
KARAKTERISTIK PERMUKAAN SERAT SILIKON KARBIDA HASIL PEMINTALAN LISTRIK DARI POLYCARBOSILANE DALAM N,N-DIMETILFORMAMIDA (DMF)/ TOLUENA

Deni Mustika¹⁾²⁾, Riwandi Sihombing²⁾, Slamet Pribadi¹⁾, Ratih Langenati¹⁾, Agus Sujatno³⁾,
Arbi Dimyati³⁾, Jan Setiawan¹⁾, Eddy Indarto¹⁾

¹Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

²Departemen Kimia Universitas Indonesia - UI

³Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail: dmustika@batan.go.id

(Naskah diterima : 10-12-2014, Naskah direvisi: 23-01-2015, Naskah disetujui: 26-01-2015)

ABSTRAK

KARAKTERISTIK PERMUKAAN SERAT SILIKON KARBIDA HASIL PEMINTALAN LISTRIK DARI POLYCARBOSILANE DALAM N,N-DIMETILFORMAMIDA (DMF)/ TOLUENA. Silikon karbida (SiC) merupakan keramik non oksida yang memiliki sifat unik seperti ketahanan mekanik, kimia dan stabilitas termal sehingga digunakan dalam berbagai aplikasi. Hasil pemodelan SiC dari beberapa studi yang menunjukkan stabilitas yang baik terhadap radiasi neutron dan permeabilitas yang rendah terhadap produk fisi. Hal ini meningkatkan ketertarikan penggunaan SiC dalam industri nuklir. Untuk meningkatkan sifat mekanik SiC, umumnya dibentuk berupa komposit. Komposit dengan penguat serat menunjukkan karakteristik mekanik yang lebih baik dibandingkan penguat partikel ataupun *whisker*. Pada komposit SiC, sifat mekanik komposit dominan dipengaruhi oleh sifat antar fasa dan atau karakteristik dari permukaan SiC. *Electrospinning* merupakan metode yang menjanjikan untuk menghasilkan serat. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik permukaan serat silikon karbida hasil pemintalan listrik dari *polycarbosilane* dalam N,N-dimetilformamida (DMF)/ toluena. Perbedaan persentase DMF dan *polycarbosilane* dalam toluena mempengaruhi elektrospinnabilitas dan karakteristik permukaan serat yang dihasilkan. Serat SiC yang dihasilkan dari prekursor *polycarbosilane* dengan pelarut toluena dan kopelarut N-N, dimetilformamida (DMF) diperoleh serat kontinu, dengan berbentuk sedikit cekungan menyerupai pita. Adanya titik-titik hitam di permukaan serat hasil pirolisis dimungkinkan akibat adanya karbon bebas dan atau kontaminasi dari grafit material tungku. Serat hasil pirolisis memiliki luas muka sebesar 3,321 – 46,14 m²/g dan pori berukuran mikro, dengan distribusi radius pada rentang 1-3 nm, dengan jumlah pori terbanyak memiliki ukuran kurang dari 2 nm. Suhu pirolisis dan *sintering* yang lebih tinggi diharapkan menghasilkan serat yang minim pori dan densitasnya mampu mendekati densitas teori.

Kata kunci: Serat SiC, polycarbosilane, toluena, DMF, morfologi, SEM, luas muka, material nuklir, komposit.

ABSTRACT

SiC SURFACE CHARACTERISTIC RESULT OF ELECTRIC SPINNING FROM POLYCARBOSILANE IN THE DIMETILFORMAMIDA (DMF) TOLUENA. Non oxide ceramic silicon carbide (SiC) has unique properties such as mechanical strength, chemical and thermal stability that is used in many applications. Results of modelling studies on SiC show good stability

on neutron irradiation and had low permeability againsts fission product increased the interest in the use of SiC in nuclear applications. Composites form was used to increased mechanical properties. Composites that used fiber as filler show better mechanical properties than filler in form particle and whisker. In SiC composites, mechanical properties influenced by interphase properties and/or SiC surface characteristic. Electrospinning was a promising method to form fibers. This research aims to study the characteristics of silicon carbide fiber surface produced from polycarbosilane that solute by toluene and N,N-dimethylformamide (DMF). The addition of DMF and polycarbosilane in toluen affect the electrospinnability and characteristic the surface of fibers. The SiC fibers produced from polycarbosilane that solute by toluen and N,N-dimethylformamide (DMF) form continue fibers with ribbon liked. Black spot on the surface of pyrolysis fibers possible from free carbon or graphite contamination from furnace material. Value of surface area of pyrolysis fibers at 3.321 – 46.14 m²/g and porous in micro size, with distribution its radius in range at 1-3 nm, highgest distribution in size less than 2 nm. Pyrolysis and sintering in higher temperature expected to form fiber with less porous and its density able to approach the theoretical density.

Keywords: SiC fibers, polycarbosilane, toluene, DMF, morphology, SEM, surface area, pore size, nuclear material, composite.

PENDAHULUAN

Silikon karbida (SiC) merupakan keramik non oksida yang memiliki sifat unik seperti ketahanan mekanik, kimia dan stabilitas termal sehingga digunakan dalam berbagai aplikasi^[1]. Berbagai bentuk SiC, seperti batang, kawat nano, lapisan tipis, busa dan serat kontinu telah dikembangkan sejak awal 1980-an dan aplikasinya semakin meluas seperti pada bidang militer, dirgantara, otomotif, elektronik dan industri nuklir. Secara khusus, serat SiC digunakan sebagai penguat komposit untuk keramik suhu tinggi, substrat pada katalis atau filter suhu tinggi^[1,2]. Pemodelan yang dihasilkan dari beberapa studi menunjukkan SiC memiliki stabilitas terhadap radiasi neutron yang baik sehingga meningkatkan ketertarikan penggunaannya sebagai material nuklir^[3]. Dalam industri nuklir SiC digunakan sebagai penukar panas ringkas^[4,5], kelongsong bahan bakar ataupun pelapisnya^[5] dan *blanket* pada reaktor fusi^[6].

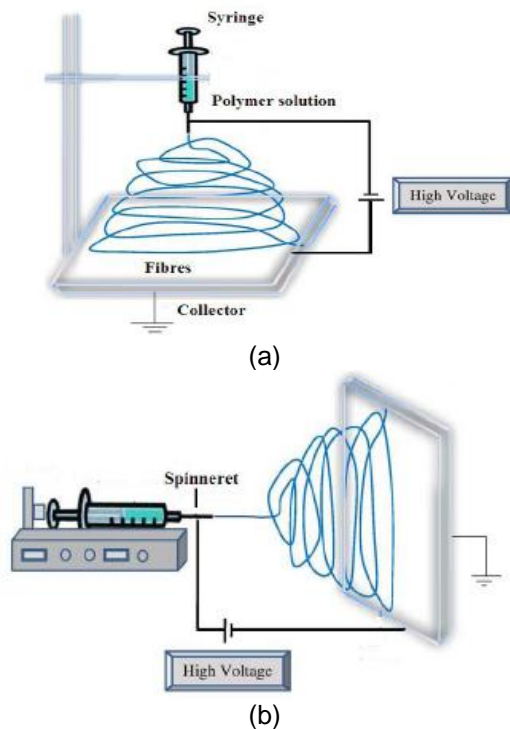
Keramik konvensional dapat patah atau retak dengan mudah akibat karakteristik mekanik atau termomekanik yang disebabkan adanya retakan awal akibat cacat atau goresan kecil. Untuk

meningkatkan ketahanan retak atau *fracture toughness* serat kontinu, fasa penguat diskontinu (*whisker*) atau partikel (partikulat) ditambahkan pada matriks. Penguatan dengan serat keramik kontinu merupakan cara efektif untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan^[7,8]. Meskipun sifat mekanik dari serat sangat penting untuk kekuatan komposit, namun antarfasa serat/matriks juga berperan penting untuk kekuatan keramik^[8]. Untuk meningkatkan sifat mekanik SiC, umumnya dibentuk berupa komposit SiC/SiC^[5]. Komposit SiC/SiC memiliki stabilitas mikrostruktur yang baik pada iradiasi neutron energi tinggi, menarik untuk digunakan sebagai komponen pendukung pada reaktor fisi dan fusi. Selain itu, permeabilitas yang rendah terhadap produk fisi menjadi satu kelebihan untuk mencegah kontaminasi produk fisi pada cairan transfer panas^[9].

Dalam pembuatan serat SiC yang diharapkan adalah serat dengan komposisi sedekat mungkin dengan stoikiometri SiC dan morfologi permukaan yang sempurna dan bebas dari fraktur material. Salah satu teknik yang menjanjikan untuk mendapatkan serat SiC dengan ukuran mikro/nano adalah

(Deni Mustika, Riwandi Sihombing, Slamet Pribadi, Ratih
Langenati, Agus Sujatno, Arbi Dimiyati, Jan Setiawan, Eddy
Indarto)

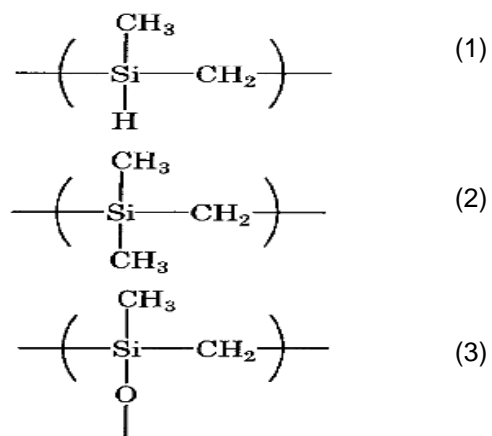
metode pemintalan listrik (*electrospinning*). Metode *electrospinning* merupakan metode pengolahan larutan atau lelehan polimer yang dapat menghasilkan serat dengan ukuran diameter pada rentang mikrometer hingga nanometer, dengan pengaplikasian medan listrik pada larutan atau lelehan yang memiliki konduktivitas listrik tertentu. Metode *electrospinning* telah digunakan untuk pembuatan serat nano bahan polimer, komposit dan keramik^[2]. Skema peralatan *electrospinning* disajikan pada Gambar 1. Peralatan *electrospinning* dapat disusun secara horizontal atau vertikal, bergantung susunan *syringe* dan kolektornya. Pada Gambar 1a merupakan susunan vertikal, dan Gambar 1b merupakan susunan horizontal. Tegangan diberikan antara ujung jarum yang terpasang pada *syringe* dengan kolektor yang disediakan yang terpisah dari ujung jarum pada jarak tertentu. Larutan dapat diatur laju alirnya dengan menambahkan pompa *syringe*.



Gambar 1. Skema peralatan *electrospinning* (a) tipe vertikal dan (b) tipe horizontal^[10].

Polycarbosilane merupakan prekursor polimer yang digunakan untuk memperoleh serat SiC dengan performa yang baik. *Polycarbosilane* memiliki unsur Si dan C pada struktur *backbone*-nya dan memiliki stabilitas kimia dan termal yang relatif tinggi jika dibandingkan dengan polimer organik atau anorganik lainnya. *Polycarbosilane* dapat terlarut dalam pelarut organik seperti tetrahidrofuran, toluena, *xylene* dan lainnya. Struktur umum pada *polycarbosilane* disajikan pada Gambar 2, ditunjukkan unsur Si dalam monomer pada *polycarbosilane* dapat mengikat gugus metil, hidrogen ataupun oksigen.

Rendahnya densitas dan struktur pori pada SiC menyebabkan rendahnya kekuatan relatif serta ketahanan oksidasi yang kurang baik^[12]. Pada komposit SiC, sifat mekanik komposit dominan dipengaruhi oleh sifat antar fasa dan atau karakteristik permukaan SiC. Adanya oksigen dan karbon bebas pada serat SiC merugikan bagi sifat mekanik komposit terutama ketika digunakan dalam lingkungan oksidasi. Sehingga serat SiC yang diharapkan adalah serat dengan komposisi sedekat mungkin dengan stoikiometri SiC dan permukaan yang sempurna dengan mengurangi fraktur material^[9].



Gambar 2. Monomer (1), (2) dan (3) sebagai penyusun struktur *polycarbosilane*^[11].

Shin, dkk^[2] mempelajari preparasi serat SiC dengan pemintalan listrik menggunakan prekursor *polycarbosilane* dari *Nipusi Type A Carbon Co, Japan* dan melakukan pirolisis pada 1000 - 1400 °C setelah proses *curing*. Namun pada sebagian besar komposisi larutan, serat yang dihasilkan tidak homogen, terdapat partikel (*bead*), dan bahkan serat tidak terbentuk. Selain itu karakteristik permukaan serat yang dihasilkan belum dipelajari secara mendalam. Penggunaan prekursor *polycarbosilane* yang berbeda (dengan struktur dan berat molekul berbeda) akan menunjukkan karakter pemintalan listrik dan hasil serat yang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik permukaan (morfologi, luas muka dan porositas) serat silikon karbida hasil pemintalan listrik dari *polycarbosilane* dalam N,N-dimetilformamida (DMF)/ toluena. Perbedaan persentase DMF dan *polycarbosilane* dalam toluena sangat mempengaruhi elektrospinnabilitas (*electrospinnability*) dan karakteristik permukaan serat yang dihasilkan.

METODOLOGI

Polycarbosilane (N abond) digunakan sebagai prekursor dilarutkan dalam pelarut toluena dan kopelarut N,N-dimetilformamida (DMF). DMF dicampur dalam toluen dengan perbandingan 15, 20, 25 dan 30% (%v/v) dengan pengadukan selama 12 jam pada temperatur ruangan normal. Selanjutnya, *polycarbosilane* ditambahkan ke dalam campuran pelarut dengan massa yang berbeda (1,0; 1,1; 1,2; 1,3 dan 1,4 g/mL) dan pengadukan dilanjutkan selama 24 jam pada temperatur ruang untuk menghasilkan larutan yang homogen. Setelah larutan homogen dilakukan proses *electrospinning*. Proses *electrospinning* menggunakan *syringe* dengan diameter sebesar 0,5 mm, laju alir

larutan sebesar 6 mL/jam, tegangan proses sebesar 10 kV, dan jarak antara ujung jarum dengan kolektor sejauh 12 cm. Kolektor yang digunakan berupa kasa kawat logam dengan ukuran 100x100 mm dengan ukuran *grid* 10x10 mm. Serat hasil *electrospinning* dilakukan proses *curing* pada temperatur 200 °C selama 1 jam dengan laju 2 - 3 °C/menit dalam udara. Setelah proses *curing* dilanjutkan dengan proses pirolisis dalam suasana argon pada temperatur 1100°C selama 1 jam dengan laju 2-3 °C/menit. Nilai dari viskositas larutan ditentukan dengan metode Ubbelohde. Saat proses *electrospinning* diamati terbentuk atau tidaknya serat, dan morfologi serat hasil *electrospinning* tersebut diamati dengan mikroskop optik Nikon Ehipot. Morfologi serat hasil pirolisis diamati menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM) Jeol 6510LA, dan analisis luas muka dan porositasnya menggunakan *surface area dan pore size analyzer* Quadrasorb SI.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Electrospinnability larutan *polycarbosilane* dalam DMF-toluena menunjukkan bahwa dalam larutan dengan konsentrasi PCS 1,3 dan 1,4 g/mL dengan persentase DMF 15, 20, 25 dan 30% v/v dapat menghasilkan serat dengan parameter proses yang diberikan. Sedangkan larutan dengan konsentrasi PCS 1,2 g/mL dapat menghasilkan serat dengan presentase DMF 20, 25 dan 30% v/v. Hal ini menandakan PCS dalam larutan bersifat kontinu dan dapat dilakukan pemintalan listrik. DMF sebagai kopelarut memiliki konstanta dielektrik sebesar 1,09 mS/m^[13] dan memungkinkan sistem PCS – toluen dipintal pada tegangan listrik 10 kV. Dari variasi larutan yang dibuat pada Tabel 1 disajikan terbentuk atau tidaknya serat dari proses *electrospinning*. *Electrospinning* dapat dilakukan pada larutan jika memiliki konduktivitas tertentu sehingga

(Deni Mustika, Riwandi Sihombing, Slamet Pribadi, Ratih
Langenati, Agus Sujatno, Arbi Dimiyati, Jan Setiawan, Eddy
Indarto)

memiliki muatan permukaan untuk melawan tegangan permukaan larutan dan memulai aliran^[10].

Tabel 1. Elektrosinabilitas larutan PCS, DMF dan toluena dengan variasi konsentrasi.

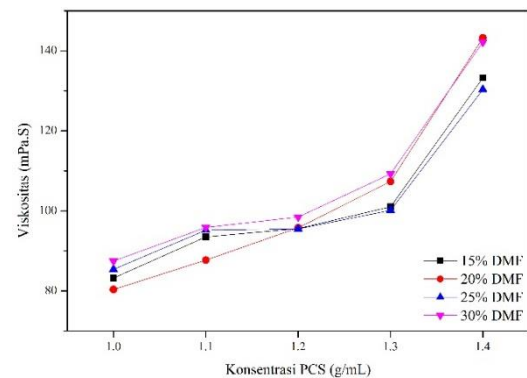
Konsentrasi PCS (g/mL)	DMF (%)			
	15	20	25	30
1,0	x	x	x	x
1,1	x	x	x	x
1,2	x	✓	✓	✓
1,3	✓	✓	✓	✓
1,4	✓	✓	✓	✓

Keterangan:

x : tidak terbentuk serat.

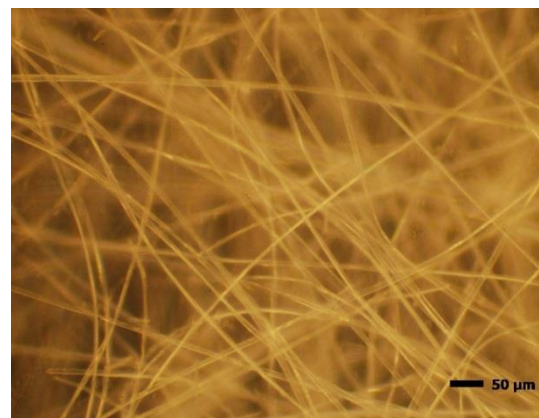
✓: terbentuk serat.

Viskositas sistem pelarut – polimer ditentukan oleh berat molekul dan konsentrasi polimernya^[10]. Pada Gambar 3, disajikan nilai viskositas dari larutan sol PCS, toluena dan DMF, dimana peningkatan yang signifikan terjadi pada konsentrasi PCS 1,4 pada semua presentase DMF. Konsentrasi PCS 1,1 sampai 1,3 g/mL menunjukkan viskositas yang relatif sama pada rentang 90 hingga 110 mPa.S untuk semua konsentrasi DMF kecuali pada PCS 1,1 dengan DMF 20% yang kurang dari 90 mPa.S. Massa polimer yang dilarutkan dengan konsentrasi PCS yang semakin tinggi (>1,3 g/mL) akan menyebabkan peningkatan viskositas sehingga pada proses *electrospinning* sering terjadi penyumbatan jarum. Hal ini disebabkan oleh menguapnya pelarut sehingga konsentrasi PCS menjadi relatif lebih tinggi. Penyumbatan pada jarum mengakibatkan terhambatnya proses pemintalan listrik. Peningkatan persentase DMF juga akan meningkatkan viskositas. Pada konsentrasi DMF lebih tinggi dari 30 % terjadi dua fasa dalam larutan, hal ini disebabkan oleh terlampauinya kelarutan DMF dan toluena. Larutan seperti ini akan menghasilkan serat yang tidak kontinu.

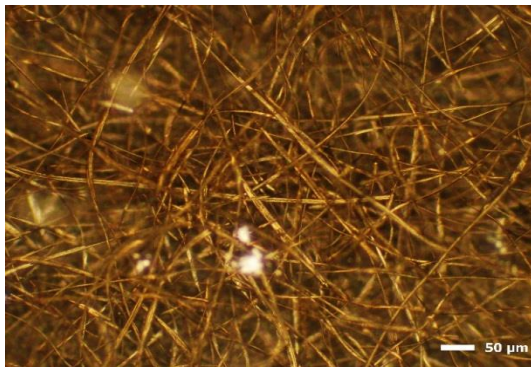


Gambar 3. Grafik viskositas sol PCS, toluena dan DMF terhadap konsentrasi PCS.

Serat hasil *electrospinning* dengan kualitas baik (tidak ada *bead* / partikel dan tidak patah) seperti pada Gambar 4a dilanjutkan proses *curing* dan pirolisis dan hasilnya seperti pada Gambar 4b. Proses *curing* bertujuan untuk menguatkan/mengeraskan material dengan membentuk rantai ikat silang (*crosslinking*) polimer, sedangkan dalam pirolisis terjadi dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa/sedikit oksigen/reagen lain. Pada proses pirolisis material akan mengalami pemecahan struktur kimia menjadi fasa gas dan menghasilkan material anorganik.



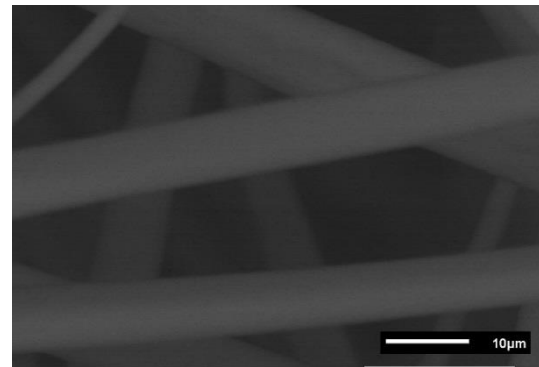
(a)



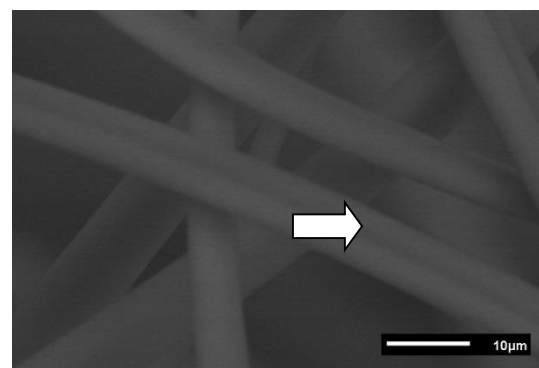
(b)

Gambar 4. Citra mikroskop optik serat hasil
a) *electrospinning* dan
b) pirolisis larutan konsentrasi
PCS 1,3 g/mL dan persentase
DMF/toluena 30%.

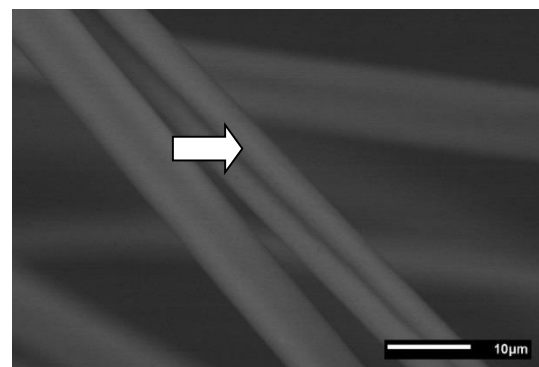
Pengamatan morfologi menggunakan SEM dilakukan pada perbesaran 2000 kali. Gambar 5 dan Gambar 6 terlihat bahwa serat yang terbentuk tanpa patahan dan beberapa serat terdapat cekungan dibagian tengah serat sehingga menyerupai pita dibandingkan bentuk silinder yang ditandai panah putih pada Gambar 5b, 5c dan 6c, hal tersebut seperti yang diperoleh^[14]. Hasil yang diperoleh menunjukkan konsistensi baik pada serat hasil pemintalan listrik, hasil *curing* maupun hasil pirolisis. Terbentuk serat dengan cekungan dimungkinkan disebabkan oleh pelarut dengan viskositas dan tekanan uap rendah sehingga saat serat sampai di kolektor, serat tidak mampu mempertahankan bentuknya yang silinder^[11,14]. Kelembaban lingkungan yang tinggi juga dapat memperlambat proses keringnya serat sehingga serat tidak mampu mempertahankan bentuk saat proses pengeringan yang lebih lama dibandingkan di lingkungan dengan kelembaban yang rendah^[10].



(a)

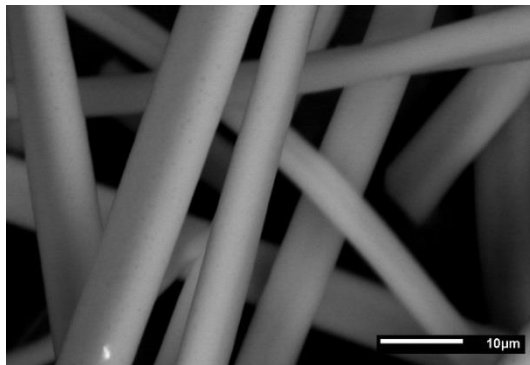


(b)

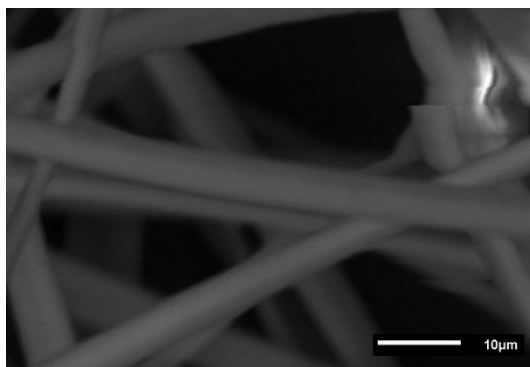


(c)

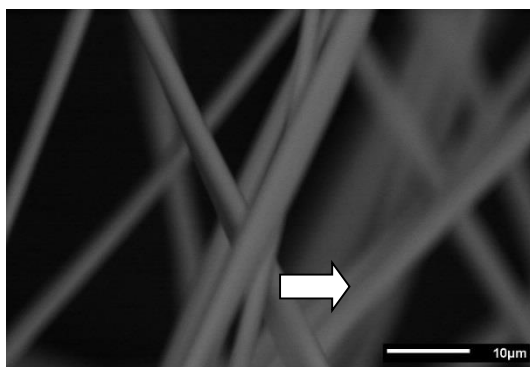
Gambar 5. Citra SEM serat hasil
a) *electrospinning*
b) *curing*
c) *pirolisis* untuk larutan 20%
DMF, 1,3 g/mL PCS.

(Deni Mustika, Riwandi Sihombing, Slamet Pribadi, Ratih
Langenati, Agus Sujatno, Arbi Dimiyati, Jan Setiawan, Eddy
Indarto)

(a)



(b)



(c)

Gambar 6. Citra SEM serat hasil
a) *electrospinning*
b) *curing*
c) pirolisis untuk larutan 30%
DMF, 1,3 g/mL PCS.

Pada serat hasil pirolisis 30% v/v DMF - 1,3 g/mL PCS terlihat adanya titik-titik hitam di permukaan, hal ini dimungkinkan akibat grafit pada material tungku terpapar suhu tinggi yang ikut dengan aliran gas argon sehingga mengenai serat, selain itu adanya karbon bebas juga dimungkinkan terdapat

pada permukaan serat akibat dekomposisi SiO_xC_y *amorf* pada proses pirolisis dengan reaksi^[15]:



Adanya karbon bebas pada serat SiC merugikan bagi sifat mekanik komposit terutama ketika digunakan dalam lingkungan oksidasi. Pada permukaan serat hasil pirolisis diperkirakan ada pori yang terlihat dari adanya degradasi warna pada gambar hasil SEM.

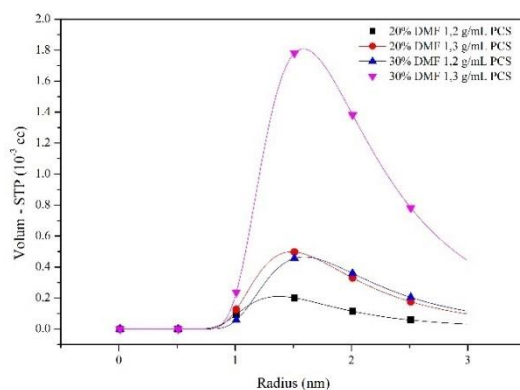
Luas muka, volume pori total dan ukuran pori rerata dianalisis menggunakan instrumen *surface area dan pore size analyzer* Quadrasorb SIdengan metode BET (Brunauer, Emmet dan Teller) serapan gas nitrogen. Model BET merupakan perluasan dari model Langmuir dengan adsorbat dapat teradsorpsi multilayer sampai tekanan uapnya mendekati tekanan uap dari gas yang teradsorpsi^[16]. Data luas muka, volume pori total dan ukuran pori rerata serat hasil pirolisis diberikan pada Tabel 2. Pada Tabel 2 terlihat terjadi peningkatan luas muka, volume pori total, sedangkan ukuran pori rerata menunjukkan penurunan dengan penambahan konsentrasi PCS. Untuk penambahan persentase DMF dari 20% menjadi 30% v/v memperlihatkan peningkatan pada luas muka dan volume pori total, sedangkan ukuran pori rerata menunjukkan penurunan.

Analisis mikropori dilakukan menggunakan metode Dubinin - Astakhov (DA). Perbedaan yang fundamental antara teori Dubinin dan Langmuir pada adsorpsi adalah mekanisme pengisian pori. Pada teori Langmuir, fasa yang terserap diasumsikan monolayer dan homogen, sedangkan teori Dubinin mengasumsikan pada mikropori adsorbat pengisian ruang adsorpsi melalui mekanisme pengisian volume sehingga tidak membentuk monolayer tersendiri pada pori^[17]. Dari Gambar 7 terlihat bahwa pori yang terdapat pada serat berukuran mikro,

dengan distribusi radius 1 hingga 3 nm, dengan jumlah terbanyak memiliki radius kurang dari 2 nm. Peningkatan konsentrasi PCS dari 1,2 ke 1,3 g/mL menunjukkan adanya kenaikan pada volume - STP hingga 2 kali lipat pada 20% DMF sedangkan untuk 30% DMF peningkatan hingga 4 kali lipat.

Tabel 2. Data luas muka, volume pori total dan ukuran pori rerata serat pirolisis

Konsentrasi		Luas muka (m ² /g)	Volum pori total (10 ⁻² cc/g)	Ukuran pori rerata (Å)
DMF (%)	PCS (g/mL)			
20	1,2	3,321	1,293	77,850
	1,3	8,460	1,420	33,660
30	1,2	13,890	0,814	11,720
	1,3	46,140	2,383	10,330



Gambar 7. Grafik analisis mikropori serat pirolisis dengan metode Dubinin-Astakhov.

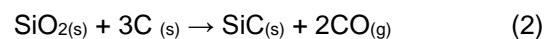
Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak DMF sebagai kopelarut setelah proses *electrospinning* meninggalkan ruang pada serat sehingga setelah proses *curing* dan pirolisis akan terbentuk lebih banyak mikropori. Serat yang terbentukpun akan memiliki kecenderungan berbentuk pita. Shin, dkk^[2] menunjukkan adanya residu dari DMF pada serat setelah proses *electrospinning*, namun Setiawan, dkk^[17] menunjukkan hal yang berbeda, bahwa DMF dan toluena dapat menguap sempurna pada saat proses *electrospinning*. Penambahan konsentrasi PCS memungkinkan semakin banyak oksigen yang dapat terikat pada serat

saat *curing* sehingga adanya oksigen meningkatkan kemungkinan terbentuknya mikropori. Adanya porositas pada serat juga dikonfirmasi oleh data densitas yang lebih rendah dari densitas teori SiC sebesar 3,2 g/cm³^[18] seperti yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Data densitas serat hasil pirolisis (g/cm³)

Konsentrasi PCS (g/mL)	DMF(%)		
	20	25	30
1,2	2,918	2,744	2,766
1,3	2,945	2,797	2,816

Dekomposisi dengan pembentukan kristalisasi dan tumbuhnya nanokristal tanpa sintering menghasilkan serat berpori^[2]. Dengan suhu pirolisis lebih tinggi dan proses sintering diharapkan serat SiC yang terbentuk berupa kristal dengan minim pori dan densitas mendekati densitas teoritis SiC, karena dengan temperatur 1500°C, spesi oksida dan karbon bebas dapat membentuk SiC dengan reaksi^[19]:



SIMPULAN

Serat SiC yang dihasilkan dari prekursor *polycarbosilane* dengan pelarut/kopelarut toluena/DMF diperoleh serat tanpa patahan, dengan sedikit cekungan. Bentuk serat yang seperti silinder dan kontinu sangat dipengaruhi oleh viskositas, tekanan uap larutan serta kelembaban lingkungan agar serat mampu mempertahankan bentuknya yang silinder. Adanya titik hitam pada hasil pirolisis dimungkinkan akibat adanya karbon bebas dan atau kontaminasi dari grafit material tungku. Serat memiliki luas muka 3.321 – 46.14 m²/g dan pori berukuran mikro, dengan distribusi radius 1 hingga 3 nm dan jumlah terbanyak kurang dari 2 nm. Suhu pirolisis dan *sintering* yang lebih tinggi diharapkan menghasilkan serat yang minim pori dan densitas mendekati densitas teori.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Prof. Ridwan dan Bapak Bambang Herutomo yang telah memfasilitasi pelaksanaan penelitian ini, Bapak Adel Fisli serta rekan-rekan di IEBE yang banyak membantu selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H.A. Liu, K.J. Balkus Jr., (2009), *Electrospinning of beta silicon carbide nanofibers*. *Materials Letters* 63, 2361-2364.
- [2] D.G. Shin, D.H. Riu, H.E. Kim, J Web, (2008), *Type Silicon Carbide Fibers Prepared by The Electrospinning of Polycarbosilanes*. *Ceram. Proc. Research*. Vol. 9, No. 2, pp 209-214.
- [3] Y. Katoh, L. L. Snead, I. Szlufarska, W. J. Weber, (2012), *Radiation effects in SiC for nuclear structural applications*. *Current Opinion in Solid State and Material Science* 16, pp 143-152.
- [4] Sommers, A., Q. Wang, X. Han, C. Tjoen, Y. Park, A. Jacobi, (2010), *Ceramics And Ceramic Matrix Composites For Heat Exchangers In Advanced Systems-A Review*. *Applied Thermal Engineering* 30, pp 1277-1291.
- [5] Kohyama, Akira, Kishimoto Hirotsu, (2013), *SiC/SiC Composite Material For Nuclear Applications*. *Nuclear Safety and Simulation* Vol 4, No. 2, pp 72-79.
- [6] Ivekovic Aljaz, Sasa Novak, Goran Drazixm Darina Blagoeva, Sehila Gonzalez de Vicente, (2013), *Current Status And Prospects Of Sicf/Sic For Fusion Structural Applications*. *Journal of the eruropean Ceramic Society* 33, pp 1577-1589.
- [7] Z. Xia, L. Li, (2014), *Understanding Interfaces And Mechanical Properties Of Ceramic Matrix Composites: Woodhead Publishing Series In Composites Science And Engineering Advances In Ceramic Matrix Composites*. India.
- [8] C. Zhang, (2014), *Understanding The Wear And Tribological Properties Of Ceramic Matrix Composites: Woodhead Publishing Series In Composites Science And Engineering Advances In Ceramic Matrix Composites*. India.
- [9] E. Buet, C. Sauder, S. Poissonnet, P. Brender, R. Gadiou, C. Vix-Guterl, (2012), *Influence of chemical and physical properties of the last generation of silicon carbide fibres on the mechanical behaviour of SiC/SiC composite*. *J. Euro. Cer. Soc.* 32, pp 547-557.
- [10] Z. Kurban, (2011) *Electrospun Nanostructured Composite Fibres For Hydrogen Storage Applications*. PhD. Thesis. England: University College London.
- [11] H. Nakagawa, M. Akiyama, T. Kurosawa, A. Shiota, (2006) *Polycarbosilane And Method Of Producing The Same*. Patent No EP. 1640404 A1.
- [12] W. Guo, H. Xiao, W. Xie, J. Hu, Q. Li, P. Gao, (2012), *A new design for preparation of high performance recrystallized silicon carbide*. *Ceramic International* 38 pp 2475-2481.
- [13] Sei-Hyun Lee, Seok-Min Yun, Sang Jin Kim, Soo-Jin Park, Young-Seak Lee, (2010), *Characterization Of Nanoporous B-Sic Fiber Complex Prepared By Electrospinning And Carbothermal Reduction*. *Res. Chem Intermed.* 36, pp 731-742.
- [14] Setiawan, J., S. Pribadi, Pranjono, S. Poertadji, Sigit, (2014), *Study on Morphology of Electrospinning SiOC Fibers*. *International Conference on Advanced Materials Science and Technology (ICAMST) 2014*, Solo 16-17 September.

-
- [15] Y. Rongqian, Z. Feng, (2009), *Synthesis and characterization of continuous freestanding silicon carbide films with polycarbosilane*. Journal of the european ceramic society 29, pp 2079 – 2085.
- [16] C.R. Clarkson, R.M. Bustin, J.H. Levy, (2001), *Application of the Mono/multilayer and Adsorption Potential Theories to Coal Methane Adsorption Isotherms at Elevated Temperature and Pressure : Activated Carbon Compendium*.
- [17] Setiawan, J., S. Fatimah, S. Poertadji, Sigit, U. Sudjadi, (2014), *Characterization of Electrospinning Polycarbosilane Fiber with the Concentration of N,N-Dimethyl-formamide 22%, 24%, 26%, 28% and 30%*. Applied Mechanics and Materials Vol. 621, Pp 44-49.
- [18] C.M. Zetterling, (2002), *Process Technology For Silicon Carbide Device IEE. INSPEC the institution of electrical engineers, Emis processing series 2*. London UK.
- [19] H.Q. Ly, R Taylor., R J Day., F Heatley, (2001), *Conversion of polycarbosilane (PCS) to SiC-based ceramic part 1. Characteri-sation of PCS and curing products*. Journal of material science 36, pp 4037 – 4043.