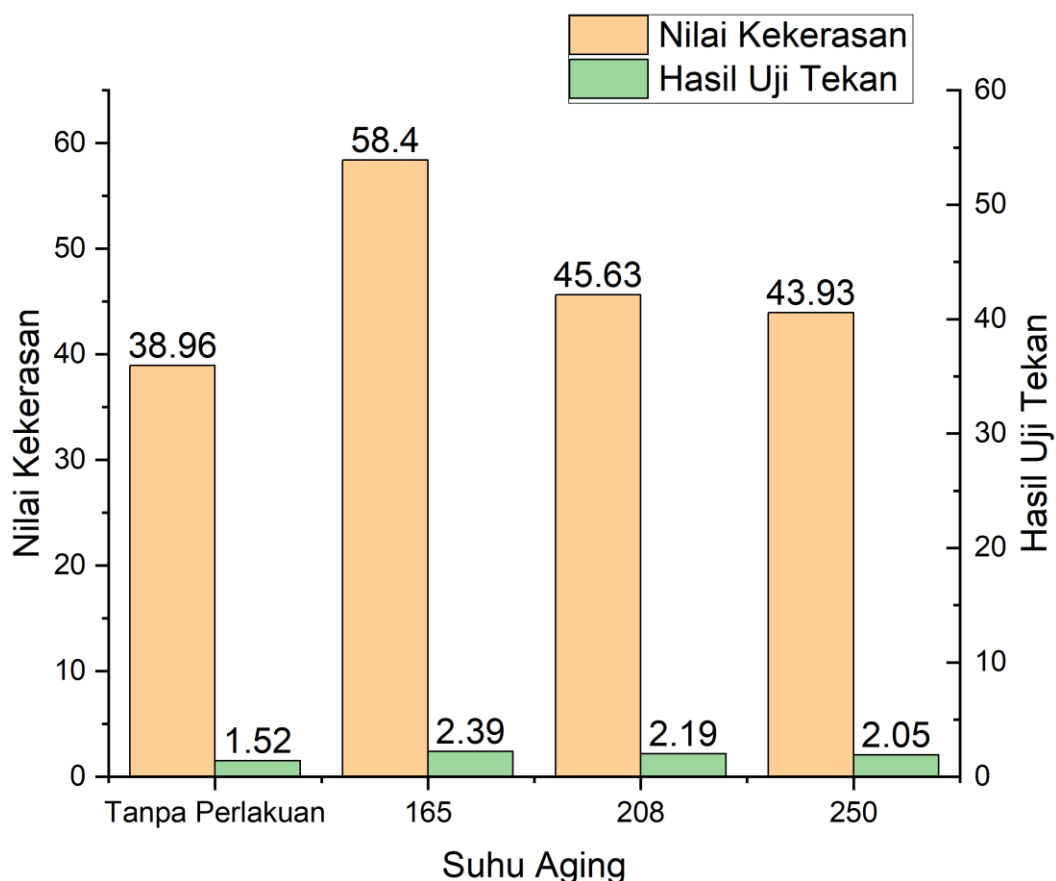
Gambar 2 menunjukkan hasil pengujian kekerasan dan kekuatan tekan pada Aluminium foam. Hasil penelitian mengenai *artificial aging* pada aluminium foam menunjukkan adanya hubungan antara suhu aging dan sifat mekanik, khususnya pada suhu sedang seperti 165°C. Penelitian menunjukkan bahwa pada suhu ini terjadi peningkatan pada nilai kekerasan dan kekuatan tekan, masing-masing sebesar 58,4 HV dan 2,39 MPa. Peningkatan ini dikaitkan dengan terbentuknya presipitat halus yang tersebar merata, yang berkontribusi terhadap penguatan struktur busa tanpa mengganggu integritas pori-pori [21], [22].

Sebaliknya, peningkatan suhu aging hingga ke tingkat yang lebih tinggi seperti 208°C dan 250°C justru menyebabkan penurunan pada nilai kekerasan dan kekuatan tekan akibat fenomena *overaging*. Secara spesifik, nilai kekerasan menurun menjadi 45,63 HV pada suhu 208°C dan 43,93 HV pada 250°C, sedangkan kekuatan tekan berkurang menjadi 2,19 MPa dan 2,05 MPa

[21], [22]. Penurunan ini dikaitkan dengan pertumbuhan presipitat yang berlebihan, sehingga efektivitasnya dalam memperkuat struktur busa menjadi berkurang [23].

Aluminium foam tanpa perlakuan menunjukkan sifat mekanik yang lebih rendah dibandingkan sampel yang telah mengalami *artificial aging*, dengan nilai kekerasan tercatat sebesar 38,96 HV dan kekuatan tekan sebesar 1,52 MPa [22]. Temuan ini menegaskan dampak positif dari proses aging yang terkontrol dalam meningkatkan sifat mekanik busa aluminium, serta menempatkan suhu 165°C sebagai kondisi aging yang optimal untuk busa berbasis paduan Al/Ca yang ditujukan untuk aplikasi struktural ringan dan penyerap energi [24]. Pengelolaan suhu aging secara efektif sangat penting karena memastikan terbentuknya presipitat yang tepat untuk penguatan struktur secara optimal, sekaligus menghindari efek negatif dari *overaging*. Presipitat yang terbentuk dengan baik dapat meningkatkan ikatan antar dinding sel busa, yang berdampak langsung pada peningkatan performa material secara keseluruhan.

Selain itu, teknik aging yang tepat tidak hanya meningkatkan kekerasan dan kekuatan tekan, tetapi juga berpotensi memperbaiki aspek mekanik lainnya. Beberapa studi menunjukkan bahwa perlakuan aging bertingkat (*graded aging*) dapat menghasilkan gradien kekuatan dalam struktur busa, yang dapat dimanfaatkan dalam aplikasi khusus yang memerlukan sifat mekanik yang bervariasi dalam satu komponen [21], [22]. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa pengendalian proses aging secara cermat pada busa aluminium sangat memengaruhi perilaku mekaniknya, dan pada akhirnya meningkatkan kelayakannya untuk berbagai aplikasi dalam desain struktural ringan.



Gambar 2. Hasil Kekerasan dan Uji Tekan Aluminium Foam Sebelum dan Sesudah Artificial Aging

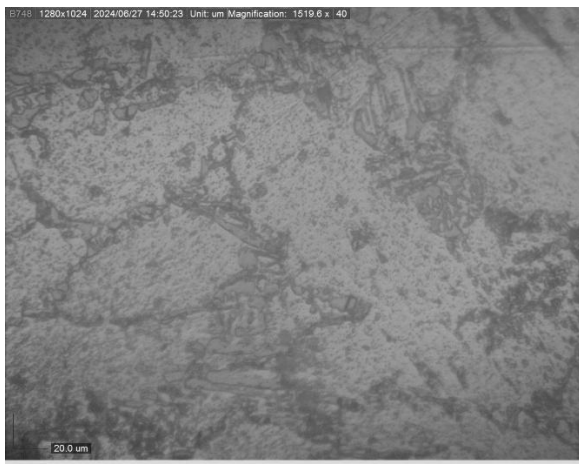
2. Hasil Pengujian Struktur Mikro

Hasil pengamatan mikroskop optik terhadap struktur mikro aluminium foam menunjukkan perubahan signifikan akibat perlakuan artificial aging pada berbagai suhu (ditunjukkan pada Gambar 3. Sampel tanpa perlakuan, seperti yang diobservasi oleh Zhao et al., menunjukkan mikrostruktur yang belum terbentuk dengan presipitat yang tidak merata dan fasa eutektik yang kasar, yang mencerminkan kondisi awal bahan aluminium yang belum mengalami proses penguatan mikrostruktural [25]. Dalam konteks ini, struktur mikro awal sangat mempengaruhi perkembangan sifat mekanik yang lebih lanjut.

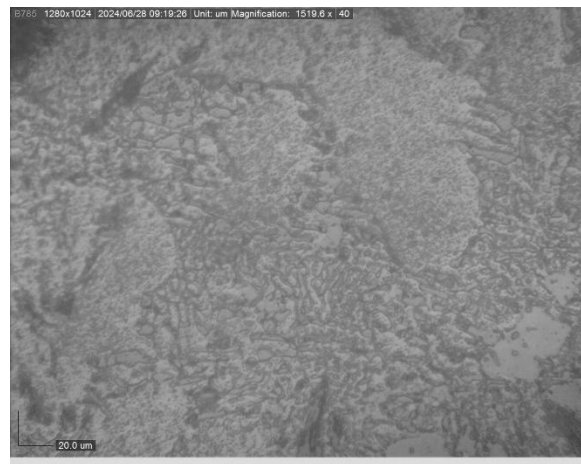
Pada perlakuan aging dengan suhu 165°C , penelitian yang dilakukan oleh Puspitasari et al. menunjukkan bahwa presipitat halus dapat terbentuk lebih merata di seluruh matriks, yang menghasilkan mikrostruktur yang lebih homogen. Hal ini berkontribusi pada peningkatan signifikan dalam kekerasan dan kekuatan tekan aluminium foam, seperti yang dijelaskan dalam studi yang menyebutkan bahwa perlakuan aging yang efektif dapat meningkatkan sifat mekanik hingga 70% [26]. Penemuan ini sejalan dengan pemahaman dasar bahwa presipitat yang lebih halus dan terdistribusi merata berfungsi untuk memperkuat matriks material.

Namun, pada suhu aging yang lebih tinggi, yaitu 208°C dan 250°C , penemuan menunjukkan mulai terjadinya overaging. Presipitat yang lebih besar dan kurang terdistribusi mengindikasikan penurunan efektivitas penguatan. Hal ini berpotensi merusak integritas struktural bahan, yang memungkinkan terjadinya pengurangan kekuatan dan kekerasan pada suhu tinggi, seperti yang diobservasi oleh Shukla et al. dalam studi mereka tentang sifat mekanik [27].

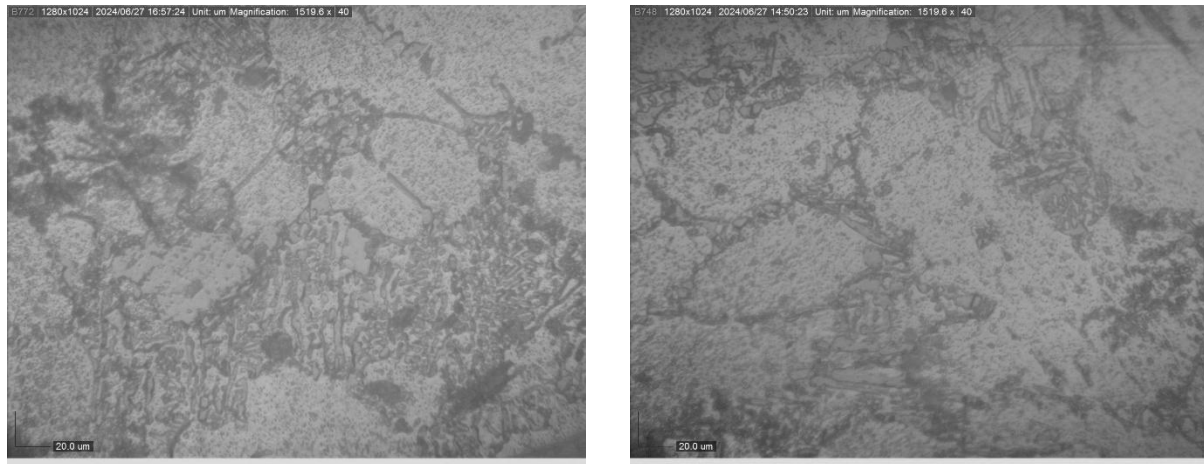
Sejalan dengan itu, penelitian oleh Wang et al. menyoroti bahwa proses aging yang berlebihan pada suhu di atas 165°C cenderung merusak mikrostruktur, memicu agregasi partikel presipitat yang berdampak pada penurunan kualitas mikrostruktur secara keseluruhan, terlihat dengan penurunan yang signifikan dalam sifat mekanik aluminium foam [28]. Penurunan ini dapat dijelaskan dengan mekanisme dasar di mana presipitat yang kasar dan tidak merata berkontribusi pada kerapuhan, membuktikan bahwa suhu aging yang tepat sangat penting untuk memastikan karakteristik mekanik yang optimal.



(a)



(b)



(c) (d)
Gambar 3. Hasil Pengujian Struktural Mikro ($20\ \mu\text{m}$) (a) Al/Ca Foam tanpa perlakuan, (b) Al/Ca Foam dengan suhu artificial aging 165°C , (c) Al/Ca Foam dengan suhu artificial aging 208°C dan (d) Al/Ca Foam dengan suhu artificial aging 250°C

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu *artificial aging* memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro aluminium foam berbasis paduan Al/Ca. Perlakuan pada suhu 165°C terbukti memberikan peningkatan paling optimal terhadap nilai kekerasan (58,4 HV) dan kekuatan tekan (2,39 MPa), yang disebabkan oleh terbentuknya presipitat halus dan merata di sepanjang dinding sel busa. Sebaliknya, peningkatan suhu hingga 208°C dan 250°C menyebabkan penurunan sifat mekanik akibat fenomena *overaging*, di mana presipitat mengalami pertumbuhan berlebih sehingga kehilangan efektivitas penguatan. Pengamatan struktur mikro mendukung temuan ini, dengan visualisasi presipitat yang paling stabil dan terdistribusi baik pada suhu 165°C . Dengan demikian, suhu 165°C dapat direkomendasikan sebagai kondisi aging optimum untuk meningkatkan performa mekanik aluminium foam, khususnya dalam aplikasi struktural ringan dan penyerap energi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya atas dukungan pendanaan dari Universitas Negeri Surabaya melalui Skema Penelitian dengan Nomor Kontrak B/116145/UN38.III.1/LK.04.00/2024. Dukungan ini sangat berperan penting dalam keberhasilan pelaksanaan dan penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] F. Garai, "Modern Applications of Aluminium Foams," *International Journal of Engineering and Management Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 14–21, 2020, doi: 10.21791/ijems.2020.2.3.
- [2] M. Peroni, G. Solomos, and N. Babcsán, "Development of a Hopkinson Bar Apparatus for Testing Soft Materials: Application to a Closed-Cell Aluminum Foam," *Materials*, 2016, doi: 10.3390/ma9010027.
- [3] J. R. Lu, J. Zhang, X. L. Sun, and X. Cai, "Research on Dynamic Compression-Shear Behavior of Closed-Cell Aluminum Foam," *Applied Mechanics and Materials*, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.423-426.1648.
- [4] H. A. Osman, A. M. Omran, A. Atlam, and M. M. Kh, "CHARACTERIZATION OF ALUMINIUM FOAM PRODUCED FROM ALUMINIUM SCRAP BY USING CaCO_3 AS FOAMING AGENT," *Jes Journal of Engineering Sciences*, 2017, doi: 10.21608/jesaun.2017.116283.

- [5] V. Crupi, G. Epasto, and E. Guglielmino, "Impact Response of Aluminum Foam Sandwiches for Light-Weight Ship Structures," *Metals (Basel)*, 2011, doi: 10.3390/met1010098.
- [6] W. Lu-cai, Y. Wang, Y. Xiao-hong, and F. Wang, "Foaming Behavior and Pore Structure Evolution of Foamed Aluminum Under the Extrusion Constraint," *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, doi: 10.1155/2020/3948378.
- [7] S. U. Nisa, S. Pandey, and P. M. Pandey, "Significance of Al₂O₃ Addition in the Aluminum 6063 Metal Foam Formation Through Friction Stir Processing Route – A Comprehensive Study," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design and Applications*, 2021, doi: 10.1177/14644207211034531.
- [8] M. Rahmani and A. M. Petrucci, "Experimental and Numerical Optimization Study of Shock Wave Damping in Aluminum Panel Sandwich," *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 2020, doi: 10.3221/igf-esis.55.07.
- [9] Y. Hangai, S. Ozawa, K. Okada, Y. Tanaka, K. Amagai, and R. O. Suzuki, "Machine Learning Estimation of Plateau Stress of Aluminum Foam Using X-Ray Computed Tomography Images," *Materials*, 2023, doi: 10.3390/ma16051894.
- [10] Y. Hangai *et al.*, "Classification of Mechanical Properties of Aluminum Foam by Machine Learning," *Mater Trans*, 2022, doi: 10.2320/matertrans.mt-m2021130.
- [11] S. Abdolkarimzadeha and N. Movahedia, "Effect of Heat Treatment and Reinforcements on the Mechanical Properties of Closed Cell Al-Cu Alloy Foam," *Metallic Foams*, 2017, doi: 10.23977/metf.2017.11004.
- [12] J. A. Garabito, H. Granados, V. H. López, A. R. Kennedy, and J. E. Bedolla, "Vacuum Foaming of Aluminum Scrap," *Mrs Proceedings*, 2012, doi: 10.1557/opl.2012.1635.
- [13] L. Z. Zhao, X. L. Zhang, N. Li, M. Zhao, and J. Zhang, "Investigation of Tensile Behavior of Aluminum Foam Used as Sound Insulation," *Applied Mechanics and Materials*, 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.44-47.3105.
- [14] W. Zhao, S. He, C. Zhang, Y. Li, Y. Zhang, and G. Dai, "Generation of a Strength Gradient in Al-Cu-Ca Alloy Foam via Graded Aging Treatment," 2022. doi: 10.3390/met12030423.
- [15] Y. Hangai, T. Takagi, Y. Goto, and K. Amagai, "Fabrication of Two-Layer Aluminum Foam Consisting of Dissimilar Aluminum Alloys Using Optical Heating," 2024. doi: 10.3390/ma17040894.
- [16] T. R. Neu, B. Pfretzschner, F. García-Moreno, and J. Banhart, "Influence of the Heating Rate on the Foaming Behavior of Various Aluminium Alloys," 2017. doi: 10.3390/met7090323.
- [17] Q. Yin, L. Jiang, F. Guo, and Z. WANG, "Microstructure and Properties of 6 Series Aluminum Alloy Under Different Aging Treatment Systems," 2023. doi: 10.5755/j02.ms.32988.
- [18] J. Banhart, "Metallic foams: challenges and opportunities," 2000. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137725121>
- [19] S. Li, F. Shen, Y. Guo, H. Liu, and C. Yu, "Influence of Artificial Aging Time on Microstructures and Mechanical Properties of Porthole Die Extruded 6063 Aluminum Alloy," 2023. doi: 10.3390/met13091621.
- [20] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley & sons, 2020.
- [21] W. Zhao, S. He, C. Zhang, Y. Li, Y. Zhang, and G. Dai, "Generation of a Strength Gradient in Al-Cu-Ca Alloy Foam via Graded Aging Treatment," *Metals (Basel)*, 2022, doi: 10.3390/met12030423.

- [22] B. Parveez, N. A. Jamal, H. Anuar, Y. Ahmad, A. Aabid, and M. Baig, "Microstructure and Mechanical Properties of Metal Foams Fabricated via Melt Foaming and Powder Metallurgy Technique: A Review," *Materials*, 2022, doi: 10.3390/ma15155302.
- [23] D. Ren *et al.*, "A Novel Sandwich Aluminum Foam Composite Reinforced With Steel Prepared by Arc Spraying," *Adv Eng Mater*, 2025, doi: 10.1002/adem.202402114.
- [24] Z. Wang and J. Shao, "Study on Quasi-Static Axial Compression Performance and Energy Absorption of Aluminum Foam-Filled Steel Tubes," *Materials*, 2023, doi: 10.3390/ma16124485.
- [25] W. Zhao, S. He, C. Zhang, Y. Li, Y. Zhang, and G. Dai, "Generation of a Strength Gradient in Al-Cu-Ca Alloy Foam via Graded Aging Treatment," *Metals (Basel)*, 2022, doi: 10.3390/met12030423.
- [26] D. Puspitasari, P. Puspitasari, M. Mustapha, and T. L. Ginta, "Effect of Heating Temperature, Holding Time and Stabilization Temperature on the Al-Foam Properties," *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology (Jmest)*, 2023, doi: 10.17977/um016v7i22023p147.
- [27] A. K. Shukla, D. Mandal, and J. D. Majumdar, "Compressive Property and Nano-Mechanical Behavior of Aluminium Cenosphere Composite Foam Developed by Powder Metallurgy Route," 2022, doi: 10.21203/rs.3.rs-1964616/v1.
- [28] X. Wang, Y. Huang, X. Wang, W. Wang, G. Hao, and D. Wang, "Effect of Pore Density on the Compressive Response of Open-Cell Al Foams," *Materials Science and Technology*, 2022, doi: 10.1080/02670836.2022.2065728.