

DOI: doi.org/10.21009/0305020211

PEMANASAN CEPAT KERAMIK KOMPOSIT SiC-ZrO₂ DENGAN MICROWAVE DAN KARAKTERISASINYA

Lydia Anggraini^{1,a)}

¹Universitas Presiden, Jl. Ki Hajar Dewantara, Kota Jababeka, Cikarang Baru, Bekasi 17550

Email: ^{a)}lydia.anggra@president.ac.id

Abstrak

Ceramic Matrix Composite (CMC) memiliki keunggulan dalam kekerasan dan ketahanan panas. Selain itu, dengan penguatan menggunakan bahan keramik ZrO₂, maka akan memberikan peningkatan resistansi suhu tinggi dan ketangguhan mekanik. Komposit SiC-ZrO₂, juga banyak diaplikasikan sebagai material dasar untuk komponen produk otomotif, seperti: busi, *turbo-charge*, kepala piston, sil pompa, katub rotor, dan komponen lainnya yang berhubungan dengan aplikasi material tahan panas. Pada penelitian ini keramik komposit SiC-ZrO₂ disiapkan dengan penggilingan mekanis selama 144 ks dan dipanaskan menggunakan *microwave* tipe *single-mode* 2,45 GHz. Efek yang berbeda dari medan listrik dan magnetik diperiksa pada daya konstan 800 W. Spesimen kompak setelah pemanasan dan struktur mikro diamati dengan *Scanning Electron Microscope (SEM)* dibandingkan dengan teknik pemanasan lainnya. Perbandingan struktur mikro pada kedua tipe pemanasan dilakukan pada suhu konstan (~1273 K). Suhu *microwave* diukur dan dikendalikan dengan termometer radiasi infra merah. Hasil dari pemanasan cepat menggunakan *microwave* terdapat pemanasan lokal, di mana panas terkonsentrasi pada satu daerah saja. Hasil dari perubahan struktur mikro pada *microwave* didapatkan bahwa dengan peningkatan waktu pemanasan tidak terdapat pertumbuhan ukuran butir (*grain growth*) dengan pengaruh waktu pemanasan yang terpanjang pada *microwave*.

Kata-kata kunci: Pemanasan, Microwave, Keramik komposit, SiC-ZrO₂, Struktur mikro.

Abstract

Ceramic Matrix Composite (CMC) have advantages in hardness and heat resistance. In addition, by strengthening the use of a ceramic material ZrO₂, it will provide improved high temperature resistance and fracture toughness. SiC-ZrO₂ composites, are also widely applied as a base material for components of automotive products, such as: spark plugs, turbo-charged, piston heads, pump seals, valve rotor and other components associated with the application of heat-resistant material. Ceramics matrix composite of SiC-ZrO₂ was prepared using mechanical milling for 144 ks and heated using single-mode 2.45 GHz microwave sintering technique. The different effect of electric and magnetic fields were examined at a constant power of 800 W. The final compact specimen and the microstructures observed by scanning electron microscope (SEM) were compared to another field assisted sintering technique, also known as, spark plasma sintering (SPS). The comparison of the microstructure in both microwave and SPS were carried out at a constant temperature (~1273 K). The temperature of the microwave was controlled by adjusting the power and has been measured by an infrared radiation thermometer. Shell-core microstructures have been obtained by microwave sintering. Nevertheless, single-mode microwave sintering is generated through local heating, where heat is concentrated in the one area. The result of microstructure change in the microwave reported that the longer sintering time the size of core and shell area does not increase. In addition, grain growth was not found with the influence of the longest microwave sintering time.

Keywords: Sintering, Microwave, Ceramics Composite, SiC-ZrO₂, Microstructure.

1. Pendahuluan

Perkembangan dalam pengolahan bahan menggunakan teknologi *microwave* telah menunjukkan banyak keuntungan, termasuk penghematan energi, produk dengan sifat yang lebih baik dan penghematan besar dalam pengolahan siklus waktu [1,2]. Secara

historis, teknologi *microwave* awalnya hanya ditargetkan untuk produksi pangan. Saat ini, penggunaan *microwave* telah dikembangkan untuk pengolahan bubuk metalurgi atau dikenal dengan *sintering*, dimana hanya membutuhkan waktu yang sangat singkat. Banyak peneliti telah menunjukkan bahwa kebanyakan serbuk keramik dapat disinter dengan *oven microwave* pada

suhu yang lebih rendah untuk waktu yang lebih pendek dari *sintering* konvensional [3-7]. Para peneliti juga melaporkan bahwa potensi aplikator pada pemanasan menggunakan *microwave* tipe *single-mode* mampu mempertahankan serbuk berukuran nanometer pada spesimen yang dipadatkan [5-8], untuk waktu *sintering* yang jauh lebih singkat jika dibandingkan dengan pemanasan yang dilakukan oleh pemanas konvensional. Namun, hasil penelitian mereka dengan menggunakan pemanasan secara konvensional hanya menunjukkan struktur mikro yang tradisional. Sementara itu, di laboratorium kami mengembangkan struktur harmonik yang terdiri dari struktur mikro *shell-core* dan diterapkan pada bahan logam. Dari hasil percobaan pada bahan logam, telah terbukti bahwa struktur harmonik memiliki pengaruh pada peningkatan sifat mekanik secara berkesinambungan [9-15].

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk memahami mekanisme perbedaan struktur mikro keramik komposit yang diperoleh dari *microwave sintering* dan dibandingkan dengan konvensional. Untuk tujuan ini, kami memilih keramik silikon karbida (SiC) dengan penambahan zirkonia (ZrO_2). SiC- ZrO_2 keramik komposit disatukan oleh proses penggilingan mekanik (*Mechanical Milling*, MM). Sebuah instrumen *microwave* aplikator dengan tipe *single-mode* berfrekuensi 2,45 GHz dilengkapi pengukuran termometer menggunakan radiasi inframerah (IR). Dalam tulisan ini, percobaan langsung menggunakan pemanasan *microwave* dengan efek yang berbeda dari bidang listrik (E) dan magnetik (H) juga diperiksa pada awal mula serbuk keramik dengan daya konstan 800 W. Selama pengolahan menggunakan *microwave*, suhu dikontrol dengan mengubah-ubah daya. Struktur mikro pada bahan yang disinter diamati di daerah penampang spesimen. Fenomena spesifik yang berhubungan dengan struktur mikro dan pemahaman mekanisme yang tepat untuk mencapai tahap yang diinginkan pada pola konektivitas *shell-core* dalam bahan keramik komposit akan dibahas lebih rinci pada penelitian ini.

2. Metode Penelitian

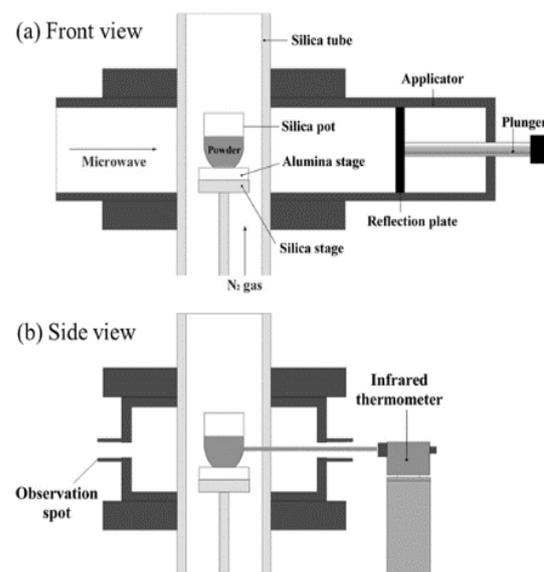
2.1 Metode Penggilingan Mekanik (MM)

Sebagai proses pra-sintering, penggilingan mekanik, yang dikenal sebagai metode *grinding*, digunakan dalam memperoleh senyawa pada suhu kamar. Serbuk SiC berukuran $2 \sim 3 \mu m$ dicampur dengan komposisi massa 50% dari serbuk ZrO_2 berukuran $1 \mu m$. Hal ini digunakan sebagai bahan awal dan digiling secara mekanis dengan menggunakan bola berbahan tungsten karbida dan kobalt (WC-Co) dengan diameter 5 mm dan pot berdiameter 60 mm. Proses penggilingan (MM) pada serbuk SiC- ZrO_2 dilakukan dengan menggunakan mesin getaran bernama Super Misuni. MM adalah teknik metalurgi serbuk yang ideal untuk aplikasi *grinding* kapasitas rendah, pencampuran atau mendispersikan

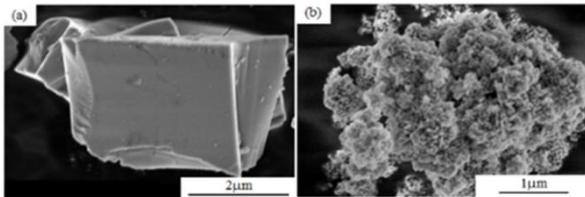
bahan, dan bahan pendingin untuk memberikan bentuk khusus atau persiapan permukaan. Metode ini memiliki beberapa keuntungan, termasuk biaya fabrikasi yang rendah, metode sintesis yang sederhana dan mudah [16]. MM ini dilakukan dengan frekuensi getar mulai 125 Hz. Rasio serbuk dan berat bola adalah 1:5. Waktu penggilingan serbuk SiC- ZrO_2 dari 144 ks juga disiapkan. Setelah proses MM, serbuk diperiksa oleh mesin difraksi meter X-Ray (XRD) dan mikroskop elektron (SEM). Selanjutnya, serbuk ini akan diterapkan pada proses pemadatan dingin sebelum diteruskan ke aplikator *microwave*.

2.2 Microwave sintering

Skema pengesetan percobaan ini diilustrasikan pada Gambar. 1 (BEI, MSS-TE0004, Jepang) dengan aplikator *microwave* tipe *single-mode* dan terkait dengan magnetron yang memberikan kekuatan kemajuan variabel hingga 2 kW pada frekuensi 2,45 GHz. Spesimen terletak di dalam wadah kuarsa dan diproses dalam suasana nitrogen yang mengalir. Mereka ditetapkan pada piring kuarsa dan dikelilingi oleh tabung silika untuk isolasi termal, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (a). Suhu permukaan di atas spesimen dan *susceptor* yang terus diukur dengan kamera *infrared*, IR (Chino, IR-CAI), yang terletak 170 mm di belakang aplikator, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (b). Kamera ini mengkonversi radiasi inframerah dari permukaan menghadap ke sebuah gambar yang menggambarkan nilai suhu untuk setiap pixel dan juga dapat menghitung nilai rata-rata di zona yang ditentukan dari gambar yang diperlukan untuk masukan adalah emisivitas permukaan, yang mana mungkin sulit untuk mengevaluasi secara akurasi, khususnya pada suhu tinggi.



Gambar 1. Ilustrasi pemanasan cepat *microwave*



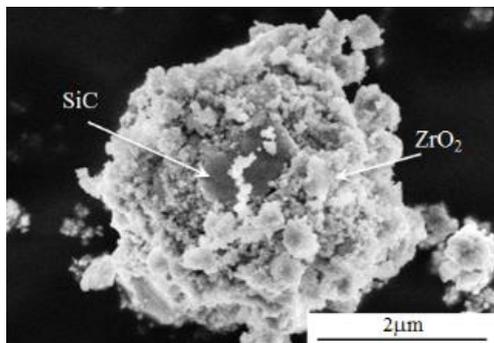
Gambar 2. Struktur mikro awal (a) SiC dan (b) ZrO₂.

Sepanjang pengujian pemisahan bidang-E dan H, kami mengeset spesimen dengan mengubah ubah *plunger* pada panjang 142 mm dan 102.25 mm untuk setiap bidang, masing-masing. Dalam rangka untuk mengevaluasi perubahan struktur mikro dari microwave *sintering*, daya dikendalikan dan mendefinisikan pada suhu ~1273 K dengan waktu *sintering* berulang kali mulai dari 0.18, 0.36, 0.60 sampai dengan 1.80 ks.

3. Hasil dan Pembahasan

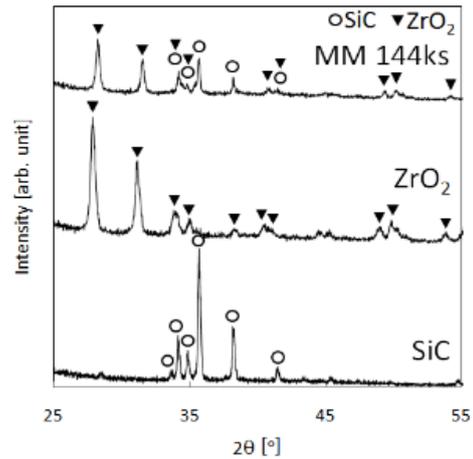
3.1 Karakterisasi Serbuk MM

Gambar 2 (a) dan (b) menunjukkan penampilan awal serbuk SiC dan ZrO₂, masing-masing, sebelum penggilingan. Serbuk SiC awal menunjukkan bentuk tidak teratur dan karakteristik serbuk ZrO₂ adalah partikel yang menggumpal. Selain itu, penampilan serbuk komposit SiC-ZrO₂ akan berubah setelah dilakukan penggilingan dengan periode waktu dari 144 ks, yang ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dispersi penyebaran serbuk ZrO₂ mengelilingi permukaan serbuk SiC.



Gambar 3. Komposit SiC-ZrO₂ setelah penggilingan selama 144 ks.

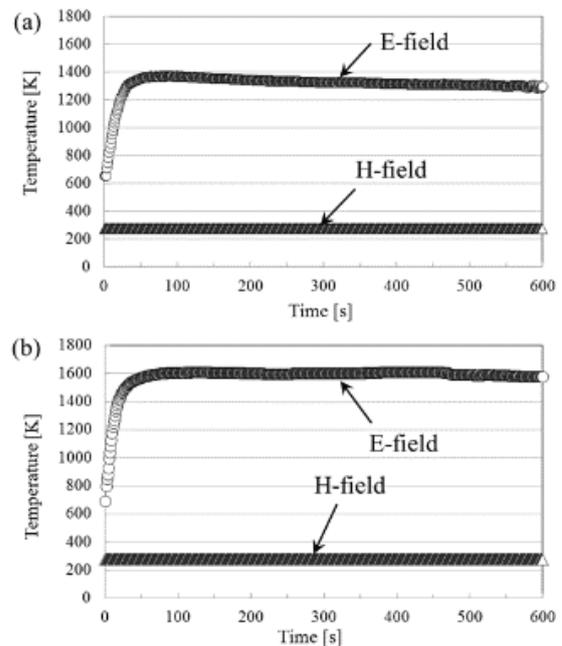
Gambar 4 menunjukkan pola difraksi Sinar-X pada serbuk komposit awal dan setelah mengalami penggilingan mekanis selama 144 ks. Dari hasil ini menunjukkan bahwa setelah proses MM, serbuk SiC-50mass%ZrO₂ mengalami fase tetap atau dikatakan tidak ada perubahan fase yang terjadi.



Gambar 4. Difraksi Sinar-X

3.2 Profil Pemanasan Microwave

Microwave sintering dilakukan pada frekuensi 2,45 GHz. Dalam evaluasi yang berbeda efek bidang-E dan H, penerusan dayanya dilakukan secara konstan sampai 800 W. Untuk pengaturan maksimum pada *plunger* bidang-E ditetapkan dengan panjang 142 mm dan 102,25 mm untuk bidang-H.



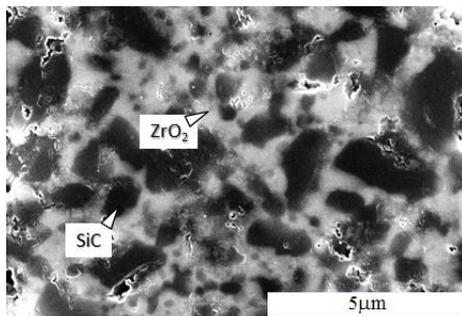
Gambar 5. Perlakuan panas dengan microwave pada serbuk (a) SiC bidang-E dan (b) ZrO₂ bidang-H dilakukan dengan daya 800 W.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada bidang-E, serbuk keramik SiC dan ZrO₂ dapat disinter tidak seperti pada bidang-H, hal ini dikarenakan, serbuk keramik tersebut memiliki intensitas yang lebih tinggi pada medan listrik dibandingkan daripada medan magnet. Oleh karena itu, efek dari bidang-E dan H pada masing-masing sampel menunjukkan bahwa awal, keramik SiC dan ZrO₂ dipanaskan secara efektif dengan bidang-E

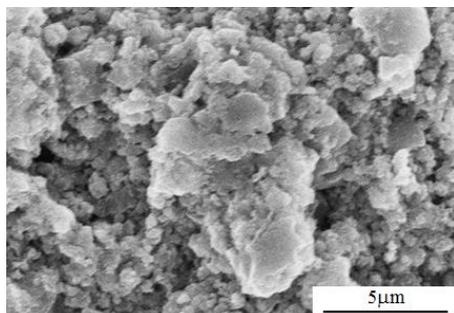
tapi tidak dengan bidang-H seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 5 (a) - (b).

3.3 Struktur Mikro

Selama pengujian dengan *microwave sintering*, suhu ditetapkan tetap pada 1273 K dengan mengendalikan dayanya, dan waktu ditentukan pada 0.60 ks. Setiap bubuk komposit dipanaskan pada bidang-E. Untuk perbandingan struktur mikro, kami juga menerapkan spesimen yang sama ke lapangan pada teknik *sintering* yang lain juga dikenal sebagai *Spark Plasma Sintering* (SPS). Pada SPS, kami menerapkan kondisi *sintering* yang sama, yaitu suhu 1273 K dan waktu tahan 0.60 ks.



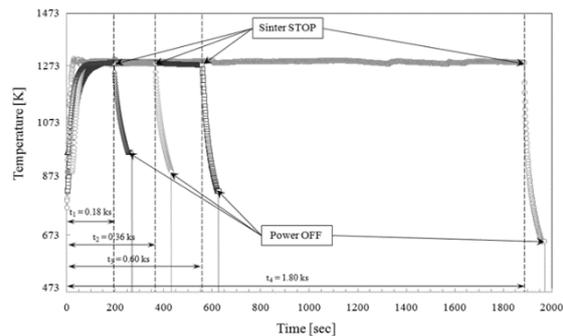
Gambar 6. SiC-ZrO₂ pemanasan microwave 1273 K selama 0.6 ks.



Gambar 7. SiC-ZrO₂ pemanasan SPS 1273 K selama 0.6 ks.

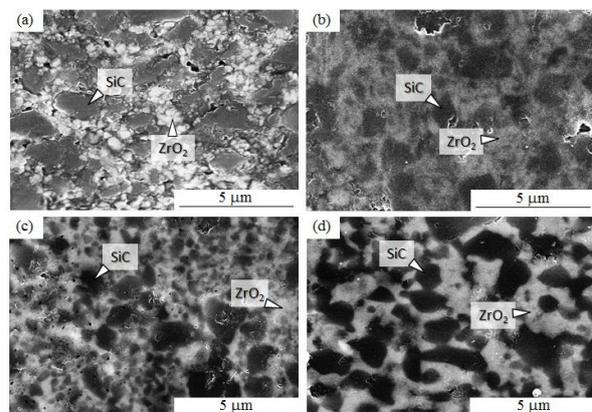
Hasil pengujian struktur mikro dari sinter material menggunakan *single-mode microwave* dapat dianggap sebagai heterogen. Fenomena ini bisa menjadi salah satu keuntungan dari *microwave sintering*, karena serbuk spesimen kompak dapat dihasilkan melalui pemanasan lokal. Gambar 6 menunjukkan struktur mikro yang diambil dengan alat SEM untuk SiC-ZrO₂ yang dihasilkan oleh microwave, disinter pada bagian keramik komposit, hasilnya menunjukkan fenomena pola konektivitas *shell-core* untuk spesimen SiC-ZrO₂ setelah MM selama 144 ks, secara rinci menunjukkan SiC sebagai *core* (inti) dan ZrO₂ sebagai struktur rangka / *shell*. Dari hasil tersebut jelas menunjukkan materi yang berbeda pada struktur jaringan. Selain itu, foto SEM dari spesimen hasil pemanasan dengan SPS ditunjukkan pada Gambar 7.

Dari hasil spesimen SPS menunjukkan bahwa keramik komposit SiC-ZrO₂ tidak dapat disinter pada temperatur 1273 K. Selanjutnya, perubahan struktur mikro pada bahan komposit SiC-ZrO₂ disinter menggunakan microwave diperiksa dengan mengendalikan kekuatan dan memperbaiki suhu di ~1273 K dan dengan berbagai waktu sintering yaitu 0.18, 0.36, 0.60 dan 1.80 ks. Gambar 8 menunjukkan profil pemanasan pada pengujian perubahan struktur mikro. Tombol sinter diaktifkan secara manual pada awal mulai dan berhenti dengan waktu *sintering* yang telah ditetapkan sebelumnya.



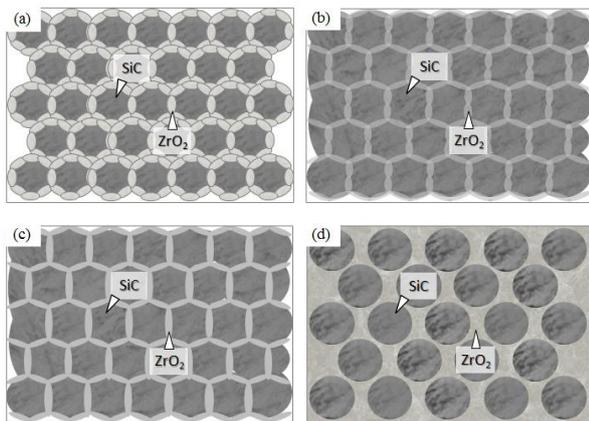
Gambar 8. Profil perlakuan panas dengan microwave menggunakan waktu tahan 1273 K.

Gambar 9 (a) - (d) menunjukkan hasil perubahan struktur mikro menggunakan *microwave sintering*. Hasil yang diperoleh dari perubahan struktur mikro pada $t_1 = 0.18$ ks, adalah bahwa kedua butir SiC dan ZrO₂ tersebar pada seluruh permukaan komposit. Pada saat, $t_2 = 0.36$ ks, ZrO₂ mulai mengembun dan penutupan pori-pori dapat diamati dengan biji-SiC membentuk fase cair. Fenomena ini terjadi karena suhu leleh SiC adalah ~2273 K dan ZrO₂ adalah ~2973 K [17]. Dengan demikian, suhu sintering SiC diperkirakan akan lebih rendah dari ZrO₂. Pemanasan menggunakan *microwave sintering* pada seluruh serbuk dilakukan pada ~1273 K.



Gambar 9. Perubahan struktur mikro pada SiC-ZrO₂ setelah pemanasan mikrowave selama (a) 0.18 ks, (b) 0.36 ks, (c) 0.6 ks dan (d) 1.8 ks.

Jadi pada komposit, butir SiC akan sinter pertama dan akan mengelilingi butir ZrO₂ seperti yang ditunjukkan pada ilustrasi di Gambar 10. Bintik hitam adalah serbuk SiC dan bintik abu-abu adalah ZrO₂. Bercak putih adalah porositas dalam komposit. Pada saat, $t_2 = 0.60$ ks, baik dari SiC dan ZrO₂ menjadi lebih jelas, akhirnya pada waktu *sintering* paling lama $t_3 = 1.80$ ks, suhu akan lebih tinggi dari suhu *sintering* murni SiC, selesai *sintering*, SiC akan mengelilingi serbuk ZrO₂.

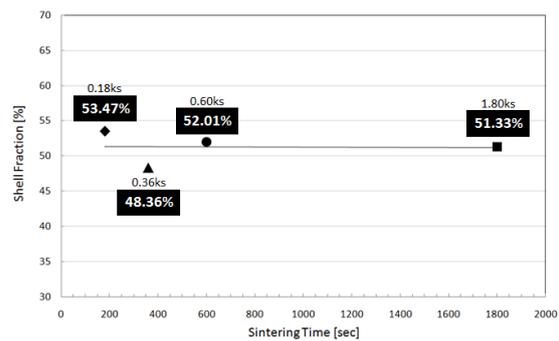


Gambar 10. Ilustrasi perubahan struktur mikro pada SiC-ZrO₂ setelah pemanasan mikrowave selama (a) 0.18 ks, (b) 0.36 ks, (c) 0.6 ks dan (d) 1.8 ks.

Selain itu, perhitungan *shell* dan daerah fraksi inti pada hasil struktur mikro dengan menggunakan analisis, juga dilakukan. Dari perhitungan *shell* dan daerah fraksi inti menunjukkan bahwa dengan peningkatan waktu *sintering*, jumlah daerah inti dan *shell* tidak meningkat, yang ditunjukkan pada Gambar 11. Hasil ini membuktikan keuntungan dari *microwave sintering* tidak hanya sebagai efisiensi waktu dan hemat energi, tetapi juga untuk mencegah dari pengkasaran biji-bijian.

3.4. Pembahasan

Tujuan utama dari penelitian ini adalah perbandingan dari struktur mikro dengan pemanasan *microwave* dan percikan plasma SPS yang ditujukan untuk bubuk keramik komposit. Memperjelas mekanisme yang tepat dalam mencapai fase yang diinginkan untuk mendapatkan pola konektivitas *shell-core* dalam komposit dengan menggunakan *single-mode microwave sintering*.



Gambar 11. Hubungan antara fraksi *shell* pada struktur mikro SiC-ZrO₂ setelah pemanasan *microwave* dengan waktu tahan *sintering*.

Hasil struktur mikro diperoleh dengan *microwave sintering* pada keramik komposit bisa membentuk struktur jaringan *shell-core*. Hal ini karena, ZrO₂ memiliki nilai lebih tinggi pada konstanta dielektrik dan kerugian dielektrik, dibandingkan dengan SiC. Selanjutnya, itu akan menyerap energi gelombang mikro lebih dari SiC. Penyerapan energi medan gelombang mikro oleh bahan keramik dihitung dengan menggunakan Persamaan 1:

$$P = \omega \epsilon_0 \epsilon_r |E|^2 = \omega \epsilon_0 \left(\epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) |E|^2 \quad (1)$$

dimana P adalah penyerapan daya, ω adalah frekuensi (2.45 GHz), ϵ_0 adalah permitivitas ruang bebas, ϵ_r adalah konstanta dielektrik, E adalah intensitas medan listrik, ϵ'' adalah faktor kehilangan dielektrik dan σ adalah konduktivitas, berturut-turut. Tabel 1 menunjukkan sifat dielektrik dari masing-masing bahan keramik awal. Penyerapan energi maksimum pada medan gelombang mikro dalam komposit menjadi lebih tinggi setelah penambahan bubuk keramik ZrO₂ ke bubuk SiC. Jadi, dengan aditif ZrO₂, lebih tinggi konstanta dielektriknya dan jaringan yang lebih baik setelah proses MM dengan SiC dan bahan mikro komposit dengan konektivitas *shell-core* dapat diperoleh.

Tabel 1. Properti dielektrik pada bahan keramik dan paduannya (komposit).

No.	Materials	Intensity of Electric Field	Conductivity	Dielectric Loss Factor	Dielectric Constant (Permittivity)
		E	σ	ϵ''	ϵ_r
1	SiC	-	2.4×10^{-6}	0.0075	10.2
2	ZrO ₂	100	1.29×10^{-8}	0.46	32.5
3	YSZ	106	-	0.40	33.4
4	SiC-ZrO ₂	100	2.41×10^{-6}	0.4675	42.7
5	SiC-YSZ	106	2.40×10^{-6}	0.4075	43.6

4. Simpulan

Pemanasan cepat dengan *microwave* SiC-50mass%ZrO₂ telah dilakukan dalam single-mode 2.45 GHz aplikator pada suhu konstan. Berdasarkan hasil percobaan, kesimpulan adalah sebagai berikut:

1. Perlakuan pemanasan *microwave* menunjukkan bahwa keramik awal lebih efektif dipanaskan dengan bidang-E.
2. Pola konektivitas *shell-core* yang terdiri dari struktur *shell* menyeluruh pada ZrO₂ dan SiC ditunjukkan sebagai *core*, telah berhasil dibentuk oleh proses MM dengan waktu penggilingan 144 ks dan pemanasan *microwave* pada suhu 1273 K selama 0.60 sec. Namun, pada suhu pemanasan dan waktu yang sama, keramik komposit ini tidak bisa disinter oleh SPS.
3. Keuntungan dari *microwave* tidak hanya menghemat waktu dan energi tetapi juga mencegah pengkasaran butir.
4. Penambahan ZrO₂ ke SiC, dapat membuat konstanta dielektrik yang lebih tinggi dan konektivitas yang baik, dan akhirnya bahan mikro komposit dengan konektivitas *shell-core* dapat diperoleh.

Daftar Acuan

- [1] W. R. Tinga, Fundamental of microwave-material interactions and sintering, Proc. Mater. Res. Soc. Symp. 124 (1988), p. 33-43.
- [2] A. J. B. Fuller, *Microwaves: An Introduction to Microwave Theory and Techniques*. 3rd ed., Pergamon Press (1990), p. 1-3.
- [3] D. K. Agrawal, Microwave processing of ceramics, Current Opinion in Solid State & Mat. Sci. 3(5) (1998), p. 480-486.
- [4] S. S. Park and T. T. Mark, Characterization of ZrO₂-Al₂O₃ composites sintered in a 2.45 GHz electromagnetic field, J. Mater. Sci. 26 (1991), p. 6309-6313.
- [5] A. W. Fliflet, R. W. Bruce, A. K. Kinkead, R. P. Fischer, D. Lewis, R. Rayne, B. Bender, L. K. Kurihara, G. M. Chow and P. E. Schoen, Application of microwave heating to ceramic processing: design and initial operation of a 2.45-GHz single-mode furnace, IEEE. Trans. Plas. Sci. 24(3) (1996), p. 1041-1049.
- [6] S. Jida, T. Suemasu and T. Miki, Effect of microwave heating on BaTiO₃: Nb ceramics with positive temperature coefficient of resistivity, J. App. Phys. 86(4) (1999), p. 2089-2094.
- [7] O. P. Thakur, C. Prakash and D. K. Agrawal, Dielectric behavior of Ba_{0.95}Sr_{0.05}TiO₃ ceramics sintered by microwave, Mater. Sci. Eng. B96 (2002), p. 221-225.
- [8] O. P. Thakur, C. Prakash and D. K. Agrawal, Structural and electrical properties of microwave-processed BaTiO₃ ceramics, J. Ceram. Proc. Res. 3(2) (2002), p. 75-79.
- [9] H. Fujiwara, R. Akada, Y. Yoshita and K. Ameyama, Microstructure and mechanical property of nano-duplex materials produced by HRS process, Mater. Sci. Forum 503-504 (2006), p. 227-232.
- [10] H. Fujiwara, Y. Iwahashi, K. Ohta and K. Ameyama, Specific phenomena in severe plastic deformation processed SUS310S austenitic stainless steel powder, Mater. Sci. Forum, 558-559 (2007), p. 1305-1308.
- [11] H. Fujiwara, M. Nakatani, Y. Iwahashi and K. Ameyama, Effect of microstructure on mechanical properties of HRS processed SUS316L stainless steel, Adv. Mater. Res. 26-28 (2007), p. 421-424.
- [12] H. Fujiwara, R. Akada, A. Noro, Y. Yoshita and K. Ameyama, Enhanced mechanical properties on nano/meso hybrid structure materials produced by hot roll sintering process, Mater. Trans. 49(1) (2008), p. 90-96.
- [13] H. Fujiwara, M. Nakatani, T. Yoshida, Z. Zhang and K. Ameyama, Outstanding mechanical properties in the materials with a nano/meso hybrid microstructure, Mater. Sci. Forum. 584-586 (2008), p. 55-60.
- [14] H. Fujiwara, T. Sekiguchi and K. Ameyama, Mechanical properties of pure titanium and Ti-6Al-4V alloys with a new tailored nano/meso hybrid microstructure, Int. J. Mater. Res. (formerly Z. Metallkd.) 100 (2009), p. 796-799.
- [15] H. Fujiwara, H. Tanaka, M. Nakatani and K. Ameyama, Effects of nano/meso harmonic microstructure on mechanical properties in austenitic stainless steel produced by MM/HRS process, Mater. Sci. Forum. 638-642 (2010), p. 1790-1795.
- [16] T. Namura, M. Nagumo, Y. Matsumoto, N. Sasaki and K. Ameyama, Superplastic behavior of composites prepared from mechanically alloyed Ti-Si₃N₄ powders, Mater. Sci. Forum. 233-234 (1997), p. 251-260.
- [17] F. Cardarelli, *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*. Springer-Verlag, London (2000), p. 350-364.