Pengaruh Tegangan pada Pembentukan Serat Nano Silika dengan Metode *Electrospinning*

Erika Sempana Ginting[(a)*], Posman Manurung[(b)] dan Yanti Yuliyanti[(c)]

Program Studi Magister Fisika, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia, 35141
Email : [(a)]erikasempana@email.com, [(b)] reip65@yahoo.com, [(c)]yanti.yuliyanti@fmipa.unila.ac.id*

Diterima (Tanggal Bulan Tahun), Direvisi (Tanggal Bulan Tahun)

Abstract. *Silica nanofibers have been successfully fabricated using electrospinning method. Silica solution was prepared with molar rasio of tetraethyl orthosilicate (TEOS): ethanol: aquabides:hydrogen chloride (HCl) of 1 : 10 : 3 : 0.04. Polyvinyl alcohol (PVA) of 10% was added to solution. The solutions were then mixed with a ratio of silica: PVA solution of 2: 3 ml. This research was conducted to observe the influence of electrospinning voltage on the uniformity and size of the diameter of silica nanofibers. The bond between silica and PVA in silica/PVA solution was confirmed by Fourier transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The influence of electrospinning stress on the formed fibers is seen through the surface morphology and fiber element analysis on the results of Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive Spectroscopy (SEM - EDS). The silica/PVA functional groups formed, indicate the occurrence of cross-linking between silica and PVA, which was also confirmed through the elements contained in silica nanofibers. Corellation of electrospinning voltage is proven to influence the formation of silica nanofibers seen from surface morphology of the fibers. The surface morphology shows that the silica nanofibers are more continuous and the beads hubungan are relatively less with increasing electrospinning voltage. The average fiber diameter by taking into account the estimated standard deviation, shows a graph with a linear trend and increasing the applied electrospinning voltage. Silica nanofibers with diameter range (80-150) nm are obtained.*

Keywords: *Silica nanofibers, electrospinning, electrospinning voltage, TEOS, PVA.*

Abstrak. Serat nano silika telah berhasil dibuat menggunakan metode *electrospinning.* Larutan silika/PVA disintesis dengan metode sol-gel. Larutan silika dibuat dengan perbandingan molar *tetraethyl orthosilicate* (TEOS): etanol: aquabides*:hydrogen chloride* (HCl) sebesar 1 : 10 : 3 : 0,04. *Polyvinyl alcohol* (PVA) 10% kemudian ditambah ke dalam larutan silika. Kedua larutan kemudian dicampur dengan perbandingan larutan silika : PVA sebesar 2 : 3 ml. Penelitian ini dilakukan untuk mengamati pengaruh tegangan *electrospinning* terhadap keseragaman dan ukuran diameter serat nano silika. Ikatan antara silika dan PVA pada larutan silika/PVA dikonfirmasi dengan *Fourier transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Pengaruh tegangan *electrospinning* terhadap serat yang terbentuk dilihat melalui morfologi permukaan dan analisis elemen serat pada hasil *Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM - EDS). Gugus fungsi larutan silika/PVA menunjukkan terjadinya ikatan silang antara silika dan PVA, yang juga dikonfirmasi terbentuk melalui elemen yang terkandung pada serat nano silika. Tegangan *electrospinning* terbukti menunujukkan pengaruh terhadap pembentukkan serat nano silika dilihat melalui morfologi permukaan serat. Morfologi permukaan menunjukkan serat nano silika semakin kontinu dan manik-manik relatif lebih berkurang seiring bertambahnya tegangan *electrospinning.* Dengan memperhatikan estimasi standar deviasi, grafik diameter rata-rata serat menunjukkan kecenderungan linier dan terjadi peningkatan seiring bertambahnya tegangan *electrospinning*. Serat nano silika yang dihasilkan memiliki diameter (80 - 150) nm.

Kata kunci: Serat nano silika, *electrospinning,* tegangan *electrospinning,*TEOS, PVA.

PENDAHULUAN

Nanoteknologi merupakan ilmu manipulasi pada skala nanometer dengan

tujuan menemukan dan menghasilkan produk baru [1] yang mengalami peningkatan dramatis dalam sifat kimia, mekanik, serta optik [2]. Perhatian para ilmuwan terhadap nanoteknologi telah banyak menghasilkan material serta teknologi baru yang saling berkesinambungan, seperti halnya silika. Silika dikembangkan menjadi serbuk nano silika (nanopartikel) [3][4] dengan pendekatan seperti *top-down* dan *bottom-up* [5]-[7], kemudian berkembang lagi menjadi serat nano silika [8][9] yang didapatkan dengan menciptakan teknik seperti teknik *electrospinning* [10]. Kesinambungan inilah yang mengakibatkan nanoteknologi berkembang diberbagai multidisiplin.

Kebutuhan akan serat nano melahirkan berbagai metode dan teknik dalam memproduksi serat nano seperti, pemintalan konjugasi (*conjugate spinning*), penarikan (*drawing*), pemisahan fasa (*phase separate*), sintesis template/cetakan (*template synthesis*), sistem perakitan mandiri (*self-assembly*), *melt-blowing* dan *electrospinning* [11]. *Electrospinning* adalah representasi dari metode yang mudah digunakan untuk produksi serat dalam jumlah besar dan sesuai untuk fabrikasi serat nano kontinyu [12] serta diameter ukurannya dapat dikontrol dari ukuran nano hingga mikro [13], dengan memperhatikan kekentalan dan konduktivitas larutan [10].

Serat nano dilihat dari dimensi diameternya dan dianggap sebagai material berstruktur nano jika diisi dengan partikel nano untuk membentuk serat nano komposit satu dimensi [14]. Proses terbentuknya serat nano silika melibatkan pendekatan *top down* dan *bottom up* dalam proses pembuatan material berdimensi nano. Pendekatan *top-down* berkaitan dengan proses sol-gel dalam pelarutan polimer dan pencampuran bahan untuk sintesis larutan *electrospinning* [7], sedangkan pendekatan *bottom-up* berlangsung saat larutan hasil sol-gel diproses dengan teknik *electrospinning* untuk menghasilkan serat nano [6].

Sintesis larutan *electrospinning* dalam pembuatan serat nano silika dengan menggunakan metode sol-gel banyak digunakan pada penelitian sebelumnya [8], [15]-[19]. Metode sol-gel dipercaya dapat memproduksi partikel dengan kemurnian tinggi, dan memungkinkan untuk mengontrol ukuran, bentuk [20], sifat kimiawi, tekstur, dan struktur morfologi material. Selain itu, metode sol-gel sangat menguntungkan, karena dapat dilakukan dalam suhu rendah [21]. Sintesis larutan untuk membuat serat nano silika dengan metode sol-gel dapat dibagi dalam dua cara yaitu dengan penambahan polimer dan tanpa penambahan polimer. Penambahan polimer bertujuan untuk mempermudah proses pemintalan karena mempengaruhi kekentalan dan konduktivitas larutan selama proses *electrospinning* [8][18][19], sedangkan tanpa penambahan polimer umumnya lebih sulit dipintal dan diameternya cenderung lebih kecil [15]-[17].

Pirzada *et al.* (2012) dalam penelitiannya berhasil melakukan sintesis PVA-silika dengan metode sol-gel menjadi serat nano silika melalui *electrospinning*. Silika disintesis melalui katalisis asam dari prekursor silika (TEOS dalam etanol-air), dan serat diperoleh dengan *electrospinning* campuran larutan prekursor silika dan PVA yang dilarutkan dalam air. Pada penelitiannya, serat nano silika berhasil terbentuk dengan diameter terkecil serat mencapai 150 nm [8].

TEOS sebagai senyawa alkoksida merupakan salah satu prekusor silika yang paling banyak digunakan karena mudah bereaksi dengan air (reaksi hidrolisis) dan lajunya mudah dikontrol dibanding turunan terhidrolisis cepat lainnya, seperti $SiCl_4$ dan $Si(OCOCH_3)_4$ [22][23]. Penggunaan etanol sebagai pelarut TEOS akan membantu

peningkatan waktu gelasi agar larutan dapat diproses dengan *electrospinning* [24]. Pencampuran TEOS hanya dengan air akan menghasilkan larutan yang heterogen, sehingga dibutuhkan penambahan etanol agar larutan homogen [25]. Penambahan HCl yang diencerkan di dalam aquabides berfungsi sebagai katalis untuk mendapatkan struktur linier pada prekursor TEOS, sehingga larutan akan dimatangkan untuk memperkuat struktur linier yang sudah ada, serta terjadi peningkatan kekentalan atau viskositas sol (Geltmeyer *et al.* (2013).

Penggunaan HCl juga mempengaruhi pH larutan yang berguna untuk menghasilkan larutan ionik. Larutan dengan pH kurang dari 2 merupakan larutan bermuatan positif yang sangat cocok digunakan dalam metode *electrospinning*, karena larutan yang dapat diproses dengan *electrospinning* adalah larutan ionik yang bermuatan positif [26]. Pencampuran silika dan PVA diyakini dapat mempengaruhi kemampuan untuk membentuk jaringan ikat. Tanpa jaringan ikat ini, larutan tidak akan dapat diproses dengan *electrospinning* karena kurangnya keterikan pada larutan [8]. Pemilihan PVA juga didasarkan pada kelarutan PVA pada air yang sangat baik, termal yang stabil, dapat berperan sebagai penghambat korosi dan trasmisi optik [27].

Pemaparan di atas menjadi dasar penelitian ini dilakukan, yaitu pembuatan serat nano silika yang larutannya disintesis dengan metode sol-gel dan dipintal dengan metode *electrospinning*. Proses *electrospinning* dilakukan dengan variasi tegangan *electrospinning* untuk mengamati pengaruhnya terhadap ukuran diameter dan keseragaman serat yang terbentuk. Viskositas larutan dan tegangan permukaan diamati untuk menunjukkan larutan yang dihasilkan dapat diproses dengan *electrospinning*. Alat yang digunakan adalah viskometer Ostwald dan tensiometer. Uji FTIR dilakukan untuk menujukkan terjadinya ikatan antara prekusor dan polimer pada larutan. Pengaruh tegangan *electrospinning* terhadap morfologi permukaan serat nano silika dilihat dengan uji SEM-EDS.

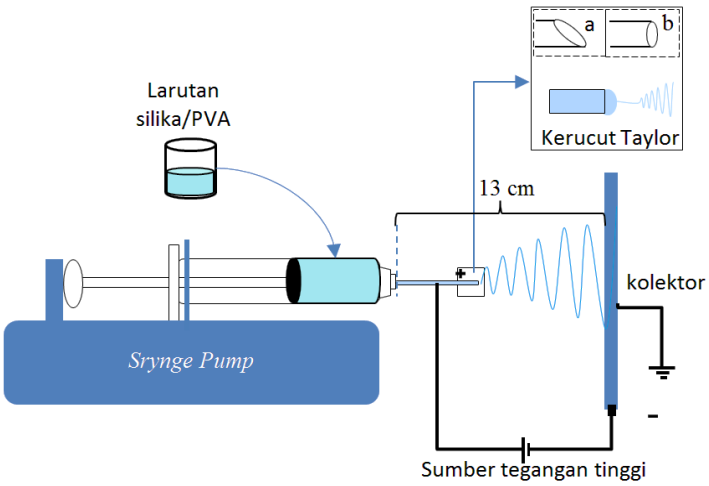
METODE PENELITIAN

Bahan awal yang digunakan adalah TEOS 99% (Merck), PVA 98% (Merck), etanol 99,9% (Merck), HCl 37% (Merck), dan Aquabides. Proses sintesis terbagi dua yaitu pelarutan polimer dan pencampuran larutan silika. Polimer dibuat dengan melarutkan PVA 10% di dalam aquabides pada suhu 80 °C selama 2,5 jam sambil diaduk dengan kecepatan 300 rpm. Selanjutnya, larutan silika dibuat dengan perbandingan molar TEOS : etanol : aquabides : HCl adalah 1 : 10 : 3 : 0,04. Sintesis dimulai dengan mencampurkan 3 ml TEOS dengan 8 ml etanol, kemudian ditambahkan 0,02 ml HCl yang sudah dicampur dengan 0,7 ml aquabides sedikit demi sambil diaduk pada suhu 60 °C selama 1 jam sambil diaduk dengan kecepatan 300 rpm. Kemudian dilakukan sintesis larutan silika/PVA dengan perbandingan silika : PVA sebanyak 2 : 3 ml.

Pengukuran viskositas larutan dilakukan dengan melihat laju alir larutan pada viskometer Ostwald dan dihitung dengan **Persamaan 1.**

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{t_1 . \rho_1}{t_2 . \rho_2} \; ; \eta_2 = \eta_1 \frac{t_2 . \rho_2}{t_1 . \rho_1} \qquad (1)$$

dengan η_1, ρ_1, t_1, η_2, ρ_2, dan t_2, masing-masing adalah kekentalan (Pa.s), massa jenis (g/ml), dan waktu aliran larutan 1 dan 2 (1 yaitu larutan standar (metanol) dan 2 yaitu larutan silika/PVA) dalam detik. Selanjutnya tegangan permukaan diukur



Gambar 1. Skema proses *electrospinning*.

Dengan tensiometer dan dihitung dengan Persamaan 2.

$$\gamma = \frac{k\ \Delta X}{4\pi r} \qquad (2)$$

dengan γ, k, ΔX, π, dan r, masing-masing adalah adalah koefisien tegangan permukaan larutan (dyn.cm^{-1}), konstanta pegas, gaya pegas larutan (mN), phi (3,14; $\frac{22}{7}$), dan jari-jari cincin sudah dapat digunakan untuk membuat serat nano menggunakan teknik *electrospinning* [28].

Proses *electrospinning* dilakukan untuk memintal serat nano silika dengan skema seperti **Gambar 1.** Larutan dimasukkan ke dalam alat suntik ukuran 10 ml dengan ujung jarum runcing yang sudah diratakan.

Kolektor yang digunakan berupa aluminium foil berlapis kaca preparat agar serat mudah diambil. Jarak kolektor dengan alat suntik (*tip to colector distance*, TCD) adalah 13 cm. Proses *electrospinning* dilakukan selama 1 jam pada suhu ruangan dengan laju aliran sebesar 1,5 ml/jam. Jarum dihubungkan dengan tegangan tinggi positif sedangkan kolektor yang telah dilapisi aluminium foil dihubungkan dengan laju tegangan tinggi negatif dengan variasi tegangan 12, 14, 16, 18, dan 20 kV.

Larutan silika/PVA dikarakterisasi dengan FTIR. Kemudian, serat nano silika hasil *electrospinning* dikarakterisasi dengan SEM-EDS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Preparasi Larutan *Electrospinning*

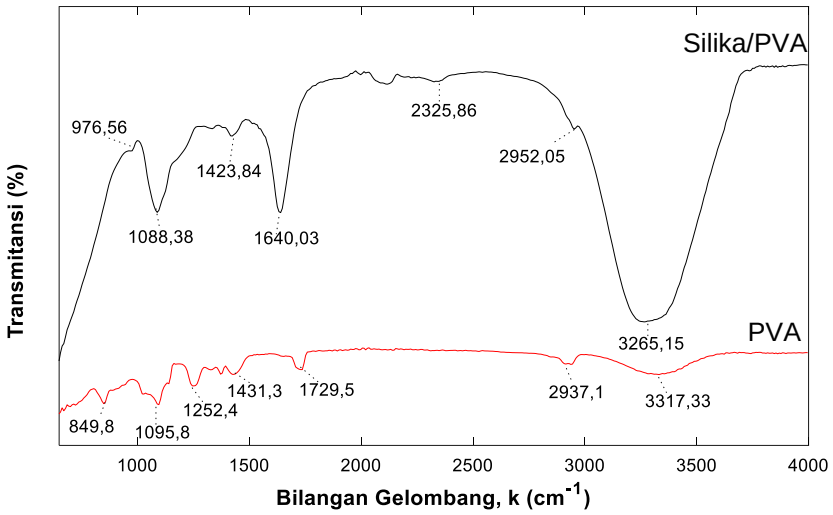
Tingkat keasaman (pH) larutan silika/PVA hasil sintesis adalah 2. Larutan dengan pH rendah (≤ pH 2) merupakan larutan ionik bermuatan positif yang sangat cocok digunakan dalam metode *electrospinning* [26].

Viskositas dan Tegangan Permukaan

Viskositas larutan silika/PVA berdasarkan **Persaman 1** ditampilkan pada Tabel 1. Nilai viskositas larutan sebesar 0,329 Pa.s yang dihasilkan menunjukkan bahwa larutan silika/PVA dapat diproses dengan teknik *electrospinning* [16].

Tabel 1. Viskositas larutan.

Keterangan	Nilai
Viskositas metanol (Pa.s)	0,00059
Massa metanol (g/cm^3)	0,7918
Waktu aliran metanol (s)	20,1433
Massa silika/PVA (g/cm^3)	1,0068
Waktu aliran silika/PVA (s)	8832
Viskositas silika/PVA (Pa.s)	0,329



Gambar 2. Spektrum FTIR larutan silika/PVA

Nilai tegangan permukaan larutan silika/PVA yang didapatkan berdasarkan perhitungan menggunakan **Persamaan 2** adalah (30 ± 4) dyn/cm. Nilai tersebut dinyatakan sebagai nilai tegangan permukaan larutan yang dapat digunakan dalam proses *electrospinning* [28].

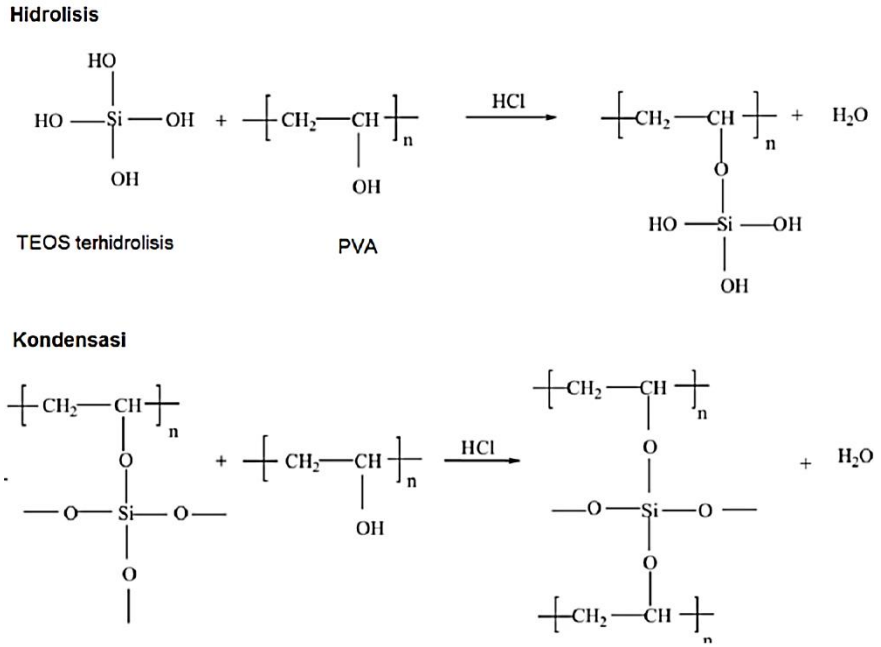
Hasil FTIR

Hasil FTIR larutan silika/PVA dan PVA murni pada panjang gelombang 650 – 4000 cm^{-1} ditampilkan pada **Gambar 2**. Adanya beberapa puncak serapan dapat menginformasikan gugus fungsi yang terlibat dalam larutan silika/PVA dan PVA murni yang ditampilkan pada Error! Reference source not found..

Tabel 2 Gugus fungsi larutan silika/PVA dan PVA murni.

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm^{-1})	
	PVA	Silika/PVA
Si-O; Si O-Si	-	976,65; 1088,38
C-C	849,8	-
C-O	1095,8	-
C-H	1252,4	2952,05
$-CH_2$	1431,3; 2937,1	1423,84; 1640,03
C=O	1729,5	2325,86
-OH	3317,33	3265,15

Kehadiran gugus -OH pada hasil FTIR dipercaya terjadi akibat hidrolisis TEOS yang menghasilkan silanol atau Si-OH [8] sebagai gugus aktif silika, diyakini mampu meningkatkan ikatan silika dengan polimer [29]. Ikatan gugus –OH juga terdapat pada PVA murni yang diyakini sebagai akibat terjadinya ikatan hidrogen antarmolekul dan intramolekul yang melibatkan gugus hidroksil PVA dan Si-OH [30]. Kehadiran CH dan CH_2 pada silika/PVA dan PVA murni diyakini sebagai PVA karena komposisi dasar PVA adalah CH_2-CHOH dan struktur monomernya yaitu CH_2=CHOH [15][30][31]. Gugus C=O menunjukkan gugus asetat yang terdapat dalam PVA yang tidak terhidrolisis. Namun, karena puncak serapan C=O yang tidak terlalu menonjol menunjukkan bahwa PVA pada larutan silika/PVA dan PVA murni terhidrolisis dengan cukup baik. Ikatan gugus fungsi Si-O dan Si-O-Si yang tidak terbentuk pada PVA murni menunjukkan bahwa penambahkan PVA ke prekusor tidak mengganggu bentuk jaringan silika pada hibrida silika/PVA [8]. Pada sampel PVAmurni juga terdapat gugus fungsi C-C yang menunjukkan terjadinya pelepasan atom O dan H yang awalnya menyatu dengan atom C. Hal ini diyakini

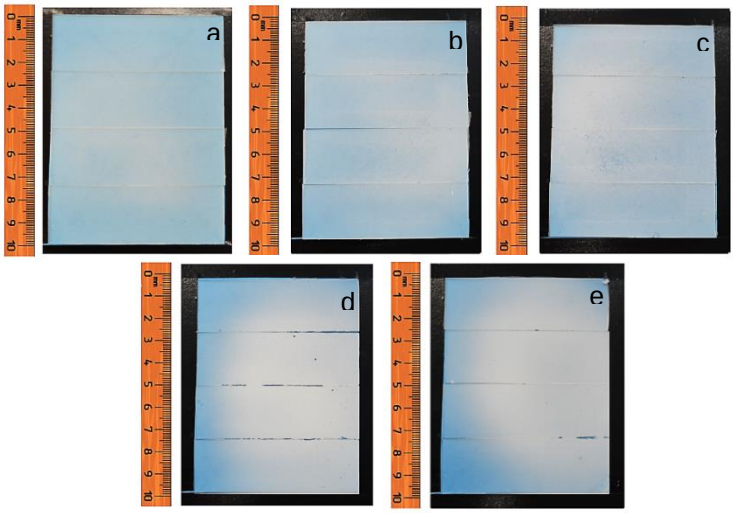


Gambar 3 Interaksi antara TEOS dan PVA .

terjadi pada saat *electrospinning*, karena sampel PVA murni merupakan serat hasil *electrospinning* [31]. Untuk memperkuat pernyataan diatas, pada Gambar 4.5 ditampilkan interaksi yang mungkin terjadi antara TEOS dan PVA dalam hidrolisis dan kondensasi [32]. Pada gambar terlihat adanya gugus silanol dan alkil yang terlibat dalam sintesis larutan silika/PVA.

Hasil *Electrospinning*

Hasil *electrospinning* berupa serat yang tertempel di permukaan kaca preparat ditampilkan pada **Gambar 4**. Tampak bahwa banyaknya serat berupa lapisan berwarna putih semakin meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan masukan yang diberikan selama proses *electrospinning*. Hal ini dibuktikan dengan lapisan putih yang semakin tebal

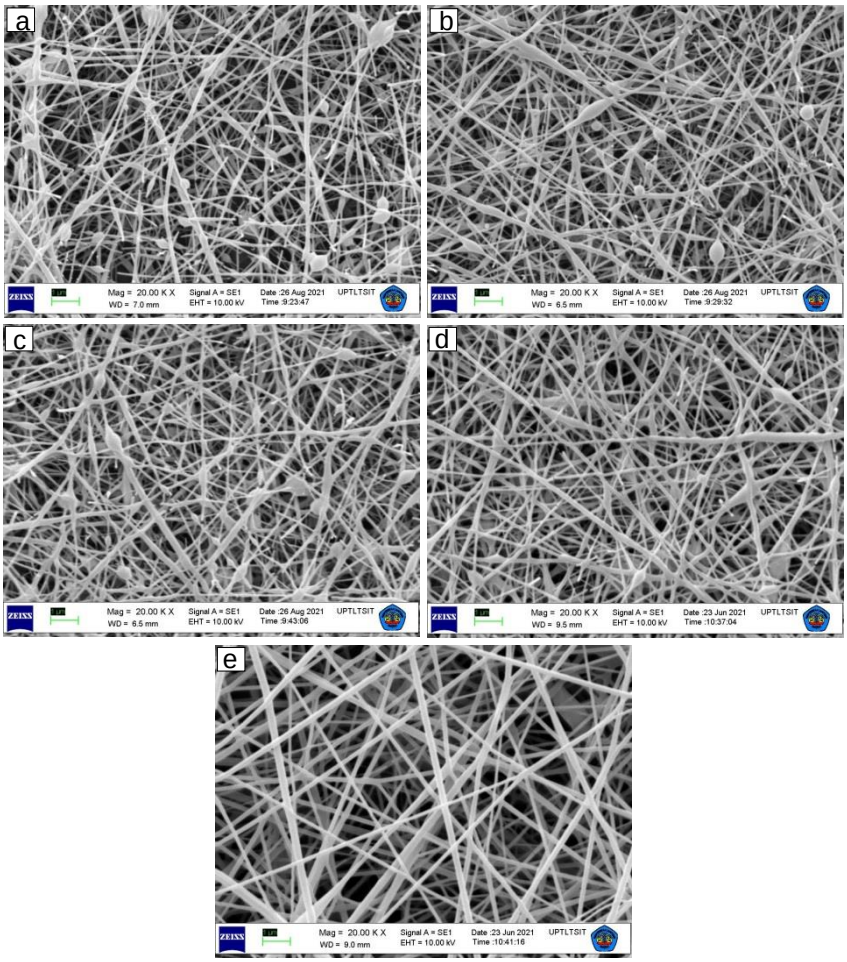


Gambar 4. Serat nano silika pada kaca preparat: (a) TP12, (b) TP14, (c) TP16, (d) TP18, dan (e) TP20**.**

dan penuh terbentuk pada permukaan kaca preparat seiring pertambahan tegangan yang diberikan. Lapisan serat terlihat lebih merata dan tipis pada sampel dengan tegangan rendah. Peningkatan tegangan menyebabkan lapisan tipis semakin menebal pada bagian pusat akibat tegangan *electrospinning* yang semakin tinggi mengusik tegangan permukaan dan mempengaruhi kecepatan larutan menuju kolektor [33].

Morfologi Permukaan

Hasil SEM berupa morfologi permukaan serat nano silika pada perbesaran 20.000 ditampilkan pada **Gambar 5**. Serat nano silika tampak semakin kontinu dan manik semakin berkurang seiring meningkat tegangan *electrospinning*. Terbentuknya serat tidak kontinu dan manik dipengaruhi oleh tegangan *electrospinning* yang mengakibatkan ketidakstabilan pancaran pada tegangan dibawah 20 kV (Deitzel *et al*., 2001; Li *et al*., 2018). Faktor penyebab terjadinya manik-manik yaitu viskositas , tegangan permukaan, dan tegangan electrospinning (Fong *et al*., 1999). Daya dorong pada tegangan *electrospinning rentang* 12 - 18 kV kurang memadai untuk dapat mengatasi tegangan permukaan larutan (30 ± 4) dyn/cm, yang artinya viskositas cairan dianggap kurang tinggi, sehingga menghasilkan manik-manik pada serat diyakini diakibatkan oleh lingkungan sistem electrospinning serta ketidakstabilan

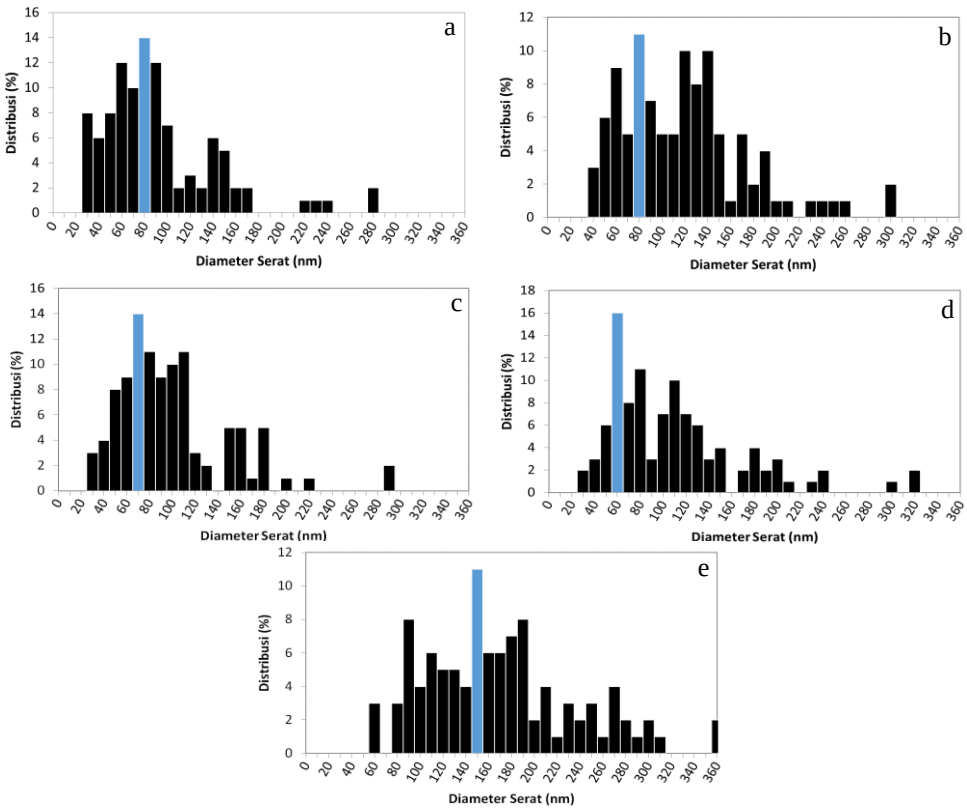


Gambar 5. Morfologi permukaan serat nano silika: (a) TP12, (b) TP14, (c) TP16, (d) TP18, dan (e) TP20.

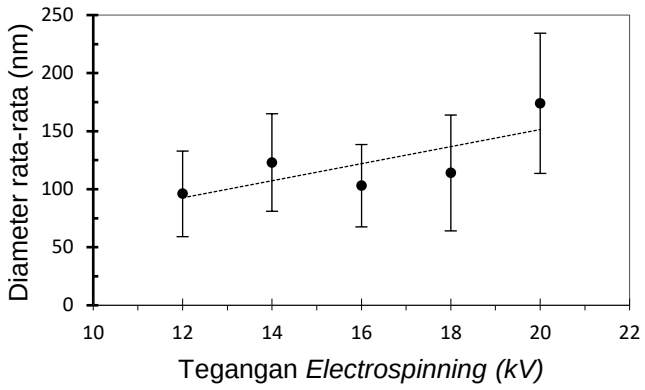
pancaran. Pada suhu (31 ± 2) °C dan kelembapan (60 ± 4)% mengakibatkan larutan cepat teroksidasi. Oksidasi berakibat pada tersumbat jarum suntik oleh larutan yang sudah mengering dan membentuk serat pada ujung jarum. Sehingga pancaran terputus karena ujung jarum harus dibersihkan terlebih dahulu. tegangan *electrospinning* pada rentang 12 - 18 kV juga menyebabkan larutan cenderung lebih lambat terlontar ke kolektor, sehingga larutan mengering dalam perjalanan menuju ke kolektor.

Ukuran Diameter Serat

Diameter serat dapat dilihat melalui morfologi permukaan sampel dengan pengukuran menggunakan ImageJ pada100 data serat tiap sampel. Distribusi ukuran diameter serat nano silika ditampilkan pada **Gambar 6**. Berdasarkan pengukuran, distribusi diameter masing-masing sampel TP12, TP14,TP 16, TP18, dan TP20 yaitu 80, 80, 70, 60, dan 150 nm, sedangkan diameter rata-rata masing-masing sampel adalah (10 ± 4) x 10 nm, (12 ± 4) x 10 nm, (10 ± 4) x 10 nm, (11 ± 5) x 10 nm, dan (17 ± 6) x 10 nm. Berdasarkan data distribusi diameter serat nano silika dapat dinyatakan terjadi penurunan diameter serat seiring bertambahnya tegangan yang diberikan. Menurut penelitian Zhang et al. (2005), peningkatan tegangan akan meningkatkan kekuatan medan listrik, sehingga gaya tolak elektrostatik pada pancaran larutan meningkat dan mendukung pembentukan serat yang lebih tipis. Di sisi lain, larutan juga akan dikeluarkan dari ujung kapiler dengan lebih cepat saat pancaran



Gambar 6. Distribusi ukuran diameter serat nano pada sampel: (a) TP12, (b) TP14, (c) TP16, (d) TP18, dan (e) TP20.

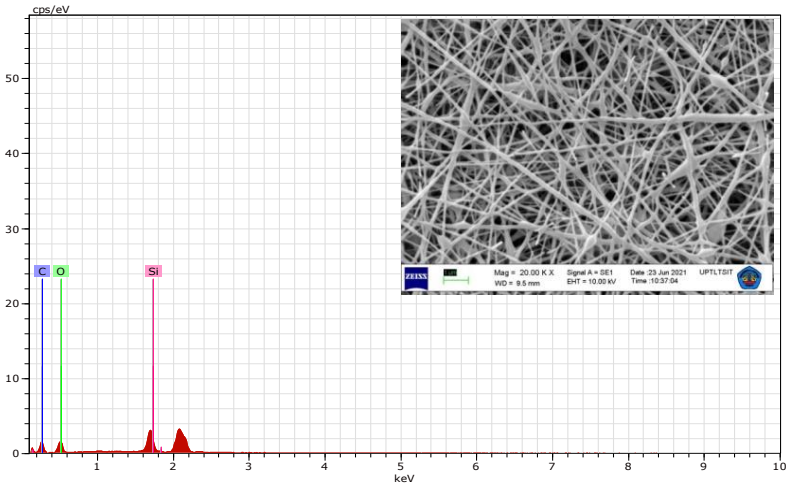


Gambar 7. Pengaruh tegangan terhadap ukuran diameter rata-rata serat nano silika.

dikeluarkan dari kerucut Taylor dan menjadi penyebab peningkatan diameter serat [34]. Hal ini bersesuaian juga dengan diameter rata-rata serat nano silika pada kelima sampel yang dihasilkan. Diameter rata-rata serat nano silika membuktikan bahwa serat yang terbentuk adalah serat nano karena berukuran <1000 nm [35]. Hubungan tegangan *electrospinning* dengan diameter rata-rata serat nano silika dapat dilihat pada **Gambar 7**. Dengan melihat estimasi standar deviasi, maka dapat dilihat bahwa grafik diameter rata-rata serat nano silika memiliki kecenderungan linier dan terjadi peningkatan seiring bertambahnya tegangan *electrospinning* yang diberi.

Komposisi Unsur Serat

Spektrum EDS ditampilkan pada **Gambar 8.** Analisis EDS bertujuan untuk mengkonfirmasi keberadaan elemen pada serat nano silika yang sebelumnya di dalam larutan silika/PVA pada hasil uji FTIR.



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	7.92	43.94	56.31	1.48
O	8	K-series	5.64	31.29	30.11	1.06
Si	14	K-series	4.46	24.77	13.58	0.23
		Total:	18.02	100.00	100.00	

Gambar 8. Komposisi unsur serat nano silika TP18

Hasil EDS menunjukkan keberadaan tiga elemen penyusun pada serat nano silika, yaitu C, O, dan Si. Keberadaan elemen C, O, dan Si juga terlihat pada hasil karakteristik FTIR larutan silika/PVA dengan kehadiran ikatan gugus fungsi –OH, C=O serta gugus Si-O dan Si-O-Si. Hal tersebut membuktikan terjadinya ikatan yang kuat antara prekusor silika (TEOS) dengan PVA setelah dilakukan proses electrospinning saar larutan silika/PVA sudah membentuk serat nano silika (Raza, 2018).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil sintesis, larutan silika/PVA dengan pH 2, viskositas 0,329 Pa.s, dan tegangan permukaan (30 ± 4) dyn/cm dapat dipintal menjadi serat nano silika dengan metode *electrospinning.* Gugus fungsi larutan silika/PVA yang terbentuk yaitu –OH, C-H, CH_2, C=O, Si-O, dan Si-O-Si menunjukkan terjadinya ikatan silang antara silika dan PVA, yang juga dikonfirmasi terbentuk pada serat nano silika dengan munculnya elemen C, O, dan Si pada hasil EDS serat nano silika. Tegangan *electrospinning* terbukti menunujukkan pengaruh terhadap pembentukkan serat nano silika dilihat melalui morfologi permukaan serat. Morfologi permukaan menunjukkan serat nano silika semakin kontinu dan manik-manik relatif lebih berkurang seiring bertambahnya tegangan *electrospinning.* Dengan memperhatikan estimasi standar deviasi, grafik diameter rata-rata serat menunjukkan kecenderungan linier dan terjadi peningkatan seiring bertambahnya tegangan *electrospinning*. Serat nano silika yang dihasilkan memiliki diameter yang relatif naik seiring dengan meningkatnya tegangan *electrospinning*, dengan diameter serat mulai dari (80 – 150) nm.

DAFTAR PUSTAKA

[1] H. N. Cheng, L. J. Doemeny, C. L. Geraci, D. G. Schmidt, R. E. L. Boulevard, N. Orleans, U. States, A. Way, S. Diego, and U. States, “Nanotechnology Overview: Opportunities and Challenges,” in *Nanotechnology: Delivering on The Promise*, vol. 1, Wasington: American Chemical Society (ACS), 2016, pp. 1-12.

[2] S. B. Mitra, “Nanoparticles for Dental Materials: Synthesis, Analysis, and Applications,” in *Emerging Nanotechnologies in Dentistry*, Second., vol. 2, K. Subramani and W. Ahmed, Eds. United States: Elsevier Inc., 2018, pp. 17-39.

[3] A. Mourhly, M. Khachani, A. El Hamidi, M. Kacimi, M. Halim, and S. Arsalane, “The Synthesis and Characterization of Low-Cost Mesoporous Silica SiO_2 from Local Pumice Rock,” *Nanomater. Nanotechnol.*, vol. 5, no. 35, pp. 1-7, Jan. 2015.

[4] M. Sarikaya, T. Depci, R. Aydogmus, A. Yucel, and N. Kizilkaya, “Production of Nano Amorphous SiO_2 from Malatya Pyrophyllite,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 44, no. 5, p. 52004, Oct. 2016.

[5] E. Hutchings, “Engineering and Sciences,” *California Institute of Technology*, United States, p. 22, Feb-1960.

[6] K. E. Drexler, “Molecular engineering: An Approach to The Development of General Capabilities for Molecular Manipulation,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 78, no. 9, pp. 5275-5278, 1981.

[7] M. F. Ashby, D. L. Schodek, and P. J. Ferreira, *Nanomaterials, Nanotechnologies and Design*. USA: Elsevier, 2009.

[8] T. Pirzada, S. A. Arvidson, C. D. Saquing, S. S. Shah, and S. A. Khan, "Hybrid Silica-PVA Nanofibers via Sol-Gel Electrospinning.," *Langmuir*, vol. 28, no. 13, pp. 5834-44, Apr. 2012.

[9] P. Aghasiloo, M. Yousefzadeh, M. Latifi, and R. Jose, "Highly Porous TiO2 Nanofibers by Humid-Electrospinning with Enhanced Photocatalytic Properties," *J. Alloys Compd.*, vol. 790, pp. 257-265, Jun. 2019.

[10] J. Doshi and D. H. Reneker, "Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers," *J. Electrostat.*, vol. 35, pp. 151-160, 1995.

[11] F. K. Ko and Y. Wan, *Introduction to Nanofiber Materials*, vol. 9780521879. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[12] A. Barhoum, M. Bechelany, and A. Makhlouf, *Handbook of Nanofibers*. Switzerland: Springer International Publishing, 2019.

[13] L. Cui, Y. Song, F. Wang, Y. Sheng, and H. Zou, "Electrospinning Synthesis of SiO_2-TiO_2 Hybrid Nanofibers with Large Surface Area and Excellent Photocatalytic Activity," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 488, pp. 284-292, Sep. 2019.

[14] S. Ramakrishna, K. Fujihara, W.-E. Teo, T.-C. Lim, and Z. Ma, *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*. Singapore: WORLD SCIENTIFIC, 2005.

[15] S.-S. Choi, S. G. Lee, S. S. Im, S. H. Kim, and Y. L. Joo, "Silica Nanofibers from Electrospinning/Sol-Gel Process," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 22, no. 12, pp. 891-893, 2003.

[16] J. Geltmeyer, L. Van der Schueren, F. Goethals, K. De Buysser, and K. De Clerck, "Optimum Sol Viscosity for Stable Electrospinning of Silica Nanofibres," *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 67, no. 1, pp. 188-195, Jul. 2013.

[17] J. Geltmeyer, J. De Roo, F. Van den Broeck, J. C. Martins, K. De Buysser, and K. De Clerck, "The Influence of Tetraethoxysilane Sol Preparation on The Electrospinning of Silica Nanofibers," *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 77, no. 2, pp. 453-62, Sep. 2015.

[18] M. H. Ugur, B. Oktay, A. Gungor, and N. Kayaman-Apohan, "Highly Thermally Resistant Hydrophobic Poly(Vinyl Alcohol)-Silica Hybrid Nanofibers," *J. Serbian Chem. Soc.*, vol. 83, no. 7-8, pp. 885-897, 2018.

[19] M. Shahhosseininia, S. Bazgir, and M. D. Joupari, "Fabrication and Investigation of Silica Nanofibers via Electrospinning.," *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl.*, vol. 91, no. 2017, pp. 502-511, Sep. 2018.

[20] A. C. Pierre, *Introduction to Sol-Gel Processing*, vol. 1. Boston, MA: Springer US, 1998.

[21] K. Pal and F. Gomes, *Nanofabrication for Smart Nanosensor Applications*. Netherland: Elsevier Inc., 2020.

[22] C. J. Brinker and G. W. Scherer, *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. London: Academic Press, Inc., 1998.

[23] S. K. Tiwari and S. S. Venkatraman, "Importance of Viscosity Parameters in Electrospinning : of Monolithic And Core – Shell Fibers," *Mater.*

Sci. Eng. C, vol. 32, no. 5, pp. 1037-1042, 2012.

[24] A. H. Boonstra and T. N. M. Bernards, "The Dependence of The Gelation time on The Hydrolysis Time in a Two-Step SiO_2 Sol-Gel Process," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 105, pp. 207-213, 1988.

[25] N. Venkatathri, "Synthesis of Silica Nanosphere from Homogeneous and Heterogeneous Systems," vol. 30, no. 6, pp. 615-617, 2007.

[26] D. Levy and M. Zayat, Eds., *The Sol-Gel Handbook: Syntesis, Characterization, and Aplications*. Germany: Wiley-VCH: Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015.

[27] A. Kausar, "Innovations in Poly(Vinyl Alcohol) Derived Nanomaterials," *Adv. Mater. Sci.*, vol. 20, no. 3, pp. 5-22, Sep. 2020.

[28] S. Tungprapa, T. Puangparn, M. Weerasombut, I. Jangchud, P. Fakum, S. Semongkhol, C. Meechaisue, and P. Supaphol, "Electrospun Cellulose Acetate Fibers: Effect of Solvent System on Morphology and Fiber Diameter," *Cellulose*, vol. 14, no. 6, pp. 563-575, Oct. 2007.

[29] M. A. Raza, A. Islam, A. Sabir, N. Gull, I. Ali, R. Mehmood, J. Bae, G. Hassan, and M. U. Khan, "PVA/TEOS Crosslinked Membranes Incorporating Zinc Oxide Nanoparticles and Sodium Alginate to Improve Reverse Osmosis Performance for Desalination," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 136, no. 22, p. 47559, Jun. 2019.

[30] K. Sasipriya, R. Suriyaprabha, P. Prabu, and V. Rajendran, "Synthesis and Characterisation of Polymeric Nanofibers Poly (Vinyl Alcohol) and Poly (Vinyl Alcohol)/Silica using Indigenous Electrospinning Set Up," *Mater. Res.*, vol. 16, no. 4, pp. 824-830, Apr. 2013.

[31] N. V. Bhat, M. M. Nate, M. B. Kurup, V. A. Bambole, and S. Sabharwal, "Effect of γ-Radiation on The Structure and Morphology of Polyvinyl Alcohol Films," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 237, no. 3-4, pp. 585-592, Aug. 2005.

[32] T. Pirzada and S. S. Shah, "Water-Resistant Poly(Vinyl Alcohol)-Silica Hybrids through Sol-Gel Processing," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 37, no. 4, pp. 620-626, Apr. 2014.

[33] J. Xue, T. Wu, Y. Dai, and Y. Xia, "Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications," *Chemical Reviews*, vol. 119, no. 8. American Chemical Society, pp. 5298-5415, 24-Apr-2019.

[34] C. Zhang, X. Yuan, L. Wu, Y. Han, and J. Sheng, "Study on Morphology of Electrospun Poly (Vinyl Alcohol) Mats," *Eur. Polym. J.*, vol. 41, pp. 423-432, 2005.

[35] R. A. Chapman, *Applications of Nonwovens in Technical Textiles*. vol. 22, no. 9. New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2010.