

## PEMBUATAN PADUAN BERBASIS ZIRCONIUM DAN SERAT SiC

Futichah, Deni Mustika, Jan Setiawan, Heri Hardiyanti,  
Ganisa K.Suryaman, Pranjono  
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

### ABSTRAK

Teknologi fabrikasi bahan bakar nuklir melingkupi bahan bakar nuklir untuk reaktor daya dan reaktor riset serta bahan strukturnya. Bahan struktur untuk reaktor daya yang dikembangkan di sini adalah paduan berbasis zirconium. Bahan struktur atau kelongsong pada elemen bakar nuklir dari paduan berbasis Zr dan bahan penguat kelongsong keramik serat SiC mempunyai unjuk kerja yang lebih tinggi untuk operasi pada temperatur lebih tinggi. Oleh karena itu dalam penelitian ini telah dibuat bahan paduan berbasis Zr dan serat SiC. Proses pembuatan dan karakterisasi paduan Zr mengacu pada hasil litbang tahun sebelumnya, sedangkan pembuatan serat SiC berbasis polikarbosilan melalui proses electrospinning, curing dan pirolisis. Diperoleh serat SiC 3,73  $\mu\text{m}$  untuk bahan baku dengan perbandingan PCS dan toluen 1,2 g/ml dan 4,34  $\mu\text{m}$  untuk bahan baku dengan PCS dan toluene 1,3 g/ml. Serat SiC yang terbentuk masih bersifat amorf. Data karakteristik logam paduan Zr yakni ZrNbFeSn(Mo) dan serat SiC ini akan digunakan sebagai data base dalam pembuatan material komposit metal-ceramic Zr/SiC.

**Kata Kunci** : Paduan Zirkonium, Zirkaloi, serat SiC, ZrNbFeSn(Mo), PCS, komposit Zr/SiC.

### PENDAHULUAN

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) adalah salah satu pusat dibawah Deputi Bidang Teknologi Energi Nuklir (TEN), berdasarkan Keputusan Presiden No. 46 tahun 2013 yang dijabarkan dalam Peraturan Kepala BATAN No. 14 Tahun 2013 tentang Organisasi dan Tata Kerja BATAN. PTBBN mempunyai tugas untuk melaksanakan perumusan dan pengendalian kebijakan teknis, pelaksanaan, dan pembinaan dan bimbingan di bidang pengembangan teknologi fabrikasi bahan bakar nuklir dan teknik uji radiometalurgi. Untuk melaksanakan tugas tersebut, PTBBN menyelenggarakan salah satu fungsinya seperti yang dibebankan pada Bidang Fabrikasi Bahan Bakar Nuklir (BFBBN) yaitu melaksanakan pengembangan teknologi fabrikasi bahan bakar nuklir. Teknologi fabrikasi bahan bakar nuklir melingkupi bahan bakar nuklir untuk reaktor daya dan reaktor riset serta bahan strukturnya <sup>[1,2]</sup>. Bahan struktur untuk reaktor daya yang dikembangkan di sini adalah paduan berbasis zirconium dan keramik SiC.

Paduan zirkonium atau zircalloy biasa disingkat Zry banyak digunakan sebagai bahan struktur atau kelongsong pada elemen bakar nuklir untuk semua reaktor daya yang berpendingin air (LWR). Kelongsong bahan bakar merupakan bagian yang penting dalam pembuatan elemen bakar, karena disamping berfungsi sebagai pembungkus bahan bakar uranium juga sebagai pengungku gas hasil fisi selama operasi dalam reaktor nuklir <sup>[3,4]</sup>. Keinginan untuk meningkatkan unjuk kerja paduan zirkonium yang lebih baik sebagai bahan struktur bahan bakar yang telah ada, dipicu oleh trend pengembangan peningkatan

*burn-up* bahan bakar yang lebih tinggi dari 60 MWd/kgU. Konsekuensinya adalah upaya-upaya peningkatan unjuk kerja bahan kelongsong paduan zirconium sebagai bahan struktur, yaitu meningkatkan kekuatan mekanik dan ketahanan korosi bahan pada temperatur tinggi<sup>[4,5]</sup>. Untuk mengatasi terbentuknya  $ZrH_2$  (pada paduan Zr) yang menyebabkan perapuhan ataupun terbentuknya  $ZrO$  yang menghambat transfer panas dari bahan bakar ke pendingin, maka kelongsong bahan bakar harus diperkuat dengan serat SiC. Kelemahan yang lain selain secara ekonomi adalah mahal, juga terjadinya penurunan kekuatan mekanik ketika suhu operasi reaktor meningkat<sup>[5,6]</sup>. Westinghouse merupakan salah satu institusi yang mengembangkan kelongsong dengan serat SiC (*duplex SiC cladding*)<sup>[7]</sup>. Komposit keramik yang dikembangkan oleh Westinghouse masih mempunyai kelemahan dalam hal proses perakitan karena bermasalah dalam proses penyambungan. Penelitian mengenai kelongsong dengan serat SiC masih terus dilakukan, oleh karena itu perlu dilakukan pengembangan komposit logam dengan penguat keramik.

Dari uraian di atas maka perlu dilakukan upaya penguasaan teknologi proses pembuatan bahan struktur bahan bakar dari paduan berbasis Zr dan bahan penguat kelongsong keramik serat SiC yang mempunyai unjuk kerja yang lebih tinggi. Dengan diperolehnya paduan zirconium baru yang mampu meningkatkan efektivitas bahan bakar di teras reaktor, maka akan mendukung kemandirian bangsa Indonesia di masa depan apabila rencana pembangunan PLTN dilaksanakan dan pabrik bahan bakar nuklir dibangun.

Dari aspek pemanfaatan untuk industri pada umumnya, paduan Zr dapat diaplikasikan pada industri bahan kimia dan farmasi yang menuntut pengoperasian pada suhu tinggi. Hal ini disebabkan oleh paduan Zr yang mempunyai sifat inert, ketahanan korosi dan kekuatan mekaniknya tinggi pada suhu di atas 300°C. Selain itu juga dilakukan proses pembuatan serat SiC yang bisa digunakan sebagai penguat kelongsong elemen bakar dalam bentuk komposit  $SiC/SiC_f$ .<sup>[5,6]</sup>

Secara garis besar kegiatan penelitian ini diawali dengan melakukan proses pemaduan antara Zr dengan unsur pemadunya, dengan komposisi tertentu. Bahan utama dan pemadu tersebut dilebur dalam tungku busur tunggal selanjutnya dilakukan karakterisasi produk yaitu uji komposisi, mekanik, mikrostruktur, dan kristalografi. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan parameter proses pemaduan dan data karakter paduan. Sedangkan proses pembuatan serat SiC dilakukan dengan metoda Elektrospinning selanjutnya serat SiC yang diperoleh dikarakterisasi yaitu morfologi mikrostruktur, diameter serat dan kristalografi.

Hasil penelitian dan pengembangan bahan kelongsong paduan Zirconium dan komposit SiC ini adalah Pemerintah dalam hal ini adalah BATAN. Dengan memiliki kemampuan memproduksi kelongsong sendiri berarti Indonesia khususnya Batan berarti turut mendukung program dan memperkuat kemandirian industri energi nuklir nasional. Selain itu juga meningkatkan kemampuan dan pengalaman bagi peneliti serta meningkatkan daya saing teknologi dalam bidang bahan struktur EBN berbasis zirkonium dan serat SiC.

## **TATA KERJA**

Pelaksanaan kegiatan penelitian pengembangan paduan berbasis Zirconium dan komposit SiC sebagai bahan struktur elemen bakar nuklir pada tahun 2015 meliputi tahapan proses.

- Tahap pertama adalah proses penyiapan bahan pembuatan paduan zirconium seperti Zr, Nb, Mo, Sn dan Fe, serta bahan pembuatan serat SiC seperti PCS, Toluene dan DMF.
- Tahap kedua adalah proses pembuatan paduan Zr melalui peleburan dan pembuatan serat SiC berbasis polikarbosilan dengan metoda elektrospinning
- Tahap ketiga adalah proses pengujian/ karakterisasi paduan Zr dan serat SiC yang terdiri dari pengamatan struktur mikro menggunakan Mikroskop Optik/ SEM, uji kekerasan mikro menggunakan indenter Vickers (VHN), komposisi dan pengamatan fasa yang terbentuk menggunakan XRD.

Peralatan yang digunakan antara lain tungku lebur untuk membuat logam paduan berbasis Zr, Nabond *E-Spinning*, viskometer Ostwald, mikroskop optik, *stopwatch*, timbangan analitik, pengaduk magnetik, peralatan gelas dan plastik, tungku anil, tungku sinter mini, tungku lebur, mesin bubut, peralatan kendali kualitas (analisis fisiko-kimia, metalografi, mekanik, kristalografi).

Bahan yang diperlukan adalah zirkonium, niobium, molibdenum, stannum serta ferrum yang seluruhnya dalam bentuk granul. Serbuk SiC, polycarbosilane (PCS) granul, larutan toluene dan N,N-dimetilformamida (DMF).

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

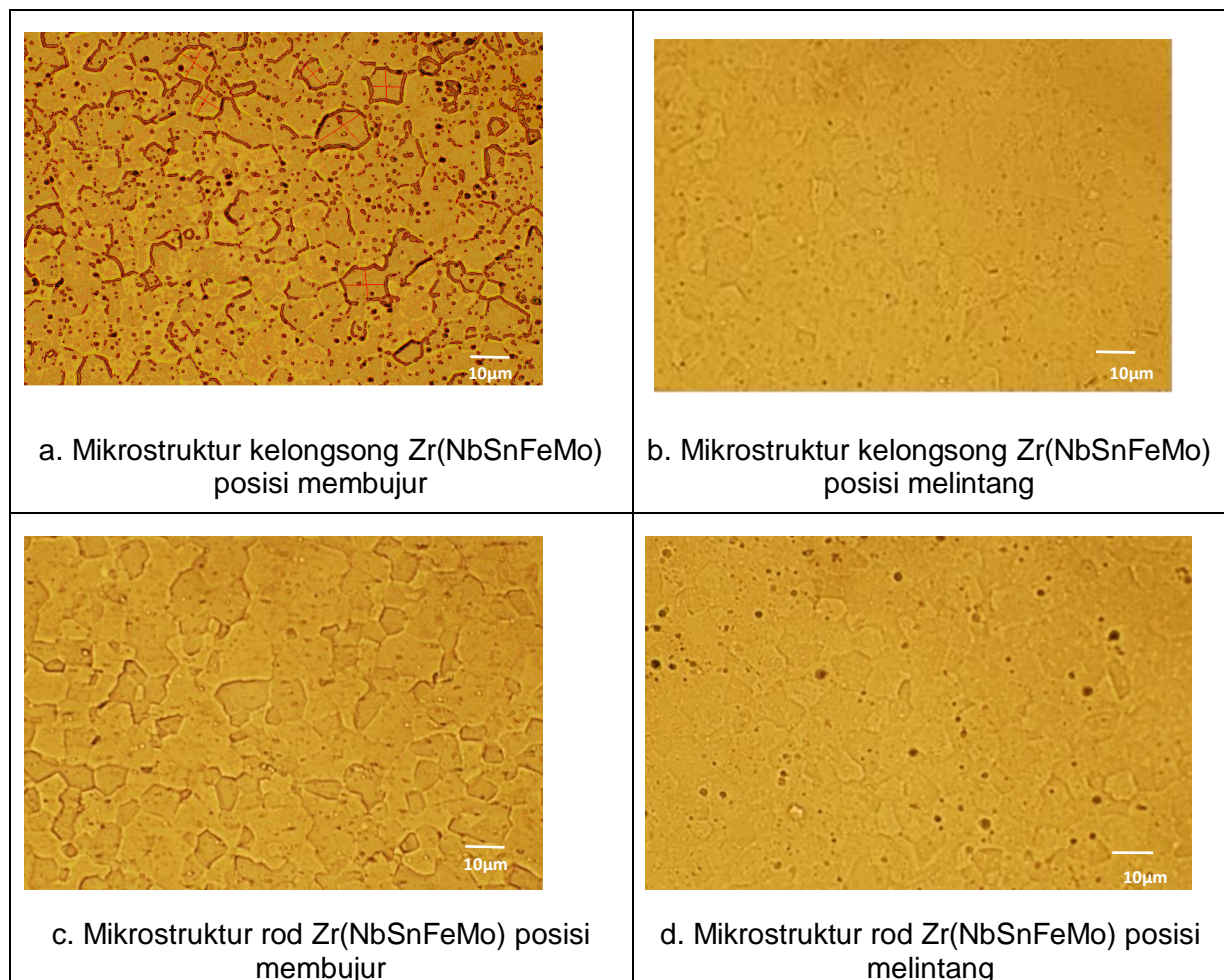
### **Pembuatan paduan Zr**

Pembuatan paduan berbasis Zr sebenarnya telah dilakukan pada litbang tahun 2010-2014, oleh karena itu seluruh parameter optimum proses pembuatannya serta seluruh data karakteristik ingot paduan Zr tahun 2010-2014 digunakan dalam penelitian

ini. Dengan kata lain dokumen teknis litbang tahun 2010-2014 digunakan sebagai data base dalam litbang ini. Dengan demikian kegiatan penelitian pada tahun 2015 difokuskan pada proses pembuatan serat SiC dan komposit SiC<sub>m</sub>/SiC<sub>f</sub>. Gambar 1 adalah paduan Zr berbentuk rod dan pipa yang telah disiapkan. Data karakteristik paduan Zr ditampilkan pada Gambar 2, Tabel 1 dan 2.



Gambar 1. Paduan Zr(NbSnFeMo) bentuk rod dan tube<sup>[8]</sup>.



Gambar 2 Mikrostruktur paduan rod dan tube Zr(NbSnFeMo)<sup>[8]</sup>

Tabel 1 Hasil analisis komposisi zirlo-Mo dengan alat XRF/AAS <sup>[8]</sup>

No	Unsur	Hasil analisis dengan alat AAS (%)				Hasil analisis dengan alat XRF (%)				Persyaratan Pengotor (% maks.) ASTM
		B1-D1A	B2-1A	B3-4B	B4-5B	B1-D1A	B2-1A	B3-4B	B4-5B	
1	Al	0,0682	0,0790	0,0952	0,0461	ND	ND	ND	ND	0,0075
2	Ag	ttd	ttd	ttd	ttd	ND	ND	ND	ND	
3	B									0,00005
4	Ca	0,0179	0,0418	0,0362	0,09797					0,003
5	Cd	ttd	ttd	ttd	ttd	ND	ND	ND	ND	0,00005
6	Co	0,00002	0,0002	0,0005	0,0006	ND	ND	ND	ND	0,0020
7	Cr	0,0045	0,0043	0,0068	0,0104	0,57	0,51	0,21	0,71	0,020
8	Cu	0,00004	0,0014	0,0086	0,0069	ND	ND	ND	ND	0,0050
9	Fe	0,0576	0,0986	0,0061	0,0048	3,27	2,76	0,51	7,56	0,150
10	Mg	0,0113	0,0112	0,0174	0,0064	ND	ND	ND	ND	0,002
11	Mn			0,0012	0,0012	ND	ND	ND	ND	0,005
12	Mo	0,0722	0,0044	0,01054	0,01784	ND	ND	ND	ND	0,005
13	Ni	0,0017	0,0042	0,0111	0,0106	ND	ND	ND	ND	0,007
14	Nb					0,85	0,85	0,96	0,82	0,01
15	Si	0,02711	0,4559	1,7092	0,2025					0,0120
16	Sn	0,5804	0,6106	0,0013	1,640	ND	ND	ND	ND	0,010
18	W									0,010
19	Ti	0,0291	0,0269	0,0565	0,0455					0,005
20	Zn	0,0018	0,0011	0,0016	0,0014					
21	Zr					84,62	84,76	87,14	78,93	
22	Gd					ND	ND	ND	ND	
23	Eu					ND	ND	ND	ND	
24	Cl					ND	ND	ND	ND	
25	Cs					ND	ND	ND	ND	
26	Hf					1,64	1,48	1,29	1,27	

Tabel 2 Hasil uji kekerasan serta diameter butir zirlo-Mo<sup>[8]</sup>

No.	KEKERASAN Zr(NbSnFeMo) (VHN)	DIAMETER BUTIR Rod Zr(NbSnFeMo) (µm)	DIAMETER BUTIR Pipa Zr(NbSnFeMo) (µm)
1	166,23	7,0	12,0
2	163,28	10,0	10,0
3	173,42	11,0	12,50
<b>Rata2</b>	<b>167,64</b>	<b>9,33</b>	<b>11,50</b>

Data karakteristik logam paduan Zr yakni ZrNbFeSn(Mo) dan serat SiC ini akan digunakan sebagai data base dalam pembuatan material komposit metal-ceramic Zr/SiC. Untuk data paduan ZrNbFeSn(Mo) pada dasarnya hasilnya tidak berbeda dengan data karakteristik paduan tersebut yang telah dibuat dan dikarakterisasi pada penelitian tahun sebelumnya (2014) sehingga karakterisasi yang dilakukan pada penelitian tahun ini banyak difokuskan pada material serat SiC.

**Pembuatan Serat SiC**

Campuran PCS dan pelarut (DMF+Toluen) dengan variasi rasio seperti contoh pada Tabel 3 dan yang sudah homogen merupakan bahan umpan alat Electrospinning dalam proses pembuatan serat polikarbosilan. Sebelum campuran ini dimasukkan (sebagai bahan umpan) ke dalam alat electrospinning, campuran larutan ini diukur densitas dan viskositasnya dan hasil pengukuran ditampilkan pada Tabel 4. Selama proses pembuatan serat polikarbosilan dengan elektrospinning, dilakukan pengamatan karakteristik elektrospinnabilitas dari larutan umpan seperti pada Tabel 5. Selanjutnya serat polikarbosilan dilakukan proses curing yaitu dipanaskan pada suhu 200°C selama 1 jam dengan laju pemanasan 2°C/menit. Setelah proses curing, selanjutnya dilakukan proses pyrolysis yaitu pemanasan pada suhu 1300°C selama 1 jam dengan laju pemanasan 2°C/menit untuk mendapatkan serat SiC.

Tabel 3 Variasi rasio DMF - toluen dan massa PCS yang dilarutkan

Persentase DMF dalam Toluene (v/v %)	Waktu Pengadukan (Jam)	Massa PCS (g) per mL pelarut	Waktu Pengadukan (Jam)
15	12	1,0 – 1,4	24
20		1,0 – 1,4	
25		1,0 – 1,4	
30		1,0 – 1,4	
35		1,0 – 1,4	

Tabel 4. Perhitungan data densitas dan viskositas sol PCS, toluen dan DMF <sup>[9]</sup>

No	NAMA	DENSITAS				VISKOSITAS		
		W Pikno (g)	W total (P + lar.) (g)	W Lar. (g)	Massa Jenis, $\rho_2$ (g/mL) (W lar./V pikno)	waktu alir, t2 (s)	t2 rerata (s)	Viskositas, $\sigma_2$ (mPa.S) (t2 x $\rho_2$ x $\sigma_1$ )/(t1xp1)
1	15 %, 1,0 g/mL	20.7763	46.2149	25.4386	1.0209	258	261.0000	83.2314
						261		
						264		
2	15 %, 1,1 g/mL	20.7763	46.1775	25.4012	1.0194	292	293.6667	93.5110
						293		
						296		
3	15 %, 1,2 g/mL	20.7763	46.2224	25.4461	1.0212	297	299.6667	95.5902
						302		
						297		
4	15 %, 1,3 g/mL	20.7763	46.3295	25.5532	1.0255	317	315.3333	101.0110
						315		
						314		
5	15 %, 1,4 g/mL	20.7763	46.4117	25.6354	1.0288	414	414.6667	133.2579
						416		
						414		
6	20 %, 1,0 g/mL	20.7763	46.1429	25.3666	1.0180	252	252.6667	80.3459
						254		
						252		
7	20 %, 1,1 g/mL	20.7763	46.3721	25.5958	1.0272	272	273.3333	87.7031
						275		
						273		
8	20 %, 1,2 g/mL	20.7763	46.3918	25.6155	1.0280	299	298.3333	95.7984
						301		
						295		
9	20 %, 1,3 g/mL	20.7763	46.3843	25.6080	1.0277	336	334.3333	107.3270
						333		
						334		
10	20%, 1,4 g/mL	20.7763	46.4765	25.7002	1.0314	444	444.6667	143.2576
						447		
						443		
11	25 %, 1,0 g/mL	20.7763	46.2597	25.4834	1.0227	269	267.3333	85.3998
						267		
						266		

12	25%, 1,1 g/mL	20.7763	46.2323	25.4560	1.0216	299	298.3333	95.2003
						301		
						295		
13	25 %, 1,2 g/mL	20.7763	46.3694	25.5931	1.0271	298	297.6667	95.4992
						299		
						296		
14	25 %, 1,3g/mL	20.7763	46.4117	25.6354	1.0288	312	311.6667	100.1560
						309		
						314		
15	25 %, 1,4 g/mL	20.7763	46.4042	25.6279	1.0285	407	405.6667	130.3254
						408		
						402		
16	30 %, 1,0 g/mL	20.7763	46.1476	25.3713	1.0182	280	275.0000	87.4625
						271		
						274		
17	30 %, 1,1 g/mL	20.7763	46.3544	25.5781	1.0265	303	299.0000	95.8707
						300		
						294		
18	30 %, 1,2 g/mL	20.7763	46.3370	25.5607	1.0258	305	307.3333	98.4756
						310		
						307		
19	30 %, 1,3g/mL	20.7763	46.3843	25.6080	1.0277	341	340.3333	109.2513
						338		
						342		
20	30 %, 1,4 g/mL	20.7763	46.3594	25.5831	1.0267	443	443.3333	142.1773
						442		
						445		

Tabel 5. Elektrospinnabilitas Larutan PCS, DMF dan toluena dengan variasi Konsentrasi <sup>[9]</sup>

Konsentra si 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:

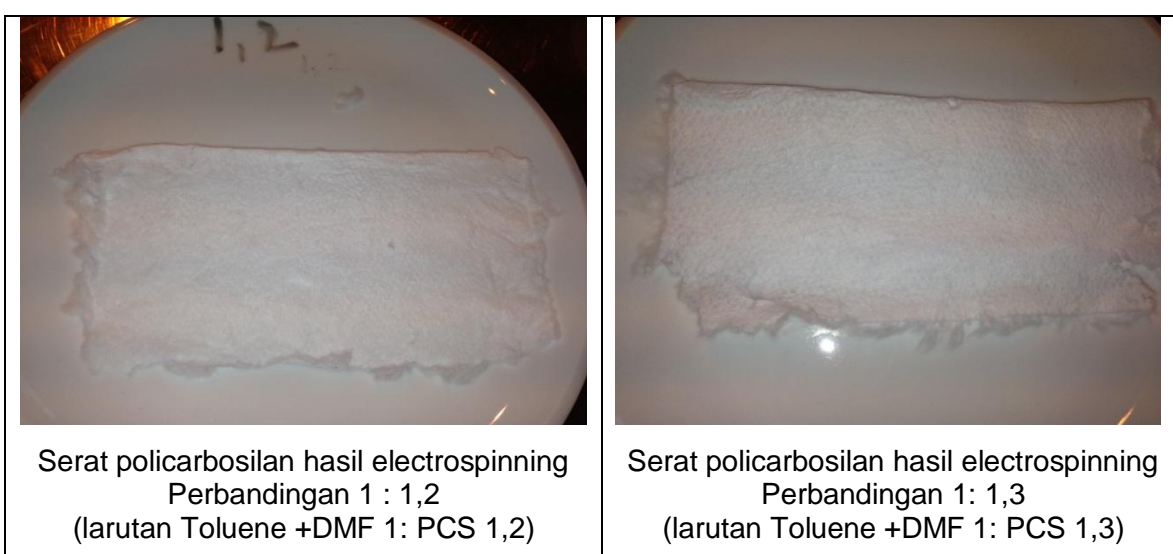
x : tidak terbentuk serat.

✓: terbentuk serat.

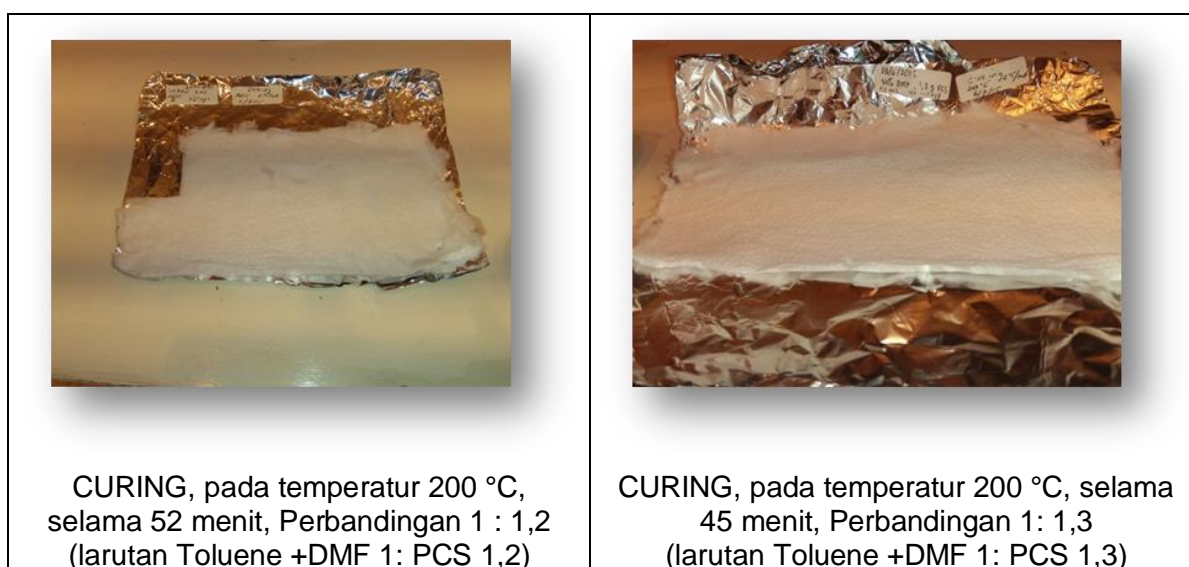


Dari hasil uji Electrospinnabilitas larutan polikarbosilan dalam DMF – toluene menunjukkan bahwa larutan dengan konsentrasi PCS 1,3 dan 1,4 g/mL dengan persentase DMF 15, 20, 25 dan 30% v/v dapat menghasilkan serat dengan parameter proses yang diberikan. Sedangkan larutan dengan konsentrasi PCS 1,2 g/mL 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.

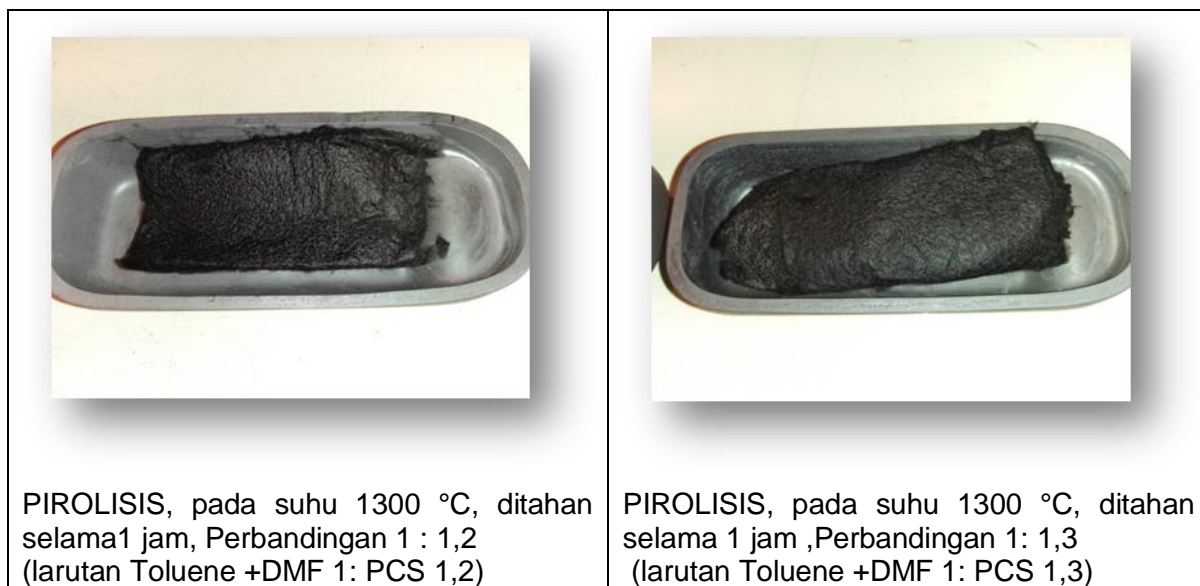
Gambar 3 adalah foto serat polikarbosilan yang diperoleh dari hasil proses electrospinning, sedangkan serat hasil proses curing tampak pada Gambar 4. Serat SiC hasil proses pirolisis berwarna hitam seperti pada Gambar 5.



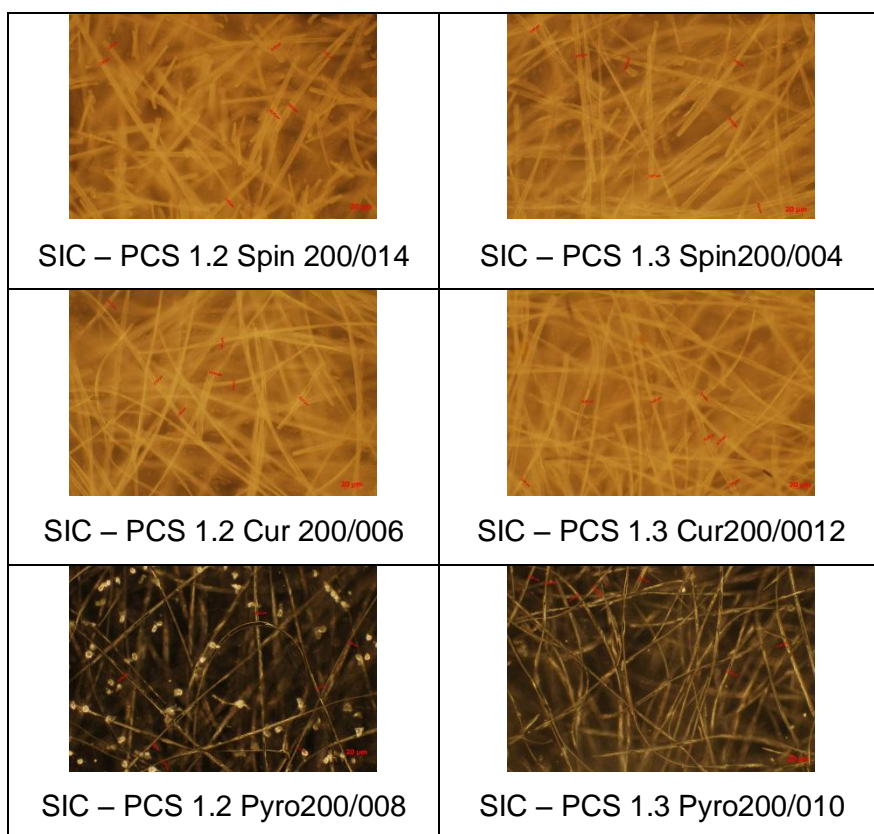
Gambar 3. Serat polikarbosilan yang diperoleh dari hasil proses electrospinning



Gambar 4, Serat polikarbosilan yang telah melewati proses curing pada temperatur 200°C.



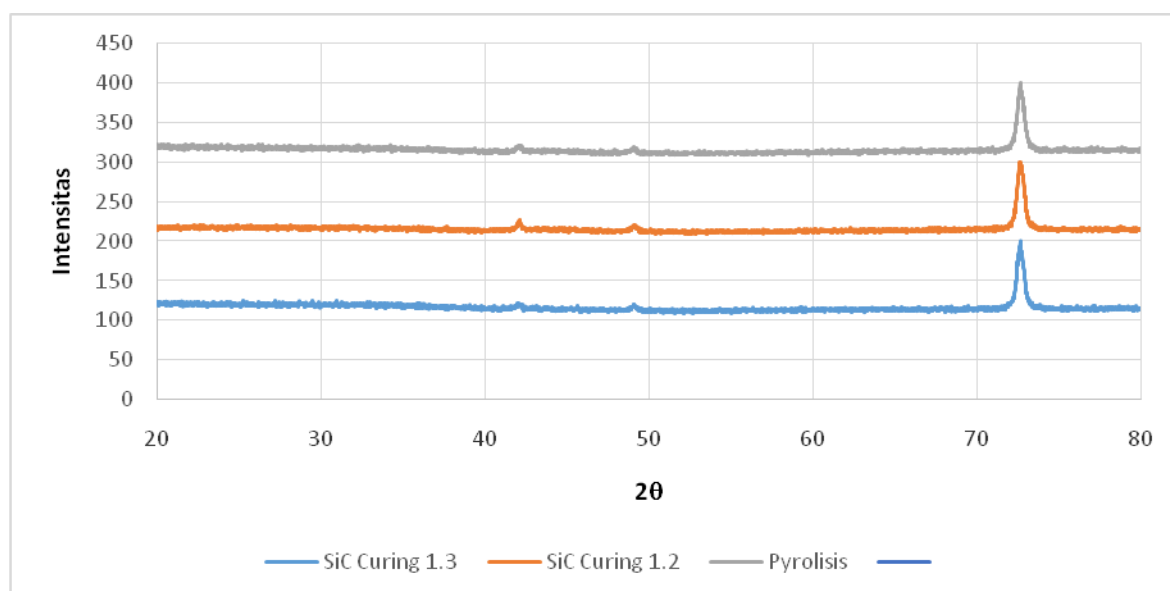
Gambar 5, Serat SiC yang diperoleh dari proses Pyrolisis pada temperature 1300°C, Selama 1 jam.



Gambar 6. Serat polikarbosilan dan SiC yang diperoleh dari proses electrospinning, curing dan Pyrolisis.

Dari hasil uji metalografi dapat dilihat bentuk serat dan ukuran serat Polikarbosilan hasil proses electrospinning dan curing serta SiC hasil proses pirolisis seperti tampak pada Gambar 6. Ukuran diameter serat rata-rata dari polikarbosilan hasil electrospinning dengan perbandingan PCS 1,2 g/ml adalah 7,54  $\mu\text{m}$ , sedangkan polikarbosilan hasil proses curing adalah 7,22  $\mu\text{m}$  dan SiC dari hasil pirolisis adalah 3,73  $\mu\text{m}$ . Hasil uji metalografi untuk perbandingan PCS 1,3 g/ml diperoleh ukuran serat polikarbosilan hasil proses electrospinning 7,29  $\mu\text{m}$  dan dari hasil proses curing adalah 6,59  $\mu\text{m}$  serta SiC dari hasil pirolisis adalah 4,34  $\mu\text{m}$ . Perbandingan ukuran serat yang diperoleh dari penggunaan PCS dengan perbandingan 1,2 g/ml dan 1,3 g/ml diperoleh hasil bahwa proses electrospinning dan curing dengan PCS 1,2 g/ml menghasilkan ukuran serat yang lebih besar dari pada ukuran serat yang dihasilkan dari perbandingan bahan PCS 1,3 g/ml, sedangkan dari hasil proses pyrolysis diperoleh hasil yang sebaliknya yaitu perbandingan PCS 1,2 g/ml ukuran seratnya lebih kecil dari pada perbandingan PCS 1,3 g/ml.

Dari hasil uji kristalografi terhadap serat SiC hasil pyrolisis, menunjukkan kondisi kristalinitas yang sangat rendah dengan kata lain serat tersebut masih bersifat amorf dan belum terbentuk kristal dari senyawa unsur Si dan C. Puncak yang muncul merupakan puncak dari alas *sample holder* seperti tampak pada gambar 7, oleh karena itu perlu dilakukan proses pirolisis dengan temperature yang lebih tinggi dari 1400  $^{\circ}\text{C}$  serta sampel yang akan diuji kristalografi dipertebal untuk mencegah sinar x menembus *sample holder*.



Gambar 7. Pola difraksi serat SiC

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa paduan Zr yang telah dibuat dan dikarakterisasi pada penelitian di tahun sebelumnya dapat digunakan sebagai data acuan pembuatan paduan tahun 2015, dan paduan Zr yang dibuat sudah tersedia. Bahan pembuatan serat SiC yang digunakan telah melewati uji densitas, viskositas dan elektrospinnabilitas hingga diperoleh serat SiC 3,73  $\mu\text{m}$  untuk bahan baku dengan perbandingan PCS dan toluen 1,2 g/ml dan 4,34  $\mu\text{m}$  untuk bahan baku dengan PCS dan toluene 1,3 g/ml. Serat SiC yang terbentuk masih bersifat amorf.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh anggota Tim Penelitian dan Pengembangan Komposit Zr/SiC yang telah bekerja sama dan saling bahu membahu untuk membantu mencapai sasaran akhir penelitian ini, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dan laporan penelitian ini dapat dibuat. Taklupa pula kami Tim Penelitian dan Pengembangan Komposit Zr/SiC mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Kepala PTBBN beserta jajarannya atas bantuan dana dari DIPA PTBBN 2015 serta sarana dan prasarana yang disediakan untuk menyelesaikan kegiatan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, Renstra PTBBN 2015-2019
2. Anonim, Rencana kegiatan BFBBN 2015-2019
3. BENJAMIN.M.MA, *Nuclear Reactor Materials and Application*, VNR Company Inc., New York, 1983, 1-60.
4. Olander, D., *Nuclear Fuels Present and Future*. J. of Nuclear Material 389, 2009, 1-22.
5. Anonim, *Very High Burn-Ups in Light Water Reactors*, Nuclear Energy Agency Org. for Economic Cooperation and Development, 2011
6. Seeram Ramakrishna, Kazutosi F, Wee-Eong T, Teik Cheng lim, Zuwei Ma, *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*, World Scientific Co. Pte.Ltd., New Jersey, (2005).
7. Hallstadius, Lars., Johnson, Steven., Lahoda, Ed., *Cladding for High Performance Fuel*, Progress in Nuclear Energy xxx, 2011, 1-6.
8. Futichah, Kisworo,Djoko., Asminar, Pribadi, Slamet. Pembuatan Prototip Pipa Paduan Zirlo-Mo dan Karakterisasinya. Bunga Rampai Hasil Penelitian Pusat

Teknologi Bahan Bakar Nuklir Tahun 2013 Teknologi Elemen Bakar Nuklir, 2014, 51-65

9. Mustika, Deni., Sihombing, R., Pribadi, S., Langenati, R., Sujatno, A., Dimyati, A., Setiawan, J., Indarto, E., Karakteristik Permukaan Serat Silikon Karbida Hasil Pemintalan Listrik dari Polycarbosilane dalam N,N-Dimetilformamida (DMF)/Toluena. Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania Vol 21 No.1, Februari 2015, 29-38.