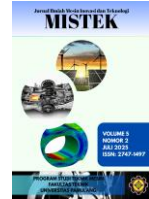




JURNAL TEKNIK MESIN MISTEK MESIN INOVASI DAN TEKNOLOGI



ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR SINTERING TERHADAP SIFAT MEKANIK PADUAN $Fe-Al$ DAN SiO_2 SEBAGAI BAHAN ALTERNATIF BUSI MOTOR

Muthia Zahra¹, Abdul Choliq²

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No.1, Tangerang Selatan, Indonesia

E-mail: iammutiazahraofficial@gmail.com¹

Masuk : 19 Mei 2025

Direvisi : 23 Juni 2025

Disetujui : 07 Juli 2025

Abstrak: Metalurgi serbuk merupakan salah satu metode alternatif dalam pengembangan material paduan karena mampu menghasilkan material dengan struktur mikro yang lebih homogen serta sifat mekanik yang terkendali. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur sintering terhadap sifat mekanik dan karakteristik struktur mikro paduan $Fe-Al-SiO_2$ sebagai bahan alternatif busi motor. Material paduan disiapkan dengan komposisi Fe 50%, Al 40%, dan SiO_2 10% melalui proses *High Energy Milling (HEM)* selama 3 jam. Serbuk hasil *milling* kemudian dikompaksi dan disintering pada variasi suhu 300°C, 400°C, dan 450°C. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Rockwell skala HRA dengan beban mayor 60 kg dan indenter kerucut intan, sedangkan karakterisasi struktur mikro dan komposisi unsur dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive Spectroscopy (SEM–EDS)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur sintering cenderung meningkatkan nilai kekerasan material, dengan nilai kekerasan berturut-turut sebesar 51,66 HRA pada suhu 300°C, 52,00 HRA pada suhu 400°C, dan 52,66 HRA pada suhu 450°C. Meskipun demikian, peningkatan kekerasan yang terjadi relatif tidak signifikan. Hasil analisis *SEM–EDS* menunjukkan bahwa material belum memiliki homogenitas yang optimal, ditandai dengan distribusi unsur Fe , Al , Si , dan O yang tidak merata pada area *mapping* yang berbeda. Kandungan oksigen yang relatif tinggi pada seluruh sampel mengindikasikan terjadinya oksidasi selama proses sintering. Hal ini menunjukkan bahwa suhu sintering yang digunakan masih belum cukup untuk menghasilkan proses difusi dan peleburan material secara optimal.

Kata Kunci: $Fe-Al-SiO_2$, Temperatur Sintering, Uji Kekerasan Rockwell, *SEM–EDS*, Metalurgi Serbuk.

Abstract: Powder metallurgy is an alternative processing route for alloy development due to its ability to produce materials with controlled mechanical properties and relatively homogeneous microstructures. This study aims to investigate the effect of sintering temperature variations on the mechanical properties and microstructural characteristics of $Fe-Al-SiO_2$ alloys as an alternative material for spark plug applications. The alloy was prepared with a composition of 50% Fe , 40% Al , and 10% SiO_2 using a *High Energy Milling (HEM)* process for 3 hours. The milled powders were compacted and sintered at temperatures of 300°C, 400°C, and 450°C. Hardness testing was conducted using the Rockwell method (HRA scale) with a major load of 60 kg and a diamond cone indenter, while microstructural characterization and elemental composition analysis were performed using *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive Spectroscopy (SEM–EDS)*. The results indicate that increasing the sintering temperature tends to increase the hardness of the material, with hardness values of 51.66 HRA at 300°C, 52.00 HRA at 400°C, and 52.66 HRA at 450°C. However, the increase in hardness is relatively insignificant within the investigated temperature range. The *SEM–EDS* analysis reveals that the material is not yet fully homogeneous, as indicated by the uneven distribution of Fe , Al , Si , and O elements across different mapping areas. The relatively high oxygen content in all samples suggests the occurrence of oxidation during the sintering process. These findings indicate that the applied sintering temperatures are still insufficient to promote optimal diffusion and melting of the constituent elements.

Keywords: $Fe-Al-SiO_2$, Sintering Temperature, Rockwell Hardness, *SEM–EDS*, Powder Metallurgy.

PENDAHULUAN

Selama beberapa dekade terakhir, metalurgi serbuk telah berkembang sebagai rute pemrosesan alternatif bagi berbagai jenis material, termasuk material intermetalik [1]. Metode ini menjadi solusi terhadap keterbatasan teknik solidifikasi cepat, seperti atomisasi lelehan, yang sering mengalami kendala akibat tingginya titik leleh material intermetalik [2], [3]. Oleh karena itu, metalurgi serbuk banyak digunakan untuk menghasilkan material dengan struktur mikro yang lebih halus dan homogen [4].

Paduan berbasis sistem Fe-Al dikenal memiliki biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan paduan Ti-Al, sehingga banyak dimanfaatkan dalam bidang industri dan otomotif. Meskipun demikian, paduan Fe-Al memiliki densitas yang relatif lebih tinggi, yaitu sekitar 5,7 g·cm⁻³. Paduan ini umumnya berbasis fasa Fe₃Al atau FeAl, yang memiliki berbagai sifat unggul, seperti ketahanan kimia yang sangat baik terhadap oksidasi pada suhu tinggi serta peningkatan tegangan luluh seiring kenaikan suhu dalam rentang suhu tertentu [5].

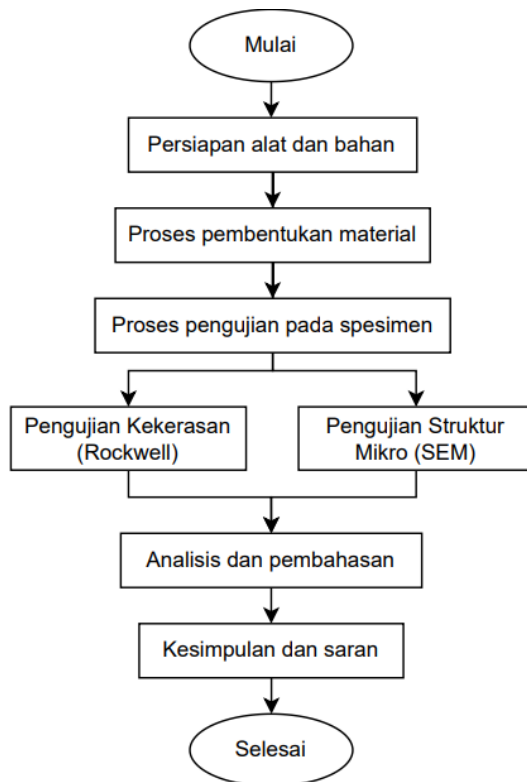
Paduan berbasis Fe-Al-SiO₂ pada umumnya diproduksi menggunakan metode metalurgi serbuk untuk mengatasi berbagai permasalahan yang muncul pada proses metalurgi konvensional. Metode ini mampu menghasilkan dan mempertahankan kehalusan serta homogenitas mikrostruktur yang menguntungkan, sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik paduan [6]. Namun, pada beberapa kondisi, tegangan tarik yang terinduksi dalam lapisan material dapat memicu terbentuknya *microcracks*, yang berpotensi menurunkan daya lekat lapisan terhadap permukaan paduan [7].

Sebagai metode pemadatan, berbagai teknik telah dikembangkan, termasuk pengepresan isostatik yang dilakukan pada suhu tinggi. Akan tetapi, hasil yang diperoleh dari metode tersebut belum sepenuhnya memenuhi harapan. Salah satu faktor penyebab kegagalan tersebut adalah durasi proses yang relatif lama, sehingga memungkinkan terjadinya pengkasaran mikrostruktur yang berdampak pada penurunan sifat mekanik yang diinginkan [8].

METODOLOGI

Tahapan Penelitian

Diagram alir penelitian pada Gambar 1 menunjukkan urutan umum pelaksanaan penelitian yang dilakukan, mulai dari tahap persiapan hingga tahap penyelesaian. Diagram ini digunakan untuk memberikan gambaran sistematis mengenai alur penelitian secara keseluruhan tanpa menjelaskan detail teknis pada setiap tahap.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian ini menjelaskan secara rinci setiap proses yang dilakukan pada penelitian, sesuai dengan alur yang telah ditampilkan pada diagram alir penelitian.

1. Persiapan alat dan bahan
Tahap ini meliputi persiapan seluruh peralatan penelitian serta bahan material berupa serbuk paduan Fe–Al–SiO₂ yang akan digunakan. Penimbangan material dilakukan sesuai dengan komposisi yang telah ditentukan.
2. Proses pembentukan material
Proses pembentukan material diawali dengan pencampuran serbuk menggunakan metode *mechanical alloying* melalui proses *milling* selama 3 jam. Selanjutnya, serbuk hasil *milling* dipadatkan melalui proses kompaksi dan dilanjutkan dengan proses sintering pada variasi suhu 300°C, 400°C, dan 450°C. Material hasil sintering kemudian dipersiapkan melalui proses *polishing* untuk pengujian lebih lanjut.
3. Pengujian spesimen
Pengujian dilakukan untuk memperoleh data sifat mekanik dan karakteristik material. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian kekerasan menggunakan metode Rockwell serta pengamatan struktur mikro menggunakan *Scanning Electron Microscope* yang dilengkapi dengan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM–EDS).
4. Analisis dan pembahasan
Data hasil pengujian kekerasan dan struktur mikro dianalisis secara sistematis untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur sintering terhadap sifat mekanik paduan Fe–Al–SiO₂. Hasil analisis selanjutnya dibahas berdasarkan teori dan hasil penelitian terdahulu.
5. Kesimpulan dan saran
Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, disusun kesimpulan penelitian serta saran yang dapat digunakan sebagai acuan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Alat yang Digunakan dalam Penelitian

No.	Nama Alat	Fungsi
1	Timbangan digital (neraca digital)	Digunakan untuk menimbang massa material serbuk Fe–Al–SiO ₂ sesuai komposisi yang ditentukan.
2	<i>High Energy Ball Milling (HEM)</i>	Digunakan untuk mencampur dan menghaluskan material serbuk Fe–Al–SiO ₂ agar homogen melalui proses <i>mechanical alloying</i> .
3	Mesin kompaksi hidrolik	Digunakan untuk memadatkan serbuk logam ke dalam cetakan guna membentuk pelet dengan kepadatan tinggi.
4	Tungku <i>furnace</i>	Digunakan untuk proses sintering pada variasi suhu 300°C, 400°C, dan 450°C agar partikel material menyatu secara optimal.
5	Mesin <i>polishing</i>	Digunakan untuk menghaluskan permukaan spesimen hasil sintering agar siap untuk pengamatan struktur mikro.
6	Alat uji kekerasan Rockwell	Digunakan untuk mengukur nilai kekerasan material berdasarkan metode Rockwell dengan indenter intan.
7	Mesin uji SEM–EDS	Digunakan untuk mengamati morfologi permukaan serta menganalisis komposisi unsur material paduan Fe–Al–SiO ₂ .

Tabel 2. Bahan yang Digunakan dalam Penelitian

No.	Nama Alat	Fungsi
1	Serbuk Fe–Al–SiO ₂	Material utama penelitian dengan komposisi Fe 50%, Al 40%, dan SiO ₂ 10%.
2	Resin	Digunakan pada proses <i>mounting</i> spesimen sebelum dilakukan pengamatan struktur mikro.
3	Katalis	Digunakan sebagai bahan pendukung dalam proses <i>mounting</i> agar resin mengeras secara optimal.

Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Praktikum Teknik Mesin Universitas Pamulang, Witanaharja. Selain itu, penelitian juga dilakukan di BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional) karena keterbatasan beberapa peralatan di Universitas Pamulang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Kekerasan

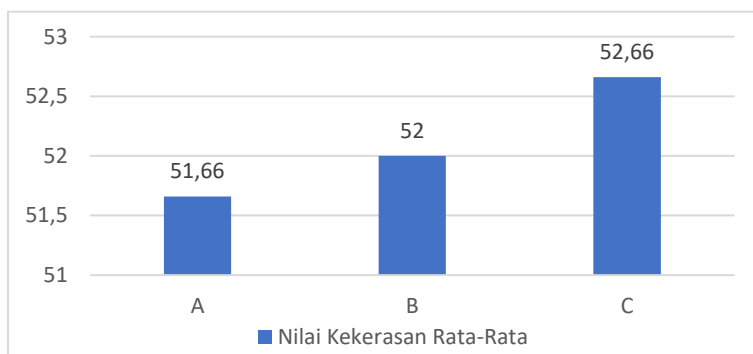
Pada paduan material serbuk Fe–Al–SiO₂, proses *milling* dilakukan selama 3 jam. Paduan besi, aluminium, dan silika dengan persentase Fe 50%, Al 40%, dan SiO₂ 10% menghasilkan massa Fe sebesar 6 g, Al sebesar 4,8 g, dan SiO₂ sebesar 1,2 g, sehingga total massa serbuk Fe–Al–SiO₂ adalah 12 g. Spesimen kemudian diberi perlakuan panas (*heat treatment*) dengan variasi suhu 300°C, 400°C, dan 450°C selama 10–20 menit, selanjutnya dilakukan pengujian kekerasan menggunakan metode Rockwell. Hasil pengujian kekerasan Rockwell ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kekerasan Rockwell pada Sampel

Sampel	Temperatur sintering	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata (HRA)
A	300°C	49	53	53	51,66
B	400°C	54	51	51	52,00
C	450°C	51	53	54	52,66

Berdasarkan Tabel 3, pengujian dilakukan menggunakan beban mayor sebesar 60 kg dengan indenter kerucut intan. Setiap sampel diuji sebanyak tiga kali pada titik yang berbeda untuk memperoleh nilai kekerasan rata-rata. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada sampel C dengan suhu sintering 450°C sebesar 52,66 HRA, sedangkan nilai kekerasan terendah diperoleh pada sampel A dengan suhu sintering 300°C sebesar 51,66 HRA.

Gambar 2 menunjukkan grafik hasil uji kekerasan Rockwell, yang memperlihatkan kecenderungan peningkatan nilai kekerasan seiring dengan meningkatnya suhu perlakuan panas. Semakin tinggi suhu *heat treatment*, maka nilai kekerasan material cenderung meningkat, sedangkan pada suhu yang lebih rendah nilai kekerasan relatif menurun. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh suhu perlakuan panas terhadap sifat mekanik material.



Gambar 2. Grafik Hasil Uji Kekerasan Rockwell

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan, dapat disimpulkan bahwa perubahan nilai kekerasan pada rentang suhu 300–450°C tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan. Hal ini diduga disebabkan oleh rentang suhu sintering yang relatif rendah, serta kemungkinan terjadinya *human error* pada saat pembacaan hasil uji kekerasan atau kondisi alat uji Rockwell yang kurang optimal.

Analisis Kedalaman Penetrasi Rockwell

Pengujian kekerasan dengan metode Rockwell menghasilkan penetrasi permanen akibat penerapan dan pelepasan beban utama. Kedalaman penetrasi permanen dapat dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$HR = E - e \quad (1)$$

Dengan:

HR : nilai kekerasan Rockwell

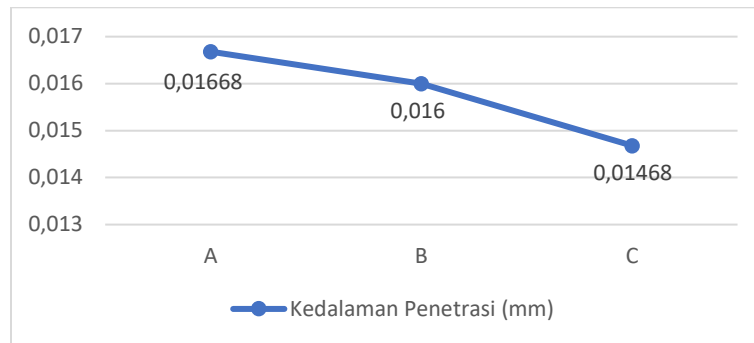
E : konstanta (60 untuk skala HRA dengan indenter intan)

e : kedalaman penetrasi permanen akibat beban utama

Hasil perhitungan kedalaman penetrasi indenter kerucut intan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kedalaman Penetrasi Indenter Kerucut Intan

Sampel	Kedalaman penetrasi (mm)
A	0,01668
B	0,01600
C	0,01468



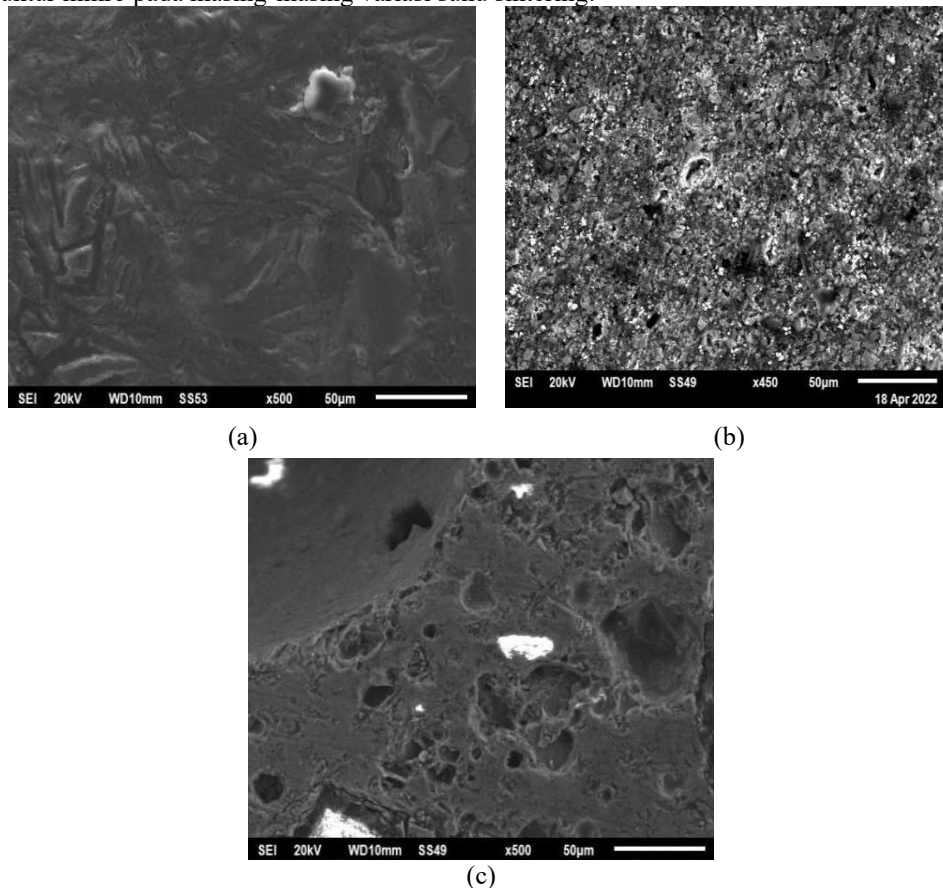
Gambar 3. Grafik Hasil Perhitungan Kedalaman Penetrasi Indentor Kerucut Intan

Berdasarkan Gambar 3, semakin tinggi suhu perlakuan panas, maka kedalaman penetrasi indentor kerucut intan semakin dangkal. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu sintering berbanding terbalik dengan kedalaman penetrasi, yang mengindikasikan peningkatan kekerasan material.

Hasil Pengujian Struktur Mikro SEM-EDS

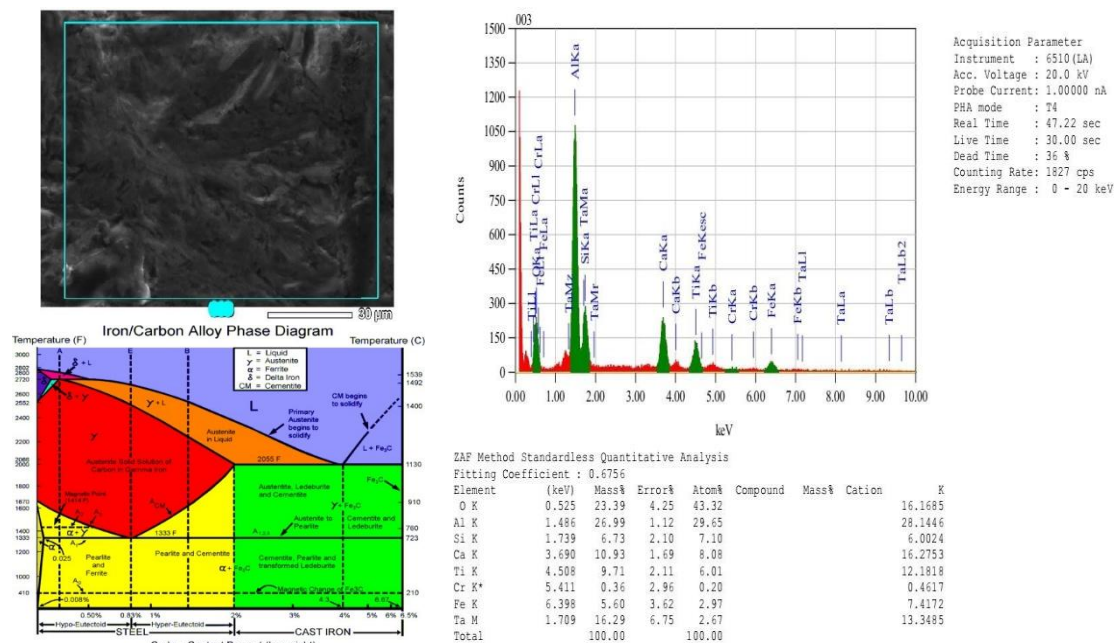
Pengujian struktur mikro dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)* JEOL JSM-650 LA dengan percepatan energi 20 keV yang dilengkapi *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)* untuk mengidentifikasi komposisi unsur dan distribusinya. Waktu pengujian selama 30 detik dengan perbesaran hingga 1000×. Spesimen berbentuk pelet diuji pada tiga variasi suhu sintering, yaitu 300°C, 400°C, dan 450°C.

Hasil pengamatan morfologi permukaan sampel ditunjukkan pada Gambar 4, yang memperlihatkan perbedaan struktur mikro pada masing-masing variasi suhu sintering.



Gambar 4. Morfologi Permukaan Sampel dengan perbesaran 50µm
(a) Suhu 300°C, (b) Suhu 400°C, dan (c) Suhu 450°C

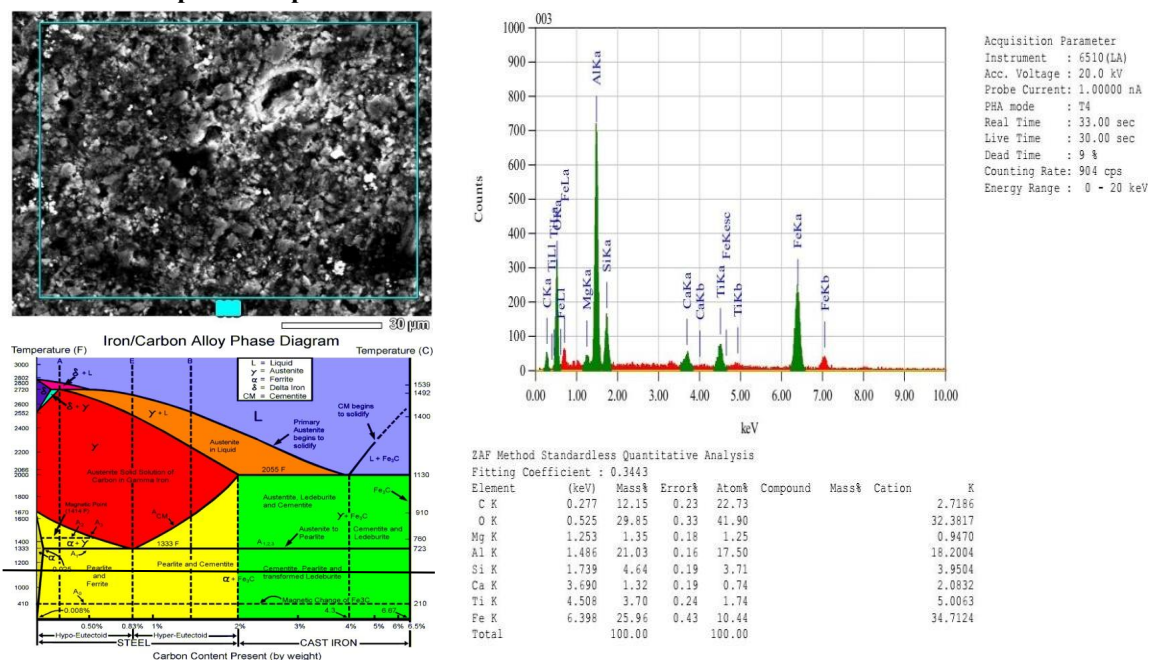
Analisis SEM–EDS pada Sampel A



Gambar 5. Analisis Data SEM-EDS Variasi Suhu Sintering 300°C

Hasil analisis SEM-EDS pada sampel A dengan suhu sintering 300°C menunjukkan bahwa kandungan unsur Fe sebesar 5,60%, Al sebesar 26,99%, Si sebesar 6,73%, dan O sebesar 23,39%. Kandungan oksigen yang relatif tinggi menunjukkan terjadinya oksidasi selama proses sintering. Selain itu, material diduga belum mengalami peleburan yang sempurna karena suhu sintering masih jauh di bawah titik leleh Fe, Al, dan SiO₂. Berdasarkan analisis diagram fasa Fe-Fe₃C, material Fe-Al-SiO₂ pada suhu 300°C berada pada fasa campuran perlit dan sementit. Ketidakhomogenan komposisi juga dipengaruhi oleh kemungkinan adanya unsur lain yang terbaca akibat sisa material pada tabung *milling* atau perbedaan lokasi *mapping* SEM-EDS.

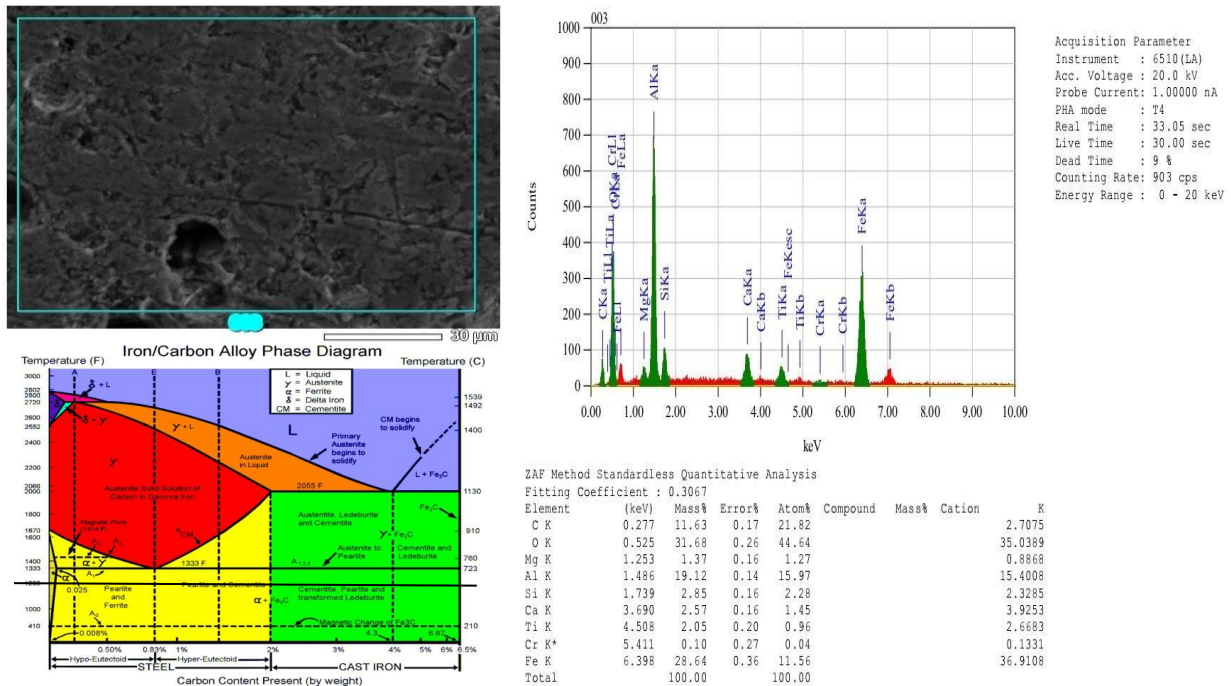
Analisis SEM–EDS pada Sampel B



Gambar 6. Analisis Data SEM-EDS Variasi Suhu Sintering 400°C

Hasil analisis SEM-EDS pada sampel B menunjukkan peningkatan kandungan Fe hingga 25,96% dan Al sebesar 21,03%, dengan kandungan oksigen sebesar 29,85%. Struktur mikro memperlihatkan adanya rongga dan batas butir yang jelas, yang menunjukkan proses sintering belum berlangsung secara optimal. Kondisi ini menyebabkan material bersifat lebih rapuh dan kurang homogen.

Analisis SEM-EDS pada Sampel C



Gambar 7. Analisis Data SEM-EDS Variasi Suhu Sintering 450°C

Pada sampel C dengan suhu sintering 450°C, kandungan Fe meningkat menjadi 28,64%, sedangkan Al dan Si masing-masing sebesar 19,12% dan 2,85%. Kandungan oksigen tertinggi tercatat pada sampel ini, yaitu sebesar 31,68%. Hal ini mengindikasikan bahwa oksidasi semakin dominan seiring peningkatan suhu sintering, meskipun proses peleburan material masih belum sempurna.

Analisis EDS Mapping

Hasil analisis *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS mapping)* dilakukan pada dua area pengamatan, yaitu *mapping* ke-1 dan *mapping* ke-2, untuk setiap variasi suhu sintering. *Mapping* ini bertujuan untuk mengamati sebaran unsur Fe, Al, Si, dan O pada permukaan sampel serta mengevaluasi tingkat homogenitas material hasil sintering.

Tabel 5. Komposisi Unsur SEM-EDS Sampel A pada Suhu Sintering 300°C

Unsur	Mapping 1 Massa (%)	Mapping 1 Atom (%)	Mapping 2 Massa (%)	Mapping 2 Atom (%)	Mapping Keseluruhan Massa (%)	Mapping Keseluruhan Atom (%)
Fe	12,35	3,35	6,05	2,76	5,6	11,56
Al	7,17	4,03	27,83	26,23	26,99	15,97
Si	1,67	0,9	11,76	10,65	6,73	2,28
O	8,89	8,42	25,86	41,11	23,39	44,64
C	63,98	80,7	21,73	19,63	11,63	21,82

Tabel 6. Komposisi Unsur SEM-EDS Sampel B pada Suhu Sintering 400°C

Unsur	Mapping 1 Massa (%)	Mapping 1 Atom (%)	Mapping 2 Massa (%)	Mapping 2 Atom (%)	Mapping Keseluruhan Massa (%)	Mapping Keseluruhan Atom (%)
Fe	29,02	11,84	35,37	15,66	25,96	10,44
Al	19,76	16,68	16,45	15,08	21,03	17,5
Si	4,74	3,85	3,55	3,12	4,64	3,71
O	27,92	39,75	30,25	46,75	29,85	41,9
C	12,99	24,63	7,12	14,67	12,15	22,73

Tabel 7. Komposisi Unsur SEM–EDS Sampel C pada Suhu Sintering 450°C

Unsur	Mapping 1 Massa (%)	Mapping 1 Atom (%)	Mapping 2 Massa (%)	Mapping 2 Atom (%)	Mapping Keseluruhan Massa (%)	Mapping Keseluruhan Atom (%)
Fe	33,47	14,53	29,28	11,98	28,64	10,44
Al	18,41	16,55	20,98	17,76	19,12	17,5
Si	1,63	1,41	1,74	1,41	2,85	3,71
O	32,51	49,28	32,49	46,39	31,68	41,9
C	6,92	13,96	9,95	18,93	11,63	22,73

Berdasarkan hasil *EDS mapping* pada *mapping* ke-1 dan *mapping* ke-2, terlihat adanya variasi distribusi unsur pada area pengamatan yang berbeda. Perbedaan komposisi antar area menunjukkan bahwa material belum memiliki homogenitas yang optimal. Kondisi ini diduga disebabkan oleh proses sintering yang dilakukan pada suhu relatif rendah, sehingga difusi unsur belum berlangsung secara sempurna. Selain itu, kemungkinan kontaminasi selama proses *High Energy Milling (HEM)* serta perbedaan lokasi *mapping* juga turut memengaruhi hasil analisis.

Perbedaan hasil antara *mapping* ke-1 dan *mapping* ke-2 menegaskan bahwa komposisi unsur pada permukaan sampel bersifat tidak seragam. Oleh karena itu, hasil *mapping* individual digunakan sebagai pendukung visual untuk menunjukkan ketidakseragaman distribusi unsur, sedangkan nilai komposisi unsur yang digunakan sebagai dasar analisis dan pembahasan utama mengacu pada hasil *mapping* keseluruhan (rata-rata), sebagaimana disajikan pada tabel komposisi SEM–EDS.

Ketidakhomogenan Komposisi Material

Berdasarkan hasil pengujian SEM–EDS pada Tabel 5 hingga Tabel 7, ketidakhomogenan komposisi material dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Material masih berbentuk butiran
Material yang belum melebur sempurna menyebabkan batas butir terlihat jelas, sehingga distribusi unsur menjadi tidak merata.
2. Terjadinya *human error*
Kesalahan dalam penentuan area *mapping* SEM–EDS maupun pembacaan data uji dapat memengaruhi hasil analisis komposisi.
3. Adanya unsur lain pada paduan utama
Keberadaan unsur Mg, Ca, Cr, Ti, Ta, dan C diduga berasal dari kontaminasi selama proses *High Energy Milling* atau oksidasi akibat udara yang terperangkap di dalam tungku *furnace* yang tidak divakumkan.
4. Perbedaan lokasi *mapping*
Penentuan lokasi *mapping* yang berbeda pada setiap sampel menyebabkan variasi komposisi unsur yang terukur, yang menunjukkan bahwa material belum homogen.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa:

1. Temperatur pada proses sintering berpengaruh terhadap nilai kekerasan material Fe–Al–SiO₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu sintering, maka nilai kekerasan material cenderung meningkat, sedangkan pada suhu sintering yang lebih rendah nilai kekerasan cenderung menurun.
2. Nilai kekerasan material Fe–Al–SiO₂ pada variasi suhu sintering yang digunakan berturut-turut adalah 51,66 HRA pada suhu 300°C, 52,00 HRA pada suhu 400°C, dan 52,66 HRA pada suhu 450°C, dengan nilai tertinggi diperoleh pada suhu sintering 450°C.
3. Peningkatan nilai kekerasan yang terjadi pada rentang suhu 300–450°C bersifat relatif kecil, yang menunjukkan bahwa suhu sintering tersebut belum cukup tinggi untuk menghasilkan perubahan sifat mekanik yang signifikan.
4. Hasil analisis SEM–EDS menunjukkan bahwa material Fe–Al–SiO₂ belum homogen, ditandai dengan distribusi unsur Fe, Al, Si, dan O yang tidak merata pada area *mapping* yang berbeda.
5. Kandungan oksigen yang relatif tinggi pada seluruh sampel mengindikasikan terjadinya oksidasi selama proses sintering, yang berpengaruh terhadap struktur mikro dan sifat mekanik material.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menggunakan suhu sintering yang lebih tinggi atau dilakukan dalam kondisi atmosfer terkontrol (vakum atau gas inert) guna meningkatkan homogenitas material dan meminimalkan terjadinya oksidasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Mallikarjuna and E. W. Reutzel, "Reclamation of intermetallic titanium aluminide aero-engine components using directed energy deposition technology," *Manuf. Rev.*, vol. 9, p. 27, 2022, doi: <https://doi.org/10.1051/mfreview/20220204>.
- [2] C. Wang *et al.*, "Rapid Synthesis and Sintering of Metals from Powders," *Adv. Sci.*, vol. 8, no. 12, p. 2004229, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202004229>.
- [3] M. Kumaravel *et al.*, "Elucidating the challenges in the development and deployment of refractory complex concentrated alloys for additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 89, p. 104286, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104286>.
- [4] Z. Wang, Y. Tan, and N. Li, "Powder metallurgy of titanium alloys: A brief review," *J. Alloys Compd.*, vol. 965, p. 171030, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171030>.
- [5] P. Novak, K. Nova, T. Vanka, and F. Prusa, "High-temperature Behaviour of New Fe-Al-Si Alloy Produced by Powder Metallurgy," *Manuf. Technol. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 299–302, 2018, doi: <https://doi.org/10.21062/ujep/95.2018/a/1213-2489/MT/18/2/299>.
- [6] M. Kopec, S. Jóźwiak, and Z. Kowalewski, "Fe-Al based composite reinforced with ultra-fine Al₂O₃ oxides for high temperature applications," *J. Theor. Appl. Mech.*, vol. 59, no. 3, pp. 509–513, 2021, doi: <https://doi.org/10.15632/jtam-pl/138322>.
- [7] G.-S. Ham, R. Kreethi, H. Kim, S. Yoon, and K.-A. Lee, "Effects of different HVOF thermal sprayed cermet coatings on tensile and fatigue properties of AISI 1045 steel," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 15, pp. 6647–6658, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.102>.
- [8] J. Wang, S. Srivatsa, Z. Wu, and Z. Huang, "Modeling of Metal Powder Densification under Hot Isostatic Pressing," *Materials*, vol. 17, no. 8, p. 1933, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/ma17081933>.