

Pengaruh Jumlah Partikel SiC Terhadap Karakteristik Material FeCuAl Dibuat Melalui Teknik Metalurgi Serbuk

Suprianto*, Muhammad Farhan, Mahadi, Rio Anggy Pradana, Mhd. Arie Widodo

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara
Jalan Almamater Kampus USU, Padang Bulan, Medan, 20155, INDONESIA.

*E-mail: suprianto@usu.ac.id

Diajukan: 22-01-2025; Diterima: 16-04-2025; Diterbitkan: 29-04-2025

Abstrak

Paduan logam FeCuAl potensial dikembangkan untuk aplikasi bidang keteknikan dikarenakan sifat mekanis yang cukup baik. Perbaikan sifat mekanis bisa dilakukan melalui berbagai cara diantaranya dengan penambahan karbida. Penelitian ini bertujuan memperbaiki sifat mekanis dan fisis paduan FeCuAl melalui penambahan partikel SiC menggunakan teknik metalurgi serbuk. Partikel SiC (2~8) wt.% ditambahkan ke serbuk Fe, Cu, dan Al menggunakan model pencampuran *horizontal milling* pada kecepatan 300 rpm selama 2 jam. Proses *cold compaction* dengan penekanan 250 MPa selama 15 menit dilanjutkan dengan *sintering* pada temperatur 1000°C. Karakteristik mekanis paduan diperoleh melalui pengujian kekerasan Vicker, *compressive test*, dan keausan. Observasi mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dan *scanning electron microscope* (SEM) untuk melihat bentuk patahan. Pengukuran konduktivitas listrik menggunakan Keithley 6517B Electrometer. Hasil pengujian diperoleh densitas terendah 4,7 gr/cm³ dan kekerasan tertinggi 117,6 ±2,2 HV untuk model material FeCuAl-8 wt.%SiC. Hasil ini berkesesuaian dengan ketahanan aus, dimana laju keausan terendah 3,2±1,1 x10⁻⁶ (mm³/N.mm) dan kekuatan tekan tertinggi 526 MPa diperoleh untuk 8 wt.%SiC. Besarnya kekuatan FeCuAl-xSiC dipengaruhi oleh mikrostruktur, dimana hasil observasi memperlihatkan terbentuknya oksida dan porositas diantara butiran Fe/Cu. Lebih lanjut, hasil pengujian kelistrikan diperoleh keberadaan partikel SiC menurunkan konduktivitas listrik, nilai terendah diperoleh 23% IACS untuk kandungan 8 wt.%SiC. Berdasarkan data hasil pengujian tekan, kekerasan, dan keausan dapat disimpulkan bahwa penambahan SiC pada rentang 2-8 wt.% berhasil meningkatkan sifat mekanis paduan FeCuAl. Dibagian lain, peningkatan kandungan partikel SiC berdampak terhadap penurunan konduktivitas listrik paduan.

Kata kunci: *dispersion*; konduktivitas; paduan; sifat mekanis; karbida silikon

Abstract

FeCuAl alloys are potential to be applied in engineering field applications because of their good mechanical properties. The mechanical properties improvement can be done by varying method like introducing carbides. The aim of this current study to improve the mechanical properties of the FeCuAl through the addition of varying wt.% SiC particles synthesized by powder metallurgy. The (2~8) wt.% SiC added into Fe, Cu, and Al powders in the horizontal milling during mixing with 300 rpm of speed for 2 h. Cold compaction at 250 MPa for 15 minute subsequently by the sintering process at 1000°C. The characteristics of FeCuAl-xSiC by Vickers hardness, compressive, and wear tests. Furthermore, the microstructure observation by using optical microscope and scanning electron microscope (SEM) to investigate fracture morphologies. Electrical conductivity measurement was carried out by Keithley 6517B Electrometer. The lowest density was 4.7 g/cm³, and the highest hardness was 117.6 HV for the material FeCuAl-8 wt.% SiC, which were obtained. These results correspond to wear resistance, in which the lowest wear rate (3,2±1,1 x10⁻⁶ mm³/N.mm) and the highest compressive strength for 8 wt.% SiC were obtained. The strength of the FeCuAl-xSiC has been strongly correlated with the microstructure, oxides and porosities formed between Fe/Cu grains were observed. Furthermore, the presence of the SiC particles tends to reduce the electrical conductivity, with the conductivity being 23% IACS for the highest SiC particle. Based on the compressive strength, hardness, and wear test results, it can be concluded that the addition of SiC with 2-8 wt.% successfully improved the mechanical properties of the FeCuAl. On the other hand, the increase of SiC particles causes a decrease in the electrical conductivity of the alloy.

Keywords: *dispersion*; conductivity; alloys; mechanical properties; silicone carbide

1. Pendahuluan

Pengembangan material paduan logam terus berkembang dalam rangka memenuhi kebutuhan berbagai bidang khususnya keteknikan seperti aplikasi pada piston, *crankshap*, roda gigi, busung, dan elektroda. Paduan berbasis Fe dikombinasikan dengan elemen lain paling banyak dikembangkan hingga saat ini terutama sistem Fe-C. Luasnya

penggunaan paduan Fe dikarenakan sifat mekanis yang cukup baik dan biaya relatif murah. Paduan logam dengan Fe sebagai penyusun utama memiliki sifat mekanis yang cukup tinggi diantaranya Cu-5Fe disintesis menggunakan teknik metalurgi serbuk dapat melebihi 206 MPa [1], sintesis paduan Cu-Al untuk kebutuhan roda gigi juga telah dilakukan, namun kekerasan belum cukup memadai [2]. Penambahan C pada baja karbon medium dapat mencapai diatas 300 MPa (0,33 wt.%), terus naik hingga sekitar 500 MPa pada 0,55 wt.%C [3]. Peningkatan kekuatan pada sistem Fe-C diyakini dipengaruhi oleh terbentuknya fase martensit. Namun, keberadaan fase ini secara berlebihan berdampak buruk terhadap ketangguhan paduan logam. Permasalahan kekuatan dan *ductility* dari paduan merupakan hal yang penting diperhatikan untuk aplikasi di bidang keteknikan. Lebih lanjut, kombinasi serbuk Fe dengan elemen lain telah banyak dilakukan diantaranya Fe-Cu/C [4], Fe-Al-Si [5], dan FeCu-0,5Al *alloys* [6]. Mekanisme penguatan logam juga bisa dilakukan melalui penambahan partikel karbida atau oksida. Keberadaan partikel Y_2O_3 di paduan Fe-Ni meningkatkan kekerasan hingga 6,2 GPa [7], Partikel SiC juga telah digunakan pada nano komposit Cu-Fe [8], penambahan SiC telah berhasil meningkatkan kekerasan dan mengurangi laju keausan dari kedua material Cu dan Sn-Sb-Cu secara berurutan [9][10]. Selain jumlah partikel pemerkuat, distribusi yang homogen dari partikel juga berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan Al₁₂SiCu komposit [11]. Distribusi yang lebih homogen setiap elemen penyusun dan sintesis material dengan penambahan partikel *reinforcement* yang memiliki titik cair tinggi dapat dilakukan melalui metalurgi serbuk.

Komposit matrik logam yang diperkuat partikel Y_2O_3 di paduan Al-Cu dengan berbagai ukuran serbuk yang berbeda [12] telah dilakukan. Peningkatan nilai kekerasan, pengurangan densitas dan ketahanan korosi diperoleh melalui penambahan (1-4) wt.%SiC berukuran 8 μm ke dalam paduan Fe [13]. Partikel SiC ditambahkan ke paduan Aluminium 6061-Cu dan SiC ke Cu *alloy* juga dilakukan menggunakan *stir casting* [14, 15]. Keberadaan SiC di dalam paduan logam meningkatkan kekerasan, namun menurunkan konduktivitas listrik seperti SiC-Ni [16]. Maka penambahan SiC harus mempertimbangkan dampaknya terhadap berbagai karakteristik suatu paduan logam.

Berdasarkan uraian diatas studi karakteristik material Fe *alloy* telah banyak dilakukan, namun FeCuAl-xSiC disintesis menggunakan teknik metalurgi serbuk masih sangat terbatas, terutama pengaruh SiC terhadap konduktivitas listrik paduan tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk melihat bagaimana peran partikel SiC dalam meningkatkan berbagai sifat mekanis seperti kekerasan, tekan, dan ketahanan aus serta pengaruh partikel terhadap konduktivitas listrik paduan FeCuAl-xSiC.

2. Material dan metodologi

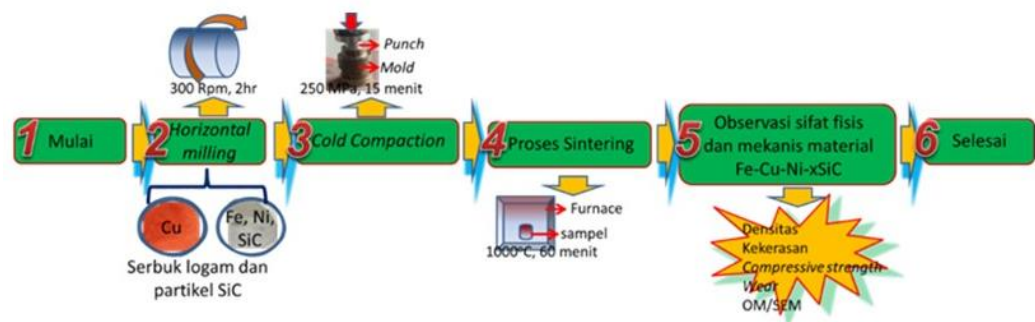
Sintesis paduan logam FeCuAl-xSiC menggunakan material serbuk Fe, Cu, Al kemurnian > 99,5%, partikel SiC kemurnian > 98% dan ukuran $\pm 40 \mu m$. Disain model material yang diperkuat partikel SiC diperlihatkan pada tabel 1.

Tabel 1. Komposisi paduan FeCuAl-xSiC dengan berbagai komposisi SiC

Model paduan	Elemen penyusun (wt.%)			
	Cu	Al	SiC	Fe
FeCuAl-2SiC	10,0	0,5	2,0	Balance
FeCuAl-4SiC	10,0	0,5	4,0	Balance
FeCuAl-6SiC	10,0	0,5	6,0	Balance
FeCuAl-8SiC	10,0	0,5	8,0	Balance

Komposisi material paduan yang telah ditetapkan pada tabel 1 selanjutnya dilakukan proses sintesis menggunakan teknik metalurgi serbuk, adapun skema proses sintesis yang diterapkan pada penelitian ini seperti diperlihatkan pada Gambar 1.

Proses pencampuran serbuk menggunakan metode *horizontal milling* pada putaran 300 Rpm selama 2 jam kondisi kering. Serbuk yang telah dicampur dilanjutkan *cold compaction* tekanan konstan 250 MPa selama 15 menit untuk menghasilkan FeCuAl-xSiC *green material*, diikuti *sintering* menggunakan *muffle furnace* temperatur 1000°C *holding time* 60 menit. Temperatur *sintering* yang digunakan diambil pada rentang 70-90% dari titik cair logam, dan waktu tidak terlalu lama untuk mencegah oksidasi berlebih. Selanjutnya, karakterisasi *bulk material* dilakukan melalui berbagai metode diantaranya pengukuran densitas, kekerasan Vickers beban 100 gr selama 15 detik. Sampel uji *compressive yield strength* FeCuAl-xSiC mengacu ASTM B925-03 dengan panjang 25,53 mm dan diameter 9,53 mm [17]. Pengujian keausan menggunakan model *pin on disk* kondisi *dry sliding* pembebanan 5 Newton, kecepatan 600 rpm selama 20 menit, untuk pengujian *pin on disk* secara umum mengacu kepada ASTM G99 [18].

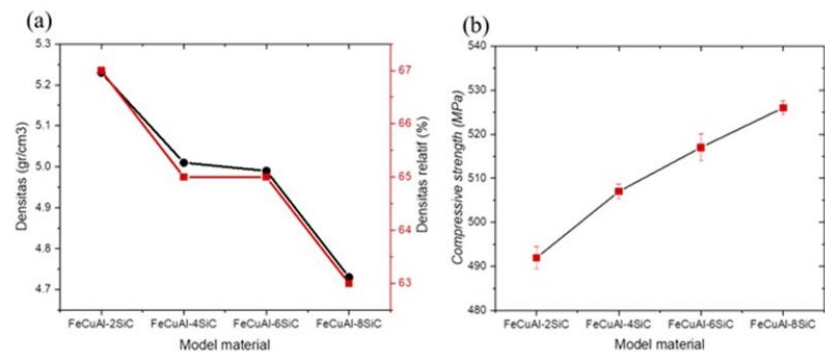


Gambar 1. Skema proses sintesis paduan FeCuAl-xSiC menggunakan teknologi metalurgi serbuk

Observasi mikrostruktur menggunakan mikroskop optik pada berbagai pembesaran dan bentuk permukaan *fracture* sampel uji tekan diamati menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Sampel model material FeCuAl-xSiC juga dilakukan pengujian karakteristik kelistrikan menggunakan peralatan Keithley 6517B Electrometer.

3. Hasil dan pembahasan

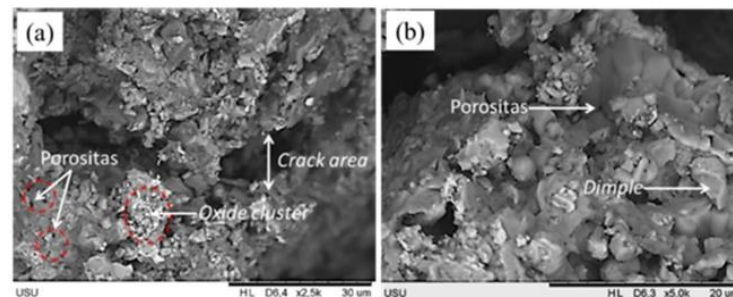
Gambar 2 memperlihatkan densitas dan *compressive yield strength* berbagai model material dengan komposisi SiC yang berbeda. Hasil pengujian terlihat penambahan SiC pada paduan FeCuAl menurunkan densitas, lihat Gambar 2a. Hal ini berkesesuaian dengan fakta partikel SiC memiliki densitas lebih rendah dibanding dengan elemen utama (Fe, Cu), densitas SiC ±3,21 gr/cm³ lebih rendah dibanding 7,86 gr/cm³ dan 8,89 gr/cm³ untuk Fe dan Cu murni secara berurutan [19–21]. Peningkatan komposisi SiC tidak menurunkan densitas secara linier, khususnya penambahan 4 dan 6 wt.% SiC terlihat penurunan ± 0,1 gr/cm³.



Gambar 2. (a) Densitas dan (b) *Compressive strength* material FeCuAl-xSiC dengan berbagai variasi partikel SiC

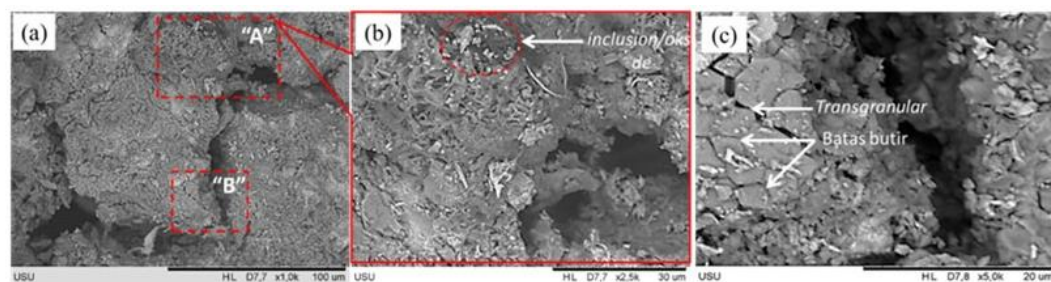
Hasil ini mengkonfirmasi bahwa densitas tidak hanya dipengaruhi unsur penyusun, namun faktor lain seperti *voids*, oksidasi, dan distribusi partikel diyakini berkontribusi terhadap densitas.

Pengujian *compressive strength* paduan FeCuAl-xSiC diperoleh penambahan (2-8) wt. %SiC berdampak terhadap kekuatan tekan. Kekuatan tertinggi 526 MPa dan terendah 492 MPa untuk FeCuAl-8 wt.%SiC dan FeCuAl-2 wt.%SiC berurutan. Peningkatan yang terjadi tidak signifikan diperkirakan sebesar $\pm 7,0\%$, lihat Gambar 2b. Penambahan partikel SiC dan ukuran yang lebih kecil diyakini dapat meningkatkan kekuatan tekan, hal ini telah diperoleh pada berbagai paduan seperti komposit Al-SiC [22]. Observasi bentuk patahan sampel uji tekan paduan FeCuAl-xSiC dilakukan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM), hasil pengamatan diperlihatkan pada Gambar 3 dan 4.



Gambar 3. SEM image patahan sampel paduan FeCuAl-2,0 wt.%SiC dengan pembesaran (a) 2,5k dan (b) 5k.

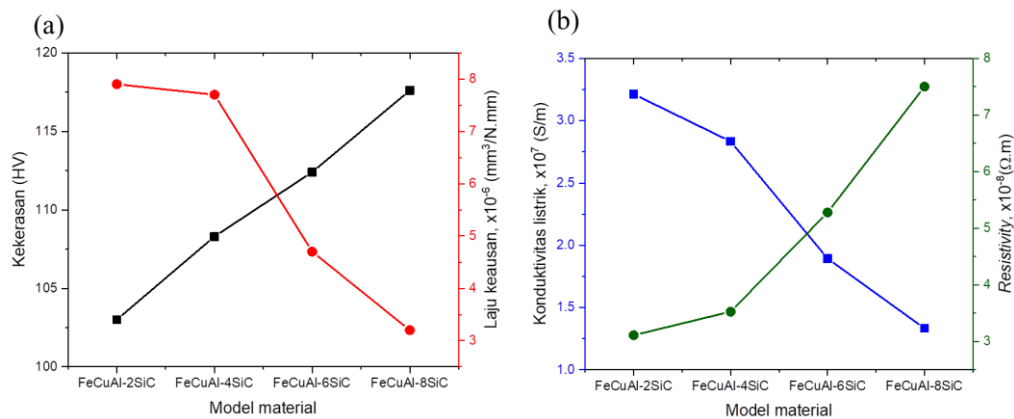
Gambar 3a memperlihatkan area *crack* material FeCuAl-2 wt.%SiC lebar $< 15 \mu\text{m}$ dengan pembesaran 2,5K. Pada area dekat tepi *crack* terbentuk *cluster* oksida/kontaminan diantara mikrostruktur, diindikasikan sebagai area berwarna cerah. Porositas skala *micro* terbentuk diantara butir material FeCuAl-2 wt.%SiC, ukuran porositas $< 1 \mu\text{m}$ teramati di area batas butir (Gambar 3b). Keberadaan *cluster* oksida dan porositas diantara mikrostruktur berkontribusi menurunkan kekuatan. Bentuk patahan FeCuAl yang memiliki kandungan 8 wt.%SiC diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. SEM image; a) Morfologi patahan sampel paduan FeCuAl-8 wt.%SiC, (b) perbesaran patahan area “A”, dan (c) patahan area “B”.

Hasil observasi terlihat *crack* terjadi dimulai pada area tepi sampel memiliki ukuran skala makro dan mikro, hingga proses penekanan selesai dengan 40% pemendekan. Bentuk dan dimensi lebar *crack* yang terjadi diantara 20-50 μm , seperti diperlihatkan pada Gambar 4a. Ukuran *crack* yang lebih besar pada FeCuAl-8 wt.%SiC mengindikasikan material ini lebih *brittle* dibanding FeCuAl-2 wt.%SiC (Gambar 4). Inklusi/oksida dengan partikel halus yang berwarna cerah juga teramati diantara mikrostruktur, lihat Gambar 4b. Pada bagian lain, perbesaran area “B” memperlihatkan *crack* terjadi melalui batas butir (Gambar 4c), hal ini mengkonfirmasi daerah batas butir rentan terhadap terjadinya kerusakan.

Gambar 5 hasil pengujian mekanis dan elektrik CuFeAl dengan variasi komposisi SiC, kekerasan terendah $103 \pm 6,0$ HV dan tertinggi $117,6 \pm 2,2$ HV diperoleh untuk FeCuAl-2 wt.%SiC dan FeCuAl-8 wt.%SiC berurutan, lihat Gambar 5a. Peningkatan ini berkorelasi langsung dengan jumlah partikel SiC yang memiliki kekerasan awal lebih tinggi daripada elemen penyusun lainnya (Fe, Cu, Al). Kekerasan yang diperoleh pada studi FeCuAl-xSiC ini berkesesuaian dengan observasi mikrostruktur, dimana ukuran butir lebih halus dan sedikit porositas diperlihatkan pada Gambar 6d.

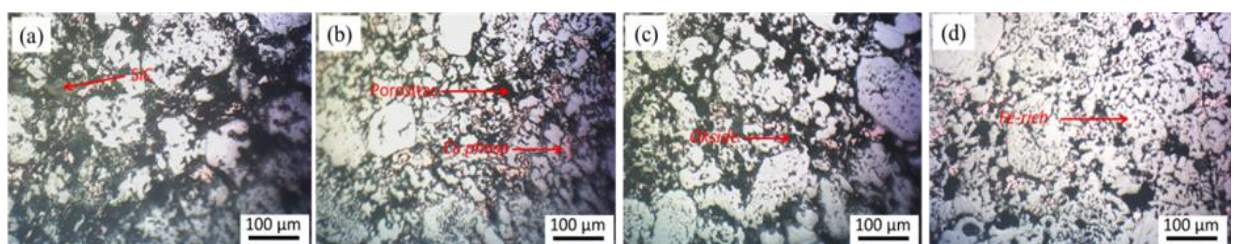


Gambar 5. Karakteristik material FeCuAl-xSiC; (a) kekerasan dan laju keausan dan (b) konduktivitas listrik dan resistivity dengan berbagai variasi partikel SiC

Gambar 5a juga menampilkan hasil uji keausan material FeCuAl-xSiC, terlihat penambahan partikel SiC dari 2-8 wt.% meningkatkan kekerasan secara linier dan berkorelasi positif terhadap penurunan laju keausan material. Laju keausan tertinggi $7,9 \pm 1,2 \times 10^{-6}$ ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$) dan terendah $3,2 \pm 1,1 \times 10^{-6}$ ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$) diperoleh pada model material FeCuAl-2SiC dan FeCuAl-8SiC secara berurutan. Hasil ini memperlihatkan bahwa penambahan SiC meningkatkan ketahanan aus material FeCuAl. Keberadaan partikel SiC dan kontribusinya terhadap penurunan laju keausan sejalan dengan kekerasan juga telah dilaporkan terjadi pada Fe-Cu alloy [23].

Gambar 5b hasil pengujian kelistrikan, hasil pengujian diperoleh penambahan SiC ke dalam FeCuAl menurunkan konduktivitas listrik. Konduktivitas berada pada rentang $3,2 \times 10^7$ S/m dan $1,3 \times 10^7$ S/m setara dengan 55 IACS dan 23 IACS untuk FeCuAl-2SiC dan FeCuAl-8SiC. Penurunan konduktivitas dipengaruhi diantaranya; oksidasi, kekosongan, dan penambahan SiC yang memiliki konduktivitas lebih rendah. Penurunan konduktivitas listrik seiring dengan peningkatan wt.%SiC juga terjadi pada material Cu-Ni composite telah dilaporkan pada penelitian lain [24]. Sebaliknya resistivity listrik FeCuAl-xSiC memperlihatkan kenaikan seiring dengan meningkatnya SiC, resistivity tertinggi $7,5 \times 10^{-8}$ $\Omega\cdot\text{m}$ pada FeCuAl-8SiC. Peningkatan resistivity akan mengurangi kemampuan material untuk menghantarkan listrik.

Observasi mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop optik pada paduan FeCuAl-xSiC dengan berbagai komposisi SiC, lihat Gambar 6.



Gambar 6. Mikrostruktur paduan Fe-Cu-Ni-xSiC variasi SiC; (a) 2 wt.%, (b) 4 wt.%, (c) 6 wt.%, dan (d) 8 wt.%

Mikrostruktur terdiri dari tiga fase utama yang terdiri dari Fe *rich*, Cu elemen, dan oksida yang masing-masing diasosiasikan dengan warna cerah, *orange*, dan *dark gray* secara berurutan. Penambahan SiC dengan titik sublim/penguapan 2700°C tidak larut dalam kondisi padat membentuk *solid solution* di temperatur *sintering* 1000°C. Namun mekanisme penguatan SiC di matrik melalui *dispersion strengthening*, hal ini juga telah dilaporkan pada pembuatan komposit Cu based *alloy* diperkuat SiC dan WC [25]. Lebih lanjut, terbentuknya porositas/*void* diantara mikrostruktur dengan area yang berwarna gelap juga terlihat. Berdasarkan hasil observasi diperoleh ukuran butir dari material FeCuAl-8 wt.%SiC lebih kecil dan homogen serta jumlah area oksida relatif lebih sedikit (Gambar 3d).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap material FeCuAl-xSiC disintesis menggunakan teknik metalurgi serbuk dapat ditarik. Penambahan SiC pada FeCuAl berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan dan menurunkan densitas. Selanjutnya, peningkatan kekerasan juga berkorelasi positif terhadap penurunan laju keausan hingga diatas 50% dan kekuatan tekan 526 MPa untuk 8 wt.%SiC. Karakteristik listrik material FeCuAl-xSiC memperlihatkan penurunan yang signifikan dalam hal konduktivitas listrik dengan penambahan partikel SiC hingga 8 wt.%. Berdasarkan fakta-fakta yang diperoleh penambahan SiC dalam usaha meningkatkan sifat mekanis perlu menjadi perhatian dan pertimbangan yang tepat dikarenakan partikel ini dapat menurunkan keuletan dan konduktivitas listrik.

Ucapan terima kasih

Terima kasih diucapkan kepada Universitas Sumatera Utara yang telah membiayai penelitian ini sesuai kontrak Nomor: 193/UN5.2.3.1/PPM/KP-TALENTA/R/2023 tertanggal 29 Agustus 2023 melalui program penelitian TALENTA kelompok penelitian reputasi skema penelitian terapan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua anggota *Alloy and Metal Processing Research Center*.

Daftar Pustaka

- [1] Zhang, P., Yuan, X., Zeng, Z., et al., Influence of Fe content on microstructure and performance of powder metallurgy Cu – Fe alloys. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2024; 34: 1571–1587.
- [2] Alfauzi, A.S., Purnomo, A., Tjahjono, B., et al., Pembuatan Roda Gigi dari Bahan Serbuk Logam Tembaga dan Aluminium dengan Proses Kompaksi. Jurnal Rekayasa Mesin. 2019; 14: 121–127.
- [3] Calik, A., Duzgun, A., Sahin, O., et al., Effect of Carbon Content on the Mechanical Properties of Medium Carbon Steels. Zeitschrift für Naturforschung A. 2010; 65a: 468–472.
- [4] Nicolicescu, C., Zorila, D., Nicoară, V., et al., Research Regarding The Influence Of Copper Powders On Tensile Strength Of Sintered Steels. Advanced Engineering Forum. 2015; 13: 103–108.
- [5] Novák, P., Vanka, T., Nová, K., et al., Structure and Properties of Fe – Al – Si Alloy Prepared by Mechanical Alloying. Material. 2019; 12: 1–18.
- [6] Suprianto, Bangun, M.F.J., Ariani, F., et al., Study on Characteristics of The Fe-Cu-0.5wt.%Al Alloys Synthesized by Powder Metallurgy with Different Fe / Cu Ratio. In: The International Engineering Conference 13th. Semarang, Indonesia: E3S Web of conferences. 2024; pp. 1–10.

- [7] Arora, A., Kumar, A., Mula, S., Effect of Y2O3 on Mechanical and Corrosion Properties of Fe and Fe-Ni Alloys Prepared by Mechanical Alloying Followed by Spark Plasma Sintering. *J Mater Eng Perform*. 2021; 30: 1387–1397.
- [8] Rabiee, M., Mirzadeh, H., Ataie, A., Processing of Cu-Fe and Cu-Fe-SiC nanocomposites by mechanical alloying. *Advanced Powder Technology*. 2017; 28: 1882–1887.
- [9] Câmara, N.T., Raimundo, R.A., Lourenço CS, et al. Impact of the SiC addition on the morphological , structural and mechanical properties of Cu-SiC composite powders prepared by high energy milling. *Advanced Powder Technology*. 2021; 32: 2950–2961.
- [10] Abioye, T.E, Zuhailawati, H., Azlan, M.A.I., et al., Effects of SiC additions on the microstructure , compressive strength and wear resistance of Sn-Sb-Cu bearing alloy formed via powder metallurgy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020; 9: 13196–13205.
- [11] Radhika, N., Jojith, R., Vignesh, S., et al., Characterization , mechanical properties , and wear behavior of functionally graded aluminum hybrid composite. *Sci Rep*. 2024; 14: 1–17.
- [12] Kerthanegara, I.D.M.A.P., Sahbana, M.A., Fadhillah, A.R., Pengaruh Ukuran Butir Serbuk Al-Cu terhadap Nilai Kekerasan dan Struktur Mikro Metal Matrix Composite Al-Cu + Al2O3. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 2022; 17: 351–360.
- [13] Karabulut, H., Erden, M.A., Karacif, K., et al., Investigation of the effects of SiC reinforcement ratio in iron-based composite materials on corrosion properties. *The journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2022; 122: 317-322.
- [14] Sumarji, Danny Febriansyah, Darsin, M, et al., The effect of SiC and Cu weight fraction on the characteristics of Al 6061 composite. *Polimesin*. 2023; 20: 121–127.
- [15] Samal, P., Tarai, H., Meher, A., et al., Effect of SiC and WC Reinforcements on Microstructural and Mechanical Characteristics of Copper Alloy-Based Metal Matrix Composites Using Stir Casting Route. *Applied Sciences*. 2023; 13: 1–18.
- [16] Makled, H.M., Chowdhury, M.N., Ali, A.I., et al., Investigation of the effect of SiC content on the microstructure, physical properties and hardness of SiC/Ni composites. *Funtional Materials*. 2019; 26: 92–99.
- [17] American society for testing and materials. Standard practices for production and preparation of powder metallurgy (P/M) test specimens. Designation: B 925. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States: ASTM Interantional; 2003.
- [18] American society for testing and materials. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-disk Apparatus. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States: ASTM Interantional; 2020.
- [19] Sharifyan, A., Ranjbaran, N., Nasiri, A., Fabrication, microstructure, mechanical properties and wear behavior of Al/Cu-SiCw composite. *Heliyon*. 2024; 10: 1–12.
- [20] Choisez, L., Van Ende, M.A., Bruyr, Z., et al., Influence of impurities on the use of Fe-based powder as sustainable fuel. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2024; 382: 20230236.
- [21] Malec, W., Kulasa, J., Brudny, A, et al., Comparative Studies of the Properties of Copper Components: Conventional vs. Additive Manufacturing Technologies. *Metals*. 2024; 14: 975.
- [22] El-Kady, O., Fathy, A., Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites. *Mater Des*. 2014; 54: 348–353.

- [23] Öksüz, K.E., Gün, T., Şimşir, M., Characterization and mechanical properties of PM Fe-Cu/SiCp alloys. *Adv Mat Res.* 2014; 829: 73–77.
- [24] Cruz-Cruz, I., Hernández-Maya, R., Reséndiz-Hernández, J.E., et al., Copper-Nickel/SiC composites for applications on contact electrodes. *Heliyon.* 2024; 10: 1–13.
- [25] Samal, P., Tarai, H., Meher, A., et al., Effect of SiC and WC Reinforcements on Microstructural and Mechanical Characteristics of Copper Alloy-Based Metal Matrix Composites Using Stir Casting Route. *Applied Sciences* . 2023; 13: 1-18.