

Tinjauan Perbandingan Metode Fabrikasi Dan Aplikasi Komposit Matricks Logam: Wawasan Dari Literatur Terkini

Hamidah Fitriyah¹, Sovian Aritonang^{1*}

¹)Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
Universitas Pertahanan Republik Indonesia
Indonesia Peace and Security Center (IPSC) Sentul, Bogor, Jawa Barat
Email: hamidahfitriyah4@gmail.com, sovian.aritonang@idu.ac.id

ABSTRACT

Metal Matrix Composites (MMCs) have become a major focus in materials research due to their ability to combine the superior properties of metals and non-metallic reinforcements. This review article focuses on a comparative analysis of two key literatures, "Recent Advances in Fabrication of Metal Matrix Composites: A Systematic Review" and "Metal Matrix Composites," which represent perspectives on fabrication technique innovation and fundamental understanding of material properties. A literature search conducted through Scopus and Google Scholar using the keywords "metal matrix composites," "fabrication techniques," and "material applications" for the period 2015–2025 yielded relevant articles as supporting literature. The analysis shows that key advances in the past decade include the development of powder metallurgy, stir casting, and additive manufacturing methods, which have significantly impacted the mechanical strength, wear resistance, and thermal stability of MMCs. Meanwhile, the fundamental literature provides a strong theoretical foundation for selecting matrices and reinforcements for specific applications. The results of this review confirm that integrating knowledge from these two main areas, enriched with supporting literature, can accelerate innovation and optimization of MMC applications across various industrial sectors.

Keywords: metal matrix composites, fabrication techniques, mechanical properties, material applications, additive manufacturing

PENDAHULUAN

Komposit matriks logam (*Metal Matrix Composites* / MMCs) merupakan salah satu kategori material rekayasa yang menggabungkan matriks logam dengan penguat non-logam, seperti keramik atau serat, [1], [2] untuk menghasilkan kombinasi sifat mekanik, termal, dan kimia yang unggul [3], [4]. Perkembangan teknologi MMCs memiliki peran penting di berbagai sektor industri, termasuk otomotif, dirgantara (*aerospace*), [5], [6], pertahanan [7], dan energi [4], [8], karena kemampuannya memberikan rasio kekuatan-terhadap-berat yang tinggi, ketahanan aus yang baik, serta stabilitas pada suhu tinggi [9], [10]. Meskipun potensi MMCs sangat besar, tantangan dalam proses fabrikasi masih menjadi hambatan utama [11], [12]. Pemilihan metode fabrikasi yang tepat sangat memengaruhi sifat akhir material, seperti kekuatan tarik, kekerasan, ketahanan korosi, dan konduktivitas termal [13], [14]. Variasi pada teknik fabrikasi—mulai dari *powder metallurgy* [15] hingga *additive manufacturing* [16]—menuntut pemahaman mendalam terkait hubungan antara parameter proses, sifat mikrostruktur, dan kinerja material [17]. Di sisi lain, upaya untuk mengoptimalkan sifat material sering kali menghadapi kendala biaya produksi, kompleksitas proses, dan keterbatasan skala produksi industri [18].

Namun, tinjauan literatur yang ada umumnya hanya berfokus pada salah satu aspek, yaitu inovasi metode fabrikasi atau karakterisasi sifat material. Sangat sedikit kajian yang secara bersamaan membandingkan berbagai teknik fabrikasi dan mengaitkannya dengan kebutuhan performa pada aplikasi industri nyata. Keterbatasan ini menimbulkan kesenjangan penting: belum tersedia sintesis komprehensif yang menjelaskan bagaimana pilihan metode fabrikasi berimplikasi langsung pada kesesuaian aplikasi MMCs di sektor-sektor strategis.

Untuk mengisi gap tersebut, artikel ini menyajikan analisis perbandingan antara metode fabrikasi MMCs dan relevansinya terhadap aplikasi industri dengan menggunakan dua literatur

inti—*Recent Advancements in Fabrication of Metal Matrix Composites: A Systematic Review dan Metal Matrix Composites*—yang diperkuat dengan literatur pendukung terbaru. Pendekatan integratif ini bertujuan memberikan pemetaan yang lebih jelas mengenai hubungan antara parameter proses, evolusi mikrostruktur, sifat mekanik, dan tuntutan aplikasi. Dengan demikian, tinjauan ini tidak hanya menyoroti perkembangan teknologi fabrikasi, tetapi juga menyajikan wawasan aplikatif yang dapat mendukung pengembangan MMCs generasi berikutnya secara lebih efektif dan terarah.

METODE

Metodologi dalam penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur semi-sistematis dengan tujuan mengidentifikasi, menganalisis, dan membandingkan perkembangan terbaru terkait metode fabrikasi serta aplikasi komposit matriks logam (Metal Matrix Composites/MMCs). Proses review dilakukan melalui tiga tahap: penelusuran literatur, seleksi berbasis kriteria, dan analisis tematik komparatif.

1. Penelusuran Literatur

Pencarian dilakukan melalui basis data akademik Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar untuk memastikan cakupan referensi yang luas dan kredibel. Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci “*metal matrix composites*”, “*fabrication techniques*”, “*powder metallurgy*”, “*stir casting*”, “*additive manufacturing*”, dan “*hybrid methods*”, dengan operator Boolean (AND/OR) guna memperoleh artikel yang relevan. Penelusuran dibatasi pada publikasi periode 2015–2025 untuk menjamin kebaruan informasi.

2. Seleksi dan Kriteria Inklusi

Artikel yang ditemukan diseleksi melalui dua tahap. Pertama, screening judul dan abstrak dilakukan untuk menghapus referensi yang tidak relevan. Kedua, artikel yang lolos tahap awal dibaca secara penuh untuk menilai kesesuaiannya dengan fokus kajian. Kriteria inklusi meliputi:

1. artikel ilmiah peer-reviewed,
2. membahas MMCs dengan fokus pada metode fabrikasi dan/atau aplikasinya,
3. dipublikasikan dalam bahasa Inggris atau Indonesia.

Adapun kriteria eksklusi mencakup: paten, laporan teknis non-ilmiah, artikel yang hanya menyebut MMCs secara sekilas tanpa pembahasan mendalam, serta publikasi yang tidak dapat diakses secara penuh. Tahap ini menghasilkan dua literatur inti sebagai dasar analisis perbandingan, yaitu *Recent Advancements in Fabrication of Metal Matrix Composites: A Systematic Review dan Metal Matrix Composites*, serta sejumlah literatur pendukung yang memperkaya konteks pembahasan. Dari seluruh artikel yang ditemukan, sebanyak 10 artikel memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis lebih lanjut dalam studi ini.

3. Kerangka Analisis Tematik

Untuk menghindari kecenderungan deskriptif dan memastikan adanya sintesis, seluruh artikel yang terpilih dianalisis menggunakan tiga tema utama:

1. Teknik Fabrikasi, mencakup powder metallurgy, stir casting, friction stir processing, additive manufacturing, dan metode hibrid.
2. Sifat dan Performa Material, termasuk kekuatan tarik, ketahanan aus, kekerasan, distribusi penguat, stabilitas termal, dan karakteristik mikrostruktur.
3. Aplikasi Industri, dengan memetakan kesesuaian sifat material terhadap tuntutan sektor otomotif, dirgantara, pertahanan, dan energi.

Setiap artikel dipetakan ke dalam ketiga tema tersebut untuk mengidentifikasi pola hubungan antara parameter fabrikasi, hasil mikrostruktur, dan relevansi aplikatif. Proses ini memungkinkan pembahasan bersifat analitis dan komparatif, bukan hanya merangkum isi literatur.

4 Sintesis dan Perbandingan

Hasil pemetaan tematik digunakan untuk menyusun perbandingan antara kedua literatur inti dan mengintegrasikannya dengan literatur pendukung. Analisis dilakukan dengan fokus pada:

1. perbedaan pendekatan fabrikasi,
2. dampaknya terhadap sifat material, dan

3. implikasi aplikasinya di sektor industri.

Pendekatan ini menghasilkan sintesis komprehensif untuk menjelaskan keterkaitan antara metode fabrikasi dan kesesuaian aplikatif MMCs, sekaligus mengisi gap penelitian yang belum dibahas dalam review sebelumnya. Pendekatan analitis bertingkat (theme-mapping) ini jarang digunakan dalam review MMCs sebelumnya, yang umumnya hanya mengulas metode fabrikasi atau aplikasi secara terpisah. Dengan kerangka sintesis ini, penelitian ini mampu menghasilkan pemetaan hubungan fabrikasi–mikrostruktur–sifat material–aplikasi yang lebih komprehensif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode Fabrikasi MMCs

Kajian literatur menunjukkan bahwa perkembangan komposit matriks logam (MMCs) terus bergerak menuju optimasi proses fabrikasi untuk memperoleh kombinasi sifat mekanik, termal, dan keausan yang unggul. Untuk memperoleh gambaran menyeluruh, literatur yang telah dikumpulkan diringkas terlebih dahulu pada Tabel 1, yang memuat perbandingan metode fabrikasi, jenis material, serta temuan utama dari setiap studi.

Tabel 1. Ringkasan 10 Literatur Terpilih

No	Judul Artikel	Tahun	Metode Fabrikasi	Material	Temuan Utama	Sitasi
1	<i>Recent Advancements in Fabrication of Metal Matrix Composites: A Systematic Review</i>	2024	<i>Stir casting</i> , PM, AM, Hybrid	Al, Mg + nano-penguat	Inovasi fabrikasi terbaru termasuk <i>nanofiller</i> dan AM	[19]
2	<i>Metal Matrix Composites</i>	2018	Umum (review teoritis)	Al, Ti, Mg MMCs	Mikrostruktur, mekanisme penguatan	[20]
3	<i>Advances in hybrid aluminium metal matrix composites</i>	2024	<i>Hybrid (stir casting + FSP)</i>	Al–SiC, Al–B4C	<i>Hybrid</i> meningkatkan kekuatan tarik dan ketahanan aus	[21]
4	<i>Fabrication of hybrid (AA6061/SiCp/B4C) composites using Friction Stir Processing</i>	2021	FSP pada <i>casting</i>	AA6061 + SiC + B4C	Distribusi partikel homogen, sifat mekanik meningkat	[22]
5	<i>Fabrication of hybrid metal matrix composites (HMMCs)</i>	2022	<i>Hybrid (casting, PM, FSP)</i>	Al-HMMCs	Review detail kelebihan & kekurangan teknik <i>hybrid</i>	[23]
6	<i>Recent development in graphene-reinforced aluminium matrix composite: A review</i>	2021	<i>Powder metallurgy</i> , <i>stir casting</i>	Al + <i>graphene</i>	<i>Graphene</i> meningkatkan kekuatan & konduktivitas	[24]
7	<i>A Review on Processing, Mechanical and Wear Properties of Al Matrix Composites Reinforced with Al₂O₃, SiC, B₄C and MgO via PM</i>	2024	<i>Powder metallurgy</i>	Al + SiC	Kontrol distribusi baik, porositas tetap jadi masalah	[15]
8	<i>Chapter 2 - Additive Manufacturing of Aluminium-Based Alloys and Composites</i>	2018	AM (SLM, WAAM)	<i>Al-based alloys & composites</i>	Peluang dan tantangan untuk Al <i>composites</i> , presisi tinggi	[25]

9	<i>Development of Aluminium Based Composite by Utilizing Industrial Waste and Agro-Waste Material as Reinforcement Particles</i>	2021	<i>Stir casting</i>	Al + fly ash	namun terbatas skala produksi. MMC ramah lingkungan; meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus. [26]
10	<i>Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing</i>	2017	FSP	Al-SiC	FSP dapat tailor sifat MMCs; distribusi lebih merata dibanding <i>stir casting</i> . [27]

Tabel tersebut memberikan dasar pemahaman mengenai variasi pendekatan fabrikasi pada MMCs. Berdasarkan rangkuman tersebut, terlihat bahwa *powder metallurgy*, *stir casting*, *additive manufacturing*, dan metode hibrid merupakan teknik yang paling banyak diintegrasikan dalam penelitian modern. *Powder metallurgy* (PM) menjadi teknik dominan karena kemampuannya menghasilkan distribusi partikel penguat yang seragam serta kontrol mikrostruktur yang baik. Namun, metode ini memerlukan biaya peralatan yang tinggi dan sering menghadapi isu porositas. Berbeda dengan PM, *stir casting* lebih ekonomis dan mudah diimplementasikan, terutama untuk produksi skala besar, meskipun berpotensi menimbulkan aglomerasi partikel dan heterogenitas struktur mikro. Perkembangan teknologi terkini menunjukkan meningkatnya penggunaan *additive manufacturing* (AM), seperti *Selective Laser Melting* (SLM) dan *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), yang memungkinkan pembuatan geometri kompleks dengan kontrol mikrostruktur yang sangat baik. Kendati demikian, keterbatasan skala produksi dan biaya operasional masih menjadi tantangan.

Pada tahap ini, pembahasan perlu diperdalam terkait bagaimana setiap teknik bekerja, variasinya, serta implikasinya terhadap hasil mikrostruktur. Untuk memperkuat analisis tersebut, Tabel 3.2 disajikan sebagai rangkuman sistematis mengenai teknik fabrikasi yang muncul paling sering dalam dua literatur utama dan literatur pendukung.

Tabel 2. Teknik Fabrikasi Berdasarkan Dua Literatur Inti

Jurnal	Teknik Fabrikasi	Metode	Hasil
	<i>Friction Stir Processing (FSP)</i>	Menggunakan alat berputar yang menciptakan panas melalui gesekan untuk memfasilitasi pengolahan material tanpa mencairkannya.	Meningkatkan distribusi partikel penguat dalam matriks logam, menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen dan sifat mekanik yang lebih baik.
[19]	<i>Ultrasonic-Assisted Stir Casting</i>	Menggabungkan pengadukan dengan gelombang ultrasonik untuk meningkatkan dispersibilitas partikel penguat dalam logam cair.	Membantu mengurangi aglomerasi partikel dan meningkatkan kualitas interaksi antara matriks dan penguat, berkontribusi pada pengurangan cacat seperti porositas.
	<i>Additive Manufacturing (AM)</i>	Mencakup berbagai metode seperti <i>Selective Laser Melting (SLM)</i> dan <i>Wire Arc Additive Manufacturing</i> .	Kontrol yang lebih baik terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik, mengurangi limbah material.
	<i>Powder Metallurgy (PM)</i>	Pencampuran serbuk logam dan serbuk keramik, lalu proses pengepresan dan <i>sintering</i> . Dalam	Menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik. Porositas lebih tinggi, mempengaruhi ketahanan

Jurnal	Teknik Fabrikasi	Metode	Hasil
		beberapa kasus, <i>sintering</i> dilakukan dengan tekanan pada suhu di mana terjadi pencairan parsial untuk meningkatkan ikatan.	korosi.
	<i>Liquid Metallurgy</i>	Pencampuran partikel penguat ke dalam matriks logam cair, diikuti dengan proses pembekuan. Beberapa variasi dari teknik ini termasuk <i>unidirectional solidification</i> , <i>compocasting</i> , <i>squeeze casting</i> , dan <i>pressure infiltration</i> .	Paling ekonomis, menghasilkan MMCs dengan sifat mekanik yang baik. Memungkinkan distribusi yang lebih baik dari partikel penguat dalam matriks, meningkatkan kekuatan tarik dan ketahanan terhadap deformasi.
[28]	<i>Powder Metallurgy (PM)</i>	Pencampuran serbuk logam dan serbuk keramik, diikuti proses pengepresan dan <i>sintering</i> .	Lebih mahal dibandingkan dengan <i>liquid metallurgy</i> , interaksi lebih sedikit antara matriks dan penguat, menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik. Porositas lebih tinggi, mempengaruhi ketahanan korosi.
	<i>Diffusion Bonding</i>	Melibatkan pengikatan filamen dan <i>foil</i> melalui proses difusi pada suhu tinggi. Ini memungkinkan pembentukan ikatan yang kuat antara matriks dan penguat.	Menghasilkan MMCs dengan sifat mekanik yang sangat baik, biaya mahal dan proses kompleks.
	<i>Vapor Phase Infiltration</i>	Melibatkan pengendapan logam dari fase uap ke dalam struktur keramik atau penguat.	Komposit dengan sifat yang sangat baik, memiliki tantangan dalam hal biaya dan kontrol proses.

Dari Tabel 2, terlihat bahwa setiap metode fabrikasi memiliki karakteristik operasional yang berbeda:

- Friction Stir Processing (FSP) menghasilkan distribusi partikel yang lebih homogen karena proses solid-state yang meminimalkan cacat.
- Ultrasonic-assisted stir casting membantu mengurangi aglomerasi dan meningkatkan kualitas ikatan matriks–penguat.
- Liquid metallurgy memberikan solusi paling ekonomis tetapi berisiko menghasilkan segregasi partikel.
- Diffusion bonding dan vapor phase infiltration menawarkan sifat mekanik unggul, namun sangat mahal dan sulit diterapkan pada skala industri.

Perbandingan Dua Literatur Utama

Perbandingan antara dua literatur inti menunjukkan perbedaan orientasi yang cukup jelas. *Recent Advancements in Fabrication of Metal Matrix Composites: A Systematic Review* menekankan aspek inovatif dalam teknik fabrikasi, seperti penggunaan nanofiller, optimasi parameter proses, dan integrasi AM dalam pembuatan MMCs. Fokus utamanya adalah pendekatan berbasis teknologi dan tren terkini yang dapat meningkatkan homogenitas partikel serta performa mekanik komposit.

Sebaliknya, *Metal Matrix Composites* memberikan landasan teoritis mendalam mengenai struktur mikro, mekanisme penguatan, dan hubungan antara komposisi material dan sifat mekanik. Literatur ini lebih berorientasi pada dasar ilmiah dan bukan pada inovasi proses.

Melalui perbandingan ini, terlihat bahwa kedua sumber saling melengkapi: satu memberikan solid framework teoritis, sementara yang lain menawarkan perkembangan terapan terbaru. Kombinasi keduanya penting untuk merumuskan arah riset MMCs yang lebih matang dan berkelanjutan.

Sintesis Temuan dari Literatur Pendukung

Literatur pendukung memperlihatkan beberapa tren penting dalam pengembangan MMCs modern. Peningkatan performa material banyak dicapai melalui penggunaan penguat berbasis graphene, pengolahan hibrid (casting + FSP), serta penerapan penguat dari limbah industri yang lebih ramah lingkungan. Analisis tematik menunjukkan bahwa:

- *Powder metallurgy* memberikan kekuatan tarik tertinggi karena kontrol mikrostruktur yang baik, meskipun porositas tetap menjadi masalah.
- *Stir casting* menghasilkan ketangguhan fraktur yang baik, meski sangat dipengaruhi oleh fraksi penguat dan parameter proses.
- Metode hibrid dapat meningkatkan homogenitas dan ketahanan aus, tetapi memerlukan kontrol proses yang ketat.
- AM menghadirkan presisi, tetapi masih belum ideal untuk produksi massal.

Tantangan umum yang masih sering ditemukan meliputi: kesulitan dispersibilitas partikel nano, kontrol porositas, variabilitas kualitas dalam produksi besar, serta prediksi umur pakai di kondisi ekstrem.

Pembahasan

Integrasi antara inovasi proses fabrikasi dan pemahaman fundamental mengenai mekanisme penguatan MMCs menjadi kunci dalam menghasilkan komposit dengan performa tinggi dan kestabilan operasional. Metode seperti AM, penguat nanosized, dan metode hibrid telah menunjukkan potensi peningkatan signifikan dalam sifat mekanik, namun efektivitasnya sangat bergantung pada pemahaman struktur mikro dan interaksi matriks–penguat.

Setiap metode fabrikasi membawa trade-off tertentu. PM unggul dalam kekuatan namun mahal dan rentan porositas. Stir casting ekonomis tetapi kurang homogen. AM menjanjikan presisi tinggi namun terbatas pada skala industri. Metode hibrid memberikan kombinasi terbaik, tetapi dengan biaya proses dan kompleksitas lebih tinggi.

Dilihat dari sisi aplikasi, MMCs memiliki potensi besar pada sektor otomotif, kedirgantaraan, pertahanan, dan energi. Kombinasi kekuatan spesifik tinggi, ketahanan aus, dan stabilitas termal menjadikannya kandidat ideal untuk komponen yang membutuhkan efisiensi berat dan durabilitas operasional. Arah riset masa depan dapat meliputi:

- penggunaan penguat berbasis nanocarbon atau boron,
- metode fabrikasi berkelanjutan berbasis limbah atau sumber daya terbarukan,
- optimasi proses menggunakan AI/ML,
- pemodelan prediksi umur pakai di lingkungan ekstrem.

Dengan pendekatan komprehensif yang menggabungkan teori, inovasi proses, dan evaluasi aplikasi, pengembangan MMCs generasi berikutnya berpotensi memberikan kontribusi besar bagi industri berteknologi tinggi. Sebelum menarik kesimpulan umum, penting untuk meninjau keterbatasan studi ini agar interpretasi hasil tetap proporsional.

Limitasi Studi

Tinjauan ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, cakupan literatur dibatasi pada rentang tahun 2015–2025 dan penggunaan kombinasi kata kunci tertentu, sehingga terdapat kemungkinan bahwa beberapa studi relevan di luar cakupan tersebut tidak teridentifikasi. Kedua, analisis yang dilakukan berfokus pada aspek kualitatif mengenai hubungan antara metode fabrikasi, struktur mikro, dan sifat material, sehingga tidak mencakup perbandingan kuantitatif performa antar-metode maupun evaluasi biaya produksi aktual. Ketiga, tinjauan ini tidak membahas secara mendalam isu reliabilitas jangka panjang dan kinerja MMCs pada kondisi ekstrem, yang merupakan aspek krusial dalam aplikasi industri berat. Keterbatasan ini membuka

peluang bagi penelitian lanjutan yang lebih terarah, termasuk studi eksperimental, analisis biaya–manfaat, dan pemodelan prediktif berbasis data.

KESIMPULAN

Tinjauan ini menunjukkan bahwa kemajuan dalam teknik fabrikasi—*meliputi powder metallurgy, stir casting, additive manufacturing*, dan metode hibrid—berperan penting dalam meningkatkan performa komposit matriks logam (MMCs). Analisis tematik yang dilakukan mengungkap bahwa efektivitas setiap metode bergantung pada kemampuan proses tersebut dalam mengontrol distribusi penguat, meminimalkan cacat mikrostruktur, serta menyesuaikan sifat material dengan tuntutan aplikatif. Tinjauan ini juga memberikan kontribusi unik dengan menghadirkan pemetaan terintegrasi antara metode fabrikasi, evolusi mikrostruktur, sifat mekanik, dan kesesuaian aplikatif MMCs. Pendekatan sintesis ini belum ditampilkan secara komprehensif pada review sebelumnya, sehingga penelitian ini mampu mengisi gap penting antara inovasi proses dan kebutuhan aplikasi industri.

Sintesis antara literatur terapan dan landasan teoritis menegaskan bahwa peningkatan kinerja MMCs tidak hanya ditentukan oleh inovasi teknologi fabrikasi, tetapi juga oleh pemahaman yang kuat mengenai mekanisme penguatan, interaksi matriks–penguat, dan evolusi struktur mikro. Dengan demikian, desain MMCs generasi berikutnya perlu mempertimbangkan keterkaitan antara parameter proses, hasil mikrostruktur, dan kebutuhan aplikasi secara simultan.

Setiap metode fabrikasi memiliki keunggulan dan keterbatasan: PM unggul dalam kontrol mikrostruktur tetapi mahal dan rentan porositas; *stir casting* ekonomis namun kurang homogen; AM menawarkan presisi tinggi namun terkendala skala produksi; dan metode hibrid mampu menggabungkan kelebihan berbagai teknik dengan kompleksitas yang lebih tinggi. Variabilitas ini menunjukkan bahwa pemilihan metode harus dilakukan secara strategis sesuai target aplikasi.

Dari sisi aplikatif, MMCs memiliki prospek luas di sektor otomotif, kedirgantaraan, pertahanan, dan energi, terutama untuk komponen yang menuntut kombinasi kekuatan spesifik tinggi, ketahanan aus, dan stabilitas termal. Arah riset masa depan berpotensi difokuskan pada pengembangan penguat berbasis nano dan material baru yang lebih berkelanjutan, optimasi proses melalui integrasi kecerdasan buatan, serta pendekatan fabrikasi ramah lingkungan. Sinergi antara perkembangan teknologi dan pemahaman ilmiah diperkirakan akan mempercepat pengembangan MMCs yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan industri modern.

Secara keseluruhan, pemetaan komprehensif yang disajikan dalam studi ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi penelitian pengembangan MMCs generasi berikutnya yang lebih terarah dan berbasis kebutuhan industri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Andini, E. Surojo, and T. Triyono, “The Effect of Stirrer Depth And Electroless Coating of Hardness And Tensile Strength in Aluminium Matrix Composite AL6061-AL2O₃,” *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*, vol. 20, no. 1, p. 23, 2021, doi: 10.20961/mekanika.v20i1.48073.
- [2] S. Bahl, “Fiber reinforced metal matrix composites - a review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 39, pp. 317–323, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.423>.
- [3] K. N. Arunkumar and G. B. Krishnappa, “Mechanical Properties of Aluminum Metal Matrix Composites - A Review,” *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 11, no. 03, pp. 341–344, 2022.
- [4] S. Seetharaman, J. Subramanian, R. A. Singh, W. L. E. Wong, M. L. S. Nai, and M. Gupta, “Mechanical Properties of Sustainable Metal Matrix Composites: A Review on the Role of Green Reinforcements and Processing Methods,” *Technologies*, vol. 10, no. 1, 2022, doi: 10.3390/technologies10010032.
- [5] V. Srinivasan, S. Kunjiappan, and P. Palanisamy, “A brief review of carbon nanotube reinforced metal matrix composites for aerospace and defense applications,” *International Nano Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 321–345, 2021, doi: 10.1007/s40089-021-00328-y.

- [6] B. Ravi Naik *et al.*, “The application of metal matrix composite materials in propulsion system valves,” *Materials Today: Proceedings*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.083>.
- [7] S. Siengchin, “A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments,” *Defence Technology*, vol. 24, pp. 1–17, 2023, doi: [10.1016/j.dt.2023.02.025](https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.02.025).
- [8] M. Gupta, “Metal Matrix Composites,” *Metals*, vol. 8, no. 6, 2018, doi: [10.3390/met8060379](https://doi.org/10.3390/met8060379).
- [9] P. Sarmah and K. Gupta, “A Review on the Machinability Enhancement of Metal Matrix Composites by Modern Machining Processes,” *Micromachines*, vol. 15, no. 8, 2024, doi: [10.3390/mi15080947](https://doi.org/10.3390/mi15080947).
- [10] S. Simões, “Design and Development of Metal Matrix Composites,” *Metals*, vol. 15, no. 8, p. 848, 2025, doi: [10.3390/met15080848](https://doi.org/10.3390/met15080848).
- [11] D. K. Sharma, D. Mahant, and G. Upadhyay, “Manufacturing of metal matrix composites: A state of review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 506–519, 2020.
- [12] E. M. Gutema and H. G. Lemu, “Conventional Machining of Metal Matrix Composites towards Sustainable Manufacturing—Present Scenario and Future Prospects,” *Journal of Composites Science*, vol. 8, no. 9, pp. 1–38, 2024, doi: [10.3390/jcs8090356](https://doi.org/10.3390/jcs8090356).
- [13] S. Chen, S. Chu, and B. Mao, *Iron-Based Metal Matrix Composite: A Critical Review on the Microstructural Design, Fabrication Processes, and Mechanical Properties*, vol. 38, no. 1. The Chinese Society for Metals, 2025. doi: [10.1007/s40195-024-01758-1](https://doi.org/10.1007/s40195-024-01758-1).
- [14] J. Pradeep Kumar, D. S. Robinson Smart, and E. C. Jones, “Experimental evaluation of mechanical, wear and corrosion properties of AA5083/graphite metal matrix composite prepared using compocasting process,” *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 2352–2357, 2019, doi: [10.35940/ijitee.A5247.119119](https://doi.org/10.35940/ijitee.A5247.119119).
- [15] D. Akgümüş Gök, C. Bayraktar, and M. Hoşkun, “A review on processing, mechanical and wear properties of Al matrix composites reinforced with Al₂O₃, SiC, B₄C and MgO by powder metallurgy method,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 31, no. June, pp. 1132–1150, 2024, doi: [10.1016/j.jmrt.2024.06.110](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.110).
- [16] M. S. K. K. Y. Nartu and P. Agrawal, “Additive manufacturing of metal matrix composites,” *Materials and Design*, vol. 252, no. October 2024, p. 113609, 2025, doi: [10.1016/j.matdes.2025.113609](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113609).
- [17] N. Li *et al.*, “Laser Additive Manufacturing on Metal Matrix Composites: A Review,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 34, no. 1, 2021, doi: [10.1186/s10033-021-00554-7](https://doi.org/10.1186/s10033-021-00554-7).
- [18] R. Phiri, S. Mavinkere Rangappa, S. Siengchin, O. P. Oladijo, and T. Ozbakkaloglu, “Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review,” *Heliyon*, vol. 10, no. 21, p. e39661, 2024, doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e39661](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39661).
- [19] P. Sarmah and K. Gupta, “Recent Advancements in Fabrication of Metal Matrix Composites: A Systematic Review,” *Materials*, vol. 17, no. 18, 2024, doi: [10.3390/ma17184635](https://doi.org/10.3390/ma17184635).
- [20] N. Chawla and K. K. Chawla, *Metal Matrix Composites*, 2nd ed. New York, NY: Springer New York, NY, 2013. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9548-2>.
- [21] S. S. Shinde and S. B. Barve, “Advances in hybrid aluminium metal matrix composite produced by stir casting route: A review on applications and fabrication characteristics,” *Materials Today: Proceedings*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.029>.
- [22] N. Subramani, R. Haridass, R. Krishnan, N. Manikandan, and A. Baskaran, “Fabrication of hybrid (AA6061/SiCp/B₄C) composites using FSP method and analysing the thermal behaviour in the weld region,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 4306–4311, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.601>.
- [23] V. Rana, H. Kumar, and A. Kumar, “Fabrication of hybrid metal matrix composites (HMMCs) – A review of comprehensive research studies,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 3102–3107, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.241>.

- [24] A. Md Ali, M. Z. Omar, H. Hashim, M. S. Salleh, and I. F. Mohamed, “Recent development in graphene-reinforced aluminium matrix composite: A review,” *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 60, no. 1, pp. 801–817, 2021, doi: 10.1515/rams-2021-0062.
- [25] S. Lathabai, “Chapter 2 - Additive Manufacturing of Aluminium-Based Alloys and Composites,” in *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*, R. N. B. T.-F. of A. M. Lumley, Ed., Woodhead Publishing, 2018, pp. 47–92. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102063-0.00002-3>.
- [26] A. Islam, S. P. Dwivedi, R. Yadav, and V. K. Dwivedi, “Development of Aluminium Based Composite by Utilizing Industrial Waste and Agro-Waste Material as Reinforcement Particles,” *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, vol. 102, no. 2, pp. 317–330, 2021, doi: 10.1007/s40033-021-00292-z.
- [27] R. Bauri and D. Yadav, *Metal matrix composites by friction stir processing*, no. August. Elsevier Inc., 2017. doi: 10.1016/C2016-0-04019-6.
- [28] P. K. Rohatgi, “Metal matrix composites,” *Metal Matrix Composites*, vol. 43, no. 4, pp. 1–170, 2018, doi: 10.1201/9781351074445.