

Optimasi Teknik Pencampuran *Ball Mill* dan *Springs* untuk Meningkatkan Homogenitas dan Karakteristik Komposit Al-SiC

Salma Salu^{1*}, Kristiana Pasau², Haslina³

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Paulus, Makassar, Indonesia

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Paulus, Makassar, Indonesia

³Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Islam Makassar, Makassar, Indonesia

salmasalu7102@gmail.com, kristianapasau@gmail.com, haslinah.dty@uim-makassar.ac.id

Abstract: This study aims to compare *Ball Mill* and *Springs* mixing techniques and determine the most effective mixing condition for improving the homogeneity and characteristics of Al-SiC composites produced by powder metallurgy. The powder mixture consisted of 4.5 g Al and 0.5 g SiC and was mixed at 135 rpm for 3 and 4 h. The mixed powders were compacted at 9 tons and sintered at 400 °C. Material characterization included Vickers hardness, density, porosity, and macrostructure observations. The results showed that the *Springs* technique produced higher hardness than the *Ball Mill* technique. The highest hardness, 87.10 HV, was obtained using *Springs* for 4 h. Under the same condition, porosity ranged from 4.15 to 4.24%, lower than the 5.80-6.73% obtained with *Ball Mill* for 4 h. Macrostructure observations of the 4 h *Springs* specimen showed an Al-dominated matrix with SiC particles distributed relatively well throughout the observed area and only limited small pores, although some local particle agglomeration remained. These results indicate that extending the mixing time to 4 h, particularly with the *Springs* technique, improves particle distribution, interparticle contact, and composite consolidation, thereby increasing hardness and reducing porosity.

Keywords: powder metallurgy; Al-SiC; mixing technique; homogeneity; hardness; porosity

Abstrak: Penelitian ini bertujuan membandingkan teknik pencampuran *Ball Mill* dan *Springs* serta menentukan kondisi pencampuran yang paling efektif untuk meningkatkan homogenitas dan karakteristik komposit Al-SiC yang dibuat melalui metalurgi serbuk. Campuran serbuk terdiri atas 4,5 g Al dan 0,5 g SiC yang dicampur pada putaran 135 rpm selama 3 dan 4 jam. Serbuk hasil pencampuran dikompaksi dengan beban 9 ton dan disinter pada temperatur 400 °C. Karakterisasi material meliputi pengujian kekerasan Vickers, densitas, porositas, dan pengamatan struktur makro. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik *Springs* menghasilkan kekerasan lebih tinggi dibandingkan *Ball Mill*. Kekerasan tertinggi sebesar 87,10 HV diperoleh pada teknik *Springs* selama 4 jam. Pada kondisi yang sama, porositas berada pada kisaran 4,15-4,24%, lebih rendah dibandingkan *Ball Mill* 4 jam sebesar 5,80-6,73%. Pengamatan struktur makro spesimen *Springs* 4 jam menunjukkan matriks Al yang dominan dengan partikel SiC yang relatif tersebar pada daerah pengamatan dan hanya terdapat pori berukuran kecil dalam jumlah terbatas, meskipun masih ditemukan aglomerasi lokal. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan waktu pencampuran hingga 4 jam, khususnya menggunakan teknik *Springs*, mampu memperbaiki distribusi partikel, kontak antarpartikel, dan konsolidasi komposit sehingga meningkatkan kekerasan dan menurunkan porositas.

Kata kunci: metalurgi serbuk; Al-SiC; teknik pencampuran; homogenitas; kekerasan; porositas

1. Pendahuluan

Metalurgi serbuk merupakan salah satu metode manufaktur yang memungkinkan pembentukan komponen mendekati bentuk akhir melalui tahapan pencampuran serbuk, kompaksi, sintering, dan proses lanjutan. Tahap pencampuran memiliki posisi penting karena kualitas campuran awal menentukan peluang terbentuknya distribusi komposisi yang seragam, kontak antarpartikel yang baik, dan densifikasi yang lebih konsisten pada tahap berikutnya. Azevedo et al. (2020) menekankan efisiensi material dan energi pada proses metalurgi serbuk, sedangkan German (2021) menjelaskan bahwa karakter serbuk dan tahapan pemrosesan memengaruhi struktur hasil sintering.

Komposit matriks aluminium dikembangkan untuk memperoleh kombinasi massa jenis yang relatif rendah dengan sifat mekanik yang lebih baik. Aluminium memiliki densitas rendah, ketahanan korosi yang baik, dan mudah diproses, sedangkan silikon karbida (SiC) merupakan penguat keramik dengan kekerasan tinggi, ketahanan aus baik, serta kekuatan tekan

tinggi. Kombinasi Al sebagai matriks dan SiC sebagai penguat karenanya relevan untuk komponen teknik yang memerlukan kekerasan dan kestabilan struktur. Chawla (2021) menyatakan bahwa performa komposit sangat dipengaruhi oleh interaksi matriks–penguat dan distribusi fasa penguat di dalam matriks.

Pada metalurgi serbuk, homogenitas campuran tidak hanya ditentukan oleh komposisi, tetapi juga oleh mekanisme dan waktu pencampuran. Serbuk yang tidak terdistribusi seragam dapat membentuk aglomerasi SiC, meninggalkan celah antartikel, dan menghasilkan variasi densitas maupun porositas. Kondisi tersebut selanjutnya memengaruhi respons material terhadap penetrasi pada pengujian kekerasan. Selain itu, gesekan internal dan eksternal selama kompaksi dapat menyebabkan distribusi densitas yang tidak seragam sehingga kualitas campuran sebelum kompaksi menjadi faktor yang perlu dikendalikan (Cheng et al., 2020).

Dua teknik pencampuran yang dibandingkan pada penelitian ini adalah *Ball Mill* dan *Springs*. *Ball Mill* memanfaatkan gerakan media bola untuk memberikan tumbukan dan gesekan selama pencampuran, sedangkan metode *Springs* menggunakan elemen pegas sebagai media pengaduk. Perbedaan bentuk media dan interaksi mekanis antarmedia dengan serbuk dapat menghasilkan tingkat homogenisasi yang berbeda. Selain jenis media, waktu pencampuran juga menentukan kesempatan partikel untuk mengalami penataan ulang dan penyebaran di dalam campuran.

Penelitian terdahulu pada komposit berbasis aluminium menunjukkan bahwa waktu pencampuran atau milling dapat memengaruhi distribusi penguat dan sifat material hasil metalurgi serbuk. Sukanto et al. (2022) melaporkan pengaruh waktu milling terhadap transformasi fasa pada komposit matriks aluminium, sedangkan Dodo dan Mahadi (2020) membahas pengaruh parameter pemrosesan serbuk Al–SiC terhadap sifat mekanik. Namun, perbandingan langsung media *Ball Mill* dan *Springs* pada kondisi proses yang sama masih menjadi aspek yang menarik untuk dievaluasi, khususnya dengan menghubungkan hasil kekerasan, densitas, porositas, dan struktur makro.

Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini bertujuan mengoptimalkan teknik pencampuran dengan membandingkan *Ball Mill* dan *Springs* pada waktu pencampuran 2 dan 3 jam. Optimasi dalam artikel ini dimaknai sebagai pemilihan kondisi proses terbaik di antara variasi yang diuji, bukan optimasi matematis. Evaluasi dilakukan berdasarkan respons kekerasan, densitas, porositas, dan homogenitas struktur makro komposit Al–SiC setelah kompaksi dan sintering.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan serbuk aluminium (Al) sebagai matriks dan silikon karbida (SiC) sebagai penguat. Berdasarkan diagram alir penelitian, massa campuran yang digunakan adalah 4.5 g Al dan 0.5 g SiC, sehingga total serbuk setiap campuran adalah 5 g. Dua teknik pencampuran digunakan, yaitu *Ball Mill* dan *Springs*. Waktu pencampuran divariasikan menjadi 3 dan 4 jam dengan putaran 135 rpm.

Setelah proses pencampuran, serbuk dimasukkan ke dalam cetakan dan dikompaksi menggunakan mesin press pada beban 9 Ton. Spesimen hasil kompaksi kemudian disinter pada temperatur 400 °C. Kondisi kompaksi dan sintering dibuat sama pada seluruh variasi agar perbedaan karakteristik terutama dapat diamati sebagai akibat perubahan teknik dan waktu pencampuran.

Karakterisasi meliputi pengujian kekerasan Vickers, densitas, porositas, dan pengamatan struktur makro. Kekerasan digunakan untuk mengevaluasi ketahanan material terhadap penetrasi. Densitas dan porositas ditentukan melalui metode perendaman menggunakan massa kering (Wdry), massa jenuh (Wsat), dan massa spesimen saat berada dalam fluida (Wfluid). Pada penelitian sumber, spesimen direndam dalam etanol untuk mengevaluasi tingkat kerapatan serta pori terbuka.

Pengamatan struktur makro dilakukan pada permukaan spesimen untuk menilai penyebaran daerah yang diindikasikan sebagai matriks Al, partikel atau aglomerasi SiC, dan pori. Hasil struktur makro digunakan sebagai data pendukung untuk menginterpretasikan perubahan kekerasan dan porositas akibat variasi teknik pencampuran.



Gambar 1. Media pencampuran *Ball Mill* dan *Springs*



Gambar 2. Cetakan untuk pembuatan *Bushing*



Gambar 3. Mesin Press merk Vesto kapasitas 20 Ton

Tabel 1. Kondisi dan Parameter Proses Pembuatan Komposit Al–SiC

Parameter	Kondisi
Material	Aluminium (Al) dan Silikon karbida (SiC)
Massa campuran	4.5 g Al + 0.5 g SiC
Teknik pencampuran	<i>Ball Mill dan Springs</i>
Waktu pencampuran	3 jam dan 4 jam
Putaran pencampuran	135 rpm
Kompaksi	9 Ton
Sintering	400 °C
Karakterisasi	Kekerasan Vickers, densitas, porositas, struktur makro

**Gambar 4.** Sepuluh *Bushing* yang telah dicetak Al-SiC

2.1 Rancangan Variasi dan Pemilihan Kondisi

Rancangan percobaan membandingkan dua faktor proses yang secara langsung berkaitan dengan tahap homogenisasi, yaitu jenis media pencampuran dan waktu pencampuran. Teknik *Springs* dan *Ball Mill* masing-masing diuji pada durasi 3 jam dan 4 jam. Dengan menjaga kompaksi 9 Ton dan *sintering* 400 °C tetap konstan, perubahan respons material dapat dibandingkan antarvariasi pencampuran tanpa mengubah kondisi pemadatan dan pemanasan. Pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi kondisi yang menghasilkan kombinasi karakteristik terbaik dari variasi yang tersedia.

Pada tahap persiapan, serbuk Al dan SiC ditimbang sesuai massa yang ditetapkan, kemudian dimasukkan ke wadah pencampuran bersama media masing-masing. Setelah pencampuran selesai, campuran serbuk dipindahkan ke cetakan. Penggunaan kondisi kompaksi yang sama penting untuk mengurangi pengaruh variasi tekanan terhadap densitas hijau. Spesimen selanjutnya dimasukkan ke tungku pada temperatur 400 °C untuk membentuk ikatan antarpartikel melalui proses *sintering* padat.

2.2 Perhitungan kekerasan, densitas dan porositas

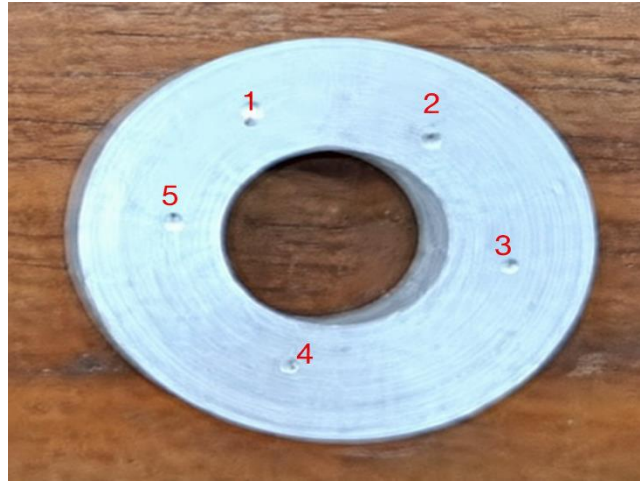
Kekerasan Vickers (HV) ditentukan dari jejak indentasi yang dihasilkan oleh indenter piramida intan pada permukaan material.

Evaluasi densitas dan porositas menggunakan tiga massa hasil penimbangan, yaitu massa kering, massa jenuh setelah perendaman, dan massa spesimen di dalam fluida. Selisih antara massa jenuh dan massa di dalam fluida digunakan sebagai representasi volume bulk, sedangkan selisih massa jenuh dan massa kering menunjukkan volume fluida yang mengisi pori terbuka.

Dengan pendekatan tersebut, densitas dan porositas dapat dibandingkan antarspesimen pada teknik pencampuran yang berbeda.

Dalam interpretasi data, densitas yang lebih tinggi digunakan sebagai indikator susunan partikel yang lebih rapat, sedangkan porositas yang lebih rendah menunjukkan berkurangnya rongga terbuka. Kedua parameter tersebut kemudian dikaitkan dengan kekerasan dan struktur makro. Karena nilai densitas antarvariasi relatif berdekatan, kecenderungan porositas dan kekerasan menjadi indikator yang lebih sensitif dalam membedakan efek pencampuran pada kondisi penelitian ini.

a. Pengujian kekerasan



Gambar 5. Lima titik pengujian kekerasan Vickers pada *Bushing*.

$$\text{b. Densitas } (\rho) = \frac{W_{dry}}{W_{sat} - W_{fluid}}$$

keterangan:

ρ = Densitas (g/cm³)

w_{dry} = berat kering spesimen (g)

w_{sat} = berat jenuh spesimen (g)

w_{fluid} = berat spesimen jenuh saat tergantung dalam fluida (g)

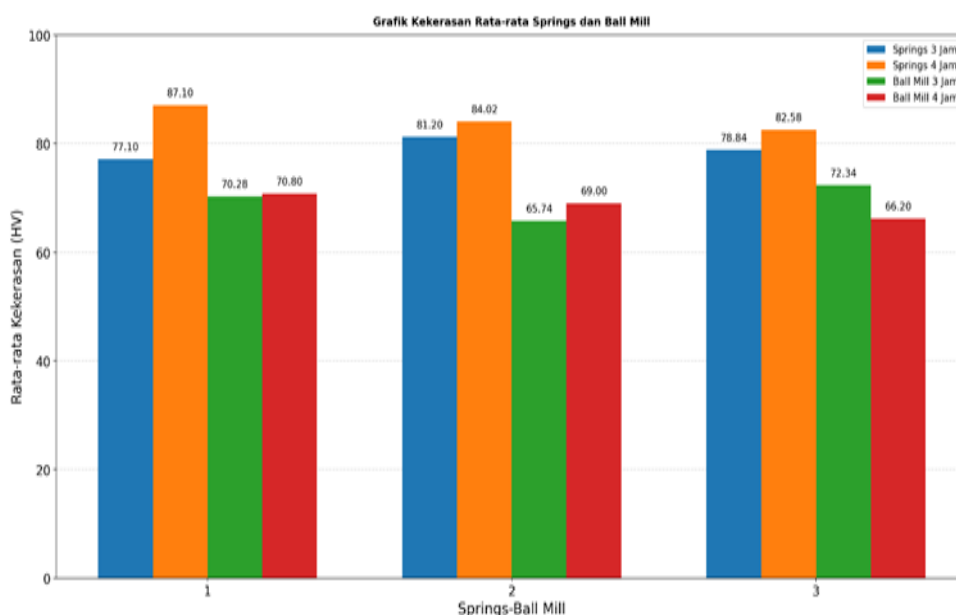
$$\text{c. Porosity } (\varphi) = \frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{sat} - W_{fluid}} \times 100 \%$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kekerasan komposit Al-SiC

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan Vickers

No.	Teknik	Waktu	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Rata-rata (HV)
1	<i>Springs</i>	3 Jam	95.3	73.3	63.3	83.3	70.3	77.10
2			84.2	71.2	96	92.3	62.3	81.20
3			90.2	92.10	61.2	81.5	69.2	78.84
4		4 Jam	97.3	88	93.2	65	92	87.10
5			96.9	76.2	94.5	85.6	66.9	84.02
6			96.2	78.1	92.3	81.5	64.8	82.58
7	<i>Ball Mill</i>	3 Jam	79.20	58.6	82.4	62.4	68.8	70.28
8			60.4	77.9	69.6	56.3	64.5	65.74
9			75.1	58.6	76.3	84.8	66.9	72.34
10		4 Jam	76.8	68.2	67.5	69.4	72.1	70.08
11			60.5	70	68.3	70.1	76.1	69.00
12			56.5	67.8	67.2	68	71.5	66.20



Gambar 6. Perbandingan kekerasan komposit Al-SiC pada variasi teknik dan waktu pencampuran

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 4, teknik *Springs* menghasilkan kekerasan komposit Al-SiC yang lebih tinggi dibandingkan *Ball Mill* pada kompaksi 9 ton dan sintering 400 °C. Pada pencampuran 3 jam, kekerasan *Springs* sebesar 77,10–81,20 HV, sedangkan *Ball Mill* 65,74–72,34 HV. Setelah waktu pencampuran ditingkatkan menjadi 4 jam, kekerasan *Springs* meningkat menjadi 82,58–87,10 HV, sementara *Ball Mill* berada pada 66,20–70,80 HV. Hasil ini menunjukkan bahwa teknik dan waktu pencampuran berperan terhadap distribusi penguat dan kekerasan komposit Al-SiC (Gasha et al., 2024; Sankhla et al., 2022).

Kekerasan tertinggi, yaitu 87,10 HV, diperoleh pada teknik *Springs* selama 4 jam. Peningkatan ini diduga berkaitan dengan distribusi SiC dan kontak antarpartikel yang lebih baik, sehingga partikel SiC yang keras lebih efektif menghambat deformasi plastis matriks Al dan meningkatkan kekerasan komposit (Sankhla et al., 2022; Zapata-Valencia et al., 2025). Sebaliknya, peningkatan waktu *Ball Mill* dari 3 menjadi 4 jam tidak menghasilkan kenaikan kekerasan yang konsisten. Tumbukan dan gesekan selama *milling* dapat mengubah morfologi serbuk serta memicu aglomerasi lokal, sehingga distribusi SiC dan ikatan matriks–penguat menjadi kurang seragam (Gasha et al., 2024). Dengan demikian, pada kondisi penelitian ini, teknik *Springs* selama 4 jam memberikan respons kekerasan terbaik karena menghasilkan kondisi pencampuran Al–SiC yang lebih efektif.

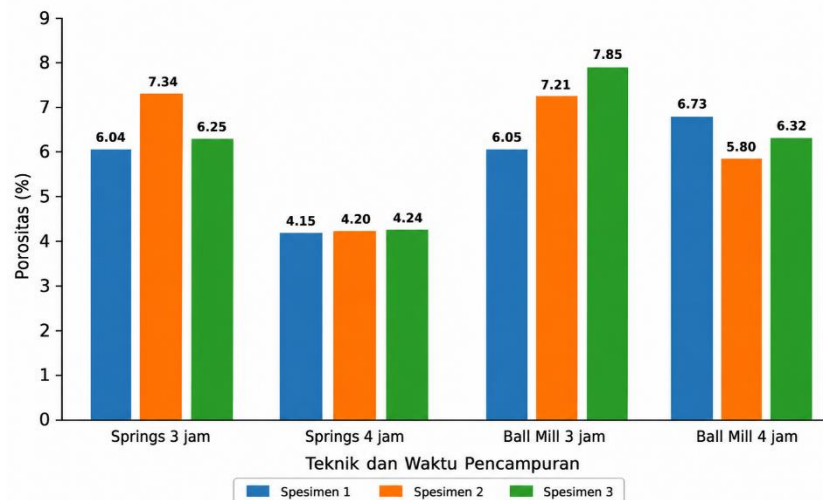
3.2 Densitas dan Porositas

Tabel 3. Densitas dan porositas Teknik *Springs*

No	Waktu	Wdry (g)	Wsat (g)	Wfluid (g)	Densitas (g/cm ³)	Porositas (%)
1	3 jam	4,95	4,04	2,77	3,10	6,04
2	3 jam	4,86	4,09	2,80	3,09	7,34
3	3 jam	4,92	4,05	2,77	3,11	6,25
4	4 jam	4,90	4,97	3,06	2,56	4,15
5	4 jam	4,92	4,98	3,09	2,58	4,20
6	4 jam	4,94	5,01	3,12	2,60	4,24

Tabel 4. Densitas dan porositas metode *Ball Mill* komposit Al–SiC

No	Waktu	Wdry (g)	Wsat (g)	Wfluid (g)	Densitas (g/cm ³)	Porositas (%)
1	3 jam	4,90	5,019	3,059	2,50	6,05
2	3 jam	4,86	5,001	3,042	2,48	7,21
3	3 jam	4,88	5,036	3,052	2,46	7,85
4	4 jam	4,91	5,041	3,093	2,52	6,73
5	4 jam	4,93	5,042	3,116	2,56	5,80
6	4 jam	4,86	4,981	3,068	2,54	6,32

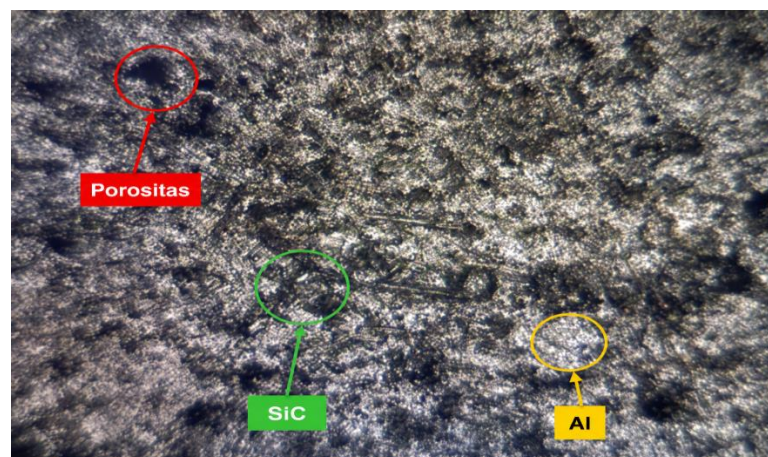


Gambar 6. Perbandingan porositas komposit Al–SiC pada variasi teknik dan waktu pencampuran

Pada teknik *Springs*, porositas pada waktu pencampuran 3 jam menunjukkan nilai 6,04%, 7,34%, dan 6,25%. Ketika waktu pencampuran ditingkatkan menjadi 4 jam, nilai porositas menurun menjadi 4,15%, 4,20%, dan 4,24%. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa waktu pencampuran yang lebih lama cenderung meningkatkan homogenitas campuran Al–SiC dan memperbaiki kontak antarpartikel selama proses kompaksi dan sintering, sehingga ruang kosong di antara partikel dapat berkurang dan material menjadi lebih padat. Hubungan antara proses densifikasi dan penurunan porositas pada komposit berbasis aluminium berpenguat SiC juga dilaporkan oleh Tosun dan Kurt (2019).

Pada teknik *Ball Mill*, porositas pada waktu pencampuran 3 jam masing-masing sebesar 6,05%, 7,21%, dan 7,85%, sedangkan pada waktu pencampuran 4 jam menjadi 6,73%, 5,80%, dan 6,32%. Secara umum, pencampuran selama 4 jam menunjukkan kecenderungan porositas yang lebih rendah dibandingkan 3 jam, meskipun masih terdapat variasi antarspesimen. Proses *ball milling* dapat meningkatkan pencampuran dan distribusi partikel SiC di dalam matriks Al sehingga mendukung homogenitas serbuk dan proses konsolidasi material. Penggunaan *ball milling* dalam pembuatan komposit Al–SiC serta pengaruhnya terhadap karakteristik material juga dilaporkan oleh Sadhu et al. (2025).

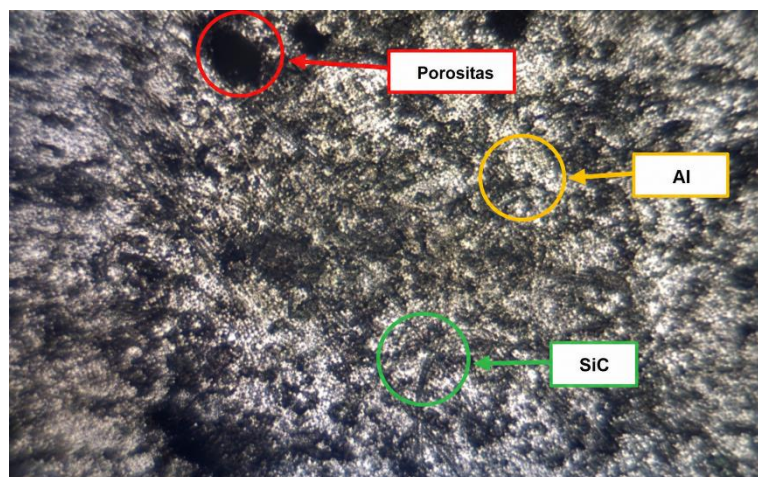
3.3 Struktur makro dan homogenitas



Gambar 8. Struktur makro komposit Al–SiC hasil *Springs* 4 jam, kompaksi 9 ton, *sintering* 400 °C

Pada teknik *Springs* dengan waktu *mixing* 4 jam, citra mikro menunjukkan bahwa matriks aluminium (Al) mendominasi permukaan komposit, sedangkan bagian yang lebih gelap dapat berkaitan dengan partikel SiC serta sebagian pori atau celah antarpartikel. Partikel SiC terlihat telah tersebar pada berbagai bagian matriks, meskipun distribusinya belum sepenuhnya seragam karena masih terdapat beberapa daerah dengan konsentrasi partikel yang lebih tinggi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa proses homogenisasi telah berlangsung cukup baik, tetapi masih terdapat aglomerasi lokal. Distribusi penguat SiC yang lebih seragam dalam matriks Al sangat dipengaruhi oleh proses dan waktu pencampuran, yang selanjutnya berperan terhadap pembentukan struktur mikro komposit hasil metalurgi serbuk (Sankhla et al., 2022; Jiju et al., 2020).

Dari sisi porositas, pada pengamatan masih terlihat beberapa area gelap kecil yang kemungkinan merupakan pori atau ruang kosong antarpartikel, tetapi secara visual tidak menunjukkan adanya rongga besar yang dominan. Hal ini mengindikasikan bahwa kontak antarpartikel telah terbentuk dengan cukup baik dan proses densifikasi selama kompaksi serta sintering mampu menghasilkan struktur komposit yang relatif padat. Pencampuran selama 4 jam memungkinkan kontak Al–SiC menjadi lebih intensif sehingga membantu penyebaran penguat dan mengurangi ketidakseragaman susunan partikel. Secara keseluruhan, teknik *Springs* pada *mixing* 4 jam menunjukkan distribusi SiC yang cukup merata, homogenisasi yang cukup baik, serta porositas yang relatif kecil, meskipun masih ditemukan sedikit aglomerasi dan ketidakseragaman lokal; kondisi mikrostruktur seperti ini umum dipengaruhi oleh distribusi partikel penguat, kompaksi, dan proses sintering pada komposit Al–SiC berbasis metalurgi serbuk (Wąsik et al., 2023; Sankhla et al., 2022).



Gambar 9. Struktur makro komposit Al–SiC hasil *Ball Mill* 4 jam, kompaksi 9 ton, *sintering* 400 °C

Pada struktur makro komposit Al–SiC dengan teknik *Ball Mill* selama 4 jam, permukaan spesimen memperlihatkan matriks aluminium (Al) sebagai fase yang dominan, sedangkan daerah yang lebih gelap dapat dikaitkan dengan keberadaan partikel SiC, aglomerasi lokal, maupun pori. Secara visual, fase gelap telah tersebar pada sebagian besar area pengamatan sehingga menunjukkan bahwa proses *Ball Milling* selama 4 jam telah membantu mendistribusikan partikel SiC ke dalam matriks Al. Namun, distribusinya belum sepenuhnya homogen karena masih terlihat beberapa daerah gelap yang terkonsentrasi dan tidak seragam. Kondisi ini menunjukkan bahwa *Ball Mill* mampu meningkatkan pencampuran dan kontak antara matriks dengan partikel penguat, meskipun aglomerasi lokal masih dapat terbentuk selama proses pencampuran serbuk (Sankhla et al., 2022).

Dari sisi porositas, citra menunjukkan beberapa area gelap dengan ukuran yang berbeda, terutama pada bagian tengah dan beberapa daerah di sekitar permukaan. Sebagian daerah tersebut dapat mengindikasikan pori atau celah antarpartikel yang belum sepenuhnya tertutup selama proses kompaksi dan sintering. Meskipun demikian, secara umum struktur tampak relatif kompak dan kontak antarpartikel cukup baik, sehingga dapat dikatakan bahwa *mixing* selama 4 jam telah menghasilkan homogenisasi yang cukup baik tetapi belum sempurna. Distribusi SiC yang lebih merata dapat memperbaiki susunan partikel dan mendukung densifikasi, sedangkan aglomerasi penguat dapat menyebabkan terbentuknya porositas lokal pada komposit Al–SiC hasil metalurgi serbuk (Wąsik et al., 2023).

3.4 Penentuan kondisi optimum

Berdasarkan kombinasi hasil kekerasan, densitas, porositas, dan pengamatan struktur makro, kondisi terbaik pada variasi yang diuji diperoleh pada teknik Springs dengan waktu pencampuran 4 jam. Pada kondisi ini, nilai kekerasan mencapai nilai tertinggi sebesar 87,10 HV, sedangkan porositas berada pada kisaran 4,15–4,24%. Dibandingkan dengan Springs 3 jam yang menghasilkan porositas 6,04–7,34%, penurunan porositas pada 4 jam menunjukkan bahwa peningkatan waktu pencampuran memberikan susunan partikel yang lebih rapat dan lebih seragam. Kondisi ini juga didukung oleh struktur makro yang memperlihatkan matriks Al dominan, distribusi SiC yang relatif tersebar pada berbagai bagian matriks, serta pori yang relatif kecil meskipun masih dijumpai aglomerasi lokal (Sankhla et al., 2022; Wąsik et al., 2023).

Pada teknik *Ball Mill*, pencampuran 4 jam juga menunjukkan kecenderungan penurunan porositas dibandingkan 3 jam, tetapi nilai kekerasannya tetap lebih rendah daripada teknik Springs. Oleh karena itu, dalam batas variasi yang diuji pada penelitian ini, kondisi optimum didefinisikan sebagai penggunaan teknik Springs selama 4 jam dengan kompaksi 9 ton dan sintering 400 °C. Penentuan ini merupakan pemilihan kondisi terbaik berdasarkan respons eksperimen yang tersedia, bukan hasil optimasi matematis.

3.5 Hubungan waktu pencampuran dengan densifikasi

Peningkatan waktu pencampuran dari 3 menjadi 4 jam meningkatkan kontak dan penataan antarpartikel sehingga mendukung proses densifikasi komposit Al–SiC. Pada teknik *Springs*, porositas menurun dari 6,04–7,34% menjadi 4,15–4,24%, sedangkan pada *Ball Mill* menurun dari 6,05–7,85% menjadi 5,80–6,73%. Hasil ini menunjukkan bahwa pencampuran yang lebih lama cenderung memperbaiki distribusi partikel dan mengurangi ruang kosong, namun efektivitas densifikasi tetap dipengaruhi oleh mekanisme pencampuran, karena tumbukan dan gesekan pada *Ball Mill* juga dapat memicu perubahan morfologi serbuk atau aglomerasi lokal (Tosun dan Kurt, 2019).

3.6 Implikasi proses dan keterbatasan

Teknik dan waktu pencampuran berperan penting terhadap homogenitas dan densifikasi komposit Al–SiC. Teknik *Springs* selama 4 jam menghasilkan kekerasan lebih tinggi dan porositas lebih rendah, menunjukkan bahwa metode pencampuran sederhana tetap efektif apabila parameter proses dikendalikan dengan baik (Sankhla et al., 2022; Tosun dan Kurt, 2019). Namun, penelitian ini terbatas pada dua teknik dan dua waktu pencampuran, sementara parameter lainnya dibuat tetap. Identifikasi Al, SiC, dan pori juga masih berdasarkan pengamatan makro dan belum dikonfirmasi dengan SEM–EDS. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu memperluas variasi parameter serta menggunakan karakterisasi mikrostruktur yang lebih rinci untuk memperkuat hubungan antara homogenitas, densifikasi, dan sifat mekanik komposit (Wąsik et al., 2023).

4. Kesimpulan

Teknik dan waktu pencampuran berpengaruh terhadap karakteristik komposit Al–SiC. Teknik *Springs* selama 4 jam memberikan hasil terbaik dengan kekerasan tertinggi 87,10 HV dan porositas 4,15–4,24%, lebih baik dibandingkan *Ball Mill* 4 jam yang menghasilkan kekerasan 66,20–70,08 HV dan porositas 5,80–6,73%. Struktur makro menunjukkan distribusi SiC yang relatif lebih merata dan pori yang lebih kecil, meskipun masih terdapat aglomerasi lokal. Dengan demikian, *Springs* 4 jam merupakan kondisi terbaik pada variasi yang diuji karena mampu meningkatkan homogenitas, densifikasi, dan kekerasan serta menurunkan porositas komposit Al–SiC.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Paulus serta laboratorium yang mendukung pelaksanaan proses pembuatan dan pengujian *Bushing*.

Daftar Pustaka

- Abdi-Zay, I. P., Zulfi, F. R. & Gurning, A. (2021). Daur ulang scrap aluminium sebagai solusi alternatif untuk mengurangi ketergantungan aluminium impor di Indonesia. Conference Paper. DOI: 10.13140/2.1.3237.6006.
- Azevedo, J. M. C., Serrenho, A. C. & Allwood, J. M. (2020). Efisiensi energi dan material metalurgi serbuk baja. *Powder Technology*, 328.
- A. M. Sankhla et al., “Effect of Mixing Method and Particle Size on Hardness and Compressive Strength of Aluminium Based Metal Matrix Composite Prepared Through Powder Metallurgy Route,” *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- A. E. Zapata-Valencia et al., “Mechanical and Microstructural Behavior of Aluminum Matrix Composites Reinforced with Silicon Carbide,” 2025.
- A. Mohammadi et al., “Effect of SiC Content and Milling Time on the Hardness and Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites,” 2026.
- Chawla, K. K. (2021). *Composite Materials: Science and Engineering* (3rd ed.). Springer.
- Cheng, L. et al. (2020). Characterization of internal and external friction during powder compaction process. *Powder Technology*. Elsevier.
- Dodo, S. A. & Mahadi, S. T. (2020). Pengaruh variasi tekanan dan suhu pada pengadukan serbuk aluminium (Al), silikon karbida (SiC) terhadap sifat mekanik logam dengan metode metalurgi serbuk. *Dinamis*, 8(2), 9–9.
- German, R. M. (2021). *Powder Metallurgy: Materials and Processing* (2nd ed.). Elsevier. ISBN 978-0-12-823529-8.
- Hidayat, T. & Nugroho, S. (2022). Analysis of density and porosity characteristics on composite material using immersion method. *Journal of Materials Engineering*, 12(2).
- Hu, B. (2019). Introduction to characterization of powders. In *ASM Handbook, Volume 10: Materials Characterization*. ASM International.
- Jiju, K. B., Selvakumar, G., & Ram Prakash, S. (2020). Study on preparation of Al–SiC metal matrix composites using powder metallurgy technique and its mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1843–1847. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.001>
- Sukanto, W., Suprpto, R., Soenoko & Irawan, Y. S. (2022). The effect of milling time on the alumina phase transformation in the AMCs powder metallurgy reinforced by silica-sand-tailings. *Eureka: Physics and Engineering*, 1, 103–117. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.001906>.

- Zamheri, A. (2024). Pengaruh waktu sintering, fraksi volume dan ukuran besar butir partikel SiC terhadap kekerasan MMC Al 6061/SiC dengan sistem stir casting. *Austenit*, 3(02).
- S. B. Gasha et al., "Effect of Milling Time and Reinforcement Volume Fraction on the Microstructure and Mechanical Behavior of SiCp-Reinforced AA2017 Composite Powder," *Materials*, vol. 17, no. 2, Art. no. 435, 2024.
- Sankhla, A. M., Patel, K. M., Makhesana, M. A., Giasin, K., Pimenov, D. Y., Wojciechowski, S., & Khanna, N. (2022). Effect of mixing method and particle size on hardness and compressive strength of aluminium based metal matrix composite prepared through powder metallurgy route. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.094>
- Tosun, G., & Kurt, M. (2019). The porosity, microstructure, and hardness of Al-Mg composites reinforced with micro particle SiC/Al₂O₃ produced using powder metallurgy. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106965. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106965>
- Wąsik, A., Leszczyńska-Madej, B., Madej, M., & Goły, M. (2023). Microstructure and mechanical properties of low-cost SiC-reinforced aluminum and Al₄Cu matrix composites produced by sintering in vacuum. *Materials*, 16(15), 5492. <https://doi.org/10.3390/ma16155492>