

Proses Produksi Soft Magnetic Composite (SMC) Berbahan Dasar Fe

Hery Tri Waloyo^{1,*}, Muhammad Gilang Firmansyah¹, Khanif Setiyawan¹, Agus Mujiyanto¹

¹Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur
Jl. Ir. H. Juanda No.15, Sidodadi, Kec. Samarinda Ulu, Kota Samarinda, Kalimantan Timur, 75124
Email korespondensi: htw182@umkt.ac.id

Abstrak

Penelitian ini membahas berbagai metode produksi Komposit Magnetik Lunak (Soft Magnetic Composite/SMC) berbasis besi dan mengidentifikasi metode produksi yang paling efektif. Peningkatan emisi karbon dan kebutuhan akan energi alternatif mendorong perkembangan teknologi elektromagnetik, termasuk penggunaan SMC pada motor listrik. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah tinjauan literatur, dengan mengkaji artikel-artikel relevan dari jurnal nasional dan internasional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode produksi tradisional dan Manufaktur Aditif (Additive Manufacturing/AM) adalah dua metode utama yang digunakan dalam produksi SMC. Di antara metode-metode ini, metode produksi tradisional dengan teknologi Metalurgi Serbuk (Powder Metallurgy/PM) terbukti lebih efektif dalam menghasilkan SMC dengan kualitas lebih baik dan proses produksi yang lebih efisien. Penelitian ini memberikan wawasan mendalam tentang berbagai teknik produksi SMC dan dapat menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan material elektromagnetik.

Kata kunci: Komposit, Magnet sementara, proses produksi, cetak tekan panas.

Abstract

This study discusses various production methods of iron-based Soft Magnetic Composite (SMC) and to identify the most effective production. The increase in carbon emissions and the need for alternative energy drive the development of electromagnetic technology, including the use of SMC in electric motors. The method used in this study is a literature review, by reviewing relevant articles from national and international journals. The results of the study indicate that traditional production methods and Additive Manufacturing (AM) are the two main methods used in SMC production. Among these methods, the traditional production method with Powder Metallurgy (PM) technology proved to be more effective in producing SMC with better quality and more efficient production processes. This research provides in-depth insights into various SMC production techniques and can serve as a foundation for future research in the development of electromagnetic materials.

Keywords: Composite, Soft Magnetic, manufacture, hot press.

1. Pendahuluan

Peningkatan emisi karbon dari pembakaran bahan bakar fosil menjadi masalah serius yang mengancam keberlanjutan lingkungan dan kesehatan global [1]. Krisis energi dan pencemaran udara akibat emisi karbon mendorong berbagai negara untuk mencari solusi alternatif yang lebih ramah lingkungan. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah penggunaan kendaraan listrik yang menghasilkan polusi jauh lebih sedikit dibandingkan dengan kendaraan berbasis mesin pembakaran dalam (Internal Combustion Engine - ICE) [2], [3]. Kendaraan listrik, yang menggunakan motor listrik, memiliki potensi besar dalam mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan mendukung ketahanan energi di masa depan.

Motor listrik memerlukan material magnetik yang efisien untuk berfungsi dengan baik, di antaranya adalah *permanent magnet* dan *soft magnetic* [4], [5]. *Permanent magnet* memiliki sifat kemagnetan yang stabil, sementara *soft magnetic* hanya memiliki medan magnet salaam

mendapatkan induksi magnet. *Soft magnetic composite* (SMC) adalah material magnetik dalam bentuk komposit yang sangat penting dalam aplikasi elektromagnetik modern. SMC terbuat dari campuran partikel besi (Fe) dengan bahan pengikat non-magnetik seperti resin, polimer, atau logam non-magnetik, yang membuatnya memiliki keunggulan dalam hal kemudahan magnetisasi dan efisiensi penggunaan energi [6].

Proses produksi SMC memainkan peran krusial dalam menentukan kualitas dan kinerja material ini. Produksi SMC melibatkan penggunaan nanomaterial dan teknologi canggih yang membutuhkan penanganan khusus serta proses manufaktur yang kompleks [7]. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan menyajikan berbagai metode produksi SMC berbahan dasar besi (Fe) serta mengidentifikasi metode yang paling efektif dan efisien. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang mendalam tentang teknik produksi SMC dan menjadi landasan bagi penelitian lebih lanjut dalam pengembangan material elektromagnetik

yang lebih baik, mendukung perkembangan teknologi hijau dan berkelanjutan di masa depan.

2. Metode

Penelitian dilaksanakan dengan studi literatur (*literature review*). Sumber literatur diperoleh dari hasil pencarian mesin pencari *Scopus*. Pencarian dilaksanakan dengan menggunakan kata kunci *Soft Magnetic Composite* kemudian dilakukan filter dengan kata kunci *manufacturing process*. Hasil pencarian dinilai tingkat kesesuaian dengan topik pembahasan berdasarkan isi abstrak. Hasil pencarian kemudian disusun berdasarkan kelompok proses manufaktur yang digunakan pada proses pembuatan SMC.

3. Hasil dan Pembahasan

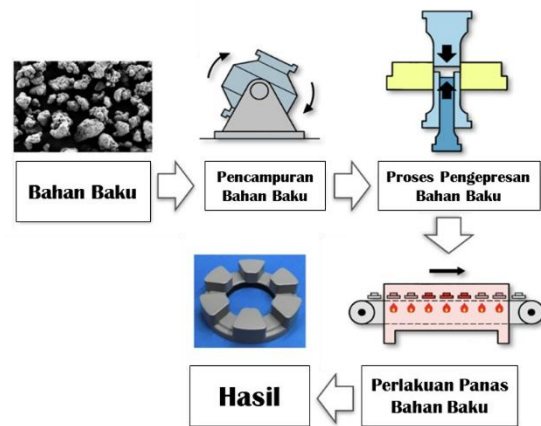
Penelusuran jurnal pada database *Scopus* dengan kata kunci *Soft Magnetic Composite* (SMC) menghasilkan daftar 4.784 judul. Hasil pencarian kemudian dilakukan penyaringan dengan menambahkan kata kunci *manufacturing process* dan diperoleh 146 jurnal. Untuk memastikan hasil pencarian dikerjakan dengan membaca abstrak.

Proses Produksi Soft Magnetic Composite (SMC)

Proses manufaktur *Soft Magnetic Composite* (SMC) dapat dikerjakan dengan metode tradisional dan *Additive Manufacturing* (AM) [8]. Metode produksi tradisional adalah teknik produksi yang dilakukan dalam sekali proses pembentukan dengan tenaga manusia atau bantuan mesin. Sedangkan, metode *additive manufacturing* (AM) merupakan proses pembuatan dengan menambahkan material secara bertahap. Dalam AM, objek dibangun lapis demi lapis berdasarkan desain digital yang dibuat menggunakan perangkat lunak *Computer-Assisted Design* (CAD). Metode AM dikerjakan dengan berbagai macam Teknik sebagaimana yang akan dijelaskan berikutnya.

Metode Produksi Tradisional

Soft Magnetic Composite (SMC) dapat dihasilkan dengan menggunakan *Powder Metallurgy* (PM) [9]. Gambar 3.1 menunjukkan gambaran umum mengenai langkah-langkah proses produksi yang menggunakan teknologi PM. Serbuk logam sebagai bahan dasar dan pengikat dipersiapkan dan dicampur sebelum dicetak. Pencampuran dimaksudkan untuk memastikan pengikat yang ditambahkan dapat tercampur secara merata. Material dan bahan yang telah tercampur dengan baik dicetak dengan cetak tekan. Perlakuan panas dikerjakan untuk meningkatkan ikatan partikel sehingga semakin meningkat kekuatan struktur.



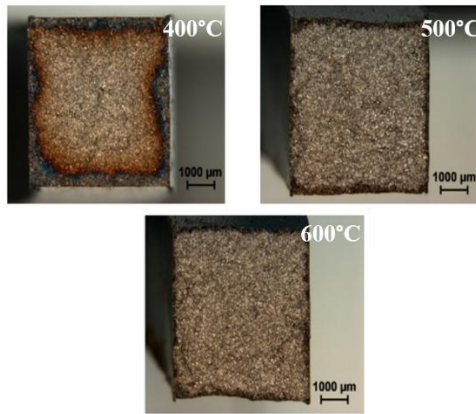
Gambar 1. Skema proses produksi dengan teknologi PM [9]

Gambar 2 memperlihatkan proses produksi stator yang terbuat dari bahan dasar SMC. Penelitian tersebut mencakup dua langkah utama dalam proses produksinya, yaitu pemadatan serbuk dan perlakuan panas. Pada langkah pertama, serbuk SMC dimasukkan ke dalam cetakan inti stator, kemudian ditekan menggunakan mesin hidrolik untuk menghasilkan bentuk dan kepadatan yang diinginkan. Langkah kedua adalah proses pemanasan penggunaan tungku pada suhu tinggi untuk memproses inti mentah sehingga menjadi inti stator siap digunakan sebagaimana gambar 2 bagian i. Gambar 2 pada bagian j, k dan l menunjukkan inti rotor setelah melewati perlakuan panas dengan parameter yang berbeda. Kedua langkah ini mempengaruhi sifat magnetik inti stator dan rotor, dengan perlakuan panas memberikan dampak yang lebih signifikan terhadap variasi sifat magnetik SMC dibandingkan dengan langkah pemadatan, karena terdapat lebih banyak faktor kontrol dalam proses perlakuan panas.



Gambar 2. Langkah pengerjaan Metalurgi serbuk [9]

Oikonomou et al., (2014) [10] melaksanakan penelitian dengan memberikan perlakuan panas pada temperature berbeda pada implementasi teknologi metalurgi serbuk (PM). Variasi temperature perlakuan panas yang digunakan adalah 400, 500, dan 600 °C. Penampang melintang setelah proses perlakuan panas terlihat sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.



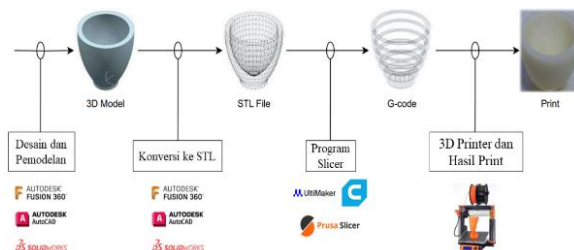
Gambar 3. Penampang melintang SMC setelah perlakuan panas [10]

Penelitian yang dilakukan Liu et al., (2018) [9] dan Oikonomou et al., (2014) [10] mengenai metode produksi tradisional dengan teknologi PM menunjukkan bahwa proses perlakuan panas memiliki pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan proses pemadatan. Untuk mencapai hasil optimal dalam produksi Soft Magnetic Composite (SMC) menggunakan teknologi PM, perhatian khusus harus diberikan pada proses perlakuan panas.

Additive Manufacturing (AM)

Additive Manufacturing (AM) adalah salah satu teknik yang digunakan dalam proses produksi SMC dengan langkah penggabungan material untuk membentuk objek dari data model 3D [8], [11]. Additive Manufacturing memungkinkan pembuatan komponen dengan geometri yang sangat rumit dan kompleks [12]. Implementasi Additive Manufacturing membuka peluang baru untuk meningkatkan industri manufaktur melalui pencetakan bentuk yang baik dengan geometri yang kompleks [13].

Singh et al., (2024) [14] memberikan laporan tentang ringkasan mengenai langkah-langkah dalam proses produksi dengan menggunakan metode Additive Manufacturing (AM), di mana setiap langkah berperan penting dalam menentukan keakuratan, kualitas, dan fungsionalitas produk akhir. Setiap tahap dalam metode AM sangat krusial untuk memastikan bahwa produk akhir memenuhi spesifikasi dan standar kualitas yang diinginkan. Langkah-langkah proses produksi metode AM dapat dilihat pada gambar 4.

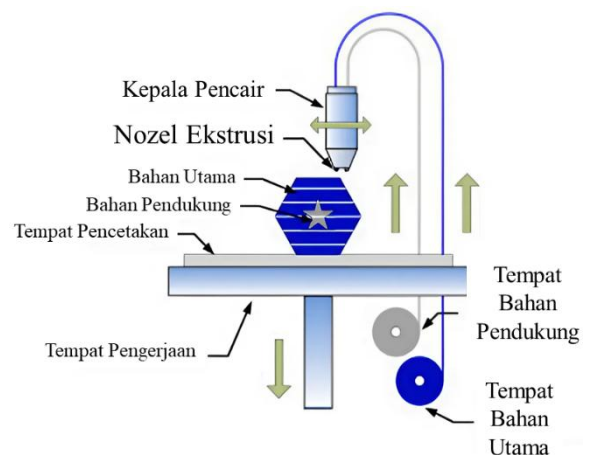


Gambar 4. Langkah kerja metode AM [14]

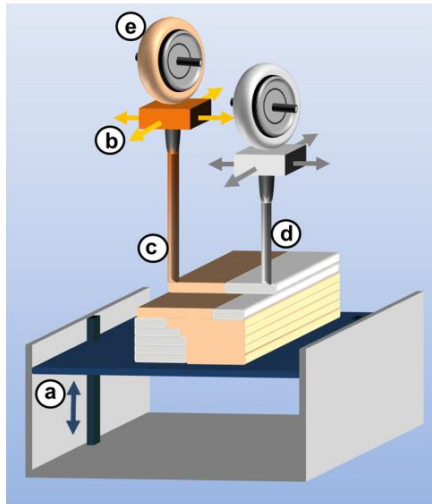
Ligon et al., (2017) [15] menuliskan bahwa menurut standar American Society for Testing and Materials (ASTM) F42 pada tahun 2009 tentang *additive manufacturing* (AM) mengklasifikasikan teknologi pencetakan 3D untuk bahan magnetik lunak ke dalam tujuh kategori utama, yaitu *materials extrusion*, *materials jetting*, *binder jetting*, *sheet lamination*, *vat photopolymerization*, *powder bed fusion*, dan *directed energy deposition*. Lucarini et al., (2022) [8] mencatat bahwa dari ketujuh teknologi tersebut, tiga teknologi yang paling sering digunakan dalam produksi magnet lunak adalah *materials extrusion*, *materials jetting*, dan *vat photopolymerization*.

Material Extrusion (ME)

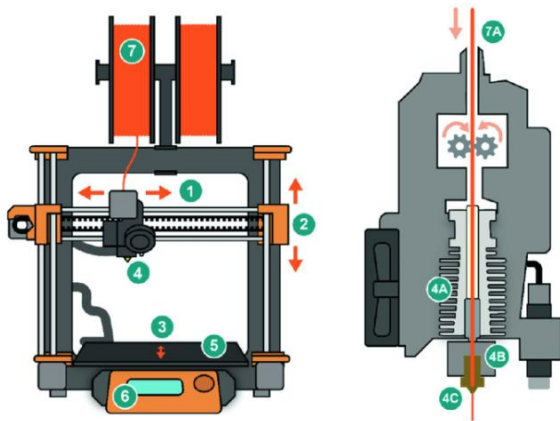
Singh et al., (2024) [14] menjelaskan bahwa pencetakan tiga dimensi kini telah menjadi metode yang lebih umum untuk memproduksi material dengan biaya dan waktu yang lebih efisien. Salah satu teknologi yang sering digunakan adalah *materials extrusion* (ME), atau dikenal juga sebagai *Fused Deposition Modelling* (FDM). Teknik FDM bekerja dengan melelehkan polimer termoplastik dalam bentuk filamen menggunakan panas di ekstruder, lalu mengendapkannya lapis demi lapis pada platform pembuatan sesuai dengan desain komputer. Dalam proses FDM, beberapa kepala cetak dapat digunakan untuk menyimpan berbagai polimer dengan sifat mekanik dan kimia yang berbeda secara bersamaan, memungkinkan pencetakan dengan sifat mekanik yang bervariasi secara spasial. Selain itu, salah satu kepala cetak dapat digunakan untuk menambahkan bahan pendukung untuk struktur pencetakan 3D yang kompleks [8]. Skema pencetakan berbasis *Material Extrusion* dapat dilihat sebagaimana pada gambar 5-7.



Gambar 5. Skema pencetakan berbasis material extrusion [8]



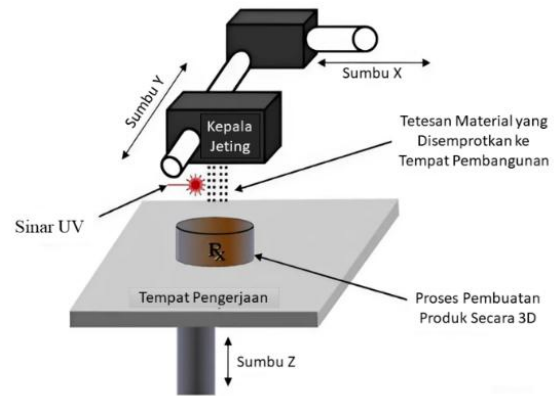
Gambar 6. Pemodelan ME yang dikembangkan oleh Scott Crump di Stratasys, Inc., [15].



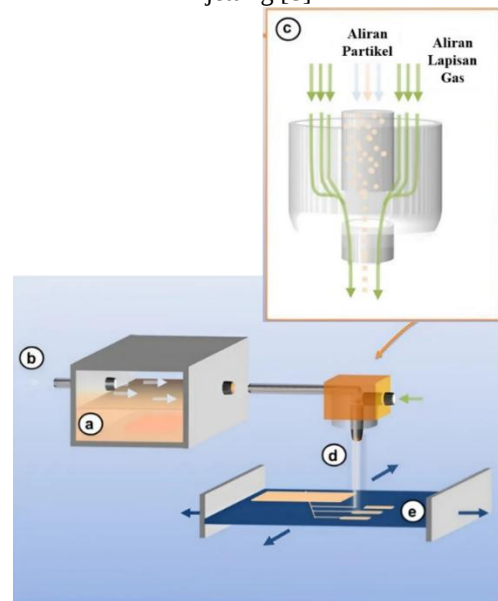
Gambar 7. Diagram skema pencetakan 3D FDM [14].

Material Jetting (MJ)

Material Jetting adalah proses pencetakan material secara 3D yang bekerja dengan memperoleh data pemotongan dari input *computer aided design* (CAD) [8]. Menurut Singh et al., (2024), proses *materials jetting* (MJ) melibatkan konstruksi lapis demi lapis saat material mengeras di atas media, dengan kepala cetak yang dilengkapi nozel bergerak secara horizontal melintasi platform pembuatan. Teknik pencetakan ini memungkinkan pembuatan bentuk dengan struktur yang kompleks. Struktur pendukung dapat ditambahkan sesuai kebutuhan dan dihapus setelah pencetakan selesai. Langkah-langkah pasca-pemrosesan seperti penghapusan penyangga, penyelesaian permukaan, dan pengawetan tambahan mungkin diperlukan untuk bahan tertentu. Selain itu, dalam proses MJ, bahan dipanaskan hingga mencapai viskositas optimal sebelum diendapkan oleh kepala cetak, dan sinar UV digunakan untuk memadatkan material sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Skema pencetakan berbasis *Material Jetting* dari penelitian yang dilakukan Lucarini et al., (2022) dapat dilihat pada gambar 8, sementara skema dari artikel Ligon et al., (2017) dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 8. Skema pencetakan berbasis materials jetting [8]

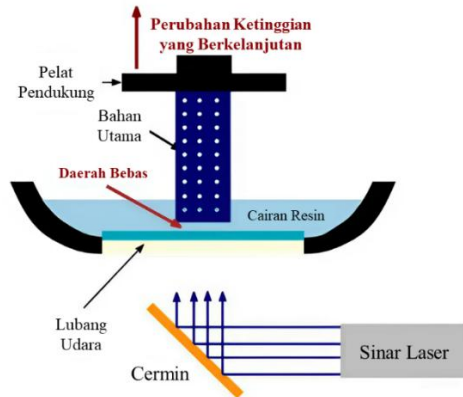


Gambar 9. Skema pencetakan berbasis ME oleh OPTOMECH [15]

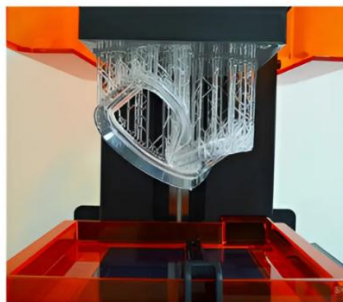
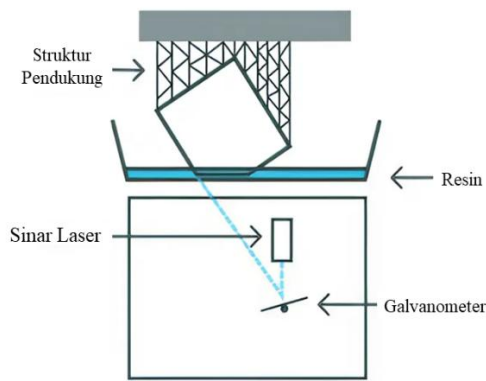
Vat Photopolymerization (VP)

Penelitian yang dilakukan oleh Lucarini et al., (2022) menjelaskan bahwa teknologi *vat photopolymerization* (VP) adalah salah satu metode tertua dalam *Additive Manufacturing* (AM). Biasanya, teknologi VP memanfaatkan sumber cahaya untuk mengeraskan resin fotopolimer yang ada dalam reservoir. Keunggulan utama dari VP adalah kemampuannya untuk menghasilkan komponen dengan detail dan permukaan akhir yang sangat halus, melebihi sebagian besar teknologi pencetakan 3D lainnya, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi yang memerlukan fitur kompleks. Seperti kebanyakan teknologi AM lainnya, proses VP dilakukan secara lapis demi lapis. Dalam teknologi VP, laser UV digunakan untuk menginduksi titik tertentu pada lubang udara dan mengikuti bentuk geometri CAD secara langsung. Setelah satu titik terkena sinar laser UV, kemudian pindah ke titik berikutnya hingga membentuk satu lapisan. Oleh karena itu, waktu yang diperlukan untuk membuat satu potongan struktur bergantung pada kecepatan

pemindaian laser dan area yang di induksi. Skema pencetakan berbasis *vat photopolymerization* dari penelitian yang dilakukan Lucarini et al., (2022) pada gambar 10 dan skema dari artikel Singh et al., (2024) dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 10. Skema pencetakan berbasis Vat Photopolymerization [8]



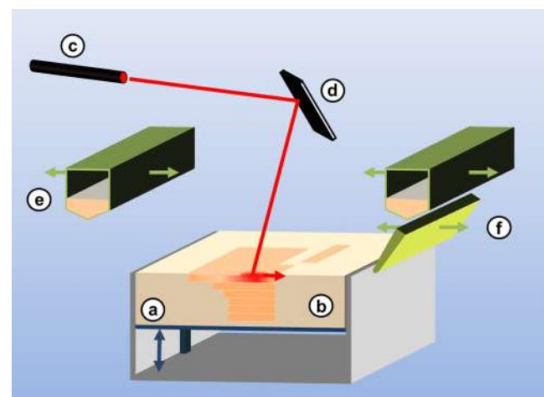
Gambar 11. Skema proses pencetakan VP dan sampel pencetakan [14]

Laser Powder Bed Fusion (LPBF)

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Lucarini et al., (2022), disebutkan bahwa tiga teknologi yang sering digunakan dalam metode *Additive Manufacturing* (AM) adalah *material extrusion*, *material jetting*, dan *vat photopolymerization*. Namun, sejak April 2024, penulis menemukan banyak penelitian mengenai proses produksi *Soft Magnetic Composite* (SMC) yang menggunakan teknologi *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF) melalui mesin pencari *Scopus*. Penelitian-penelitian tersebut meliputi penelitian

yang dilakukan Rodríguez-Sánchez et al., (2024), Oel et al., (2023), Schäfer et al., (2024), Tiismus et al., (2022) dan Özden & Morley, (2023). LPBF diakui secara luas sebagai teknologi yang dapat mengatasi keterbatasan ukuran dan geometri yang sering muncul dalam pemrosesan *Bulk Metallic Glass* (BMG) dan telah diterapkan pada berbagai sistem untuk berbagai aplikasi. Prosedur proses produksi LPBF meliputi pengendapan serbuk, pemadatan serbuk, dan penurunan platform pembangunan sebanyak satu lapisan ketebalan, yang diulang hingga seluruh bagian yang diproduksi selesai.

Dalam proses *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF), pemadatan dilakukan dengan menggunakan sumber laser dan sistem optik laser untuk memindai kontur dan lapisan model berdasarkan data CAD. Radiasi laser diserap oleh partikel serbuk, menyebabkan pemanasan lokal yang mengakibatkan pelunakan, peleburan, dan pemadatan partikel di sekitarnya. Proses deposisi serbuk antara lapisan-lapisan yang disinter dilakukan menggunakan pisau (laser sintering) atau roller (SLS) untuk menyebarkan partikel serbuk yang disuplai oleh satu atau dua hopper yang bergerak melintasi material yang telah dipadatkan, atau dari satu atau dua platform tambahan yang menyediakan bahan serbuk. Selama prosedur ini, ruang proses dipertahankan pada suhu tinggi, beberapa derajat di bawah titik pelunakan bahan yang diproses (Rodríguez-Sánchez et al., 2024). Skema pencetakan berbasis LPBF dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12. Skema pencetakan berbasis LPBF [15]

Pembahasan

Pada penelitian studi literatur dengan judul proses produksi *Soft Magnetic Composite* (SMC) berbahan dasar besi (Fe) mencakup analisis terhadap dua metode utama, yaitu metode tradisional dan metode *Additive Manufacturing* (AM). Adapun ringkasan dari penelitian yang sudah dilakukan tampak pada tabel 1.

Metode tradisional, seperti teknologi *powder metallurgy*, melibatkan proses pemadatan serbuk logam dan perlakuan panas untuk menghasilkan bahan dengan sifat magnetik dan mekanik yang optimal. Proses ini dimulai dengan memasukkan

serbuk SMC ke dalam cetakan, kemudian dipress menggunakan mesin press hidrolik, dan dilanjutkan dengan perlakuan panas untuk meningkatkan sifat magnetiknya. Sementara itu, metode AM, seperti *Materials Extrusion*, *Materials jetting*, *Laser Powder Bed Fusion (LPBF)* dan *vat photopolymerization*, memungkinkan pembuatan objek tiga dimensi dengan menambahkan material secara bertahap berdasarkan desain dari input *computer aided design (CAD)*. Metode ini menawarkan keunggulan dalam hal presisi dan kemampuan untuk menghasilkan struktur kompleks yang tidak dapat dicapai dengan metode tradisional.

Tabel 1. Hasil penelitian SMC dengan metode additive manufacturing dan konvensional

Powder Metallurgy	Additive Manufacturing
1. Mencapai konduktivitas magnetik yang tinggi [20]	1. <i>Liquid-phase sintering</i> efektif meningkatkan kekuatan, permeability, menurunkan power loss [24].
2. Menurunkan core loss pada komposit FeSi [21]	2. <i>Multi-material PBF-LB</i> dapat meningkatkan power density pada motor listrik akan tetapi mempunyai tantangan pada thermal distortion [25]
3. Meningkatkan kualitas magnetik dengan menurunkan core loss pada power application [22]	3. <i>Laser additive manufacturing</i> bisa menjadikan SMC mempunyai sifat baik dengan meminimalkan core loss dan yield strength yang bagus [26].
4. Mampu memperbaiki kualitas magnetik [23]	4. <i>Spark plasma sintering</i> mampu meningkatkan resistivitas elektrik [27]
	5. <i>LPBF</i> yang dioptimasi mampu meningkatkan sifat kemagnetan dan meningkatkan densitas SMC [28].

Namun, teknologi *Additive Manufacturing (AM)* memiliki keterbatasan dalam hal variasi material, ukuran komponen, serta memerlukan pascapemrosesan yang signifikan. Di sisi lain, metode

manufaktur tradisional unggul dalam efisiensi produksi massal, memberikan kekuatan mekanik, isotropi, dan hasil permukaan yang lebih baik karena penggunaan bahan dan proses yang sudah mapan. Meskipun AM dapat mengurangi biaya awal dengan menghilangkan kebutuhan akan cetakan atau perkakas, keunggulan biaya ini berkurang seiring dengan peningkatan skala produksi, berbeda dengan metode tradisional yang memperoleh keuntungan dari skala ekonomi. Oleh karena itu, pemilihan antara AM dan metode tradisional harus disesuaikan dengan tuntutan spesifik proyek, termasuk kompleksitas, volume, dan efisiensi biaya. Pembahasan ini menekankan pentingnya pemilihan metode produksi yang tepat untuk aplikasi tertentu, serta perlunya penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan proses dan meningkatkan efisiensi produksi SMC berbahan dasar Fe.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kami ucapkan kepada Kemendikbud Ristek Dikti melalui pendanaan DRTPM Skema Penelitian Pemula dengan Nomor Kontrak 61/LL11/KM/2024, 167.2/LPPM/A.4/C/2024.

Daftar Pustaka

- [1] G. Zimon *et al.*, "The Impact of Fossil Fuels, Renewable Energy, and Nuclear Energy on South Korea's Environment Based on the STIRPAT Model: ARDL, FMOLS, and CCR Approaches," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 17, p. 6198, Aug. 2023, doi: 10.3390/en16176198.
- [2] E. Sendek-Matysiak, "The Role and Importance of Electric Cars in Shaping a Sustainable Road Transportation System," 2020, pp. 381–390. doi: 10.1007/978-3-030-27687-4_38.
- [3] P. S. Jose, P. S. H. Jose, G. J. J. Wessley, and P. Rajalakshmy, "Environmental Impact of Electric Vehicles," 2022, pp. 31–42. doi: 10.1007/978-3-030-85424-9_2.
- [4] M. Nizam, H. T. Waloyo, A. Mujiyanto, Inayati, and A. Purwanto, "Brushless DC motor torque improvement with magnetic material stator core," *Proceedings of 2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science, ICEECS 2014*, no. November, pp. 158–162, 2014, doi: 10.1109/ICEECS.2014.7045237.
- [5] H. T. Waloyo, U. Ubaidillah, D. Tjahjana, M. Nizam, and ..., "A novel approach on the unipolar axial type eddy current brake model considering the skin effect," *Energies (Basel)*, 2020.
- [6] H. Shokrollahi and K. Janghorban, "Soft magnetic composite materials (SMCs)," *J Mater Process Technol*, vol. 189, no. 1–3, pp. 1–12,

- Jul. 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.02.034.
- [7] M. Rodríguez-Sánchez *et al.*, “Relating laser powder bed fusion process parameters to (micro)structure and to soft magnetic behaviour in a Fe-based bulk metallic glass,” *Materialia (Oxf)*, vol. 35, no. May, 2024, doi: 10.1016/j.mtla.2024.102111.
- [8] S. Lucarini, M. Hossain, and D. Garcia-Gonzalez, “Recent advances in hard-magnetic soft composites: Synthesis, characterisation, computational modelling, and applications,” *Compos Struct*, vol. 279, p. 114800, 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114800.
- [9] C. Liu, G. Lei, B. Ma, Y. Guo, and J. Zhu, “Robust design of a low-cost permanent magnet motor with soft magnetic composite cores considering the manufacturing process and tolerances,” *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 8, pp. 7–9, 2018, doi: 10.3390/en11082025.
- [10] C. Oikonomou, R. Oro, E. Hryha, and L. Nyborg, “Effect of heat treatment in air on surface composition of iron-phosphate based soft magnetic composite components,” *Materials Science and Engineering: B*, vol. 189, pp. 90–99, 2014, doi: 10.1016/j.mseb.2014.08.003.
- [11] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chrysosolouris, “Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, no. 1–4, pp. 389–405, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7576-2.
- [12] V. Chaudhary, S. A. Mantri, R. V. Ramanujan, and R. Banerjee, “Additive manufacturing of magnetic materials,” *Prog Mater Sci*, vol. 114, no. May, p. 100688, 2020, doi: 10.1016/j.pmatsci.2020.100688.
- [13] T. N. N. Lamichhane, L. Sethuraman, A. Dalagan, H. Wang, J. Keller, and M. P. P. Paranthaman, “Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines—a review,” *Materials Today Physics*, vol. 15, p. 100255, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.mtphys.2020.100255.
- [14] G. Singh, A. Mehta, and H. Vasudev, “Sustainability of additive manufacturing: a comprehensive review,” *Progress in Additive Manufacturing*, 2024, doi: 10.1007/s40964-024-00579-z.
- [15] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, “Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing,” *Chem Rev*, vol. 117, no. 15, pp. 10212–10290, 2017, doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
- [16] M. Oel *et al.*, “Multi-material laser powder bed fusion additive manufacturing of concentrated wound stator teeth,” *Additive Manufacturing Letters*, vol. 7, no. July, p. 100165, 2023, doi: 10.1016/j.addlet.2023.100165.
- [17] K. Schäfer *et al.*, “Magneto-active composites with locally tailored stiffness produced by laser powder bed fusion,” *Addit Manuf*, vol. 79, no. November 2023, pp. 1–15, 2024, doi: 10.1016/j.addma.2023.103905.
- [18] H. Tiismus *et al.*, “Laser Additively Manufactured Magnetic Core Design and Process for Electrical Machine Applications,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 10, 2022, doi: 10.3390/en15103665.
- [19] M. G. Özden and N. A. Morley, “Optimizing laser additive manufacturing process for Fe-based nano-crystalline magnetic materials,” *J Alloys Compd*, vol. 960, p. 170644, 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.170644.
- [20] H. Huang, R. Wang, K. Li, B. Dai, Z. Wu, and P. Lyu, “Fabrication of high-performance FeSiCr-based soft magnetic composites using thermal decomposition of salt compounds,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 29, pp. 3291–3302, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.02.081.
- [21] R. Zhao *et al.*, “The influence of FeNi nanoparticles on the microstructures and soft magnetic properties of FeSi soft magnetic composites,” *Advanced Powder Technology*, vol. 33, no. 8, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.appt.2022.103663.
- [22] Y. Xu *et al.*, “Design, fabrication, and magnetic properties of iron-based soft magnetic composites with La₂NiMnO₆ ferromagnetic insulation layer,” *Ceram Int*, vol. 49, no. 24, pp. 40347–40357, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.ceramint.2023.10.007.
- [23] A. Talaat, J. Egbu, C. Phatak, K. Byerly, M. E. McHenry, and P. R. Ohodnicki, “Nanostructure refinement and phase formation of flash annealed FeNi-based soft magnetic alloys,” *Mater Res Bull*, vol. 152, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.materresbull.2022.111839.
- [24] J. Sun *et al.*, “High-strength FeSiCr soft magnetic composite fabricated via liquid-phase sintering for high-frequency applications,” *J Alloys Compd*, vol. 980, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.jallcom.2024.173691.

- [25] M. Oel *et al.*, “Multi-material laser powder bed fusion additive manufacturing of concentrated wound stator teeth,” *Additive Manufacturing Letters*, vol. 7, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.addlet.2023.100165.
- [26] H. Tiismus *et al.*, “Laser Additively Manufactured Magnetic Core Design and Process for Electrical Machine Applications,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/en15103665.
- [27] T. F. Marinca *et al.*, “Soft magnetic composite of Ni₃Fe/ZnFe₂O₄ type obtained by mechanical alloying/milling and spark plasma sintering,” *Ceram Int*, vol. 50, no. 5, pp. 7547–7557, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ceramint.2023.12.061.
- [28] M. G. Özden and N. A. Morley, “Optimizing laser additive manufacturing process for Fe-based nano-crystalline magnetic materials,” *J Alloys Compd*, vol. 960, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.170644.