

Efek Pemanasan Pra-kompaksi dan Sinter terhadap Sifat Kuat Tekan Komposit Al/SiC

Mashuri* dan I. Mufidah

Departemen Fisika, Fakultas Sains, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS),
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

Intisari

Penelitian efek pemanasan pra kompaksi pada matrik Al dan sintering terhadap densitas dan kuat tekan komposit Al/SiC yang dibuat dengan metode metalurgi serbuk telah dilakukan. Pembuatan komposit Al/SiC diawali dengan memanaskan matrik Al pra-kompaksi pada temperatur 40, 60, dan 80°C dalam waktu 1 jam, kompaksi secara mekanik dan disinter pada temperatur 400, 500, dan 600°C. Guna meningkatkan kehomogenan tekanan saat kompaksi diseluruh bagian komposit digunakan zinc stearate yang tidak reaktif dan mudah menguap. Identifikasi fasa dan morfologi dilakukan dengan menggunakan alat *X-rays Diffractometry* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Densitas dan porositas diukur dengan metode Archimedes dan kuat tekan diuji dengan alat *Torsee Universal Testing Machine*. Hasil penelitian menunjukkan pemanasan pra-kompaksi pada matrik Al hingga temperatur 60°C dan temperatur sinter hingga 500°C dapat meningkatkan nilai densitas dan kuat tekan komposit Al/SiC yang dibuat dengan metode metalurgi serbuk. Pemanasan sinter dapat menimbulkan fasa baru γ -Al₂O₃ pada bidang kontak permukaan Al-SiC yang dapat memperkuat ikatan antar muka dan mengurangi porositas sehingga densitas dan kuat tekan meningkat.

Abstract

Research on the effects of pre-compacting heating on Aluminum (Al) matrix and sintering on the density and compressive strength of Al/SiC composites made using powder metallurgy method. The synthesized of Al/SiC composites was began by heating pre-compacting of Al matrix at temperatures of 40, 60, and 80°C within 1 hour, mechanically compacting and sintering at temperatures of 400, 500, and 600°C. In order to increase the homogeneity of pressure during compacting throughout in the composites, non-reactive and volatile zinc stearate was used. Phase and morphological identification were carried out using X-rays Diffractometry (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM) devices. The density and porosity were measured by the Archimedes method and the compressive strength was tested by the Torsee Universal Testing Machine. The results showed that pre-compacting in the Al matrix with the temperature of 60°C and sintered temperatures up to 500°C can increase the density and the compressive strength of Al/SiC composites prepared by powder metallurgy method. Sintering process can give a new phase γ -Al₂O₃ in the surface area contact of Al-SiC which can strengthen interfacial bonds and reduce porosity so that the density and the compressive strength increase.

Keywords: composites; powder metallurgy; pre-compacting; sintering.

*Corresponding author: mash@physics.its.ac.id

<http://dx.doi.org/10.12962/j24604682.v15i3.5281>
2460-4682 ©Departemen Fisika, FSains-ITS

I. PENDAHULUAN

Seiring berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi material, bahan komposit matrik metal merupakan salah satu jenis material yang secara ekstensif dilakukan penelitian secara berkelanjutan karena ekselennya sifat fisis yang dimilikinya, sebagai contoh kekuatan tarik tinggi dan ringan pada waktu pemakaian secara bersamaan. Aplikasi material komposit matrik metal yang berkualitas banyak digunakan dan terus meningkat dalam berbagai bidang, khususnya permesinan, aerospace dan transportasi [1]. Material komposit matrik Aluminium (Al) yang diperkuat dengan Silikon Karbida (SiC) merupakan salah satu dari kelompok material yang

banyak diaplikasikan dalam bidang manufaktur hingga saat ini. Komposit Al/SiC secara efektif memiliki keuntungan sifat fisis dari perpaduan sifat Al sebagai matrik dan SiC sebagai penguat yaitu ringan, anti korosi, tahan gesek, kekuatan tarik dan tekan tinggi, konduksi panas rendah serta keunggulan sifat mekanik dan fisis lainnya [2, 3].

Beberapa metode pembuatan komposit Al/SiC yang umum digunakan yaitu *melt stirring*, infiltrasi-tekanan, *squeeze casting*, infiltrasi-vakum dan metalurgi serbuk. Metode-metode pembuatan komposit Al/SiC tersebut masing-masing memiliki keunggulan dan kelemahan. Metode infiltrasi, *casting* dan *melt stirring* diperlukan proses yang tidak sederhana, perlu pemanasan tinggi dan sering terjadi porous yang meng-

akibatkan sifat fisis dan mekanik menurun serta memerlukan biaya yang mahal [4]. Metode metalurgi serbuk yang mencakup proses pencampuran (*blending*), *molding* dan *sintering* memiliki mekanisme proses yang lebih sederhana dan biaya pembuatan relatif lebih murah [5].

Komposit merupakan kombinasi dua atau lebih material yang berbeda, dengan syarat adanya ikatan permukaan antara kedua material tersebut secara fisis atau ikatan lain dengan menambahkan bahan aditif seperti agen pengganding (*coupling agent*). Sifat fisis dan mekanik komposit matrik metal ditentukan oleh fraksi volume, bentuk dan ukuran partikel, distribusi dan berhasil tidaknya terbentuk ikatan antar muka (*interfacial bonding*) [6, 7]. Terbentuknya ikatan antar muka sangat ditentukan oleh ketepatan metode pembuatan, kontrol parameter proses dan ditambah tidaknya bahan lain sebagai aditif semacam agen penggandeng. Efek pemanasan seperti anil dan sinter juga menentukan sifat mekanik dan fisis dari komposit matrik metal, sehingga penting untuk dilakukan penelitian terkait dengan efek pemanasan saat sebelum dan sesudah kompaksi pembentukan komposit matrik metal.

Pada makalah ini disampaikan hasil penelitian efek dari pemanasan pra kompaksi terhadap sifat kuat tekan komposit Al/SiC yang dibuat dengan metode metalurgi serbuk. Perilaku kuat tekan komposit Al/SiC dikaji dari segi berhasil tidaknya pembentukan ikatan antar muka yang dikaitkan dengan sifat fisis densitas dan porositas karena pemanasan pra kompaksi. Ikatan antar muka Al/SiC diamati dengan alat *X-ray Diffraction* (XRD), morfologi distribusi partikel SiC dalam Al diamati dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan sifat kekuatan tekan diuji dengan alat uji tekan dengan standar ASTM D 695.

II. METODE EKSPERIMEN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk komersial aluminium (Al, 99%, $E = 73 \text{ GPa}$, titik leleh 638°C , densitas $2,77 \text{ gr/cm}^3$), serbuk silikon karbida (SiC, 99%, $E = 410 \text{ GPa}$, titik leleh 2837°C , densitas $2,9 \text{ gr/cm}^3$) dan serbuk zinc stearat ($\text{Zn}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$). Serbuk zinc stearat berfungsi sebagai bahan pelumas antara campuran serbuk Al/SiC dengan dinding cetakan agar gaya tekan pada saat pengujian terdistribusi merata ke segala bagian campuran serbuk baik yang ditengah maupun yang bersinggungan dengan dinding cetakan.

Komposit Al/SiC dengan komposisi Al:SiC sebesar 80:20%wt dibuat dengan metode metalurgi serbuk yang meliputi pemanasan pra-kompaksi, kompaksi, pra-sinter, sinter dan selanjutnya dilakukan pengujian kuat tekan. Serbuk Al sebagai matrik dan SiC sebagai pengisi ditimbang sesuai komposisi. Sebelum proses pencampuran serbuk Al sebagai matrik dipanaskan pada temperatur 40, 60, dan 80°C masing-masing dalam waktu 1 jam dengan tujuan untuk memudahkan proses pencampuran dan kompaksi. Serbuk Al yang telah dipanaskan dan SiC kemudian dicampur secara mekanik pada temperatur kamar (*dry mixing*) sampai homogen menggunakan alat *High-Speed Planetary Miller* (MTI-SFM1) dalam waktu 5 jam dengan kecepatan putar 100 rpm. Serbuk

yang telah tercampur dimasukkan ke dalam cetakan berbentuk silinder yang sebelumnya sudah diolesi dengan zinc stearat untuk mempermudah proses kompaksi. Proses kompaksi dilakukan dengan penekanan sebesar 300 MPa dengan waktu tahan selama 10 menit. Setelah didapatkan sampel sesuai dengan bentuk cetakan yaitu silinder dilakukan proses pra sinter pada temperatur 200°C selama 1 jam guna menghilangkan tegangan sisa akibat kompaksi. Selanjutnya dilakukan proses sintering pada temperatur 400, 500, dan 600°C dalam waktu 2 jam.

Densitas komposit Al/SiC diukur dengan metode *Archimedes*, terbentuknya fasa baru diamati dengan XRD merk PanAnalytical Type Expert Pro dan morfologi distribusi SiC dalam Al diamati dengan SEM merk FEI type Inspect-S50, kekuatan tekan diuji dengan alat uji tekan *Torsee Universal Testing Machine* dengan mengacu ASTM D 695.

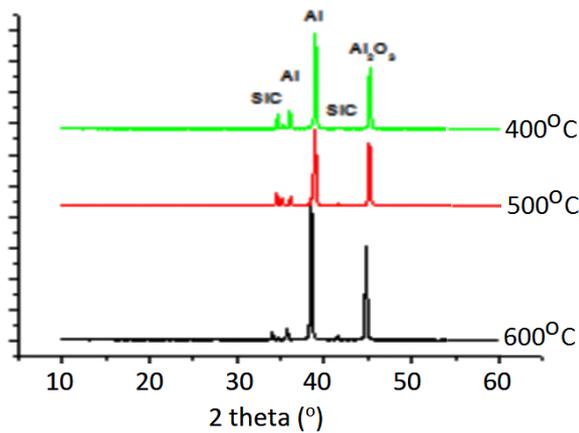
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Efek pemanasan pra-kompaksi dan sinter terhadap densitas

Pembuatan komposit Al/SiC dengan metode metalurgi serbuk meliputi pencampuran, pemadatan serbuk dengan tekanan (kompaksi) dan pemanasan. Kompaksi dilakukan untuk membentuk ikatan mekanik antar partikel Al dan SiC akibat gaya luar sehingga terbentuk padatan dengan densitas tinggi. Kompaksi dalam pembentukan komposit secara metalurgi serbuk dapat dilakukan pada temperatur kamar disebut kompaksi dingin (*cold compressing*) dan kompaksi yang dilakukan di atas temperatur kamar (*hot compressing*). Pada penelitian ini komposit Al/SiC dibuat secara kompaksi dingin dengan memberi pemanasan 40, 60, dan 80°C masing-masing selama 1 jam pada serbuk Al dan SiC terlebih dahulu. Pemanasan pra kompaksi dilakukan guna meningkatkan kemudahan terbentuknya ikatan antar muka secara mekanik akibat penekanan.

Kemudahan terbentuknya ikatan antar muka serbuk Al sebagai matrik dan SiC menentukan tingginya densitas komposit. Densitas komposit bergantung pada ukuran partikel pengisi dan tingkat homogenitas kerapatan dalam komposit [1]. Dalam penelitian ini untuk meningkatkan homogenitas kerapatan diupayakan dengan memberikan *lubricant*/pelumas (*zinc stearate*) yang dioleskan pada dinding cetakan (*die-wall compressing*) untuk mengurangi gesekan antar partikel dan dinding cetakan. Pelumas yang digunakan adalah *zinc stearate* tidak reaktif secara kimiawi terhadap campuran serbuk Al/SiC dan memiliki titik leleh rendah sehingga pada awal proses sintering pelumas dapat menguap [2].

Tahap akhir pembentukan komposit dalam metalurgi serbuk adalah pemanasan yang disebut sintering. Sintering merupakan suatu proses pengikatan partikel melalui proses pemanasan pada temperatur dibawah titik leleh dari material komposit yang dilakukan sesudah proses penekanan. Sebelum proses sinter, selalu diawali dengan proses presinter dengan tujuan untuk mengurangi *residual stress* akibat proses kompaksi dan mengeluarkan gas dari atmosfer atau pelumas padat yang terjebak dalam porositas bahan komposit serta menghindari perubahan temperatur yang terlalu cepat pada saat proses



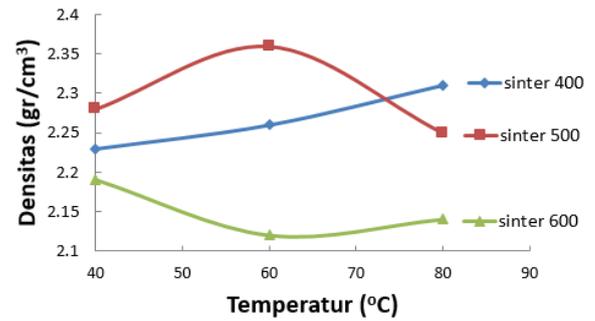
Gambar 1: Difraktogram XRD komposit Al/SiC pemanasan pra-kompaksi 40°C tersinter 400, 500 dan 600°C.

TABEL I: Fasa terbentuk dalam komposit Al/SiC pemanasan pra-kompaksi 40°C tersinter 400°C.

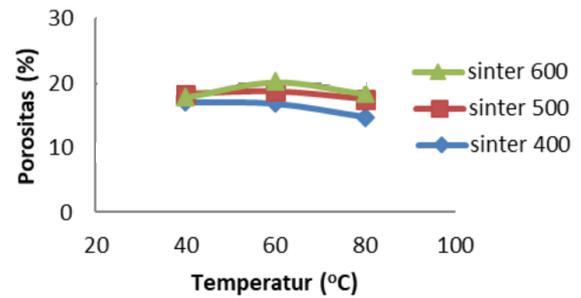
Sudut 2θ (°)	$d(\text{Å})$	Fasa
34,04	2,6317	SiC
35,97	2,4950	Al
38,59	2,3313	Al
41,61	2,1689	SiC
45,78	1,9803	γ -Al ₂ O ₃

sinter (*shock thermal*). Pemanasan pada sinter dari komposit Al/SiC dengan pemanasan pra kompaksi menyebabkan terbentuknya fasa baru pada permukaan kontak seperti yang ditunjukkan hasil pengujian menggunakan alat XRD pada Gambar 1.

Fasa-fasa yang terbentuk dalam komposit Al/SiC pasca sinter yang mengalami pemanasan pra-kompaksi 40°C dan rerata ukuran kristal (d) dihitung menggunakan persamaan Bragg: $n\lambda = 2d \sin\theta$ dengan λ adalah panjang gelombang, d merupakan jarak kisi kristal dan θ adalah sudut difraksi. Hasil analisis menggunakan software *Match*, untuk ketiga sampel uji yaitu pada temperatur sinter 400, 500, dan 600°C dengan suhu pemanasan matrik prakompaksi 40°C ternyata mempunyai pola difraksi yang hampir sama. Fasa Al dan SiC menunjukkan fasa matrik dan pengisi dalam struktur komposit dan muncul fasa baru yaitu fasa oksida logam γ -Al₂O₃ (*aluminium oxide*) pada sudut $2\theta = 45,78^\circ$. Terbentuknya formasi γ -Al₂O₃ pada permukaan Al dalam lingkungan atmosfer mengikuti persamaan $2 \text{Al} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$. Munculnya fasa γ -Al₂O₃ ini menunjukkan adanya oksidasi yang terjadi saat proses sinter di mana oksigen berinteraksi dengan logam Al. Terbentuknya fasa aluminium oksida dan pemanasan sinter akan menentukan sifat kuat tekan dan densitas komposit Al/SiC yang dibuat secara metalurgi serbuk. Sinter pada komposit pasca kompaksi menyebabkan terjadinya ikatan muka antar partikel serbuk, pertumbuhan leher (*necking growth*), penutupan saluran pori, pembulatan pori dan tahap penyusutan (*shrinkage*). Gaya adhesi-kohesi antar par-



(a)



(b)

Gambar 2: Efek pemanasan pra-kompaksi terhadap (a) densitas, dan (b) porositas komposit Al/SiC untuk pemanasan pra-kompaksi dari temperatur 40, 60, dan 80°C.

tikel serbuk merupakan fenomena interaksi awal ikatan antar permukaan partikel setelah proses kompaksi. Fenomena fisis tersebut disebabkan oleh aspek gaya Van der Waals, elektrostatik dan interlocking antar permukaan, hal ini dimungkinkan dapat diperbaiki dengan memberi pemanasan pra kompaksi yang akan menentukan nilai *green density*.

Densitas dan porositas komposit Al/SiC yang telah mengalami pemanasan pra-kompaksi dan sinter dihitung dengan persamaan:

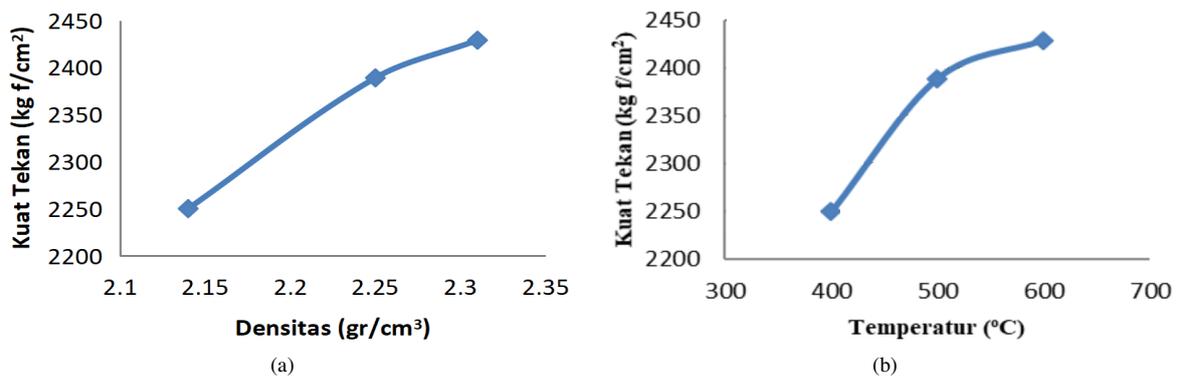
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

dan

$$\phi = \frac{m_b - m_k}{m_k} \times 100\% \quad (2)$$

dengan ρ : densitas (gr/cm^3), V : volume (cm^3), m : massa (gr), ϕ : porositas (%), m_k : massa sampel kering (gram), m_b : massa sampel pasca direndam dalam air (gram). Hasil penghitungan densitas dan porositas ditunjukkan Gambar 2.

Pemanasan prakompaksi matrik Al dari 40, 60, dan 80°C, mempermudah terjadinya ikatan kontak permukaan antar partikel baik Al dengan Al atau Al dengan SiC sebagai pengisi. Hal ini seiring mudahnya dilakukan kompaksi yang menyebabkan jarak antar partikel menjadi semakin semakin kecil sehingga densitas komposit menjadi besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2(a) pada sintering 400 dan 500°C nilai densitas meningkat untuk pemanasan pra kompaksi hingga 60°C. Menurunnya jarak antar partikel disebabkan



Gambar 3: Kuat tekan komposit Al/SiC (a). pemanasan pra kompaksi 40, 60 dan 80°C yang disinter 400°C, (b). pemanasan pra kompaksi 40°C yang disintesis 400, 500 dan 600°C.

oleh elastisitas atom-atom dalam kisi sehingga mudah dilakukan pemampatan saat kompaksi, pemanasan sinter hingga 500°C dapat meningkatkan ikatan antar muka dan timbul fasa baru γ -Al₂O₃ sehingga menurunkan densitas crack saturasi Al sebagai matrik [5]. Pada sinter 600°C terjadi penurunan nilai densitas hingga pemanasan pra-kompaksi 60°C namun terjadi peningkatan densitas pada pemanasan pra-kompaksi 80°C. Penurunan densitas ini terjadi disebabkan oleh terbentuknya pori sebagai akibat terputusnya ikatan antar muka karena temperatur tinggi dengan intensitas yang lebih banyak dan elastisitas atom-atom dalam kisi sudah menurun sehingga peregangan meningkat menuju plastisitas dari kesetimbangan kisi dan kemungkinan terjadinya cracking sehingga memperbesar volume. Peningkatan densitas pada pemanasan pra-kompaksi 80°C dimungkinkan karena terbentuknya fasa γ -Al₂O₃ pada ikatan antar muka baru Al-SiC yang mereduksi cracking sehingga dapat memperkecil volume.

Densitas suatu material dipengaruhi oleh porositas. Semakin besar temperatur pemanasan pra-kompaksi semakin menurunkan nilai porositas. Penurunan porositas sebagai akibat dari semakin mudahnya partikel matrik-pengisi untuk dilakukan pemadatan melalui kompaksi. Semakin tinggi temperatur pemanasan matrik maka semakin mudah terbentuk ikatan antar partikel semakin kuat sehingga jarak partikel menjadi semakin rapat atau semakin kecil yang menyebabkan pori-pori menurun. Hasil pengujian porositas bahan komposit Al/SiC yang mengalami pemanasan pra-kompaksi 40°C hingga 80°C menunjukkan perilaku penurunan porositas dengan nilai porositas terendah pada temperatur pemanasan pra-kompaksi matrik 80°C pada temperatur sinter 400°C sebesar 14,74%. Namun data masih menunjukkan ketidak konsistenan terhadap nilai densitas secara teoritis di karenakan masih dimungkinkan ketidak seragaman dalam distribusi pengisi karena ketidak sempurnaan dalam proses pencampuran padat. Tingkat keporousan komposit juga dipengaruhi oleh distribusi serbuk. Pada komposit Al-SiC porositas terjadi pada daerah antar muka matrik dan penguat. Jika distribusi serbuk SiC kurang merata terhadap matriknya, maka belum terjadi kontak permukaan yang baik antar kedua serbuk sehingga material tersebut semakin porous.

Pengaruh pemanasan sinter terhadap kuat tekan

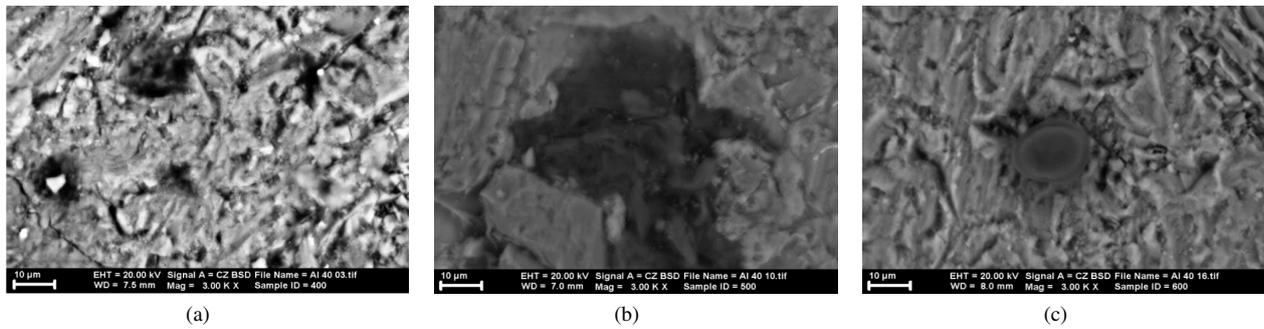
Kuat tekan suatu bahan adalah kemampuan bahan dalam menahan beban atau gaya mekanik dari luar sampai terjadinya kerusakan (failure). Kuat tekan suatu bahan dihitung dengan persamaan:

$$P = \frac{F}{A} \quad (3)$$

dengan P: kuat tekan (kgf/cm²), F: beban maksimum (kgf), A: luas penampang sampel uji = $\pi d^2/4$ (cm²). Nilai kuat tekan dipengaruhi oleh nilai densitas, semakin tinggi nilai densitas dari suatu bahan maka semakin tinggi nilai kuat tekannya. Bahan komposit Al/SiC yang dibuat secara metalurgi serbuk yang meliputi tahap pencampuran, pemadatan dan pemanasan (pra-kompaksi dan sinter) maka kuat tekan sangat ditentukan oleh densitas. Densitas komposit ditentukan oleh keberhasilan ketiga tahapan tersebut. Densitas komposit yang tinggi maka komposit tersebut memiliki kuat tekan yang tinggi pula, artinya dibutuhkan energi mekanik yang besar untuk menghancurkan komposit tersebut. Kuat tekan komposit Al/SiC yang dibuat dengan metalurgi serbuk pada pemanasan pra-kompaksi dan sinter ditunjukkan Gambar 3.

Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh dengan nilai 2429 kgf/cm² atau setara dengan 243 MPa pada temperatur 600°C. Secara teoritik nilai kuat tekan dari komposit Al/SiC berkisar antara 300-450 MPa. Nilai ini masih jauh berbeda dengan kuat tekan yang diperoleh secara eksperimen. Hal ini kemungkinan juga disebabkan oleh distribusi dari partikel serbuk Al dan SiC yang kurang merata sehingga ikatan antara matrik Al dan penguat SiC kurang maksimal sehingga pada penekanan dengan gaya 243 MPa sampel uji sudah hancur (retak).

Gambar 4 menunjukkan morfologi permukaan komposit hasil pengamatan menggunakan SEM dengan perbesaran 3000X. Pada dasarnya kehomogenan distribusi Al/SiC akan berpengaruh pada kualitas sifat kuat tekan. Dalam tahap awal proses sintering, atom-atom akan bergerak untuk memperbanyak jumlah kontak antar partikel. Kondisi ini kemudian



Gambar 4: Foto SEM komposit Al/SiC pemanasan prakompaksi 40°C tersinter (a). 400°C (b). 500°C, (c). 600°C.

terus mengalami perbaikan di tahap-tahap berikutnya dengan terbentuknya ikatan antar partikel Al dan SiC yang terus-menerus mengeliminasi porositas antar butir selama holding time. Semakin homogen distribusi partikel, maka semakin besar pula porositas yang tereliminasi, yang berimbas pada kepadatan dari komposit [6, 8]. Hasil pengamatan SEM pada Gambar 4 untuk masing-masing temperatur menunjukkan masih terdapat belum sepenuhnya distribusi SiC dalam Al dan ikatan antar muka sehingga dapat mengurangi sifat fisis dan kuat tekan dari komposit. Ketidak sempurnaan pembentukan ikatan antar muka partikel Al dan SiC menyebabkan mudah terputusnya ikatan antar muka (*cracking*) tersebut membentuk pori ketika mendapatkan panas sinter yang tinggi [9]. Hal ini terlihat pada sinter 500 dan 600°C yang ditunjukkan Gambar 4(b) dan 4(c) pori terlihat menjadi lebih besar sehingga berpengaruh pada densitas dan kuat tekan komposit Al/SiC. Pada penelitian ini didapat densitas tertinggi 2,36 gr/cm³ dan kuat tekan 243 MPa yang masih berbeda dengan nilai densitas dan kuat teoritis antara 2,6-3,1

gr/cm³ dan 300-400 MPa. Pemanasan pra kompaksi pada temperatur 60°C dan sintering pada temperatur 500°C kombinasi pemanasan yang terbaik untuk mendapatkan kuat tekan terbaik dari komposit Al/SiC yang dibuat secara metalurgi serbuk.

IV. SIMPULAN

Pemanasan pra-kompaksi pada matrik Al hingga temperatur 60°C dan temperatur sinter hingga 500°C dapat meningkatkan nilai densitas dan kuat tekan komposit Al/SiC yang dibuat dengan metode metalurgi serbuk. Peningkatan densitas dan kuat tekan komposit Al/SiC dimungkinkan karena terbentuknya fasa γ -Al₂O₃ pada bidang kontak permukaan Al-SiC akibat pemanasan sinter. Fasa γ -Al₂O₃ dapat memperkuat ikatan antar muka dan mereduksi porositas sehingga densitas dan kuat tekan meningkat.

-
- [1] T. Ve, Y. Xu, J. Ren, "Effects of SiC particle size on mechanical properties of SiC particle reinforced aluminum metal matrix composite", *Materials Science & Engineering A*, vol. 753, pp. 146-155, 2019.
- [2] H. Izadi, *et al.*, "Friction Stir Processing of Al/SiC Composite Fabricated by Powder Metallurgy", *Journal of Material Processing Technology*, vol. 213, pp. 1900-1907, 2013
- [3] A.K. Kumar Bodukuri, K. Eswarajah, K. Rajendar, V. Sampath, "Fabrication of Al-SiC-B4C metal matrix composite by powder metallurgy technique and evaluating mechanical properties", *Perspectives in Science*, vol. 8, pp. 428-431, 2016.
- [4] M. Zainuri, E.S. Siradj, D. Priadi, A. Zulfia, dan D. Darminto, "Pengaruh Pelapisan Permukaan Partikel SiC dengan Oksida Metal terhadap Modulus Elastisitas Komposit Al/SiC". *Jurnal MAKARA, SAINS*, vol. 12, no. 2, hlm. 126-133, 2008.
- [5] X. Han, X. Gao, Y. Song, "Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical behavior of SiC/SiC mini-composites", *Materials Science & Engineering A*, vol. 753, pp. 146-155, 2019.
- [6] D. Mandal, S. Viswanathan, "Effect of heat treatment on microstructure and interface of SiC particle reinforced 2124 Al matrix composite", *Materials Characterization*, vol. 85, pp. 73-81, 2013.
- [7] J.M. Zhan, *et al.*, "Tensile deformation of nanocrystalline Al-matrix composites: Effects of the SiC particle and graphene", *Computational Materials Science*, vol. 156, pp. 187-194, 2019.
- [8] F. Teng, *et al.*, "Microstructure and properties of Al-50%SiC composites for electronic packaging applications", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 26, pp. 2647-2652, 2016.
- [9] B.L. Madej, D. Garbiec, M. Madej, "Effect of sintering temperature on microstructure and selected properties of spark plasma sintered Al-SiC composites", *Vacuum*, vol. 164, pp 250-255, 2019.