

**PENGARUH TEGANGAN PADA PEMBENTUKAN SERAT NANO
SILIKA DENGAN METODE *ELECTROSPINNING***

(Tesis)

Oleh

**ERIKA SEMPANA BR GINTING
1927041008**



**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

ABSTRAK

PENGARUH TEGANGAN PADA PEMBENTUKAN SERAT NANO SILIKA DENGAN METODE *ELECTROSPINNING*

Oleh

ERIKA SEMPANA BR GINTING

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. Gugus fungsi larutan silika/PVA dan PVA murni dikarakterisasi dengan *Fourier transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Morfologi permukaan dan analisis elemen diamati dengan *Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM - EDS). Gugus fungsi larutan silika/PVA yang terbentuk adalah -OH, C-H, CH₂, C=O, Si-O, dan Si-O-Si yang menunjukkan terjadinya ikatan silang antara silika dan PVA. Gugus fungsi yang ditunjukkan pada larutan masih tampak pada serat nano silika hasil *electrospinning* dengan adanya elemen C, O, dan Si pada hasil EDS serat nano silika. Tegangan *electrospinning* terbukti menunjukkan pengaruh terhadap pembentukan 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*. Estimasi standar deviasi pada grafik diameter rata-rata serat menunjukkan kecenderungan linier dan terjadi peningkatan seiring bertambahnya tegangan *electrospinning*. Serat nano silika yang dihasilkan memiliki rentang diameter 60 - 150 nm.

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

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF ELECTRICAL VOLTAGE ON FORMATION OF SILICA NANO FIBER WITH ELECTROSPINNING METHOD

By

ERIKA SEMPANA BR GINTING

Silica nanofibers have been successfully fabricated using electrospinning method. Silica solution was prepared with molar ratio 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. The functional group of silica/PVA was characterized by Fourier transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Morphology and elements analysis was tested by Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive Spectroscopy (SEM - EDS). The functional groups of silica/PVA solution formed are -OH, C-H, CH₂, C=O, Si-O, and Si-O-Si which indicate the occurrence of cross-linking between silica and PVA. The functional groups shown in the solution are still visible on the silica nanofibers in the presence of C, O, and Si elements in the EDS results of the silica nano fibers. Electrospinning voltage is proven to have an effect on the formation of silica nanofibers seen through the surface morphology of the fiber. The surface morphology shows that the silica nanofibers are more continuous and the beads are relatively less with increasing electrospinning voltage. The estimated standard deviation of the average fiber diameter shows a linear trend and the fibers diameter increases with increasing applied electrospinning voltage. Silica nanofibers with diameter range 60 - 150 nm are obtained.

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

**PENGARUH TEGANGAN PADA PEMBENTUKAN SERAT NANO
SILIKA DENGAN METODE *ELECTROSPINNING***

Oleh

**ERIKA SEMPANA BR GINTING
1927041008**

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER SAINS**

Pada

**Program Studi Magister Fisika
Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

Judul : PENGARUH TEGANGAN PADA PEMBENTUKAN SERAT NANO SILIKA DENGAN METODE ELECTROSPINNING

Nama : Erika Sempana br Ginting

NPM : 1927041008

Program Studi : Magister Fisika

: Material

Fakultas ; Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.
NIP. 19590308 199103 1 001

Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.
NIP. 19751219 200012 2 003

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Fisika

**Ketua Program Studi
Magister Fisika**

Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 19801010 200501 1 002

Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.
NIP. 19820618 200812 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Prof. Posman Manurun, M.Si., Ph.D.**

Sekretaris : **Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.**

Penguji Anggota : **1. Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.**

2. Dr. rer. Nat. Roniyus Marjunus, M.Si

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dr. Eng. Suripto Dwi Yuwono, S.Si., M.T.

NIP. 19740705 200003 1 001

3. Direktur Program Pascasarjana

Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T.

NIP. 19710415199803 1 005

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **20 Desember 2021**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis yang berjudul **“PENGARUH TEGANGAN PADA PEMBENTUKAN SERAT NANO SILIKA DENGAN METODE *ELECTROSPINNING*”** tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis disebut dalam daftar pustaka. Selain itu saya menyatakan pula bahwa tesis ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai hukum yang berlaku.



Bandar Lampung, Desember 2021

Handwritten signature of Erika Sempana br Ginting.

Erika Sempana br Ginting
NPM. 1927041008

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kabanjahe, 25 Juni 1995. Penulis adalah anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Minpin Ginting dan Ibu Kenangan br Purba. Penulis menyelesaikan pendidikan Taman Kanak-Kanak di TK Negeri Pembina pada Tahun 2002, Sekolah Dasar di SDN 040460 Berastagi pada Tahun 2008, Sekolah Menengah Pertama di SMPN 01 Kabanjahe pada Tahun 2011, Sekolah Menengah Atas di SMAN 01 Tigapanah pada Tahun 2014.

Pada tahun 2018, penulis menyelesaikan pendidikan Strata-1 di Universitas Lampung (Unila), Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), jurusan Fisika. Selanjutnya tahun 2019 penulis melanjutkan studi Magister Fisika di Universitas Lampung, Program Studi Magister Fisika.

MOTTO

Bekerja sambil Berdoa
(Ora et Labora)

“Yok bisa yok”

“Apa yang tidak pernah dilihat oleh mata, dan tidak pernah didengar oleh telinga dan yang tidak pernah timbul di dalam hati manusia: semua disediakan Allah untuk mereka yang mengasihi DIA”

(1 Korintus 2:9)

PERSEMBAHAN

Segala hormat dan kemuliaan hanya bagi Yesus Kristus.
Dengan segala syukur kupersembahkan karya ini untuk orang-orang yang kusayangi:

Nande Karo Kekelengen Ku

Ir. Kenangan br Purba

Atas pengorbanan dan kasih sayang yang tiada berkesudahan.

Agi Kekelengen Ku

Fredy Septrianus Ginting

Atas dukungan dan doa yang tiada henti.

Keluarga besar Purba dan Ginting yang selalu memberi dukungan dan semangat.

Sahabat dan rekan-rekan seperjuangan - Program Magister Fisika 2019, terimakasih untuk kebersamaan kita semasa kuliah.

Orangtua sekaligus pembimbing yang sangat ku hormati,
Prof. Posman Manurung.

Almamaterku tercinta “UNIVERSITAS LAMPUNG”

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur bagi Tuhan Yesus Kristus yang telah memberi hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul **“PENGARUH TEGANGAN PADA PEMBENTUKAN SERAT NANO SILIKA DENGAN METODE *ELECTROSPINNING*”** yang merupakan syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains (M.Si) dari Program Magister Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyajian tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh sebab itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan dan penyempurnaan tesis ini. Semoga tesis ini dapat menjadi rujukan untuk penelitian selanjutnya agar lebih sempurna dan dapat memperkaya ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, Desember 2021
Penulis

Erika Sempana br Ginting

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberi hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul **“PENGARUH TEGANGAN PADA PEMBENTUKAN SERAT NANO SILIKA DENGAN METODE *ELECTROSPINNING*”**. Terwujudnya tesis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Posman Manurung, M.Si., Ph.D. selaku Pembimbing I dan Pembimbing Akademik yang telah bersedia meluangkan waktu untuk membimbing, memotivasi serta memberi ilmu dan nasehat kepada penulis selama proses perkuliahan, penelitian, dan penulisan tesis.
2. Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. selaku Pembimbing II yang telah bersedia membimbing dan memberikan saran kepada penulis.
3. Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc. selaku dosen Penguji I dan Kepala Program Magister Fisika yang telah berkenan mendukung dan memberikan saran yang membangun kepada penulis.
4. Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, S.Si., M.Si. selaku Penguji II yang telah berkenan memberikan saran yang membangun kepada penulis.
5. Prof. Karomani, M.Si. selaku Rektor Universitas Lampung.

6. Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, S.Si., M.T. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
7. Prof. Dr. Ir. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
8. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
9. Bapak dan Ibu Dosen serta Staff Program Magister Fisika Universitas Lampung.
10. Nurul Oktavia yang telah meluangkan waktu dalam memberi masukan dan motivasi selama masa penelitian.
11. Orangtuaku Ibu Kenangan br Purba dan adikku Fredy Septrianus Ginting yang selalu memberikan dukungan secara moril dan materil, senantiasa terus mendoakan dan memberi semangat.
12. Resi Vita Loka Ginting, Kak Resa Flanika Ginting, Erik Estrada Ginting dan Bang Eko Sinulingga atas dukungan, doa, dan semangat yang diberikan.
13. Sahabat-sahabat yang telah meluangkan waktu untuk memberikan dukungan, bantuan, dan motivasi.

Serta semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu. Semoga Tuhan selalu membalas dengan hal yang terbaik dan lebih baik.

Bandar Lampung, Desember 2021
Penulis

Erika Sempana br Ginting

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHKAN	v
HALAMAN PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
HALAMAN PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	8
C. Tujuan Penelitian	8
D. Batasan Masalah.....	8
E. Manfaat Penelitian	9
II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Penelitian Terkait	10
B. Serat Nano (<i>Nanofibers</i>)	16
C. Tetraethyl Orthosilicate (TEOS).....	19
D. <i>Electrospinning</i>	23

E. <i>Polyvinyl Alcohol (PVA)</i>	28
F. Metode Sol-Gel	30
G. <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	33
H. <i>Fourier Transform - Infrared Spectrometer (FT-IR)</i>	39
I. Aplikasi Serat Nano Silika	42
III. METODE PENELITIAN	
A. Waktu dan Tempat Penelitian	49
B. Alat dan Bahan Penelitian	49
C. Prosedur Penelitian.....	49
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Hasil Preparasi Larutan <i>Electrospinning</i>	52
B. Kekentalan dan Tegangan Permukaan Larutan Silika/PVA	64
C. Ikatan Gugus Fungsi Larutan Silika/PVA.....	65
D. Serat Nano Silika Hasil <i>Electrospinning</i>	69
E. Morfologi Permukaan dan Ukuran Serat Nano Silika/PVA	71
F. Komposisi Unsur Serat Nano Silika	78
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Kesimpulan.....	80
B. Saran	81
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Serbuk silika berwarna putih.....20
Gambar 2.2	Ilustrasi skema dua dimensi struktur molekul silika, (a) silika kristal; (b) silika non-kristal22
Gambar 2.3	Skema alat <i>electrospinning</i>24
Gambar 2.4	Formasi kerucut Taylor pada ujung kapilar yang diberikan medan listrik. Tanda panah menunjukkan tegangan permukaan. dimana (a) Larutan ditahan oleh tegangan permukaan yang tinggi; (b) Peningkatan muatan elektrostatik membantu mengatasi tegangan permukaan; (c) Pada tegangan kritis larutan mengatasi tegangan permukaan dan muatan listrik sehingga menyebabkan larutan memanjang dan mempercepat menuju kolektor yang ditanahkan.26
Gambar 2.5	(a) Struktur molekul PVA; (b;c) representasi kimiawi PVA28
Gambar 2.6	Proses sol-gel.33
Gambar 2.7	Skema sistem optik instrumen SEM.35
Gambar 2.8	Emisi berbagai elektron dan gelombang elektromagnetik dari spesimen.....36
Gambar 2.9	Morfologi permukaan hasil <i>electrospinning</i> (a dan b) serat nano PVA dan (c dan d) TEOS/PVP.....37
Gambar 2.10	Spektrum EDS serat TEOS/PVA hasil <i>electrospinning</i>38
Gambar 2.11	Spektrum FTIR (a) serat PVA, silika, dan komposit PVA-silika; (b) versi yang diperbesar40

Gambar 2.12	Serat nano silika (a) saat diuji dan (b) setelah di uji dengan nyala api suhu 1000 - 1200 °C (busen burner).....	44
Gambar 2.13	Skema simulasi penyaringan pemisahan minyak dan air dengan serat nano silika	46
Gambar 3.1	Proses sintesis larutan <i>electrospinning</i> : (a) penimbangan dan pelarutan PVA 10%; (c) mempersiapkan larutan silika (*TEOS + etanol = larutan TEOS, **aquabides + HCl = larutan HCl); (d) sintesis larutan silika/PVA	50
Gambar 3.2	Piknometer.	51
Gambar 3.3	Bagian-bagian viskometer Ostwald.	51
Gambar 3.4	Skema tensiometer	53
Gambar 3.5	Skema proses <i>electrospinning</i>	55
Gambar 3.6	Tampilan awal ImageJ	57
Gambar 3.7	Tampilan pengatur skala.	57
Gambar 3.8	Diameter serat yang telah diukur.	58
Gambar 3.9	Tampilan tabel result.....	58
Gambar 3.10	Grafik distribusi ukuran diameter serat.....	59
Gambar 3.11	Diagram alir.	52
Gambar 4.1	Proses pembuatan larutan silika. (a) TEOS, (b) setelah penambahan etanol, (c) setelah penambahan larutan HCl, dan (d) larutan silika.....	62
Gambar 4.2	Proses pembuatan larutan polimer. (a) PVA, (b) aquabides, dan (c) larutan PVA.	63
Gambar 4.3	Sintesis larutan silika/PVA. (a) larutan silika dan larutan PVA, dan (b) larutan silika/PVA.	63
Gambar 4.4	FTIR silika/PVA, dan PVA.....	66
Gambar 4.5	Interaksi antara TEOS dan PVA	69
Gambar 4.6	Hasil <i>electrospinning</i> pada kaca preparat (a) TP12, (b) TP14, (c) TP16, (d) TP18, dan (e) TP20.....	71
Gambar 4.7	Morfologi permukaan serat nano silika, sampel (a) TP12, (b) TP14, (c) TP16, (d) TP18, (e) TP20.....	72

Gambar 4.8	Distribusi ukuran diameter serat nano pada sampel: (a) TP12, (b) TP14, (c) TP16, (d) TP18, dan (e) TP20.	74
Gambar 4.9	Grafik pengaruh tegangan terhadap ukuran diameter rata-rata serat nano silika.	76
Gambar 4.10	Komposisi unsur serat nano silika TP18.	79

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Sifat fisis dan kimia silika.	20
Tabel 2.2 Sifat fisis dan kimia PVA.	29
Tabel 2.3 Puncak spektrum gugus fungsi serat nano silika.	41
Tabel 3.1 Perbandingan larutan dan variasi tegangan <i>electrospinning</i>	49
Tabel 3.2 Bilangan gelombang absorpsi pada beberapa ikatan gugus fungsi	56
Tabel 4.1 Data pengukuran kekentalan larutan silika/PVA.	64
Tabel 4.2 Bilangan gelombang serapan larutan silika/PVA dan PVA murni.	66

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Nanoteknologi merupakan ilmu manipulasi pada skala nanometer dengan tujuan menemukan dan menghasilkan sifat serta produk baru (Cheng *et al.*, 2016). Terbentuknya nanoteknologi tidak terlepas dari ketersediaan nanomaterial penyusun yang sangat beragam. Minat yang kuat dalam menggunakan material nano berasal dari gagasan bahwa material nano dapat digunakan untuk memanipulasi struktur bahan dan memberikan peningkatan dramatis dalam sifat kimia, mekanik, serta optik (Subramani & Ahmed, 2018). Sumber material nano yang terbatas mendorong para peneliti menemukan solusi praktis dalam menciptakan dan memodifikasi material agar dalam keterbatasan jumlahnya di alam, material tetap dapat dipergunakan dengan maksimal.

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) (Mourhly, *et al.*, 2015; Sarikaya *et al.*, 2016) dengan berbagai pendekatan (Hutchings, 1960; Drexler, 1981), kemudian berkembang lagi menjadi serat nano silika (Pirzada *et al.*, 2012; Aghasiloo *et al.*, 2019) yang didapatkan dengan menciptakan teknik seperti teknik *electrospinning* (Doshi & Reneker, 1995). Kesenambungan inilah

yang mengakibatkan nanoteknologi berkembang diberbagai multidisiplin.

Richard Feynman pada 1959 mengemukakan pidatonya yang visioner mengenai manipulasi dan pengendalian hal-hal dalam skala kecil (Hutchings, 1960). Kemudian pada 1974, untuk pertama kalinya Norio Taniguchi mulai memunculkan konsep pemahaman tentang nanoteknologi secara resmi dalam makalahnya. Konsep Richard Feynman dan Norio Taniguchi menjurus kepada manipulasi material menggunakan pendekatan *top-down*, yaitu pembentukan material nano dengan cara memecahkan material ukuran besar menjadi material berukuran kecil (Hutchings, 1960; Ashby *et al.*, 2009). Pada tahun 1981 K.E. Drexler melengkapi cara yang dapat dilakukan untuk menyintesis material dalam skala nano dengan pendekatan *bottom-up* yang merupakan kebalikan dari pendekatan *top-down* (Drexler, 1981).

Material dalam skala nano memberikan keuntungan dalam hal efisiensi pemakaian jumlah material yang cenderung diminimalisir, yang berarti nanomaterial akan menjadi sangat ramah terhadap lingkungan akibat berkurangnya pengerukan material alam secara berlebihan. Hal ini dikarenakan karakteristik fisik dan kimia nanomaterial lebih spesifik dibandingkan material berukuran lebih besar, terutama pada penurunan ukuran partikel dan luas permukaan material yang menyebabkan peningkatan jumlah molekul atau atom permukaan yang berpotensi mengubah reaktivitas permukaan (Jong *et al.*, 2010). Ketertarikan para ilmuwan dalam mempelajari nanomaterial melahirkan klasifikasi material berdasarkan dimensi, mulai dari nol dimensi (0D) hingga tiga dimensi (3D). Material 1D merupakan salah satu yang banyak dikembangkan karena menghasilkan material struktur nano pada kisaran diameter 100 nm. Material 1D diantaranya adalah kabel nano

(*nanowires*), batang nano (*nanorods*), tabung nano (*nanotube*), sabuk nano (*nanobelts*), lembar nano (*nanosheets*), dan serat nano (*nanofiber*) (Li & Wang, 2013).

Serat nano adalah material nano yang dilihat dari dimensi diameternya dan dianggap sebagai material berstruktur nano jika diisi dengan partikel nano untuk membentuk serat nano komposit (Ramakrishna *et al.*, 2005). Serat nano merupakan material 1D yang mengambil peran dalam berbagai bidang penerapan seperti fabrikasi bahan pakaian pada industri tekstil, sistem pengiriman obat dan perancah untuk rekayasa jaringan di bidang kesehatan, kabel, transistor serta dioda untuk teknologi informasi, sistem transportasi energi, konversi serta penyimpanan seperti baterai dan sel bahan bakar, komposit struktural ruang angkasa (Ko & Wan, 2014). Kombinasi luas permukaan spesifik yang tinggi, fleksibilitas, kekuatan serta peluang potensial yang dijanjikan oleh serat nano menjadi pertimbangan dalam pengembangan teknologi manufaktur serat nano. Beberapa serat nano yang sudah pernah dibuat diantaranya serat nano emas (Serbezeanu *et al.*, 2015; Parsaee, 2018), karbon (Lou *et al.*, 2013), nikel (Aravindan *et al.*, 2013), titania (He *et al.*, 2013), selulosa (Lavoratti *et al.*, 2016; Carvalho, *et al.*, 2018), silika (Pirzada *et al.*, 2012; Aghasiloo *et al.*, 2019), dan masih banyak lagi.

Pengembangan serat nano silika cukup banyak mendapat perhatian karena merupakan salah satu material yang banyak digunakan dalam bidang industri. Silika merupakan produk yang penting dalam mineral industri dengan banyak aplikasi diantaranya sebagai bahan abrasif dan poles, pembuatan kaca, sebagai pengisi (*fillers*), pemanjang (*extenders*), katalis, pelapisan, pembersihan keramik,

optik, elektronik (Bulatovic, 2015), produksi material maju dan untuk pengolahan air limbah (Sarikaya *et al.*, 2016). Serat nano silika kemudian disintesis dan berkembang sangat pesat untuk menambah deretan manfaat silika dengan keunikan tersendiri, seperti memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, ukuran pori yang cenderung kecil, porositas yang tinggi, ketahanan termal, dan kimiawi yang tinggi (Geltmeyer *et al.*, 2015).

Meningkatnya kebutuhan akan serat nano melahirkan beragam variasi metode dan teknik dalam memproduksi serat nano yang dikembangkan para ahli, diantaranya pemintalan konjugasi (*conjugate spinning*), penarikan (*drawing*), pemisahan fasa (*phase separate*), sintesis template/cetakan (*template synthesis*), sistem perakitan mandiri (*self-assembly*), *melt-blowing* dan *electrospinning* (Ko & Wan, 2014). *Electrospinning* adalah representasi dari metode yang sangat mudah dan sesuai untuk fabrikasi serat nano yang kontinyu dan dapat diproduksi dalam jumlah besar (Barhoum *et al.*, 2019). Serat nano yang diproduksi dengan menggunakan metode *electrospinning* memiliki morfologi yang dapat dikendalikan serta diameter yang dapat dikontrol mulai dari nanometer hingga mikrometer (Cui *et al.*, 2019). *Electrospinning* memanfaatkan penggunaan muatan listrik untuk memecah cairan menjadi serat-serat kecil yang dikumpulkan di kolektor dengan memperhatikan kekentalan dan konduktivitas cairan atau larutan (Doshi & Reneker, 1995).

Proses terbentuknya serat nano silika melibatkan pendekatan *top down* dan *bottom up* dalam proses pembuatan material berdimensi nano. Pendekatan *top down* terjadi saat *electrospinning* melibatkan proses sol-gel dalam pelarutan polimer dan pencampuran bahan untuk sintesis larutan *electrospinning* (Ashby *et al.*, 2009).

Selanjutnya, pendekatan *bottom up* berlangsung saat larutan hasil sol-gel diproses dengan teknik *electrospinning* dan dihasilkan serat nano (Drexler, 1981). Sintesis larutan *electrospinning* untuk serat nano silika dengan menggunakan metode sol-gel banyak digunakan pada penelitian sebelumnya seperti Choi *et al.* (2003), Geltmeyer *et al.* (2013), Geltmeyer *et al.* (2015), Pirzada *et al.* (2012), Ugur *et al.* (2018), dan Shahhosseininia *et al.* (2018). Metode sol-gel dipercaya dapat memproduksi partikel dengan kemurnian tinggi, dan memungkinkan untuk mengontrol ukuran, bentuk (Pierre, 1988), sifat kimiawi, tekstur, dan struktur morfologi material. Selain itu, metode sol-gel sangat menguntungkan, karena dapat dilakukan dalam suhu rendah (Pal & Gomes, 2020).

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* (Pirzada *et al.*, 2012; Ugur *et al.*, 2018; Shahhosseininia *et al.*, 2018). Tanpa penambahan polimer umumnya lebih sulit dipintal dan diameternya yang cenderung lebih kecil (Choi *et al.*, 2003; Geltmeyer *et al.*, 2013; Geltmeyer *et al.*, 2015). Dalam pembuatan serat nano silika biasanya melibatkan polimer dan prekursor silika. Pirzada *et al.* (2012) dalam penelitiannya menggunakan *polyvinyl alcohol* (PVA) sebagai polimer, *tetraethyl orthosilicate* (TEOS) sebagai prekursor silika, etanol, aquabides, dan *hydrochloric acid* (HCl) yang diproses dengan metode sol-gel. Hasil *electrospinning* kemudian dikarakterisasi dengan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) yang menampilkan hilangnya puncak –OH yang biasanya ditunjukkan oleh PVA, sedangkan pembentukan ikatan antara PVA dan

silika ditunjukkan oleh pucak Si-O-C dalam spektrum semua hibrida. Selain itu juga dilakukan karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang menampilkan bahwa serat berhasil terbentuk dan mencapai ukuran diameter terkecil sebesar 150 nm.

Pemaparan latar belakang di atas menjadi dasar penelitian ini dilakukan, yaitu pembuatan serat nano silika yang larutannya disintesis dengan metode sol-gel dan dipintal dengan metode *electrospinning*. Bahan yang akan diproses dengan metode sol-gel adalah TEOS, etanol, aquades, HCl, dan PVA.

TEOS merupakan salah satu prekursor silika yang paling banyak digunakan karena mudah bereaksi dengan air atau disebut reaksi hidrolisis. Reaksi hidrolisis terjadi karena ion hidroksil menjadi terikat pada atom logam (Brinker & Scherer, 1990). Laju hidrolisis senyawa alkoksida dapat dikontrol dengan mudah dibandingkan dengan turunan terhidrolisis cepat lainnya, seperti SiCl_4 dan $\text{Si}(\text{OCOCH}_3)_4$ (Tiwari *et al.*, 2014). Penggunaan etanol sebagai pelarut TEOS akan membantu peningkatan waktu gelasi agar larutan dapat diproses dengan *electrospinning* (Boonstra & Bernards, 1988). Pada penelitian Venkatathri (2007) ditemukan bahwa pencampuran TEOS hanya dengan air akan menghasilkan larutan yang heterogen, sehingga dibutuhkan penambahan etanol agar larutan homogen. Pada penelitian Geltmeyer *et al.* (2013), 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. Penggunaan HCl juga mempengaruhi pH larutan yang berguna untuk menghasilkan larutan ionik. Larutan dengan pH kurang dari 2 merupakan larutan

bermuatan positif (Levy & Zayat, 2015) yang sangat cocok digunakan dalam metode *electrospinning*, karena larutan yang dapat diproses dengan *electrospinning* adalah larutan ionik yang bermuatan positif. 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 (Pirzada *et. al.*, 2012). Pemilihan PVA juga didasarkan pada kelarutan PVA pada air yang sangat baik, termal yang stabil, dapat berperan sebagai penghambat korosi dan transmisi optik (Kausar, 2020).

Bahan-bahan pada penelitian ini akan disintesis sesuai dengan penelitian yang dilakukan Pirzada *et al.* (2012) dengan beberapa modifikasi. Perbandingan molar yang digunakan adalah 1 : 10 : 3 : 0,04 untuk masing-masing bahan TEOS : etanol : aquabides : HCl. Selanjutnya PVA 10% dilarutkan di dalam aquabides sebagai larutan pengikat. Kedua larutan, yaitu larutan silika dan PVA akan dicampurkan dengan perbandingan 2 : 3 ml (silika : PVA) dan diproses dengan *electrospinning* selama 1 jam dengan laju alir 1,5 ml/jam serta variasi tegangan 12, 14, 16, 18, 20 kV untuk melihat pengaruh tegangan terhadap pembentukan serat nano silika. Sampel akan dikarakterisasi dengan FTIR untuk melihat gugus fungsi larutan silika/PVA, SEM untuk mengetahui morfologi permukaan serta ukuran diameter serat nano silika, dan *Energy-dispersive X-ray spectroscopy* (EDS) untuk mengetahui unsur pembentuk sampel.

B. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana ikatan gugus fungsi larutan silika/PVA yang akan diproses dengan *electrospinning*?
2. Bagaimana pengaruh tegangan *electrospinning* terhadap morfologi permukaan, serta diameter rata-rata dan distribusi ukuran diameter serat nano silika yang terbentuk?
3. Bagaimana unsur kimia serat nano silika yang terbentuk setelah dilakukan proses *electrospinning*?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengetahui ikatan gugus fungsi larutan silika/PVA yang akan diproses dengan *electrospinning*.
2. Mengetahui pengaruh tegangan *electrospinning* terhadap morfologi permukaan, serta diameter rata-rata dan distribusi ukuran diameter serat nano silika yang terbentuk.
3. Mengetahui unsur kimia serat nano silika yang terbentuk setelah dilakukan proses *electrospinning*.

D. Batasan Masalah

Penelitian ini akan dilaksanakan dengan batasan pengkajian dan pengamatan sebagai berikut:

1. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah TEOS, PVA, etanol, aqubides, dan HCl.
2. Metode yang digunakan untuk memintal serat nano silika adalah metode *electrospinning* dengan jarak *tip-to-colector* sebesar 13 cm, *flow rate* sebesar 1,5 ml/jam, waktu pemintalan selama 1 jam, alat suntik ukuran 10 ml dengan diameter jarum 0,5 mm, serta kolektor berupa aluminium yang permukaannya dilapisi kaca preparat.
3. Variasi tegangan *electrospinning* yang digunakan yaitu 12, 14, 16, 18, dan 20 kV.
4. Metode sol-gel digunakan untuk mensintesis larutan silika/PVA.
5. Uji yang digunakan adalah *Spektrofotometer* FTIR, SEM, dan EDS.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai informasi ilmiah terkait pengaruh tegangan *electrospinning* terhadap serat nano silika yang pembuatan larutannya melibatkan metode sol-gel. Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai acuan dalam pengembangan serat nano silika pada penelitian selanjutnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terkait

Serat nano (*nanofiber*) merupakan salah satu material maju yang banyak menarik perhatian peneliti agar dapat dikembangkan secara luas untuk keperluan teknik seperti biomedis. Pemintalan serat nano silika dengan menggunakan metode *electrospinning* telah dilakukan oleh beberapa peneliti dengan menggunakan variasi bahan yang berbeda-beda. Choi *et al.* (2003), Geltmeyer *et al.* (2013), dan Geltmeyer *et al.* (2015) telah membuat serat nano silika tanpa menggunakan polimer, sedangkan Pirzada *et al.* (2012), Ugur *et al.* (2018), dan Shahhosseininia *et al.* (2018) membuat serat nano silika dengan penambahan polimer untuk menghasilkan jaringan ikat pada larutan *electrospinning*.

Choi *et al.* (2003), Geltmeyer *et al.* (2013), dan Geltmeyer *et al.* (2015), pada penelitiannya membuat serat nano silika dengan metode sol-gel dan dipintal dengan proses *electrospinning* menggunakan perbandingan molar 1 : 2 : 2 : 0,01 (TEOS : etanol : air : HCl). Pada penelitian tersebut, TEOS dicampur dengan etanol di dalam gelas *beaker* sambil ditetesi larutan HCL/air sambil dipanaskan pada suhu 80 °C selama 30 menit dan didinginkan pada suhu ruang dan didapatkan sol silika. Sol silika ditempatkan ke dalam alat suntik yang ujung jarumnya dihubungkan dengan elektroda tegangan tinggi untuk diproses dengan *electrospinning*.

Pada penelitian Choi *et al.* (2003), kolektor yang digunakan dalam percobaan ini berbentuk tabung yang dilapisi aluminium *foil* dengan diameter 22 cm dan diputar pada kecepatan 10 rpm. Jarak antara ujung kapiler ke kolektor (*tip-to-collector distance* atau TCD) adalah 10 cm dan tegangan yang diberikan berkisar antara 10 kV - 16 kV. Pada penelitian ini berhasil diperoleh serat nano silika di bawah kondisi asam atau pada pH rendah karena melibatkan HCl. Mempertahankan kondisi asam pada larutan bertujuan mematangkan larutan untuk mendapatkan prekursor dengan struktur linier, serta bertujuan untuk meningkatkan viskositas sol. Serat nano silika pada umumnya mengandung molekul pengikat (molekul gelator), sehingga harus dikalsinasi untuk mendapatkan serat anorganik murni. Serat yang dihasilkan pada penelitian ini tidak memerlukan proses kalsinasi.

Dengan variasi tegangan 10kV - 16 kV, tampak bahwa serat yang dipintal dengan tegangan 10 kV cenderung lebih tebal dibandingkan dengan serat yang dipintal pada tegangan 12 kV. Diameter serat yang diperoleh pun cenderung semakin kecil seiring bertambahnya besar tegangan yang diberikan. Silika yang didapatkan pada tegangan 12 kV - 16 kV kebanyakan berukuran 200-600 nm. Pada analisis FTIR juga ditunjukkan bahwa sebagian besar TEOS terhidrolisis dan gugus etoksi diubah menjadi gugus silanol (Si-OH). Sejumlah besar gugus silanol tampak membentuk serat nano silika. Struktur kristal yang dihasilkan menunjukkan karakteristik silika amorf. Pada termograf TGA ditampilkan bahwa berat serat berkurang secara substansial pada daerah suhu rendah dan terus menurun. Penurunan berat pada suhu 200 °C mencapai 6,7%, dan pada suhu 800 °C sekitar 12%. Hal ini dapat dijelaskan dengan terjadinya reaksi kondensasi akibat adanya fraksi yang signifikan dari gugus silanol pada serat silika dan molekul air yang

dihasilkan dari reaksi kondensasi, yang kemudian diuapkan dan beratnya menjadi berkurang seiring bertambahnya suhu.

Geltmeyer *et al.* (2013) melakukan penelitian dengan perbandingan molar bahan yang sama dengan penelitian yang dilakukan Choi *et al.* (2003) yaitu 1 : 2 : 2 : 0,01 (TEOS : etanol : air : HCl). Namun pada penelitiannya, Geltmeyer *et al.* melakukan sintesis sol pada suhu 80 °C hingga larutan yang tersisa sekitar 3/8 dari larutan awal dengan viskositas tertentu. Pada penelitian ini diamati pengaruh kekentalan atau viskositas larutan pada pembentukan serat nano silika. Alat suntik yang digunakan berukuran 20 ml dengan diameter 1,024 mm. Tegangan yang digunakan pada proses *electrospinning* adalah 22,5 kV dan kolektor yang dipakai adalah aluminium *foil* yang ditanahkan. Proses *electrospinning* berlangsung pada suhu ruang (21 ± 1 °C) dan kelembapan ruangan ($33 \pm 10\%$ RH). Jarak TCD adalah 15 cm dengan laju alir 1 ml/jam. Sampel dengan viskositas dibawah 100 mPa.s dapat dipintal pada laju alir 2 ml/jam.

Kesimpulan dari penelitian Geltmeyer *et al.* (2013) dinyatakan bahwa *electrospinning* sol TEOS dengan viskositas yang bervariasi menunjukkan kestabilan pada viskositas 120 - 200 mPa.s dengan rata-rata serat yang dihasilkan sangat baik. Sol silika yang baik untuk *electrospinning* adalah sol yang baru disiapkan (*fresh sol*) karena sol sangat stabil saat diproses dengan *electrospinning*. Pada viskositas lebih kecil dari 100 mPa.s didapatkan serat nano dengan banyak manik akibat sol yang menetes saat proses *electrospinning* berlangsung. *Electrospinning* paling stabil terjadi pada viskositas 120-200 mPa.s. Diameter

meningkat dari (260 ± 70) nm pada viskositas 136 mPa.s menjadi (670 ± 200) nm pada viskositas 398 mPa.s.

Geltmeyer *et al.* (2015) mengamati pengaruh variasi sistem sintesis larutan silika dengan perbandingan molar bahan 1 : 2 : 2 : 0,01 (TEOS : etanol : air : HCl). Sistem sintesis yang digunakan adalah sistem terbuka (*open system*) dan sistem tertutup (*closed system*). Larutan yang disiapkan dengan sistem terbuka dijelaskan mengalami pengurangan volume akibat penguapan pelarut yang ditandai dengan berkurangnya jumlah etanol. Sistem tertutup terdiri dari dua sistem, yaitu pengaturan Liebig dan Allihn. Pada sistem Liebig dan Allihn, pelarut yang menguap dikumpulkan kembali ke dalam sistem. Sol kental didapatkan dengan menguapkan sejumlah etanol. Namun pada sistem Liebig dan Allihn menghasilkan larutan dengan jumlah etanol yang tetap sebagai akibat dari sistem yang terisolasi. Sehingga dalam sintesis larutan *electrospinning*, etanol perlu diuapkan dengan pompa rotari penguap.

Sintesis serat nano silika dengan penambahan polimer dilakukan oleh Pirzada *et al.* (2012) menggunakan perbandingan molar bahan 1 : 8 : 3 : 0,04 (TEOS : etanol : air : HCl). Larutan silika dibuat dengan mencampurkan TEOS, etanol, air, dan HCl sesuai dengan perbandingan yang sudah ditentukan sambil diaduk pada suhu 60°C selama 1 jam. Larutan polimer dibuat dengan melarutkan PVA 7% pada air sambil diaduk pada suhu 60°C selama 1 jam. Setelah itu, larutan silika dimasukkan ke dalam PVA sambil diaduk pada suhu 60°C selama 1 jam. Sol silika/PVA kemudian dimasukkan ke dalam alat suntik berukuran 10 ml. Jarak TCD yang digunakan adalah 10 cm dan dipintal pada tegangan 20 kV dengan laju alir 0,5 ml/jam.

Hasil dari penelitian Pirzada *et al.* (2012) adalah terbentuknya serat nano silika dengan memvariasikan konsentrasi dan waktu penuaan (*aging*) dari campuran prekursor silika yang mengandung TEOS dengan metode *electrospinning*. Variasi rasio TEOS : PVA berdasarkan massa, menghasilkan serat nano hibrida tanpa manik-manik pada larutan *electrospinning* yang mengandung sedikitnya 1,4% berat PVA dibandingkan PVA 6% tanpa TEOS. Rasio silika : PVA mempengaruhi *electrospinnabilitas*, morfologi serat, dan diameter serat karena peningkatan viskositas dan konduktivitas larutan. Selain itu, peningkatan waktu penuaan larutan TEOS sebelum menambahkan PVA, menghasilkan viskositas larutan yang lebih tinggi dan meningkatkan diameter serat. Dengan menggunakan prekursor silika dan memodulasi rasio TEOS : PVA, menjadikan serat nano silika hibrida silika/PVA dapat dipintal dan tidak larut dalam air. Serat nano yang dihasilkan dengan stabilitas yang ditingkatkan dalam media air dapat diaplikasi pada bidang filtrasi, pemisahan, dan rekayasa jaringan.

Ugur *et al.* (2018) membuat serat nano silika dengan melarutkan PVA 7% di dalam air sambil diaduk pada suhu ruang selama 30 menit, kemudian suhu pengadukan dinaikkan menjadi 60 °C hingga 3 jam. Selanjutnya, prekursor silika dibuat dengan *methyltrimethoxysilane* (MTMS), *phenyltrimethoxysilane* (PTMS), *tridecafluoro-1,1,2,2-tetrahydro-octyltriethoxysilane* (FAS), *dimethyldimethoxysilane* (DMDMS), PVA, isopropil alkohol dan air deionisasi. Prekursor silika disiapkan dengan MTMS (11,76 g), DMDMS (5,04 g), PTMS (0,72 g), dan FAS (1,2 g), yang dicampur dan diaduk selama 1 jam pada suhu ruang. Campuran MTMS/DMDMS/PTMS/FAS dilarutkan dalam isopropil alkohol (35 ml) dan air deionisasi (65 ml). Perbandingan molar bahan yang digunakan adalah 37 : 160 :

1000 (alkoksilen : isopropanol : air). Prekursor silika dari 0,5 sampai 40% ditambahkan ke dalam larutan PVA dengan mengaduknya pada suhu 60 °C selama 2 jam agar larutan PVA/MTMS/DMDMS/PTMS/FAS menjadi homogen. Setelah menambahkan asam asetat sebagai katalis pada larutan, yang sebelumnya sudah disiapkan, maka larutan tersebut diproses pada *electrospinning*. Proses *electrospinning* dilakukan pada tegangan 33 kV, laju alir 1 ml/jam, dengan jarak TCD 16 cm, dan larutan dimasukkan ke dalam alat suntik 10 ml.

Serat nano silika yang dihasilkan pada penelitian Ugur *et al.* (2018) memiliki diameter rata-rata kurang dari 100 nm dan rata-rata diameter berpori berkisar antara 100-700 nm. Ketika serat direndam semalam dalam air, struktur serat tidak berubah dan serat tetap utuh. Pada sol prekursor 5% berat, serat nano silika memiliki sudut kontak air 130°. Sudut kontak air yang dimaksud yaitu sifat hidrofobik serat yang diukur berdasarkan sudut kontak antara permukaan kaca dengan air melalui uji tetesan. Serat nano hibrida silika/PVA hidrofobik sangat tahan panas dengan stabilitas yang ditingkatkan dalam media air dapat diaplikasi pada berbagai bidang seperti filtrasi, pemisahan, permeabilitas gas, dan rekayasa jaringan.

Shahhosseinia *et al.* (2018), membuat serat nano silika dengan menggunakan PVP sebagai polimer dan TEOS sebagai prekursor silika. Larutan terbagi menjadi 2 yaitu larutan *doping* dan larutan prekursor. Larutan *doping* dibuat dengan penambahan 0,1 g (PVP) ke dalam tiap 1 ml larutan etanol + butanol, dalam penelitian ini digunakan 4 g PVP. Selanjutnya, larutan prekursor dibuat dengan pencampuran butanol (14 ml) dan TEOS (24 ml) yang diaduk pada suhu 80 °C selama 30 menit. Setelah kedua larutan didapatkan, dilakukan sintesis dengan

pencampuran larutan *doping* dan larutan prekursor yang diaduk pada suhu 120 °C selama 90 menit. Larutan kemudian didiamkan selama 24 jam dalam kondisi ambien (suhu 25 °C dan kelembapan 47%) untuk merealisasikan rantai polimer. Viskositas dan konduktivitas larutan dievaluasi untuk mendapatkan karakteristik reologi yang baik untuk proses *electrospinning*. Untuk proses *electrospinning*, larutan dimasukkan ke dalam alat suntik 50 ml yang memiliki jarum suntik berukuran 18 gauge yang dihubungkan pada jarak 19 cm dari elektroda pendukung (*counter*). Kolektor berupa tabung berputar dengan diameter 8 cm dihubungkan ke elektroda counter sebagai kolektor. Generator DC digunakan sebagai sumber tegangan 16 kV pada kondisi ambien. Serat kemudian dikeringkan selama 24 jam pada suhu kamar untuk menghilangkan sisa pelarut.

Serat nano silika yang dihasilkan menunjukkan bahwa ukuran serat silika/PVA meningkat dibandingkan dengan serat PVP murni karena adanya ikatan Si-O-Si. Morfologi paling tepat dari serat silika adalah dikalsinasi pada suhu 700 °C, yang pada analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan karakteristik silika amorf meski sudah dikalsinasi selama 5 jam. Berdasarkan hasil turunan, *bio-inert* serat nano silika dapat digunakan dalam perancah rekayasa jaringan, dengan mempertimbangkan proliferasi dan pelekatan sel. Tidak ada sitoksisitas (tingkat merusaknya suatu zat jika dipaparkan terhadap organisme) yang diamati dan dapat dideteksi perlekatan seluler yang kuat.

B. Serat Nano (*Nanofibers*)

Keberadaan teknologi berukuran nano tidak terlepas dari adanya material berukuran nano. Nanomaterial merupakan salah satu material maju yang terbentuk

dari hasil pengembangan material oleh para ahli. Material itu sendiri adalah suatu bahan baku yang dibentuk menjadi suatu benda atau produk. Material berkembang dengan sangat pesat diikuti oleh teknologi untuk memenuhi kebutuhan manusia dalam hal penyediaan bahan baku bahkan teknologi yang membantu mempermudah pekerjaan manusia seperti mobil, televisi, *handphone*, dan lain sebagainya. Pengembangan material dalam perspektif fungsional dipegang oleh ilmuwan material dan insinyur material. Seorang ilmuwan material berperan mengembangkan dan mensintesis material baru, sedangkan insinyur material berperan untuk membuat produk atau sistem baru menggunakan material yang sudah ada, serta mengembangkan teknik untuk mengelola material hingga terbentuk material dengan sifat baru seperti nanomaterial (Callister & Rethwisch, 2009).

Nanomaterial memiliki sifat menarik dan aspek teknologi yang luar biasa. Material nano berbeda dari material konvensional yang dibedakan pada dasar kimia, namun material nano dibedakan berdasarkan ukurannya. Istilah nano berasal dari bahasa Yunani untuk *dwarf* yang berarti orang yang sangat pendek atau kurcaci (Goyal, 2018). Nano diartikan pada Cambridge Dictionary sebagai sesuatu yang sangat kecil atau satu miliar dari suatu unit yang disebutkan, misalnya nanometer. Istilah nano dalam *International System of Units (SI)* diformalkan menjadi pengali 10^{-9} untuk menjelaskan ukuran dalam unit ilmiah, sehingga ukuran 1 nm sama dengan 10^{-9} m (Anonim A, 2020). Nanomaterial itu sendiri berarti material yang berukuran sangat kecil, dimana secara konvensional dapat didefinisikan sebagai material yang memiliki karakteristik skala panjang kurang dari sekitar 100 nanometer, yang setidaknya berada dalam klasifikasi

material satu dimensi. Skala panjang ini dapat berupa diameter partikel, ukuran butiran, ketebalan lapisan, atau lebar garis konduksi pada keping (*chip*) elektronik (Edelstein & Cammarata, 1996). Beberapa karakteristik fisik dan kimia yang ditunjukkan oleh material memiliki kemungkinan mengalami perubahan drastis saat partikel mendekati dimensi atom (Callister & Rethwisch, 2009).

Goyal (2018) menyebutkan bahwa terdapat 4 jenis nanomaterial yang diklasifikasikan berdasarkan dimensinya, yaitu nanomaterial 0D, 1D, 2D, dan 3D. Nanomaterial 0D merupakan nanomaterial yang semua ukurannya berada dalam skala nano dan tidak ada yang berukuran lebih dari 100 nm dan pada umum berupa nanopartikel. Nanomaterial 1D merupakan material yang biasanya berada di luar skala nano yang mencakup tabung nano, serat nano, dan kawat nano. Nanomaterial 2D juga berada di luar skala nano dan cenderung memamerkan bentuk plat dan cakupan *graphene*, film nano, lapisan nano, dan lain sebagainya. Nanomaterial 3D merupakan material dengan cakupan yang tidak terbatas pada skala nano dalam diameter apapun, seperti serbuk limbah (*bulk*), dispersi nanopartikel, gulungan (buntalan) kawat nano, tabung nano, dan multi lapisan nano.

Serat nano atau *nanofiber* secara geometri masuk ke dalam kategori material satu dimensi (1D). Serat nano didefinisikan sebagai struktur silinder dengan diameter luar di bawah 1000 nm serta rasio antara panjang dan lebar lebih besar dari 50 nm (Chapman, 2010). Pengurangan diameter serat hingga skala nano memungkinkan peningkatan luas permukaan spesifik yang sangat besar hingga tingkatan 1000 m²/g, sehingga pengurangan dimensi dan peningkatan luas permukaan sangat mempengaruhi reaktivitas kimiawi, biologis, dan elektroaktivitas serat polimer.

Luas permukaan serat nano yang tinggi memberikan kapasitas yang luar biasa untuk pelekatan atau pelepasan gugus fungsi, molekul yang diserap, ion, gugus katalitik dan berbagai jenis partikel skala nanometer (Ko & Wan, 2014).

Ketertarikan para peneliti pada serat nano melahirkan banyak teknik fabrikasi, diantaranya pemintal elektrik (*electrospinning*), sintesis dengan bantuan cetakan, pencairan (*melt-blowing*), pemintalan biokomponen (*biocomponent-spinning*), gaya putar (*force-spinning*) dan pemintalan cahaya (*flash spinning*), deposisi uap kimia (*chemical vapor deposition*) dan deposisi uap fisika (*physical vapor deposition*). Namun dalam pembuatan serat nano kontinyu pada umumnya digunakan teknik *electrospinning* (Barhoum *et al.*, 2019). *Electrospinning* memiliki teknik yang cenderung lebih cepat, sederhana, dan ekonomis untuk membuat berbagai bahan menjadi struktur berserat nano. Teknik *electrospinning* mampu menghasilkan serat yang sangat halus, serat mikro (>1 μm), atau serat nano (<1000 nm) (Faccini, *et al.*, 2014).

C. Tetraethyl Orthosilicate (TEOS)

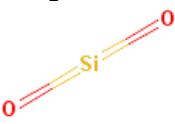
Silika merupakan unsur kimia yang tersusun dari silikon dan oksigen dengan rumus kimia SiO_2 atau silikon dioksida. Silikon sebagian besarnya ditemukan dalam mineral silikat kristal seperti pasir kuarsa (Seaton *et al.*, 1987). Semua bentuk silika seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 merupakan padatan (serbuk, gel kristal) transparan keabu-abuan dan tak berbau yang terdiri dari atom silika dan oksigen. Silika dapat bergabung dengan unsur logam dan oksida lainnya untuk membentuk silikat (Anonim C, 2021). Sifat fisis dan kimia nano silika ditampilkan pada Tabel 2.1.



Gambar 2.1 Serbuk silika berwarna putih (Anonim E, 2021).

Silika berdasarkan sumbernya dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu silika sintesis, silika mineral, dan silika nabati. Silika sintesis (komersial) banyak diproduksi oleh industri seperti, *tetramethyl orthosilicate* (TMOS) dan TEOS. Silika mineral biasanya didapatkan dari hasil ekstraksi mineral penyusun bebatuan atau material di alam seperti pasir kuarsa, abu terbang, batu apung (Mourhly *et al.*, 2015; Sarikaya *et al.*, 2016), dan batu lempung. Silika nabati yang bersumber dari tumbuhan biasanya bisa didapatkan dari bambu, tumbuhan *equisetum* (Cameiro *et al.*, 2015), bonggol jagung (Kaya *et al.*, 2018), sekam padi (Costa & Paranhos, 2018), ampas tebu (Falk *et al.*, 2019; Rovani *et al.*, 2018), dan lain sebagainya.

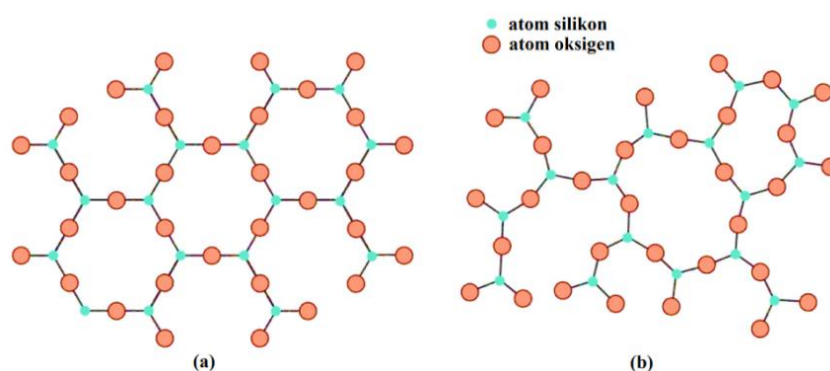
Tabel 2.1 Sifat fisis dan kimia silika (Anonim C, 2021).

No.	Keterangan	
1.	Nama IUPAC	<i>Silicon Dioxide</i>
2.	Nama lain	<i>Quartz; Silica; Silicic oxide; Silicon(IV) oxide, Crystalline silica; Pure Silica; Silicea</i>
3.	Rumus kimia	SiO ₂
4.	Struktur 2D	
5.	Deskripsi fisik	Transparan keabu-abuan, bubuk tak berbau; padatan transparan (amorf), putih/kuning keputihan (serbuk, pasir).
6.	Berat molekul	60,083 g/mol
7.	Massa jenis	2,660 g/cm ³
8.	Titik didih	2230°C
9.	Titik leleh	1716 - 1736°C
10.	Indeks bias	1,544; 1,553

Silika pada umumnya dapat diperoleh dengan beberapa variasi teknik preparasi. diantaranya teknik Stöber dan teknik sol-gel. Teknik Stöber digunakan untuk mensintesis nanopartikel silika murni dan nanopartikel pewarna organik hidrofobik. Teknik Stöber biasanya menggunakan prekursor TEOS dan TMOS yang dihidrolisis pada larutan etanol dan amonium hidroksida sehingga didapatkan asam silikat. Asam silikat selanjutnya melalui proses kondensasi dan membentuk partikel silika amorf. Melalui teknik Stöber didapatkan nanopartikel dengan diameter yang dapat dikontrol melalui parameter seperti suhu, dan konsentrasi, namun dibatasi oleh ketidakseragaman partikel yang diperoleh, penyaringan dan pemisahan lebih lanjut juga ternyata dibutuhkan untuk mengisolasi fraksi ukuran yang berbeda. Keterbatasan teknik Stöber konvensional juga secara inheren tidak kompatibel dengan protein (Escoto, 2012). Kekurangan tersebut kemudian diatasi dengan menggunakan teknik sol-gel untuk mendapatkan silika dengan suhu rendah dalam kondisi kimia ringan.

Pada teknik sol-gel, proses ekstraksi silika dimulai dengan penghancuran sampel berukuran besar dengan mortar untuk mendapatkan serbuk sampel yang akan diekstrak. Pada penelitian Mourhly *et al.* (2015), silika diekstrak dari batu apung, dengan menggerusnya untuk menghasilkan serbuk batu apung. Serbuk batu apung diberi perlakuan basa pada pH minimal 10 untuk diambil filtratnya (sol) dan dititrasi dengan asam hingga pH 7 (gel). Gel lalu dicuci untuk menghilangkan garam sulfat. Serbuk silika kemudian dihasilkan dari gel yang sebelumnya sudah dikeringkan. Pemurnian silika dapat dilakukan dengan larutan asam klorida dan di kalsinasi pada suhu 800 °C untuk mendapatkan serbuk silika amorf berwarna putih.

Para peneliti menemukan bahwa keberadaan silika mungkin ada dalam sejumlah bentuk kristal dan amorf (*amorphous*) seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.2. Silika dalam bentuk aslinya cenderung berada pada fasa kristal kuarsa (*quartz*). Silika diklasifikasikan pada tiga fasa kristal utama yaitu kuarsa, tridimit, dan kristobalit. Kristal kuarsa terbentuk pada suhu di bawah 870 °C. Suhu 870 °C hingga 1470 °C akan membentuk silika tridimit. Silika tridimit merupakan silika yang paling kuat namun merupakan silika yang paling tidak umum ditemui. Selanjutnya silika kristobalit yang terbentuk secara alami di batuan vulkanik dan sering ditemukan bersamaan dengan kuarsa. Silika kristobalit didapatkan pada suhu antara 1470 – 1700 °C. Pada suhu diatas 1700 °C biasanya akan terbentuk vitreous silika yang dikenal sebagai kaca paling tahan api pada penggunaan komersial (Iler, 1978).



Gambar 2.2 Ilustrasi skema dua dimensi struktur molekul silika, (a) silika kristal; (b) silika non-kristal (Callister & Rethwisch, 2014).

Selain memiliki bentuk kristal, silika juga memiliki bentuk non kristal yaitu silika amorf. Kristalinitas suatu material biasanya diamati secara spektroskopi dengan menggunakan difraksi sinar-x untuk menentukan ada atau tidaknya garis-garis defenitif dalam pola difraksi silika. Pada difraksi sinar-x, neutron, atau elektron memberikan informasi yang pasti tentang struktur padatan kristal. Namun

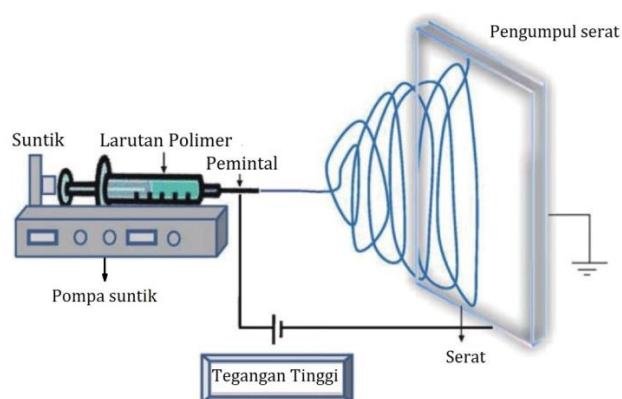
pengukuran tersebut memberikan informasi yang jauh lebih sedikit tentang struktur padatan amorf. Silika dinyatakan amorf karena tidak memiliki struktur kristal seperti yang ditentukan oleh pengukuran difraksi sinar-x. Struktur atom silika amorf menunjukkan susunan acak atau tidak beraturan sehingga dibaca sebagai material non kristal pada analisis difraksi sinar-x (Devine, 1988). Silika dengan fasa amorf terbentuk melalui proses pemanasan pada suhu 800 °C (Latif & Munasir, 2014).

D. Electrospinning

Electrospinning (electrostatic fiber spinning) adalah salah satu teknik elektrohidrodinamik potensial yang memanfaatkan medan listrik dalam memproduksi serat kontinu dengan diameter hingga skala nanometer (Mirjalili & Zohoori, 2016; Ding *et al.* 2019) dari larutan atau lelehan polimer (Brown, 2016) dalam berbagai jenis polimer alami maupun sintesis seperti paduan polimer, logam, dan keramik yang diterapkan untuk berbagai aplikasi, termasuk filtrasi air (Faccini *et al.*, 2015) dan udara (Sundarrajan *et al.* 2014), biomedis (Hikmawati *et al.*, 2018), sensor (Wang *et al.*, 2002), pakaian pelindung (Faccini *et al.*, 2012) dan sebagainya. Keberadaan *electrospinning* pertama kali dipatenkan pada 1902 oleh Jhon F. Cooley dengan klaim skema alat untuk mendispersi cairan secara elektrik yang tercatat pada *U.S. Patent* No. 692,631 dan William James Morton dengan klaim metode pendispersi cairan secara elektrik untuk pembuatan serat yang tercatat pada *U.S. Patent* No. 705,691. Kata *electrospinning* kemudian menjadi banyak diketahui setelah Doshi dan Reneker (1995) dalam penelitiannya

menyebutkan bahwa proses dispersi cairan secara elektrik dinyatakan sebagai proses *electrospinning*.

Electrospinning memiliki 3 komponen utama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 yaitu catu daya tegangan tinggi AC atau DC, jarum suntik logam atau plastik, dan kolektor. Larutan polimer yang dipersiapkan untuk menjadi *nanofiber*, ditempatkan di dalam tabung suntikan. Tetesan larutan polimer akan terpolarisasi saat tegangan tinggi mulai diterapkan, dan muatan yang diinduksi akan didistribusikan ke permukaan. Polimer yang bermuatan akan dipercepat menuju kolektor dipengaruhi oleh medan elektrostatis yang kuat. Pada proses *electrospinning*, elektrostatis berperan menambahkan atau mengganti gaya mekanis konvensional (misalnya hidrostatis, pneumatik) untuk memancarkan dan mengurangi ukuran serat, maka dari itu disebut pengaliran elektrohodinamika. Kolektor merupakan tempat pengumpulan serat nano yang terbentuk dan pada umumnya berupa konduktor listrik yang baik agar dapat menetralkan muatan yang dibawa oleh serat nano (Li & Wang, 2013).



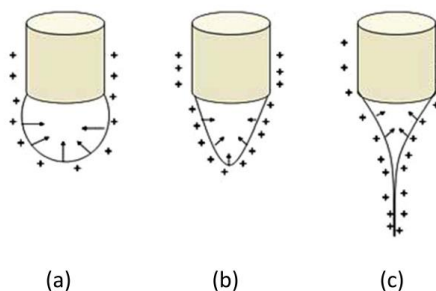
Gambar 2.3 Skema alat *electrospinning* (Avossa *et al.*, 2018).

Electrospinning yang dihubungkan dengan catu daya bertegangan tinggi berfungsi untuk meningkatkan potensial elektrostatis cair dan menghasilkan dorongan pada

jarum suntik yang berisikan larutan polimer. Sehingga terbentuk tetesan larutan pada ujung kapiler *spinnerete* sebagai akibat tegangan permukaan. Tetesan larutan polimer yang telah terinduksi muatan listrik dibawah pengaruh medan listrik akan meloncat atau terlontar ke arah elektroda dengan muatan yang berlawanan sambil disertai proses penguapan pelarut polimer. Tolakan elektrostatis di antara muatan permukaan yang memiliki tanda yang sama (muatan) mengubah bentuk tetesan menjadi kerucut Taylor pada ujung jarum suntik. Pancaran larutan polimer yang awalnya memanjang dalam garis lurus, kemudian mengalami gerakan mencambuk yang kuat karena ketidakstabilan tekanan. Saat hasil pancaran polimer direntangkan menjadi diameter yang lebih halus, maka akan terjadi pepadatan dengan cepat, sehingga yang tertinggal pada kolektor pengumpul serat hanya serat polimer saja (Xue *et al.*, 2019).

Pada proses *electrospinning* terdapat fenomena unik yang mempengaruhi berlangsungnya pembentukan serat, yaitu fenomena tegangan permukaan dan fenomena kerucut Taylor. Tegangan permukaan merupakan kecenderungan kontraktif dari permukaan cairan yang bersentuhan dengan udara, atau gas tertentu lainnya, yang memungkinkannya untuk menahan gaya eksternal (Camuffo, 2014). Hal tersebut menyebabkan cairan berperilaku seolah-olah permukaannya ditutupi oleh membran elastis yang diregangkan seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.4a. Jika molekul sebuah cairan tertarik lebih kuat terhadap jenisnya sendiri, maka tegangan permukaan akan mendominasi dan meningkatkan kelengkungan antarmuka (Speight, 2020). Penelitian Tungprapa *et al.* (2007) menyatakan bahwa larutan dengan tegangan permukaan mulai dari 28 dyn/cm sudah dapat digunakan untuk membuat serat nano menggunakan teknik *electrospinning*. Pada teknik

electrospinning, tegangan permukaan diatasi dengan menerapkan medan listrik sehingga larutan yang dipertahankan diujung kapilet seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.4a dapat membentuk kerucut Taylor seperti Gambar 2.4b.



Gambar 2.4 Formasi kerucut Taylor pada ujung kapilar yang diberikan medan listrik. Tanda panah menunjukkan tegangan permukaan, dimana (a) Larutan ditahan oleh tegangan permukaan yang tinggi; (b) Peningkatan muatan elektrostatis membantu mengatasi tegangan permukaan; (c) Pada tegangan kritis larutan mengatasi tegangan permukaan dan muatan listrik sehingga menyebabkan larutan memanjang dan mempercepat menuju kolektor yang ditanahkan (Beaumont & Zweben, 2018).

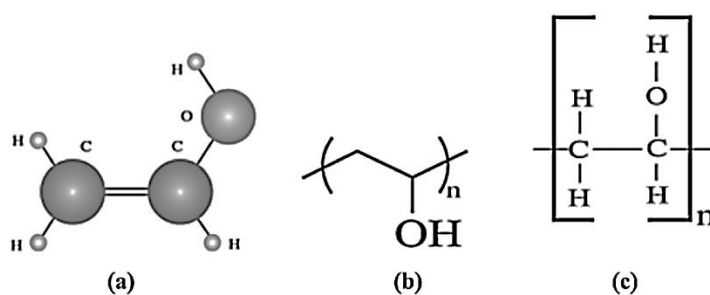
Fenomena kerucut Taylor merupakan kerucut yang terbentuk dalam cairan penghantar listrik saat terkena medan listrik tinggi. Cairan yang bermuatan diekspos ke medan listrik statis yang besar sehingga pada ujung jarum terbentuk kerucut dengan sisi cembung dan ujung membulat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Medan listrik menyebabkan tetesan cairan ionik melepaskan diri dari kerucut Taylor dan mempercepat terjadinya daya dorong (Wright & Ferrer, 2015). Daya dorong tersebut yang kemudian menyebabkan larutan yang terlontar menjadi memanjang dan mempercepat larutan menuju kolektor sehingga terbentuklah serat yang tertempel pada kolektor (Beaumont & Zweben, 2018).

Komponen utama *electrospinning* sangat berpengaruh pada serat yang dihasilkan seperti kolektor, tegangan tinggi, jarak antara nosel ke kolektor, diameter dan

panjang jarum suntik, serta laju alir. Kim *et al.* (2005) pada penelitiannya membandingkan hasil serat pada 3 jenis kolektor penampung yang berbeda-beda. Pada kolektor berbahan logam (permukaan serat halus), pada kolektor penampung (*reservoir*) air (permukaan serat kasar), sedangkan kolektor penampung (*reservoir*) metanol (serat kasar dan melengkung). Deitzel *et al.*, (2001) juga melihat peningkatan tegangan *electrospinning* berpengaruh pada serat karena jumlah cacat manik (akibat perubahan kemiringan arus *electrospinning* sebagai fungsi tegangan), peningkatan panjang dan penurunan ukuran serat juga cenderung meningkat seiring dengan peningkatan tegangan. Nayak *et al.*, (2017) mengamati jarak antara nosel ke kolektor yang lebih pendek cenderung menghasilkan serat dengan diameter yang lebih kasar karena pemancaran tetesan larutan polimer telah terkumpul di kolektor sebelum pancaran tetesan polimer memanjang dan menipis dengan maksimal, sehingga menurut Zhang *et al.*, (2019) dibutuhkan jarak yang tepat untuk memberikan waktu cairan meregang dan mengering sebelum terjadi pengendapan pada kolektor. Kizildag *et al.*, (2012) melihat bahwa penggunaan jarum dengan diameter seminimal menghasilkan serat nano lebih halus. Panjang jarum yang tidak tepat juga mengakibatkan penurunan energi kinetik rantai polimer dan lengkungan pada pancaran larutan polimer selama proses *electrospinning* (Hekmati *et al.*, 2013). Peningkatan laju aliran ternyata meningkatkan diameter serat dan morfologi manik-manik pada serat nano (Mirjalili & Zohoori, 2016). Penyebab manik yang terbentuk dikaitkan dengan tidak adanya penguapan pelarut serta peregangan yang rendah dari larutan saat pancaran dari jarum ke kolektor logam.

E. Polyvinyl Alcohol (PVA)

PVA merupakan polimer sintesis yang banyak digunakan sebagai salah satu bahan dasar pembuatan hidrogel yang bersifat hidrofilik (suka air), tidak beracun dan larut dalam air panas pada suhu lebih dari 80 °C (Erizal dan Rahayu, 1998). PVA pertama kali ditemukan oleh F. Klatte pada tahun 1915 dan mulai dibuat dengan cara menghidrolisis *polyvinyl acetat* (PVA atau PVAc) pada tahun 1924 oleh Herman dan Hachnel di Jerman. Hidrolisis dilakukan pada larutan alkohol melalui mekanisme radikal bebas dan polimerisasi suspensi untuk menghilangkan gugus asetat pada *polyvinyl acetat*. *Polyvinyl Alcohol* tidak memiliki singkatan tunggal yang dikenali dan digunakan secara universal, sehingga berdasarkan beberapa literatur bahwa selain PVA, *polyvinyl alcohol* juga disebut PVAL atau PVOH dengan nama dagang Elvanol (DuPont), Mowiol, dan Poval (Kuraray) (Goodship & Jacobs, 2005). Rumus molekul PVA adalah CH₂CHOH atau C₂H₄O seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.5 serta sifat fisis dan kimiawi PVA ditampilkan pada Tabel 2.2 (Anonim D, 2021).



Gambar 2.5 (a) Struktur molekul PVA; (b;c) representasi kimiawi PVA (Goodship & Jacobs, 2005).

PVA merupakan gugus hidroksil yang biasanya berbentuk kristal. Polimer yang sangat terhidrolisis umumnya memiliki kecenderungan tinggi untuk mengkristal

dan mengalami ikatan hidrogen. Pada saat derajat hidrolisis meningkat, molekul-molekul akan cepat mengkristal dan ikatan hidrogen mengakibatkan molekul menyatu jika tidak terdispersi sepenuhnya sebelum pelarutan terjadi. Hal tersebut menjadi dasar produsen menyarankan suhu minimum 96 °C untuk memastikan PVA dengan derajat hidrolisis diatas 98% memiliki energi termal yang cukup selama pelarutan agar dapat terlarut sempurna (Goodship & Jacobs, 2005).

Tabel 2.2 Sifat fisis dan kimia PVA (Anonim D, 2021).

No.	Keterangan
1. Nama	<i>Polyvinyl Alcohol</i>
2. Rumus kimia	CH ₂ CHOH atau C ₂ H ₄ O
3. Deskripsi fisik	Tampak seperti butiran atau bubuk berwarna putih hingga krem yang tidak berbau. Berikatan dengan air (hidrofilik).
4. Berat molekul	44,05 g/mol
5. Massa jenis	2,66 g/cm ³
6. Titik didid	340 °C
7. Titik leleh	228 °C
8. Indeks bias	1,91 – 1,31
9. <i>Flash Point</i>	79 °C
10. Kelarutan	Larut dalam air dan etanol, serta tidak larut dalam pelarut minyak bumi dan hidrokarbon terklorinasi.
11. Dekomposisi	> 200 °C

PVA banyak dijadikan serat berukuran nano dengan cara pemintalan pada alat *electrospinning* dan diaplikasikan pada medis dan filtrasi. Larutan PVA untuk *electrospinning* dibuat dengan memperhatikan derajat polimerisasi dan hidrolisis. Dalam hal persiapan larutan PVA, akan dikenal istilah terhidrolisis penuh dan terhidrolisis sebagian.

1. Larutan yang terhidrolisis penuh tidak benar-benar larut pada suhu kamar, sehingga pencampuran air/PVA memerlukan pemanasan hingga mendidih saat proses pengadukan berlangsung untuk memastikan terjadinya pelarutan penuh.

2. Pada kadar terhidrolisis sebagian, efek plasticizer (molekul dengan volatilitas/penguapan rendah) air dan kelarutan berarti zat terlarut cenderung membentuk gumpalan jika disiapkan dengan cara yang sama dengan terhidrolisis penuh. Oleh karena itu, dalam hal ini PVA harus ditambahkan perlahan-lahan ke larutan sambil diaduk. Suhu dapat dinaikkan, jika perlu, untuk mempercepat proses ini.

Larutan PVA 10% merupakan laju pengenceran yang sangat umum digunakan serta menjadi indikator pelarutan polimer yang banyak digunakan dalam pembuatan larutan *electrospinning* yang dikatsilangkan dengan PVA (Goodship & Jacobs, 2005).

F. Metode Sol-Gel

Metode sol-gel merupakan teknik yang banyak digunakan pada produksi partikel dengan kemurnian tinggi, dan memungkinkan untuk mengontrol ukuran, bentuk (Pierre, 1988), sifat kimiawi, tekstur, dan struktur morfologi material (Pal & Gomes, 2020). Proses sol-gel adalah metode kimia basah yang melibatkan hidrolisis dan kondensasi alkoksida logam dan garam anorganik (Vansant *et al.*, 1995). Proses sol-gel juga sering diartikan sebagai jalur koloid yang digunakan untuk mensintesis keramik dengan tahap perantara sol dan atau keadaan gel (Pierre, 1988).

Sol-gel adalah proses sintesis yang melibatkan senyawa awal untuk pembuatan koloid yang disebut prekursor. Prekursor itu sendiri terdiri dari unsur logam atau metaloid yang dikelilingi oleh berbagai ligan (pelengkap; tidak termasuk atom logam atau metaloid lain). Prekursor yang banyak digunakan dalam penelitian sol-

gel adalah alkoksida (Brinker & Scherer, 1990). Alkoksida dibagi menjadi beberapa kelompok senyawa (Turova *et al.*, 2002), yaitu:

- a. Turunan alkali yang bersifat garam dan larut dalam pelarut polar (air, amonia cair).
- b. Turunan nonlogam dan alkohol yang berupa monomer atau agregat lemah dengan tingkat keasaman sangat rendah serta larut dalam alkohol dan pelarut nonpolar.
- c. Alkoksida logam yaitu turunan dari logam dan alkohol alifatik dengan sifat yang bervariasi serta sensitif terhadap aksi air.

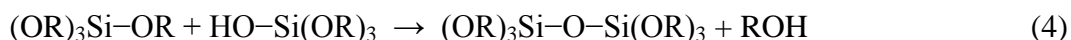
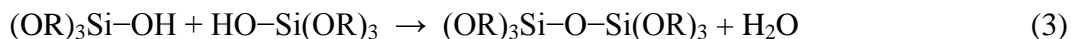
Alkoksida logam adalah anggota senyawa metalorganik yang memiliki ligan organik yang terikat pada atom logam atau metaloid. Contoh yang paling banyak dipelajari adalah *silicon tetraethoxide* (*tetraethoxysilane* atau *tetraethyl orthosilicate*, TEOS), $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$. Reaksi alkoksida logam dengan air disebut hidrolisis, karena ion hidroksil menjadi terikat pada atom logam seperti yang ditampilkan pada Reaksi (1)



R mewakili proton atau ligan lain dan ROH adalah alkohol. Hidrolisis dapat selesai tergantung jumlah air dan katalis yang digunakan sehingga semua gugus OR berubah menjadi OH seperti pada Reaksi (2) atau dapat berhenti saat logam hanya terhidrolisis sebagian, $\text{Si}(\text{OR})_{4-n}(\text{OH})_n$.



Dua molekul terhidrolisis sebagian dapat bergabung bersama dalam reaksi kondensasi, seperti pada Reaksi (3) dan (4).

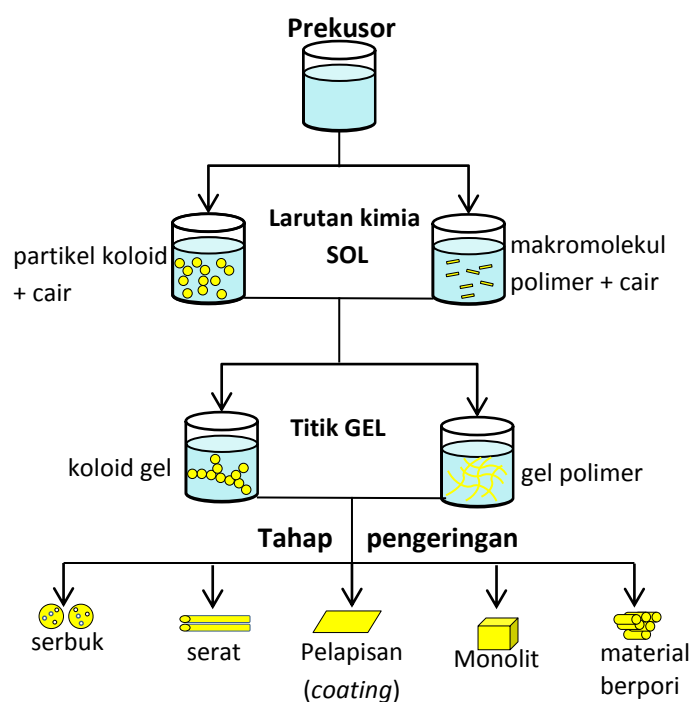


Kondensasi berperan membebaskan molekul kecil seperti air atau alkohol. Jenis reaksi ini dapat terus membangun molekul silikon yang lebih besar melalui proses polimerisasi (Brinker & Scherer, 1990).

Terdapat tiga buah istilah yang sangat mempengaruhi metode sol-gel, yaitu sol, gel, dan gelas. Sol adalah suspensi stabil dari partikel koloid dalam cairan (Pierre, 1988). Partikelnya bisa berupa amorf atau kristal, dan mungkin memiliki substruktur padat, berpori, atau polimer (Levy & Zayat, 2015). Gel adalah jaringan padat berpori tiga dimensi yang saling berhubungan dan mengembang secara stabil di seluruh media cair dan hanya dibatasi oleh ukuran wadah. Jika jaringan padat terbuat dari partikel sol koloid, maka gel tersebut dikatakan koloid. Dan jika jaringan padat terbuat dari unit kimia sub-koloid, maka gelnya adalah polimer. Dalam keadaan gel, cairan ada di antara jaringan-jaringan padat yang membentuk gel, serta tidak mengalir keluar secara spontan dan berada dalam kesetimbangan termodinamika dengan jaringan padat. Proses terbentuknya gel ketika dispersi homogen yang ada dalam larutan awal mengeras disebut gelas (Pierre, 1988). Gelas disebabkan oleh pembentukan ikatan kovalen antara partikel sol dan pembentukan gel dapat dibalik ketika ikatan lain terlibat, seperti gaya Van der Waals atau ikatan hidrogen (Levy & Zayat, 2015).

Proses sol-gel sudah banyak digunakan pada berbagai jenis variasi dan aplikasi dengan hanya terpusat di sekitar skema tunggal seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.6. Tahapan dari proses sol-gel dapat dimulai dengan pemilihan prekursor dari material yang diinginkan. Prekursor yang digunakan memiliki sifat

kimia yang membawa reaksi pembentukan partikel koloid atau gel polimerik (Pierre, 1988). Setelah pemilihan prekursor, suspensi/sol koloid diturunkan dengan hidrolisis prekursor dan didiamkan selama beberapa jam, tergantung pada morfologi bahan yang diinginkan. Pada tahap ini, jenis pelarut, konsentrasi larutan prekursor, jumlah penambahan asam dan basa, dan suhu secara langsung mempengaruhi sifat-sifat bahan (Pal & Gomes, 2020). Terdapat bahan-bahan baru yang dibuat menggunakan metode sol-gel, seperti hibrida organik dan anorganik, pemintalan serat, dan bahan pelapis (Pierre, 1988).



Gambar 2.6 Proses sol-gel (Pierre, 1988).

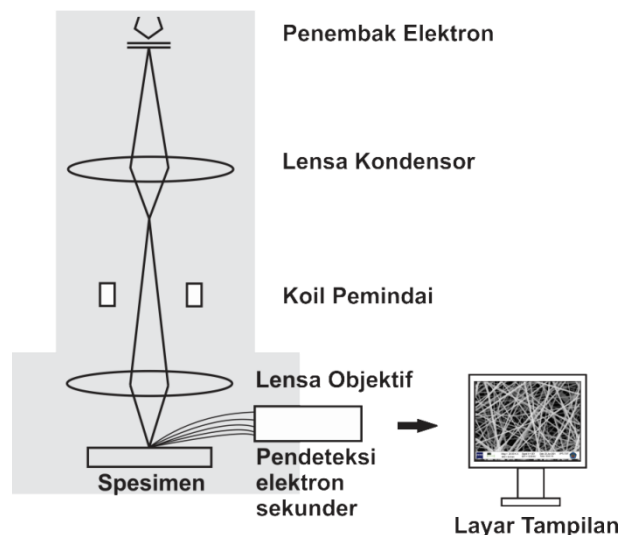
G. Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM atau pemindaian mikroskop elektron merupakan analisis yang menghasilkan gambar perbesaran dan informasi kimiawi dari hampir semua jenis spesimen. Spesimen yang akan dianalisis pada SEM pada umumnya harus konduktor yang

baik untuk memastikan elektron sebagian besar masuk ke *ground*. Ukuran spesimen yang dimungkinkan untuk masuk dan dapat diamati pada alat SEM yaitu dengan kisaran diameter hingga 50 mm dan tebal 20 mm. Namun SEM sering digunakan untuk menganalisis spesimen yang berukuran lebih kecil dengan diameter berkisaran 12 mm dan lebar 22,4 mm (Echlin, 2009).

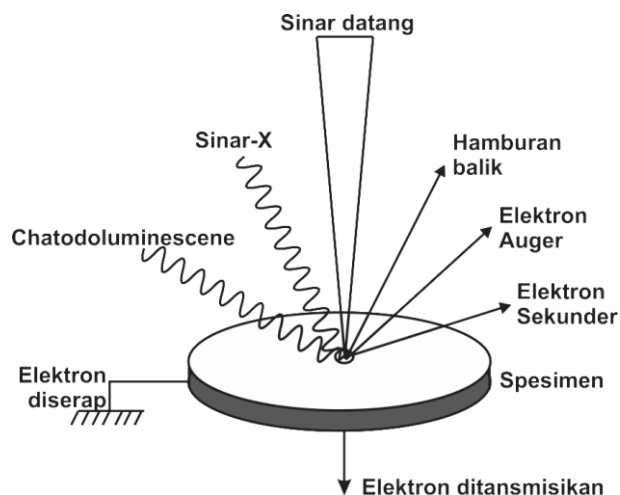
Instrumen SEM membutuhkan sistem optik untuk menghasilkan tampilan gambar topografi spesimen. Sistem optik SEM terdiri dari penembak elektron, lensa kondensor, dan lensa objektif untuk menghasilkan *probe* elektron, koil pemindai untuk memindai *probe* elektron yang dirangkai pada lingkungan yang vakum, dan komponen lain seperti tempat peletakan spesimen, pendeteksi dan layar tampilan yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Secara prinsip, cara kerja sistem optik pada SEM dimulai dari penembak elektron yang berupa penembak emisi termionik (aliran pembawa muatan yang diinduksi secara termal dari permukaan atau melalui penghalang energi potensial) untuk menghasilkan berkas elektron dengan cara memancarkan termionik dari filamen (katoda) yang terbuat dari kawat tungsten tipis (0,1 mm) melalui pemanasan filamen pada suhu tinggi (2527 °C). Penembakan elektron yang difokuskan menuju lensa kondensor dan objektif memungkinkan penyesuaian diameter berkas elektron yang dihasilkan agar dapat mengilustrasikan pembentukan *probe* elektron yang lebih halus atau kecil untuk diteruskan ke tempat peletakan sampel. Tempat spesimen dapat melakukan gerakan horizontal, vertikal, gerakan miring dan rotasi untuk pemilihan bidang pandang, serta gerakan vertikal untuk mengatur perubahan resolusi gambar yang akan ditampilkan. Berkas elektron yang sudah melalui spesimen dideteksi dengan pendeteksi elektron sekunder untuk menghasilkan sinyal keluaran yang diperkuat

dan dikirim pada unit tampilan. Sistem vakum pada instrumen SEM berada pada tingkat vakum yang tinggi yaitu, $10^{-3} - 10^{-4}$ Pa (Anonim B, 2021).



Gambar 2.7 Skema sistem optik instrumen SEM (Anonim B, 2021).

Pada saat elektron ditembakkan dan difokuskan menuju spesimen, elektron berinteraksi dengan atom yang ada di dalam spesimen dan menghasilkan hamburan elektron. Elektron yang bertumbukan dengan proton (inti atom) spesimen akan menghasilkan hamburan balik dan juga hamburan elastis karena elektron spesimen membelokkan berkas elektron yang masuk, sedangkan elektron yang bertumbukan dan mengeksitasi elektron spesimen menghasilkan elektron sekunder dan terjadi hamburan inelastis karena berkas elektron kehilangan energi dan mengirim energi ini dalam berbagai cara ke atom spesimen. Efek gabungan dari proses hamburan elastis dan inelastis menimbulkan sinyal yang berguna untuk pencitraan, seperti elektron sekunder, hamburan balik, sinyal karakteristik sinar-x, cahaya *catodoluminescence* (CL), arus yang diserap (arus spesimen), dan elektron yang ditransmisikan seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.8 (Goldstein *et al.*, 2003).

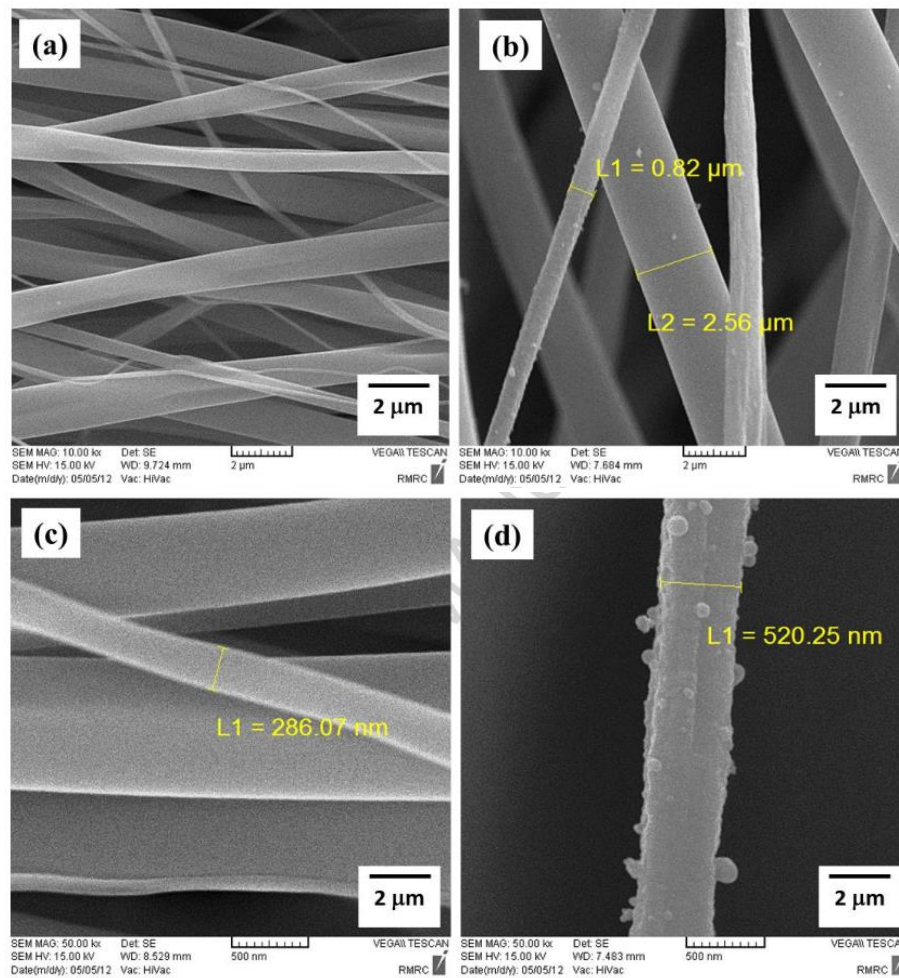


Gambar 2.8 Emisi berbagai elektron dan gelombang elektromagnetik dari spesimen (Anonim B, 2021).

Selain mengetahui morfologi permukaan spesimen, SEM juga dapat digunakan untuk mengetahui informasi unsur dan karakteristik kimiawi spesimen dengan teknik spektroskopi sinar-x dispersi energi atau *energy-dispersive x-ray spectroscopy* (EDS; EDX; EDSX). Analisis ini dapat dilakukan dengan menambahkan pendeteksi EDS pada instrumen SEM berupa *lithium-drifted-silicon*, Si(Li) padat yang dipasang pada *probe* elektron penganalisis mikro. EDS mengidentifikasi interaksi beberapa sumber eksitasi sinar-x dan spesimen untuk mengetahui unsur yang ada di dalam spesimen. Unsur kimia dipercaya memiliki struktur atom unik yang memungkinkan serangkaian puncak unik pada spektrum emisi elektromagnetik dipakai sebagai prinsip utama spektroskopi. Elektron yang ditembakkan pada spesimen dapat mengeluarkan elektron dari kulit bagian dalam spesimen dan menciptakan lubang pada tempat elektron berada. Elektron dari kulit terluar yang berenergi tinggi kemudian mengisi lubang tersebut, sehingga perbedaan energi antara kulit berenergi tinggi dan kulit berenergi lebih rendah dapat dilepaskan dalam bentuk sinar-x. Informasi jumlah energi sinar-x yang

dipancarkan spesimen dapat diukur dengan EDS untuk mengetahui komposisi unsur spesimen yang diukur (Goldstein *et al.*, 2003).

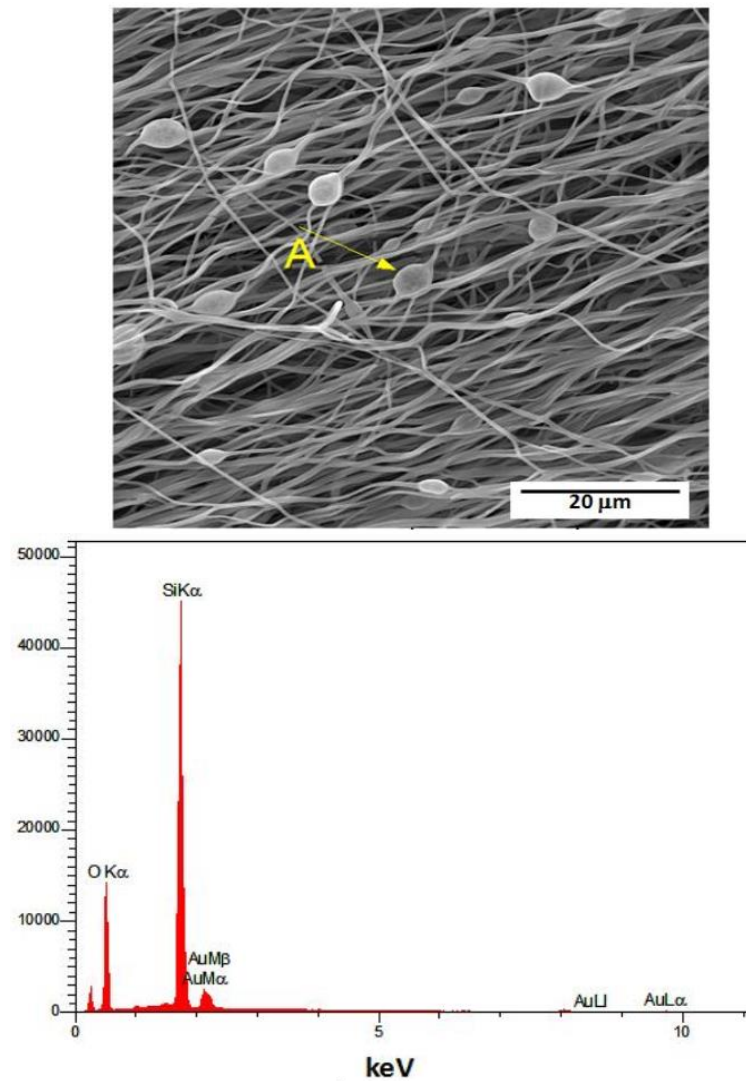
Tampilan gambar morfologi permukaan serta spektrum komposisi unsur sampel yang didapatkan dari hasil karakterisasi SEM dan EDS akan tampak seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.9 dan Gambar 2.10.



Gambar 2.9 Morfologi permukaan hasil *electrospinning* (a dan b) serat nano PVA dan (c dan d) TEOS/PVP (Shahhosseinia *et al.*, 2018).

Bedasarkan morfologi permukaan yang ditampilkan pada Gambar 2.9 dapat dilihat bahwa serat PVP dan TEOS/PVP terbentuk dan dapat dipintal dengan menggunakan metode *electrospinning*. Perbedaan ukuran serat antara sampel PVP

dan TEOS/PVP dapat terlihat menggunakan ImageJ. Tampak bahwa diameter serat PVA lebih besar dibandingkan dengan serat TEOS/PVA. Pada Gambar 2.10 ditampilkan spektrum EDS dari serat TEOS/PVP yang menunjukkan jumlah atom Si dan O yang cukup tinggi pada area yang ditandai A.

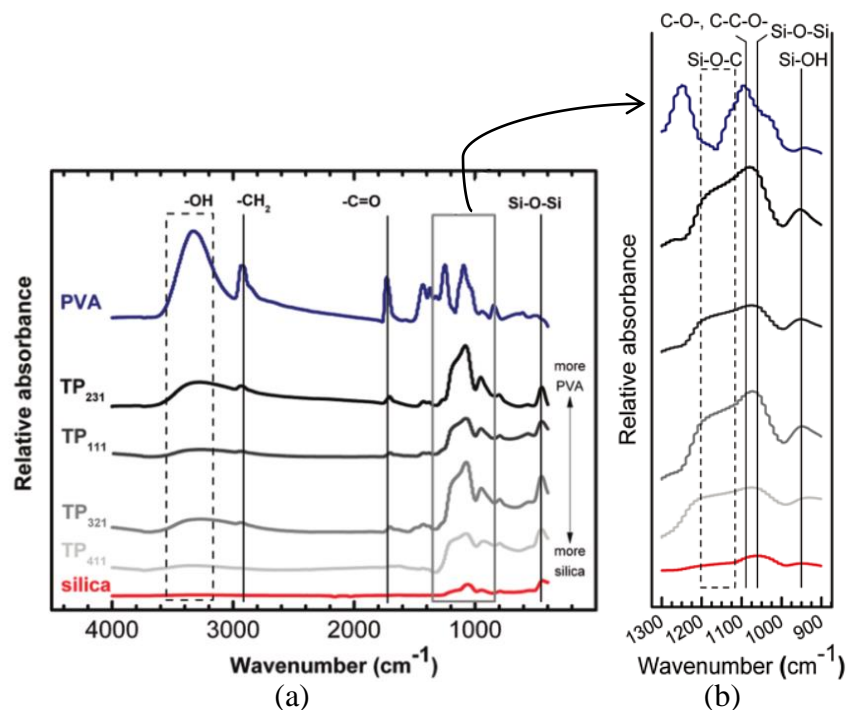


Gambar 2.10 Spektrum EDS serat TEOS/PVA hasil *electrospinning* (Shahhosseininia *et al.*, 2018).

H. *Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)*

FTIR merupakan analisis spektrum inframerah yang digunakan untuk mengetahui gugus fungsi molekul pada konsentrasi tertentu yang ada pada sampel (Smith, 2011) dengan memanfaatkan spektroskopi optik yang mampu menunjukkan bahwa molekul memiliki spektrum vibrasi yang kompleks (Kuptsov & Zhizhin, 1998) dan sangat spesifik dalam rentang spektral $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ yang disebut *mid-infrared spectrum* (Griffiths & Haseh, 2007). Spektrum inframerah dihasilkan dari transisi antara keadaan energi vibrasi terkuantisasi. Vibrasi molekul dapat berkisar dari gerakan gabungan sederhana dari dua atom molekul diatomik hingga gerakan yang jauh lebih kompleks dari setiap atom dalam molekul polifungsional besar. Setiap molekul memiliki mode vibrasi yang berbeda satu sama lain, sehingga spektrum inframerah dari molekul dapat digunakan untuk mengidentifikasi molekul yang dianalisis (Griffiths & Haseh, 2007).

Radiasi infra merah yang dilewatkan melalui suatu sampel akan mengakibatkan molekul-molekulnya dapat menyerap (mengabsorpsi) energi sehingga terjadi transisi diantara tingkat vibrasi (*ground state*) dan tingkat vibrasi tereksitasi (*excited state*). Penyerapan energi pada berbagai frekuensi dapat dideteksi oleh spektrofotometer infra merah, dengan memplot jumlah radiasi infra merah yang diteruskan melalui sampel sebagai fungsi frekuensi (atau panjang gelombang) radiasi. Plot tersebut adalah spektrum infra merah yang memberikan informasi penting tentang gugus fungsional suatu molekul seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Spektrum FTIR (a) serat PVA, silika, dan komposit PVA – silika; (b) versi yang diperbesar (Pirzada *et al.*, 2012).

Pada penelitian Pirzada *et al.* (2012) diperoleh serat nano silika melalui teknik *electrospinning* dengan mencampurkan larutan prekursor silika (TEOS) dan PVA yang diencerkan dengan air. Pengamatan dilakukan dengan bervariasi rasio larutan TEOS ke dalam larutan PVA, serta waktu penuaan TEOS dalam hitungan jam. Gambar 2.11 merupakan hasil FTIR yang menunjukkan bahwa puncak karakteristik PVA ditemukan pada bilangan gelombang sekitar 2900 cm⁻¹ dan 1700 cm⁻¹ yang menyatakan karakteristik gugus -CH₂ dan C=O. Silika ditampilkan pada puncak serapan antara 440 dan 500 cm⁻¹ serta antara 1000 dan 1100 cm⁻¹ yang mewakili puncak Si-O-Si dan Si-O-C. Gugus Si-O-Si menunjukkan bahwa penambahan PVA ke prekursor yang sudah di-*aging* tidak mengganggu bentuk jaringan silika pada hibrida. Dan gugus Si-O-C menunjukkan bahwa terjadi penghubung atau ikatan silang silika dengan PVA. Gugus -OH

yang di tampilkan pada sampel PVA diyakini berada pada puncak serapan antara 3200 dan 3400 cm^{-1} hal ini karena pada sampel yang jumlah PVA-nya menurun pada larutan menunjukkan karakteristik FTIR yang melemah pada bilangan gelombang sekitar 3300 cm^{-1} karena adanya $-\text{OH}$ akibat hidrolisis TEOS yang menghasilkan Si-OH dan diyakini beberapa gugus PVA tidak berpartisipasi dalam ikatan silang dengan TEOS yang tampak pada sampel TP₂₃₁ dan TP₃₂₁. Puncak spektrum FTIR serat nano silika pada penelitian sebelumnya ditampilkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Puncak Spektrum gugus fungsi serat nano silika.

Referensi	Bilangan Gelombang (cm^{-1})							
	Gugus Fungsi							
	OH	CH ₂	CH	C-O	Si-O-Si	Si-O-C	Si-OH	C=O
Ugur <i>et al.</i> , 2018	3300	2850-2950, 1418	1335	1150- 1250	1135	956	-	1725
Pirzada <i>et al.</i> , 2012	3200- 3400	2900	-	-	440-500, 1000-1100, 1080,	1110	-	1700
Choi <i>et al.</i> , 2003	3390	2800-3000, 1400-1800	-	-	795, 1058	950	-	-
Geltmeyer <i>et al.</i> , 2013	3300	-	-	-	795, 1070	-	952	-
Shao <i>et al.</i> , 2003	3400	-	-	-	1100	1100	-	-
Driscan <i>et al.</i> , 2014	3300	-	-	-	1060, 1100-1200	-	930-950	-

Pada Tabel 2.3 ditampilkan beberapa puncak serapan yang terbentuk pada serat nano silika di beberapa penelitian terdahulu. Tampak bahwa gugus fungsi yang terbentuk diantaranya yaitu gugus $-\text{OH}$, CH, CH₂, C-O, Si-O-Si, Si-O-C, Si-OH, dan C=O. Gugus fungsi $-\text{OH}$ rata-rata ditampilkan pada bilangan gelombang 3200 cm^{-1} hingga 3400 cm^{-1} . Gugus CH hanya dijelaskan pada penelitian Ugur *et al.* (2018) dengan bilangan gelombang 1335 cm^{-1} , sedangkan penelitian lainnya hanya menampilkan gugus CH₂ pada bilangan gelombang 1418 cm^{-1} , 2850 - 2950

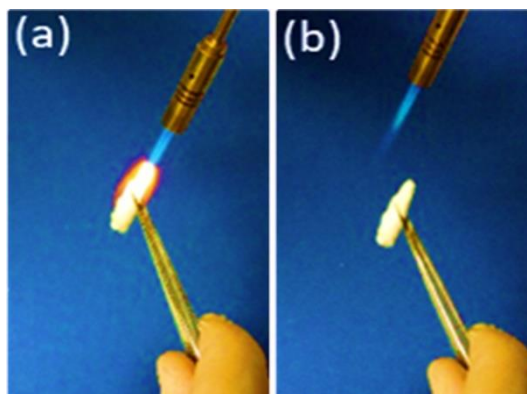
cm^{-1} (Pirzada *et al.*, 2012), $1400 - 1800 \text{ cm}^{-1}$ dan $2800-3000 \text{ cm}^{-1}$ (Choi *et al.*, 2003). Ugur *et al.* (2018) dengan pembuatan serat nano silika tanpa menggunakan polimer menyatakan adanya gugus fungsi C-O pada puncak serapan $1150 \text{ cm}^{-1} - 1250 \text{ cm}^{-1}$. Selanjutnya, gugus fungsi Si-O-Si dengan bilangan gelombang terendah ditampilkan pada puncak serapan $440 - 550 \text{ cm}^{-1}$ (Pirzada *et al.*, 2012), dan bilangan gelombang tertinggi pada puncak serapan $1100 - 1200 \text{ cm}^{-1}$ (Drican *et al.*, 2014). Gugus fungsi Si-O-C hadir pada puncak serapan 950 cm^{-1} (Choi *et al.*, 2003), 956 cm^{-1} (Pirzada *et al.*, 2012), 1100 cm^{-1} (Shao *et al.*, 2003), serta 1110 cm^{-1} (Ugur *et al.*, 2018). Gugus fungsi Si-OH hadir pada puncak serapan $930 - 950 \text{ cm}^{-1}$ serta 952 cm^{-1} , sedangkan gugus fungsi C=O ditampilkan pada bilangan gelombang 1700 dan 1725 cm^{-1} .

I. Aplikasi Serat Nano Silika

Silika merupakan material yang pengaplikasiannya mencakup hingga ke dimensi nano seperti serat nano. Serat nano silika cukup banyak mendapat perhatian karena memiliki keunikan tersendiri, seperti memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, ukuran pori yang cenderung kecil, porositas yang tinggi, ketahanan termal dan kimiawi yang tinggi, serta adsorbansi yang baik (Geltmeyer *et al.*, 2015). Karakteristik serat nano silika tersebut sangat cocok digunakan dalam bidang industri terutama sebagai penyaringan udara yang mencakup hingga suhu tinggi (Tepekiran *et al.*, 2019), pengolahan air limbah (Sarıkaya *et al.*, 2016), dan pemanenan air atau *water harvesting* (kim *et al.*, 2019). Aktivitas industri yang umumnya menghasilkan air limbah dengan kandungan ion beracun seperti logam berat, fosfat, pewarna, pestisida, dan *plasticizer* (Ramakrishna *et al.*, 2006) hingga

partikel polusi yang beragam seperti CO, NO, ozon, SO₂, baik dalam bentuk cair maupun padatan merupakan penyebab terjadinya pencemaran udara dan air yang merugikan bagi lingkungan hingga kesehatan masyarakat (Ripple *et al.*, 2014; Allen *et al.*, 2016; West *et al.*, 2013). Zhang *et al.* (2017) meneliti ukuran partikel yang sering terhirup ke dalam paru-paru manusia dan mengakibatkan kanker paru-paru memiliki ukuran 250 nm hingga 1000 nm.

Pada penyaringan udara, diameter serat nano silika yang umumnya digunakan yaitu 140 - 300 nm dengan efisiensi penyaringan mulai dari 65% – 99,993% untuk penyaringan partikel berukuran 300 nm dengan polimer beragam seperti *Nylon 6* (Ahn *et al.*, 2006), *polyacrylonitrile* (PAN) (Vinh & Kim, 2016), *thermoplastic polyurethane* (TPU) (Chen *et al.*, 2018), dan lainnya. Serat nano komposit seperti PAN/silika dengan diameter 600 - 700 nm mampu menyaring partikel berukuran 300 - 500 nm dengan efisiensi 64,9% (Wang *et al.*, 2014), sedangkan untuk penyaringan udara suhu tinggi digunakan serat nano berdiameter (521 ± 308) nm dengan efisiensi 75,89% (Tepekiran *et al.*, 2019) yang dapat diaplikasikan pada aktivitas industri, kendaraan, hingga pembangkit listrik. Pembangkit listrik identik sebagai penghasil gas buangan bersuhu tinggi, contohnya mesin diesel yang biasanya menghasilkan gas buangan pada suhu sekitar 420 °C (Nolan, 2017). Penggunaan serat nano silika sebagai penyaring udara suhu tinggi dapat dibuktikan dengan melakukan uji nyala api seperti pada Gambar 2.12 yang menampilkan serat nano silika yang diuji dengan nyala api. Tampak serat nano yang dipusatkan dengan nyala api dengan suhu antara 1000 - 1200 °C pada Gambar 2.12a tampak tidak terpengaruh sama sekali dengan paparan suhu tinggi yang diberikan seperti terlihat pada Gambar 2.12b.

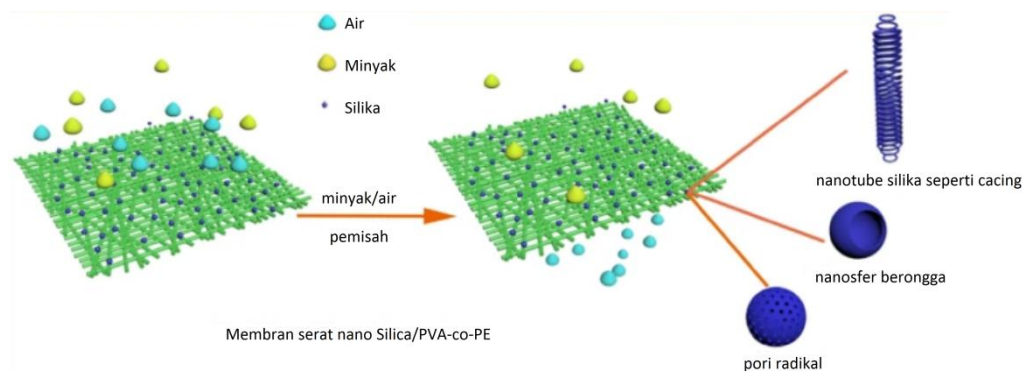


Gambar 2.12 Serat nano silika (a) saat diuji dan (b) setelah di uji dengan nyala api suhu 1000 - 1200 °C (busen burner) (Tepekiran *et al.*, 2019).

Serat nano silika juga diaplikasikan untuk penyaring air limbah. Ukuran serat yang digunakan umumnya memiliki variasi diameter tertentu, seperti serat nano PVA/silika yang memiliki diameter 300 - 500 nm mampu menyerap Cu (II) dari air dan mampu meregenerasi diri melalui pengasaman. Serat nano silika yang digunakan sebagai *adsorbent* atau penyerap ini disimulasikan dan diamati mampu menyerap Cu^{2+} hingga mencapai 89,79% setelah dilakukan penyaringan sebanyak 6 kali (Wu *et al.*, 2010). Serat nano silika juga digunakan sebagai penyerap zat warna, yang dilakukan pada penelitian Mahmoodi, *et al.* (2020). Penelitian ini dilakukan dengan cara mensintesis larutan silika aerogel + *polyacrylonitrile* + *polyvinylidene fluoride* (SAPPF) dengan metode sol-gel dan dipintal dengan teknik *electrospinning*. Variasi silika aerogel yang dimasukkan ke dalam larutan menunjukkan bahwa penambahan silika aerogel menyebabkan peningkatan porositas, kuat tarik, serta penyerapan terhadap zat warna. Serat dengan diameter antara 110 – 130 nm ini mampu menyerap (memisahkan) zat warna merah (*Basic Red 18 - BR18*) hingga mencapai efisiensi 97,25%.

Serat nano silika sebagai penyaringan air limbah (anti polusi), juga digunakan sebagai pemisah antara air dan minyak. Hal ini dipercaya sangat memungkinkan

terjadi karena permukaan silika memiliki gugus hidroksil yang sifat keterbasahannya sangat baik. Artinya, silika memiliki suatu kecenderungan fluida yang tidak saling mencampur satu sama lain. Hal tersebut dimanfaatkan oleh Chen *et al.* (2021) untuk membuat membran serat nano silika/PVA yang dikombinasikan dengan *polyethylene* (PE) atau selanjutnya disebut serat nano silika/PM. Terdapat 5 variasi silika yang digunakan yaitu silika nanosfer dengan pori-pori radikal, nanosfer silika berongga, dan nanotube silika seperti cacing yang disemprotkan secara terpisah pada PVA dan dikombinasikan dengan membran nanofiber PE. Kandungan Si-OH pada permukaan silika dimanfaatkan untuk mempersiapkan membran yang super hidrofobik. Komposit silika/PM yang berdasarkan hasil TEM dinyatakan memiliki panjang dan diameter nanotube sekitar 130-350 nm dan 30-45 nm yang telah disiapkan digunakan untuk memisahkan campuran n-heksana/air, minyak silikon/air dan air minyak kacang tanah melalui filtrasi. Hasilnya, mereka semua menunjukkan pemisahan yang efisien dari campuran minyak/air melalui filtrasi yang digerakkan oleh gravitasi. Keseluruhan sampel mencapai efisiensi 95% dalam pemisahan minyak dan air. Skema simulasi pemisahan minyak dari air dengan menggunakan serat silika ditunjukkan oleh Gambar 2.13. Pemisahan minyak dan air dengan menggunakan serat nano silika menggunakan TEOS sebagai prekursor silika dan *poly (ethylene glycol)-b-poly (propylene glycol)-b-poly (ethylene glycol)* (P123) dilakukan oleh Kaleekkal *et al.* (2018). Membran komposit yang dihasilkan menunjukkan keberhasilan pemisahan air dan minyak melalui peningkatan emulsi/fluks air yang terjadi sambil mempertahankan >99,8% penolakan minyak dari emulsi oli motor/air/surfaktan sintetis.



Gambar 2.13 Skema simulasi penyaringan pemisahan minyak dan air dengan serat nano silika (Chen *et al.*, 2021).

Silika juga dimanfaatkan sebagai alternatif pemanen air karena sifatnya sebagai material dengan adsorpsi yang baik. Penelitian mengenai pemanenan air berbasis adsorpsi yang memanfaatkan serat nano silika telah dilakukan oleh Kim *et al.* (2019) sebagai solusi krisis air global. Penelitian yang menggunakan mesopori serat nano silika (SNF) ini divariasikan berdasarkan kelembapan relatif (RH) selama proses *electrospinning* yaitu RH tinggi dan rendah (H-SNF dan L-SNF). Kinerja adsorpsi-desorpsi uap air H-SNF dan L-SNF diukur pada suhu 303 K dalam berbagai tingkat kelembapan relatif (30%, 60%, dan 90% RH). Pertama, setelah mengalirkan gas nitrogen lembab ke dalam sampel untuk menyerap uap air selama 40 menit, aliran gas dialihkan ke nitrogen kering untuk mendesorpsi adsorben. Profil adsorpsi-desorpsi dicatat untuk siklus berturut-turut dengan tingkat kelembapan relatif yang berbeda. Setelah adsorben terkena uap air, ada penambahan berat yang nyata karena adsorpsi uap air. Pada langkah awal, kenaikan massa eksponensial dicapai dalam 25 menit, dan kemudian proses yang jauh lebih lambat diikuti di mana kesetimbangan terjadi. Hasil yang didapatkan bahwa H-SNF mengandung struktur mesopori yang tertata dengan baik dan serat tipis yang terkondensasi karena efek selama proses *electrospinning*. Kemampuan

adsorpsi-desorpsi uap air yang cepat pada sampel H-SNF ditunjukkan melalui volume pori yang besar dan aksesibilitas pori yang tinggi dari serat silika dibandingkan dengan gel silika komersial. Adapun diameter rata-rata serat nano silika pada sampel H-SNF sebelum dikalsinasi adalah (684 ± 120) nm dan setelah dikalsinasi adalah sebesar (284 ± 49) nm.

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Mei sampai dengan September 2021. Proses sintesis, uji kekentalan dan uji tegangan permukaan dilakukan di Laboratorium Fisika Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung. Proses *Electrospinning* dilakukan di Laboratorium Elektronika Dasar Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung. Karakterisasi FTIR dan SEM-EDS dilaksanakan di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi (LTSIT) Universitas Lampung.

B. Alat dan Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *tetraethyl orthosilicate* (TEOS) 99% Merck, *polyvinyl alcohol* (PVA) 98% Merck, etanol 99,9% Merck, HCl 37% Merck, kertas pH meter, aquabides, *aluminium foil*, *plastic wrap*, tisu. Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *magnetic stirrer- hot plate*, batang magnet, timbangan digital, pipet mikro, gelas beaker, botol kaca, spatula kaca, piknometer, viskometer Ostwald, tensiometer alat suntikan, alat *electrospinning*, dan kaca preparat. Karakterisasi dilakukan menggunakan alat FTIR dan SEM-EDS.

C. Prosedur Penelitian

Prosedur yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari beberapa tahap penelitian yaitu sintesis larutan silika/PVA, pengukuran viskositas dan tegangan permukaan larutan silika/PVA, proses *electrospinning*, dan karakterisasi sampel menggunakan FTIR, dan SEM-EDS. Pengamatan akan dilakukan dengan memvariasikan tegangan yang digunakan pada saat proses *electrospinning* berlangsung. Perbandingan larutan yang digunakan untuk mensintesis larutan silika/PVA beserta variasi tegangan *electrospinning* ditampilkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Perbandingan larutan dan variasi tegangan *electrospinning*.

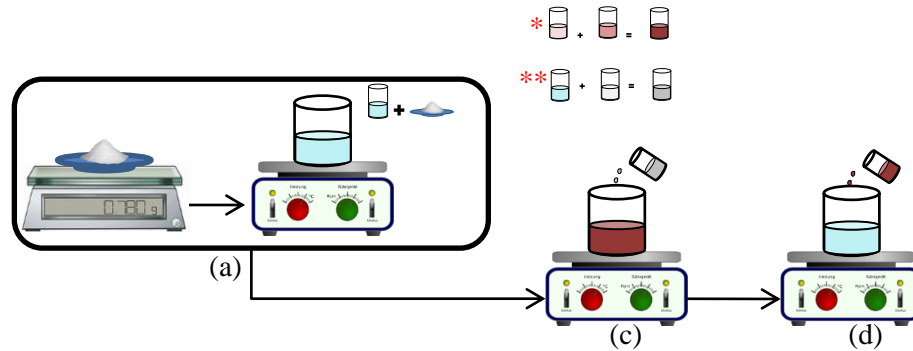
Nama Sampel	Larutan Silika (2 ml)				Larutan Polimer (3 ml)		Tegangan <i>Electrospinning</i> (kV)
	TEOS (ml)	Etanol (ml)	HCl (ml)	Aquabides (ml)	PVA (gr)	Aquabides (ml)	
TP12	3	8	0,02	0,7	0,78	7,38	12
TP14	3	8	0,02	0,7	0,78	7,38	14
TP16	3	8	0,02	0,7	0,78	7,38	16
TP18	3	8	0,02	0,7	0,78	7,38	18
TP20	3	8	0,02	0,7	0,78	7,38	20

1. Preparasi Larutan *Electrospinning*

Preparasi larutan *electrospinning* dilakukan dengan tiga tahap yaitu preparasi larutan PVA, preparasi larutan silika dan sintesis larutan silika/PVA seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.1.

- a. Larutan PVA dibuat dengan melarutkan PVA 10 % di dalam aquabides pada suhu 80 °C selama 2,5 jam sambil diaduk dengan kecepatan 300 rpm.
- b. Larutan silika dibuat dengan perbandingan molar TEOS : etanol : air : aquabides masing-masing 1 : 3 : 10 : 0,04. Pembuatan larutan silika diawali dengan mencampur TEOS dan etanol sehingga didapatkan larutan TEOS, dan selanjutnya mengencerkan HCl di dalam aquabides untuk mendapatkan larutan

HCl. Larutan TEOS dan HCl dicampur dengan meneteskan larutan HCL sedikit demi sedikit ke dalam larutan TEOS sambil diaduk dengan kecepatan 300 rpm pada suhu 60 °C selama 1 jam hingga didapat larutan silika.



Gambar 3.1 Proses sintesis larutan *electrospinning*: (a) penimbangan dan pelarutan PVA 10%; (c) mempersiapkan larutan silika (*TEOS + etanol = larutan TEOS, **aquabides + HCl = larutan HCl); (d) sintesis larutan silika/PVA.

c. Selanjutnya larutan PVA dan silika disintesis menjadi larutan silika/PVA dengan perbandingan silika : PVA, 2 : 3 ml. Proses sintesis ini dilakukan dengan menambahkan larutan silika sedikit demi sedikit ke dalam larutan PVA pada suhu 60 °C selama 1 jam sambil diaduk dengan kecepatan 300 rpm.

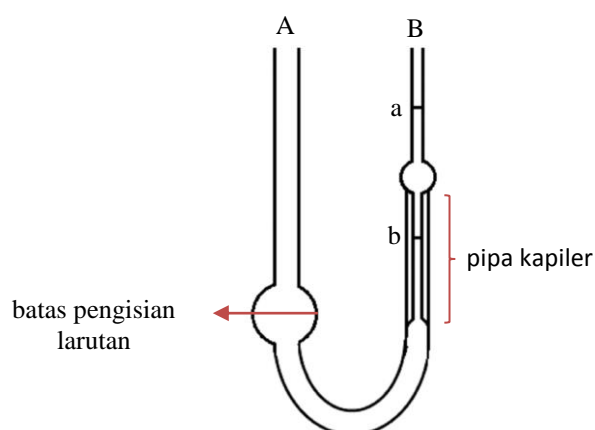
2. Pengukuran Viskositas dan Tegangan Permukaan Larutan Silika/PVA

Pengukur viskositas diawali dengan mengukur massa jenis (ρ) larutan silika/PVA menggunakan alat piknometer seperti pada Gambar 3.2. Piknometer volume 10 ml ditimbang dalam keadaan kosong (m_0), kemudian massa piknometer dikurangkan dengan massa piknometer saat diisi dengan larutan silika/PVA (m_1). Selisih massa keduanya dibagi dengan volume piknometer (V) sebagai hasil massa jenis larutan silika/PVA seperti pada Persamaan (3.1).

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (3.1)$$



Gambar 3.2 Piknometer.



Gambar 3.3 Bagian-bagian viskometer Ostwald.

Setelah melakukan pengukuran massa jenis larutan silika/PVA, waktu alir larutan silika/PVA diamati dengan viskometer Ostwald. Viskometer Ostwald adalah viskometer dengan tipe tabung U dan kapiler yang memanfaatkan gravitasi untuk mengetahui viskositas atau kekentalan suatu larutan (Viswanath *et al.*, 2007). Larutan yang digunakan relatif lebih sedikit dibanding alat lainnya. Viskometer Ostwald digunakan dengan memasukkan larutan silika/PVA melalui pipa A hingga mencapai setengah dari labu seperti yang ditandai dengan garis panah merah pada Gambar 3.3 Waktu alir mulai dihitung saat larutan sudah masuk dan mencapai garis bertanda a. Larutan dengan viskositas yang tinggi membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai garis a, sehingga larutan disedot naik dengan bantuan bulp yang dipasang di titik B hingga larutan mencapai garis a.

Waktu alir larutan dihitung saat larutan sudah mencapai garis a dengan melepas bulp terlebih dahulu. Penghitungan waktu alir pipa kapiler berakhir saat larutan sudah mencapai garis b pada pipa kapiler.

Untuk mengukur viskositas diperlukan larutan pembanding yang telah diketahui viskositasnya. Pada penelitian ini akan digunakan metanol. Setelah diketahui massa jenis dan waktu aliran pada larutan, selanjutnya menghitung nilai viskositas/kekentalannya dengan menggunakan Persamaan (3.2).

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{t_1 \cdot \rho_1}{t_2 \cdot \rho_2} ; \eta_2 = \eta_1 \frac{t_2 \cdot \rho_2}{t_1 \cdot \rho_1} \quad (3.2)$$

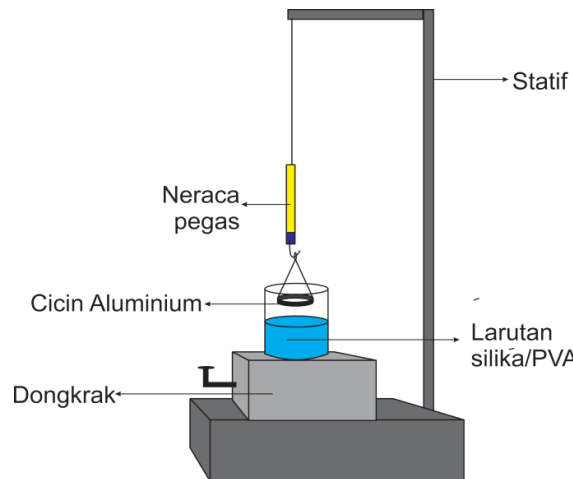
dengan η_1 , ρ_1 , t_1 , η_2 , ρ_2 , dan t_2 , masing-masing adalah kekentalan, massa jenis, dan waktu aliran larutan 1 dan 2 (1 larutan standar dan 2 larutan silika/PVA). Larutan standar atau pembanding yang digunakan dalam penelitian ini adalah metanol dengan η_1 sebesar 0,59 cP atau 0,59 Pa.s, ρ_1 sebesar 0,7918 g/ml, dan t_1 sebesar 20,1433 detik (s) (Partington, 1951). Satuan viskositas adalah P (poise) atau cP (sentipoise) dan satuan SI untuk viskositas dinamis adalah Pa.s (paskal sekon), N.s/m², kg/m.s dimana 1 P = 0,1 Pa.s dan 1 Pa.s = 1 N.s/m² = 1 kg/m.s (Viswanath, 2007).

Pengukuran tegangan permukaan larutan silika/PVA dilakukan dengan alat tensiometer seperti pada Gambar 3.4. Pengukuran terbagi menjadi 2 bagian, yaitu menentukan konstanta pegas (k) dan menentukan koefisien tegangan permukaan larutan (γ). Pengukuran k dilakukan dengan menimbang massa tiga buah beban (m ; gram) pada timbangan lalu mengukur gaya pegas, X (satuan milinewton; mN), masing-masing beban pada neraca pegas yang sudah digantung pada statif.

Masing-masing beban kemudian dihitung konstantanya dengan Persamaan (3.3) dan Persamaan (3.4).

$$k_n = \frac{m_n g}{X_n} \quad (3.3)$$

$$\bar{k} = \frac{k_1 + k_2 + \dots + k_n}{n} \quad (3.4)$$



Gambar 3.4 Skema tensiometer.

Pengukur koefisien tegangan permukaan larutan silika/PVA dilakukan dengan mempersiapkan larutan silika/PVA sebanyak 20 ml yang ditempatkan pada gelas beaker. Kemudian, neraca pegas yang sudah tergantung pada statif dipastikan kedudukan nilai berada pada angka nol. Selanjutnya menggantung cincin aluminium pada neraca pegas yang sudah diukur diameternya (untuk mengukur panjang garis khayal), lalu mencatat kedudukan nilai yang terbaca pada neraca pegas yang dianggap sebagai nilai X_{awal} . Larutan silika/PVA diletakkan diatas dongkrak yang sudah diatur bersamaan dengan statif tepat dibawah neraca pegas. Gelas yang berisi larutan dinaikkan dengan dongkrak menuju cincin aluminium yang sudah digantungkan pada neraca pegas. Pastikan larutan sampel mengenai setengah bagian dari cincin aluminium. Gelas beaker berisi larutan sampel

diturunkan perlahan-lahan dengan mengatur kedudukan dongkrak, sehingga cincin alumunium hampir terlepas dari permukaan larutan. Angka yang tertera pada neraca pegas sesaat sebelum cincin alumunium terlepas dicatat sebagai data X_{akhir} . Perlakuan serupa diulang sebanyak tiga kali percobaan. Setelah didapatkan data X_{awal} dan X_{akhir} , selanjutnya dihitung selisih dari kedua nilai gaya pegas tersebut sebagai data ΔX dengan satuan mN. Koefisien tegangan permukaan larutan dihitung dengan Persamaan (3.5) dan Persamaan (3.6).

$$\gamma_n = \frac{\bar{k} \Delta X}{4\pi r} \quad (3.5)$$

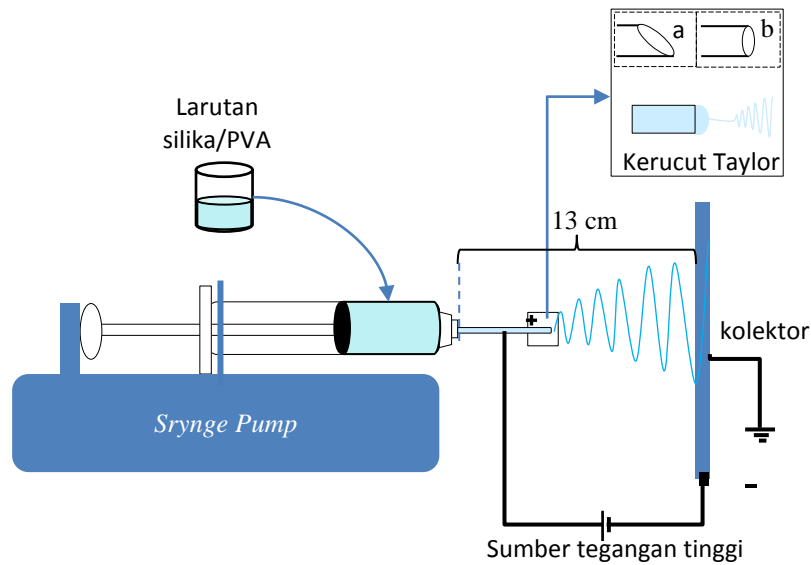
$$\bar{\gamma} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n}{n} \quad (3.6)$$

Pada persamaan diatas, r merupakan jari-jari cincin alumunium. Satuan yang digunakan untuk menyatakan γ adalah mN.m^{-1} atau dyn.cm^{-1} .

3. Proses *Electrospinning*

Proses *electrospinning* dimulai dengan mempersiapkan alat-alat yang digunakan selama proses *electrospinning* berlangsung, sesuai dengan skema proses *electrospinning* yang ditampilkan pada Gambar 3.5. Pertama memotong ujung jarum suntik yang semula berbentuk runcing (a) menjadi rata (b) seperti yang terlihat pada Gambar 3.5. Larutan silika/PVA dimasukkan ke dalam alat suntik ukuran 10 ml dan jarum suntik berbahan *stainless steel* memiliki diameter 0,5 mm. Udara yang terikut ke dalam tabung suntikan saat memasukkan larutan dikeluarkan melalui jarum sambil mengalirkan larutan ke ujung jarum. Jarum dihubungkan dengan tegangan tinggi positif sedangkan kolektor yang telah dilapisi aluminium foil dihubungkan dengan laju tegangan tinggi negatif dari sumber listrik dengan variasi 12, 14, 16, 18, dan 20 kV. Aluminium foil dilapisi

dengan kaca preparat agar serat nano mudah diambil. Proses *electrospinning* berlangsung selama 1 jam pada suhu ruang dengan laju alir 1,5 ml/jam, dan jarak ke kolektor sebesar 13 cm.



Gambar 3.5 Skema proses *electrospinning*.

4. Karakterisasi Sampel

Sampel dikarakterisasi dengan FTIR dan SEM-EDS untuk mengetahui gugus fungsi larutan Silika/PVA, morfologi permukaan, ukuran serat nano silika, dan komposisi unsur serat nano silika.

a. Gugus Fungsi Larutan Silika/PVA

Ikatan gugus fungsi larutan silika-PVA diamati dengan menggunakan alat FTIR Agilent. Hasil karakterisasi FTIR berupa spektrum puncak serapan yang menandakan vibrasi ikatan senyawa organik yang terkandung dalam sampel. Vibrasi diketahui dengan menembak cahaya infra merah dengan panjang gelombang 2.5 - 50 μm atau bilangan gelombang 4000 - 200 cm^{-1} pada sampel, sehingga saat melewati sampel maka akan terjadi penyerapan frekuensi senyawa yang terdapat pada sampel. Frekuensi yang tidak diserap oleh

senyawa akan ditangkap oleh pendeteksi sebagai persen transmitansi. Vibrasi molekul pada senyawa tergambar pada spektrum FTIR melalui grafik bilangan gelombang. Puncak serapan pada bilangan gelombang yang terbentuk pada grafik digunakan sebagai parameter penanda ikatan gugus fungsi yang terbentuk pada sampel. Untuk menginterpretasikan spektrum infra merah dibutuhkan data absorpsi ikatan setiap gugus fungsi seperti pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Bilangan gelombang absorpsi pada beberapa ikatan gugus fungsi (Dachriyanus, 2004).

Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Jenis Ikatan
3750 - 3000	regangan O-H, N-H
3000 - 2700	regangan $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$, C-H, C-H aldehyd
2400 - 2100	regangan $\text{C}\equiv\text{C}$, $\text{C}\equiv\text{N}$
1900 - 1650	regangan C=O (asam, aldehyd, keton, amida, ester, anhidrida)
1675 - 1500	regangan C=C (aromaterapi dan alifatik), C=N
1475 - 1300	C-H <i>bending</i>
1000 - 650	C=C-H, Ar-H <i>bending</i>

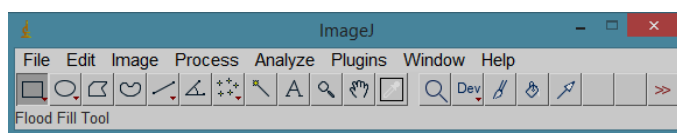
b. Morfologi Permukaan dan Ukuran Serat Nano Silika

Karakterisasi SEM yang dilakukan dengan menggunakan alat SEM ZEIS EVO/MA 10 akan menampilkan hasil uji berupa perbesaran gambar morfologi permukaan sampel. Gambar yang didapatkan akan digunakan untuk mengamati dan menganalisis bentuk atau struktur permukaan sampel serta mengetahui besar ukuran diameter serat nano yang berhasil terkumpul di kolektor saat proses *electrospinning*.

Gambar hasil SEM dibuat berdasarkan deteksi elektron baru (elektron sekunder) atau elektron pantul yang muncul dari permukaan sampel ketika permukaan sampel tersebut dipindai dengan sinar elektron. Elektron sekunder yang terdeteksi selanjutnya diperkuat sinyalnya dan besar amplitudonya

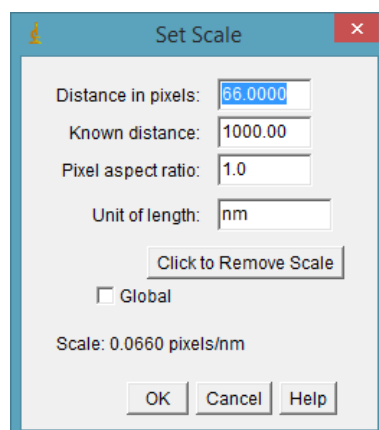
ditampilkan dalam gradasi gelap-terang pada layar monitor CRT (*cathode ray tube*). Gambar struktur objek yang sudah diperbesar pada bisa dilihat pada layar CRT. Hasil Gambar tersebut juga dapat digunakan untuk menentukan distribusi ukuran diameter serat nano silika dengan memanfaatkan perangkat lunak ImageJ. Proses analisis ukuran serat nano silika dengan perangkat lunak ImageJ dilakukan dengan langkah-langkah berikut ini.

1. Membuka perangkat lunak ImageJ dengan tampilan seperti pada Gambar 3.6.



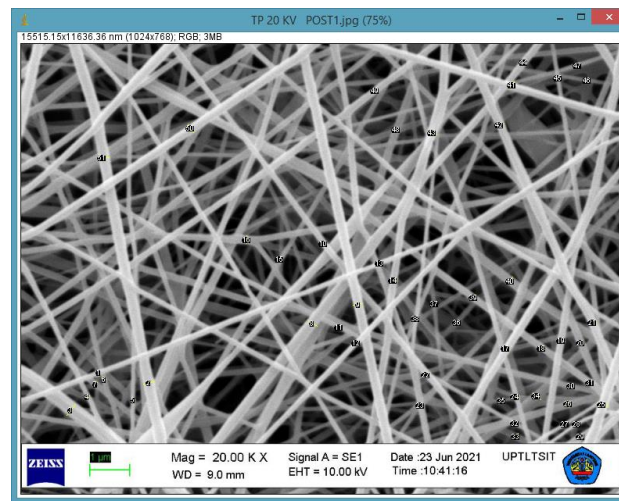
Gambar 3.6 Tampilan awal ImageJ.

2. Lalu pilih gambar yang akan dianalisis. Pengaturan skala dilakukan dengan menarik garis *straight* pada garis skala bar, dan pada *Analyze - Set scale*, bagian *known distance* diisi dengan nilai skala dan *unit of length* dengan satuan yang tertera pada skala bar, seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Tampilan pengatur skala.

3. Setelah menentukan skala, selanjutnya adalah mengukur diameter serat nano dengan cara memilih *straight* pada posisi sampel yang akan diukur seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.8, dan hasil pengukuran akan ditampilkan pada kotak dialog *result* yang berisi nilai *mean*, *standart deviation* (SD), *min*, dan *max* seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.9.

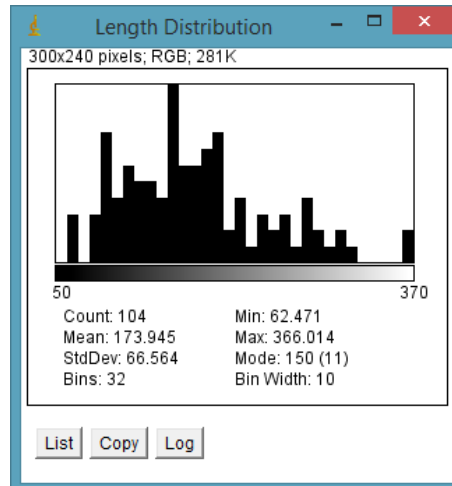


Gambar 3.8 Diameter serat yang telah diukur.

Label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
95	1836.547	74.893	65.333	81.000	0.000	111.111
96	2295.684	137.491	108.667	147.383	32.005	137.389
97	1377.410	116.411	94.000	127.400	-90.000	80.808
98	2066.116	146.099	81.333	165.528	-45.000	121.632
99	2754.821	120.925	61.333	138.788	-5.194	162.874
100	2525.253	87.632	69.222	95.311	-101.310	154.516
101 Mean	2862.718	148.757	109.981	165.257	-38.382	174.244
102 SD	964.339	39.907	38.374	44.066	56.000	63.147
103 Min	1147.842	57.947	22.000	63.000	-145.008	62.471
104 Max	5739.210	222.119	198.037	242.152	167.471	366.014

Gambar 3.9 Tampilan tabel *result*.

4. Grafik distribusi ukuran diameter partikel seperti pada Gambar 3.10 dapat dibuat dengan cara klik *Result – Distribution*.



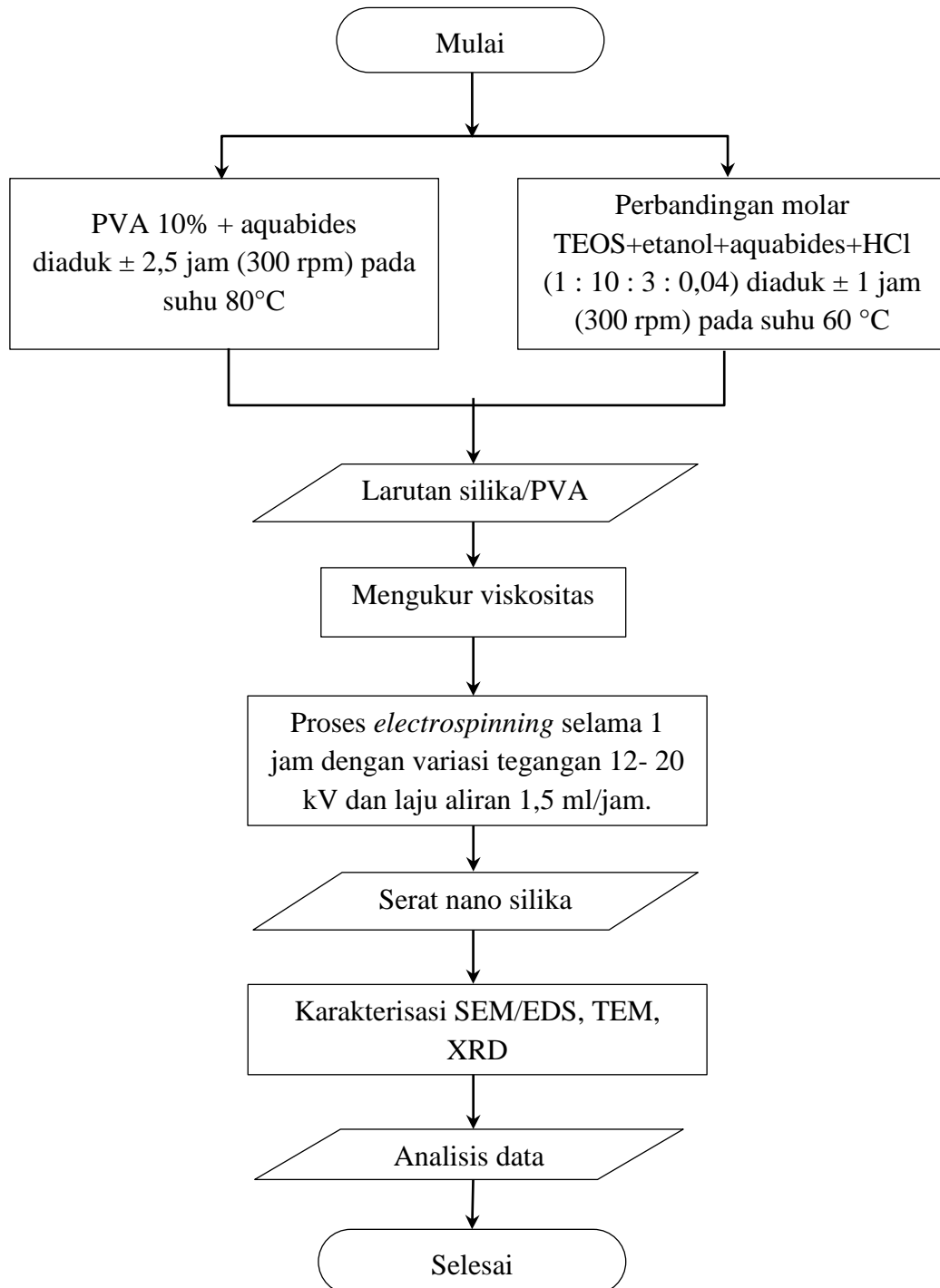
Gambar 3.10 Grafik distribusi ukuran diameter serat.

c. Komposisi Unsur Serat Nano Silika

Data yang didapatkan pada karakterisasi EDS berupa spektrum khas plot jumlah x-ray terhadap energi (dalam keV) yang menunjukkan puncak energi sesuai dengan berbagai elemen dalam sampel. Hal ini karena dipercaya bahwa elektron menempati orbit yang jelas dan pasti dalam gerakannya mengelilingi inti atom. EDS yang berupa pendeteksi ini digunakan untuk mengukur energi foton yang dipancarkan dalam spektrum elektromagnetik sinar-x selama proses SEM berlangsung. Sehingga didapat informasi spektrum energi yang terdeteksi setelah terpisah dari sinar-x. Informasi inilah yang digunakan untuk mendapatkan sebuah grafik untuk mengetahui unsur yang terdapat pada sampel.

D. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir pada penelitian ini disajikan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Diagram alir.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Larutan silika/PVA dengan viskositas sebesar 0,325 Pa.s dan tegangan permukaan (34 ± 4) dyn/cm berhasil membentuk serat nano silika dengan teknik *electrospinning* pada tegangan 12 - 20 kV dalam lingkungan sistem bersuhu (31 ± 2) °C dengan rentang diameter serat sebesar 60 - 150 nm.
2. Hasil FTIR menunjukkan bahwa pada sampel terbentuk gugus fungsi –OH, C-H, CH₂, C=O, Si-O, dan Si-O-Si yang menunjukkan terjadinya ikatan silang antara silika dan PVA.
3. Morfologi serat nano silika semakin kontinu dan manik-manik relatif lebih berkurang seiring bertambahnya tegangan *electrospinning*.
4. Diameter rata-rata serat nano silika mengalami peningkatan seiring bertambahnya tegangan *electrospinning* yang diberikan, dengan memperhatikan estimasi standar deviasi yang memiliki kecenderungan linier.
5. Hasil EDS menunjukkan adanya elemen C, O, dan Si yang mengkonfirmasi kehadiran ikatan silika dan PVA pada serat nano silika.

B. Saran

Saran yang dapat diterapkan untuk penelitian selanjutnya yaitu

1. Memvariasikan konsentrasi larutan polimer dan jarak antara ujung jarum dan kolektor yang diyakini dapat berpengaruh terhadap ukuran diameter serat (Demir *et al.*, 2002).
2. Proses *electrospinning* dilakukan pada tegangan ≥ 20 kV, yang pada penelitian ini diyakini dapat menghasilkan serat nano kontinu dan bebas manik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aghasiloo, P., Yousefzadeh, M., Latifi, M., & Jose, R. 2019. Highly Porous TiO₂ Nanofibers by Humid - Electrospinning with Enhanced Photocatalytic properties. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 790. Pp. 257 - 265.
- Ahn, Y. C., Park, S. K., Kim, G. T., Hwang, Y. J., Lee, C. G., Shin, H. S., & Lee, J. K. 2006. Development of High Efficiency Nanofilters Made of Nanofibers. *Current Applied Physics*. Vol. 6. No. 6. Pp. 1030 - 1035.
- Allen, M. R., Fuglestedt, J. S., Shine, K. P., Reisinger, A., Pierrehumbert, R. T., & Forster, P. M. 2016. New Use of Global Warming Potentials to Compare Cumulative and Short-Lived Climate Pollutants. *Nature Climate Change*. Vol. 6. No. 8. Pp. 773–776.
- Anonim A. 2020. *Nano*. Cambridge Dictionary. Diakses pada Selasa 1 Desember 2020, pukul 17.30 WIB dari dictionary.cambridge.org/dictionary/english/nano.
- Anonim B. 2021. *SEM - Scanning Electron Microscope Ato Z: Basic Knowledge for Using The SEM*. JEOL. Diakses pada 22 April 2021 di laman berikut: https://www.jeol.co.jp/en/applications/pdf/sm/sem_atoz_all.pdf . JEOL Ltd. Tokyo. Pp. 1-32.
- Anonim C. 2021. *PubChem Compound Summary for CID 24261, Silicon dioxide*. National Center for Biotechnology Information. Diakses pada 24 Februari 2021 dari <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Silicon-dioxide>.
- Anonim D. 2021. *PubChem Compound Summary for CID 11199, Polyvinyl Alcohol*. National Center for Biotechnology Information. Diakses pada 23 April 2021 dari <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Polyvinyl-alcohol>.
- Anonim E. 2021. *Silika Dioksida*. Wikipedia. Diakses pada 24 Februari 2021 dari https://id.wikipedia.org/wiki/Berkas:Sample_of_silicon_dioxide.jpg).
- Aravindan, V., Suresh Kumar, P., Sundaramurthy, J., Ling, W. C., Ramakrishna, S., & Madhavi, S. 2013. Electrospun NiO Nanofibers as High Performance Anode Material for Li-ion Batteries. *Journal of Power Sources*. Vol. 227. Pp. 284 – 290.

- Ashby, M. F., Ferreira, P. J., & Schodek, D. L. 2009. *Nanomaterial, Nanotechnologies and Design : An Introduction for Engineers and Architects*. Elsevier. Canada. Pp. 1 - 4.
- Avossa, J., Branda, F., Marulo, F., Petrone, G., Guido, S., Tomaiuolo, G., & Costanti, A. 2018. Light Electrospun Polyvinylpyrrolidone Blanket for Low Frequencies Sound Absorption. *Chinese Journal of Polymer Science*. Vol. 36. Pp. 1368 - 1374.
- Barhoum, A., Bechelany, M., & Makhlof, A.S.H. 2019. *Handbook of Nanofibers*. Springer. New York City. Pp. 1179 p.
- Beaumont, P. W. R., & Zweben, C. H. 2018. *Comprehensive Composite Materials II, Vol. 6*. Elsevier. London. 366 p.
- Bhat, N. V., Nate, M. M., Kurup, M. B., Bambole, V. A., & Sabharwal, S. 2005. Effect of γ -Radiation on The Structure and Morphology of Polyvinyl Alcohol Films. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. Vol. 237. No. 3 - 4. Pp. 585–592.
- Boonstra, A. H., & Bernards, T. N. M. 1988. The Dependence of The Gelation Time on The Hydrolysis Time in A Two-Step SiO₂ Sol-Gel Process. *Journal of Non-Crystalline Solids*. Vol. 105. No. 3. Pp. 207 - 213.
- Brinker, C. J., & Scherer, G. W. 1990. *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Academic Press, Inc. USA. 908 p.
- Brown, T. D., Dalton, P. D., & Hutmacher, D. W. 2016. Melt Electrospinning Today: An Opportune Time for an Emerging Polymer Process. *Progress in Polymer Science*. Vol. 56. Pp. 116 - 166.
- Bulatovic, S. M. 2015. *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice - Flotation of Industrial Mineral Volume 3*. Elsevier. UK. 222 p.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. 2009. *Materials Science and Engineering An Introduction, 8th Edition*. Jhon Wiley & Sons, Inc. Hoboken. New Jersey. 992 p.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. 2014. *Materials Science and Engineering An Introduction, 9th Edition*. Jhon Wiley & Sons, Inc. Hoboken. New Jersey. 990 p.
- Camuffo, D. 2014. *Microclimate for Cultural Heritage: Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments*. Elsevier B.V. Netherland. 560 p.
- Carneiro, M. E., Magalhães, W. L. E., Muñoz, G. I. B., Nisgoski, S. & Satyanarayana, K. G. 2015. Preparation and Characterization of Nano Silica from *Equisetum arvense*. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*. Vol. 5. No. 2. Pp. 1 - 7.

- Carvalho, A. J. F., Trovatti, E., & Casale, C. A. 2018. Polystyrene and Cellulose Nanofibril Composites: Fiber Dispersion Driven by Nanoemulsion Flocculation in The Presence of a Fiber or Nanofiber Suspension. *Journal of Molecular Liquids*. Vol. 272. Pp. 387 – 394.
- Chapman, R. A. 2010. *Applications of Nonwovens in Technical Textiles*. Woodhead Publishing Limited. New Delhi. 224 p.
- Chen, R., Zhang, X., Wang, P., Xie, K., Jian, J., Zhang, Y., Zhang, J., Yuan, Y., Na, P., Yi, M., & Xu, J. 2018. Transparent Thermoplastic Polyurethane Air Filters for Efficient Electrostatic Capture of Particulate Matter Pollutants. *Nanotechnology*. Vol. 30. No. 1. Pp. 15703 - 15710.
- Chen, Y., Fan, H., Zha, X., Wang, W., Wu, Y., Xiong, Y., Yan, K., Wang, Y., & Wang, D. 2021. Fabrication of Silica/PVA-Co-PE Nanofiber Membrane for Oil/Water Separation. *Fashion and Textiles*. Vol. 8. No. 1. Pp. 1 - 12.
- Cheng, H. N., Doemeny, L. J., Geraci, C. L., & Grob Schmidt, D. 2016. *Nanotechnology Overview: Opportunities and Challenges. Nanotechnology: Delivering on The Promise Volume 1*. American Chemical Society. Wasington. Pp. 1 - 12.
- Choi, S. S., Lee, S.G., Im, S. S., Kim, S. H., & Joo, Y. L. 2003. Silica Nanofibers from Electrospinning/Sol-Gel Process. *Journal of Materials Science Letters*. Vol. 22. Pp. 891 - 893.
- Costa, J. A. S., & Paranhos, C. M. 2018. Systematic Evaluation of Amorphous Silica Production from Rice Husk Ashes. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 192. Pp. 688 - 697.
- Cooley, J. F. 1902. *Apparatus for Electrically Dispersing Fluids*. U.S. Patent 692,631 Issue date: February 4, 1902.
- Cui, L., Song, Y., Wang, F., Sheng, Y., & Zou, H. 2019. Electrospinning Synthesis of SiO₂-TiO₂ Hybrid Nanofibers with Large Surface Area and Excellent Photocatalytic Activity. *Applied Surface Science*. Vol. 488. Pp. 284 - 292.
- Dachriyanus. 2004. *Analisis Struktur Senyawa Organik Secara Spektroskopi*. LPTIK. Padang. 139 hlm.
- Deitzel, J. M., Kleinmeyer, J., Harris, D., & Tan, N. C. B. 2001. The Effect of Processing Variables on The Morphology of Electrospun Nanofibers and Textiles. *Polymer*. Vol. 42. No. 1. Pp. 261 - 272.
- Demir, M. M., Yilgor, I., Yilgor, E., & Erman, B. 2002. Electrospinning of Polyurethane Fibers. *Polyme*. Vol. 43. No. 11. Pp. 3303–3309.
- Devine, R. A. B. 1988. *The Physics and Technology of Amorphous SiO₂*. Plenum Press. New York. 579 hlm.

- Ding, B., Wang, X., & Yu, J. 2019. *Electrospinning: Nanofabrication and Applications*. Elsevier-Butterworth Heinemann. USA. 806 p.
- Doshi, J., & Reneker, D. H. 1995. Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers. *Journal of Electrostatics*. Vol. 35. No. 2 - 3. Pp. 151 - 160.
- Drexler, K. E. 1981. Molecular Engineering: An Approach to The Development of General Capabilities for Molecular Manipulation. *Proceedings National Academy Sciences*. Vol. 78. No. 9. Pp. 5275 - 5278.
- Drican, M., Yanilmaz, M., Fu, K., Yildiz, O., Kizil, H., Hu, Y., & Zhang, X. 2014. Carbon-Confined PVA - Derived Silicon/Silica/Carbon Nanofiber Composites as Anode for Lithium - Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. Vol. 161. No. 14. Pp. A2197 - A2203.
- Echlin, P. 2009. *Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer. UK. 330 p.
- Edelstein, A. S. & Cammarata, R. C. 1996. *Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications*. Institute of Physics Publishing Ltd. - Briston and Philadelphia. 618 p.
- Erizal & Rahayu. 1998. Karakterisasi Hidrogel Poli (Vinil Alkohol) (PVA) Hasil Polimerisasi radiasi. *Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi*. Pp. 137 - 144.
- Escoto, J. V. 2012. *Nanotechnology Science and Technology: Silica Nanoparticles Preparation, Properties, and Uses*. Nova Science Publishers, Inc. (Nova). New York. 288 p.
- Faccini, M., Vaquero, C., & Amantia, D. 2012. Development of Protective Clothing against Nanoparticle Based on Electrospun Nanofibers. *Journal of Nanomaterials*. Pp. 1 - 9.
- Faccini, M., Borja, G., Boerrigter, M., Morillo Martín, D., Martínez Crespiera, S., Vázquez-Campos, S., Aubouy, L., & Amantia, D. 2015. Electrospun Carbon Nanofiber Membranes for Filtration of Nanoparticles from Water. *Journal of Nanomaterials*. Pp. 1 - 9.
- Falk, G., Shinhe, G. P., Teixeira, L. B., Moraes, E. G., & de Oliveira, A. P. N. 2019. Synthesis of Silica Nanoparticles from Sugarcane Bagasse Ash and Nano-Silicon Via Magnesiothermic Reactions. *Ceramics International*. Vol. 45. Pp. 21618 - 21624.
- Fong, H., Chun, I., & Reneker, D. 1999. Beaded Nanofibers Formed during Electrospinning. *Polymer*. Vol. 40. No. 16. Pp. 4585 - 4592.
- Geltmeyer, J., Schueren, L. V. d., Goethals, F., Buysser, K. D. & Clerck, K. D. 2013. Optimum Sol Viscosity for Stable Electrospinning of Silica Nanofibers. *Journal Sol-Gel Technology*. Vol. 67. Pp. 188 - 195.

- Geltmeyer, J., De Roo, J., Van den Broeck, F., Martins, J. C., De Buysser, K., & De Clerck, K. 2015. The Influence of Tetraethoxysilane Sol Preparation on The Electrospinning of Silica Nanofibers. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. Vol. 77. No. 2. Pp. 453 - 462.
- Goldstein, J. I., Lyman, C. E., Newbury, D. E., Lifshin, E., Echlin, P., Sawyer, L. Joy, D. C, & Michael, J. R. 2003. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, Third Edition*. Kluwer Academic/Plenum Publishers. New York. 689 p.
- Goodship, V., & Jacobs, D. 2009. Polyvinyl Alcohol: Material, Processing, and Applications. *RAPRA Technology Review Reports*. Vol. 16. No. 12. Pp. 1 - 30.
- Goyal, R. K. 2018. *Nanomaterials and Nanocomposites Synthesis, Properties, Characterization Techniques and Applications*. Taylor and Francis Group. New York. 350 p.
- Griffiths, P. R., & Haseth, J. A. 2007. *Fourier Transform Infrared Spectrometry, Second Edition*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. 535 p.
- Haider, A., Haider, S., & Kang, I.-K. 2015. A Comprehensive Review Summarizing The Effect of Electrospinning Parameters and Potential Applications of Nanofibers in Biomedical and Biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*. Pp. 1 - 24.
- He, G., Cai, Y., Zhao, Y., Wang, X., Lai, C., Xi, M., Zhu, Z. & Fong, H. 2013. Electrospun Anatase - Phase TiO₂ Nanofibers with Different Morphological Structures and Specific Surface Areas. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 398. Pp. 103 - 111.
- Hekmati, A. H., Rashidi, A., Ghazisaeidi, R., & Drean, J. Y. 2013. Effect of Needle Length, Electrospinning Distance, and Solution Concentration on Morphological Properties of Polyamide-6 Electrospun Nanowebs. *Textile Research Journal*. Vol. 83. No. 14. Pp. 1452 - 1466.
- Hikmawati, D., Rohmadanik, A. R., Putra, A. P., Siswanto, & Aminatun. 2018. The Effect of Aloe Vera Extract Variation in Electrospun Polyvinyl Alcohol (PVA) - Aloe vera - Based Nanofiber Membrane. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1120. Pp. 1 - 8.
- Hutchings Jr, E. 1960. *Engineering and Science Magazine Volume XXIII Number 5*. California Institute of Technology. California. Pp. 22 - 36.
- Iler, R. K. 1978. *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid, and Surface Properties and Biochemistry*. John Wiley & Sons. New York. 896 p.
- Jong, W. D., Bridges, J., Dawson, K., Jung, T., & Proykova, A., 2010. *Scientific Basis for the Definition of The Term "Nanomaterial"*. European Commission. Belgia. 43 p.

- Kaleekkal, N. J., Radhakrishnan, R., Sunil, V., Kamalanathan, G., Sengupta, A., & Wickramasinghe, R. 2018. Performance Evaluation of Novel Nanostructured Modified Mesoporous Silica/Polyetherimide Composite Membranes for The Treatment of Oil/Water Emulsion. *Separation and Purification Technology*. Vol. 205. Pp. 32 - 47.
- Kausar, A. 2020. Innovations in Poly(Vinyl Alcohol) Derived Nanomaterials. *Advances in Materials Science*. Vol. 20. No. 3. Pp. 5 - 22.
- Kaya, G. G., Yilmaz, E., & Deveci, H. 2018. Sustainable Nanocomposites of Epoxy and Silica Xerogel Synthesized from Corn Stalk Ash: Enhanced Thermal and Acoustic Insulation Performance. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 150. Pp. 1 - 6.
- Kizildag, N., Beceren, Y., Kazanci, M., & Cukul, D. 2012. Effect of Needle Diameter on Diameter of Electrospun Silk Fibroin Nanofibers. *RMUTP International Conference: Textiles & Fashion*. Pp. 1 - 7.
- Kim, G. T., Lee, J. S., Shin, J. H., Ahn, Y. C., Hwang, Y. J., Shin, H. S., Lee, J. K., & Sung, C. M. 2005. Investigation of Pore Formation for Polystyrene Electrospun Fiber: Effect of Relative Humidity. *Korean Journal of Chemical Engineering*. Vol. 22. Pp. 783 - 788.
- Kim, S., Park, H., & Choi, H. 2019. Maneuvering The Ordered Mesoporosity of Electrospun Silica Nanofibers for Water Harvesting. *Microporous and Mesoporous Materials*. Vol. 281. Pp. 23 - 31.
- Kim, S., Park, H., & Choi, H. 2019. Maneuvering The Ordered Mesoporosity of Electrospun Silica Nanofibers for Water Harvesting. *Microporous and Mesoporous Materials*. Vol. 281. Pp. 23 - 31.
- Ko, F. K., & Wan, Y. 2014. *Introduction to Nanofiber Materials*. Cambridge University Press. New York. 279 p.
- Kuptsov, A. H., & Zhizhin, G. N. 1998. *Handbook of Fourier Transform Raman and Infrared Spectra of Polymers*. Elsevier. The Netherlands. 535 p.
- Latif, C., Triwikantoro, & Munasir. 2014. Pengaruh Variasi Temperatur Kalsinasi pada Struktur Nanosilika. *Jurnal Sains dan Seni POMITS*. Vol. 3. No. 1. Hal. 4 - 7.
- Lavoratti, A., Scienza, L. C., & Zattera, A. J. 2016. Dynamic - Mechanical and Thermomechanical Properties of Cellulose Nanofiber/Polyester Resin Composites. *Carbohydrate Polymers*. Vol. 136. Pp. 955 - 963.
- Levy, D., & Zayat, M. 2015. *The Sol-Gel Handbook: Synthesis, Characterizations, and Applications, Vol. 1*. Wiley-VCH verlag GmbH & Co. KGaA. Jerman. 1508 p.
- Li, Z., & Wang, C. 2013. *One-dimensional nanostructures electrospinning technique and unique nanofibers*. Springer. London. 141 p.

- Lin, T. 2018. *Novel Aspects of Nanofibers*. IntechOpen. London. 160 p.
- Lou, F., Zhou, H., Vullum-Bruer, F., Tran, T. D., & Chen, D. 2013. Synthesis of Carbon Nanofibers at MnO₂ 3D Structures Over Copper Foil as Binder Free Anodes for Lithium Ion Batteries. *Journal of Energy Chemistry*. Vol. 22. No. 1. Pp. 78 - 86.
- Mahmoodi, N. M., Mokhtari - Shourijeh, Z., Langari, S., Naeimi, A., Hayatti, B., Jalili, M., & Seifpanahi - Shabani, K. 2020. Silica Aerogel/Polyacrylonitrile/Polyvinylidene Fluoride Nanofiber and Its Ability for Treatment of Colored Wastewater. *Journal of Molecular Structure*. Vol 1227. Pp. 129418.
- Matyjaszewski, K., & Möller, M. 2012. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. Elsevier. Netherland. 871 p.
- Mirjalili, M., & Zohoori, S. 2016. Review for Application of Electrospinning and Electrospun Nanofibers Technology in Textile Industry. *Journal of Nanostructure in Chemistry*. Vol. 6. No. 3. Pp. 207 - 213.
- Mourhly, A., Khachani, M., Hamidi, A. E., Kacimi, M., Halim, M., & Arsalane, S. 2015. The Synthesis and Characterization of Low-Cost Mesoporous Silica SiO₂ from Local Pumice Rock. *Nanomaterials and Nanotechnology*. Vol. 5. No. 35. Pp. 1 - 7.
- Morton, W.J. 1902. *Method of Dispersing Fluids*. U.S. Patent 0,705,691 Issue date: July 29, 1902.
- Nayak, R. & Padhye, R. 2017. Nanofibers by Electrospinning, Properties and Applications. *Journal Textile Engineering Fashion Technology*. Vol. 2. No. 5. Pp. 486 - 497.
- Nolan, D. P. 2017. *Fire Pump Arrangement at Industrial Facilities, Third Edition*. Gulp Professional Publishing - Elsevier. UK. 256 p.
- Pal, K., & Gomes, F. 2020. *Nanofabrication for Smart Nanosensor Applications*. Elsevier. UK. 451 p.
- Parsaee, Z. 2018. Electrospun Nanofibers Decorated with Bio-Sonochemically Synthesized Gold Nanoparticles as An Ultrasensitive Probe in Amalgam-Based Mercury (II) Detection System. *Ultrasonics Sonochemistry*. Vol. 44. Pp. 24 - 35.
- Partington, J. R. 1951. *An Advanced Treatise on Physical Chemistry Vol. 2: The Properties of Liquids*. Longmans-Green and Co. London. 448 p.
- Pierre, A.C. 1988. *Introduction to Sol-Gel Processing*. Springer Science + Business Media, LLC. NewYork. 701 p.
- Pirzada, T., Arvidson, S. A., Saquing, C. D., Shah, S. S., & Khan, S. A. 2012. Hybrid Silica-PVA Nanofibers via Sol-Gel Electrospinning. *Langmuir*. Vol. 28. No. 13. Pp. 5834 - 5844.

- Pirzada, T., & Shah, S. S. 2014. Water-Resistant Poly(Vinyl Alcohol)-Silica Hybrids through Sol-Gel Processing. *Chemical Engineering & Technology*. Vol. 37. No. 4. Pp. 620–626.
- Qing, W., Li, X., Wu, Y., Shao, S., Guo, H., Yao, Z., Chen, Y., Zhang, W., & Tang, C. Y. 2020. In Situ Silica Growth for Superhydrophilic-Underwater Superoleophobic Silica/PVA Nanofibrous Membrane for Gravity-Driven Oil-in-Water Emulsion Separation. *Journal of Membrane Science*. Vol. 612. No. 118476. Pp. 1 - 8.
- Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W. E., Lim, T. C., & Ma, Z. 2005. *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore. 396 p.
- Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W. E., Yong, T., Ma, Z., & Ramaseshan, R. 2006. Electrospun Nanofibers: Solving Global Issues. *Materials Today*. Vol. 9. No. 3. Pp. 40 - 50.
- Raza, M. A., Islam, A., Sabir, A., Gull, N., Ali, I., Mehmood, R., Bae, J., Hassan, G., & Khan, M. U. 2019. PVA/TEOS Crosslinked Membranes Incorporating Zinc Oxide Nanoparticles and Sodium Alginate to Improve Reverse Osmosis Performance for Desalination. *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. 136. No. 22. Pp. 47559 (1 - 10).
- Ripple, W. J., Smith, P., Haberl, H., Montzka, S. A., McAlpine, C., & Boucher, D. H. 2014. Ruminants, Climate Change and Climate Policy. *Nature Climate Change*. Vol. 4. No. 1. Pp. 2 - 5.
- Rovani, S., Santos, J. J., Corio, P., & Fungaro, D. A. 2018. Highly Pure Silica Nanoparticles with High Adsorption Capacity Obtained from Sugarcane Waste Ash. *ACS Omega*. Vol. 3. No. 3. Pp. 2618 - 2627.
- Sarikaya, M., Depci, T., Aydogmus, R., & Yucel, A. 2016. Production of Nano Amorphous SiO₂ from Malatya Pyrophyllite. *Earth and Environmental Science*. Vol. 44. No.5. Pp. 1 - 5.
- Sasipriya, K., Suriyaprabha, R., Prabu, P., & Rajendran, V. 2013. Synthesis and Characterisation of Polymeric Nanofibers Poly(Vinyl Alcohol) and Poly(Vinyl Alcohol)/Silica Using Indigenous Electrospinning Set Up. *Materials Research*. Vol. 16. No. 4. Pp. 824 - 830.
- Seaton A., Addison J., Davis J. M. G., Hurley J. F., McGovern B., & Miller B. G. 1987. *Historical Research Report*. Institute of Occupational Medicine. Edinburgh. 128 p.
- Serbezeanu, D., Popa, A. M., Sava, I., Carja, I.-D., Amberg, M., Rossi, R. M., & Fortunato, G. 2015. Design and Synthesis of Polyimide Gold Nanofibers with Tunable Optical Properties. *European Polymer Journal*. Vol. 64. Pp. 10 - 20.

- Shahhosseininia, M., Bazgir, S., & Joupari, M. D. 2018. Fabrication and Investigation of Silica Nanofibers via Electrospinning. *Materials Science and Engineering: C*. Vol. 91. Pp. 502 – 511.
- Shao, C., Kim, H.Y., Gong, J., Ding, B., Lee, D. R., & Park, S.J. 2003. Fiber Mats of Poly(Vinyl Alcohol)/Silica Composite Via Electrospinning. *Materials Letters*. Vol. 57. No. 9 - 10. Pp. 1579 - 1584.
- Smith, B. C. 2011. *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Second Edition*. CRC Press - Taylor & Francis Group. New York. 207 p.
- Speight, J. G. 2020. *Natural Water Remediation*. Butterworth-Heinemann. UK. 380 p.
- Subramani, K., & Ahmed, W. 2018. *Emerging Nanotechnologies in Dentistry, Second Edition*. Elsevier. United States. 469 p.
- Sundarrajan, S., Tan, K. L., Lim, S. H., & Ramakrishna, S. 2014. Electrospun Nanofibers for Air Filtration Applications. *Procedia Engineering*. Vol. 75. Pp. 159 - 163.
- Tepekiran, B. N., Calisir, M. D., Polat, Y., Akgul, Y., & Kilic, A. 2019. Centrifugally Spun Silica (SiO₂) Nanofibers for High - Temperature Air Filtration. *Aerosol Science and Technology*. Vol. 53. No. 8. Pp. 921 - 932.
- Tiwari, A., Rawlins, J., & Hihara, L.H. 2014. *Intelligent Coatings for Corrosion Control*. Elsevier. UK. 728 p.
- Tungprapa, S., Puangparn, T., Weerasombut, M., Jangchud, I., Fakum, P., Semongkhon, S., Meechaisue, C., & Supaphol, P. 2007. Electrospun Cellulose Acetate Fibers: Effect of Solvent System on Morphology and Fiber Diameter. *Cellulose*. Vol. 14. No. 6. Pp. 563 - 575.
- Turova, N. Y., Turevskaya, E. P., Kessler, V. G., & Yanovskaya, M. I. 2002. *The Chemistry of Metal Alkoxides*. Kluwer Academic Publisher. USA. 568 p.
- Ugur, M. H., Oktay, B., Gungor, A., & Kayaman - Apohan, N. 2018. Highly Thermally Resistant, Hydrophobic Poly(Vinyl Alcohol) – Silica Hybrid Nanofibers. *Journal of Serbian Chemical Society*. Vol 83. No.7 - 8. Pp. 885 - 897.
- Ul-Hamid, A. 2018. *A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy*. Springer. Switzerland. 402 p.
- Vansant, E. F., Van Der Voort, P., & Vrancken, K. C. 1995. *Characterization and Chemical Modification of the Silica Surface*. Elsevier. The Netherlands. 556 p.
- Venkatathri, N. 2007. Synthesis of Silica Nanosphere from Homogeneous and Heterogeneous Systems. *Bull Matter*. Vol. 30. No. 6. Pp. 615 - 617.

- Vinh, N., & Kim, H. M. 2016. Electrospinning Fabrication and Performance Evaluation of Polyacrylonitrile Nanofiber for Air Filter Applications. *Applied Sciences*. Vol. 6. No. 9. Pp. 235 - 245.
- Viswanath, D. S., Ghosh, T. K., Prasad, D. H. L., Dutt, N. V. K., & Rani, K. Y. 2007. *Viscosity of Liquids: Theory, Estimation, Experiment, and Data*. Springer. Netherland. 662 p.
- Wang, N., Si, Y., Wang, N., Sun, G., El-Newehy, M., Al-Deyab, S. S., & Ding, B. 2014. Multilevel Structured Polyacrylonitrile/Silica Nanofibrous Membranes for High-Performance Air Filtration. *Separation and Purification Technology*. Vol. 126. Pp. 44 - 51.
- Wang, X., Drew, C., Lee, S.-H., Senecal, K., Kumar, J., & Samuelson, L. 2002. Electrospinning Technology: A Novel Approach to Sensor Application. *Journal of Macromolecular Science - Part A1*. Vol. 39. No. 10. Pp. 1251 - 1258.
- West, J. J., Smith, S. J., Silva, R. A., Naik, V., Zhang, Y., Adelman, Z., Fry, M. M., Anenberg, S., Horowitz, L. W., & Lamarque, J. F. 2013. Co-Benefits of Mitigating Global Greenhouse Gas Emissions for Future Air Quality and Human Health. *Nature Climate Change*. Vol. 3. No. 10. Pp. 885 - 889.
- Worsfold, P., Townshend, A., & Poole, C. 2005. Encyclopedia of Analytical Science, 2nd Edition: Archaeometry and Antique Analysis - Metallic And Ceramic Objects by L.T. Gibson. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Elsevier. UK. 5000 p.
- Wright, W. P., & Ferrer, P. 2015. Electric Micropropulsion Systems. *Progress in Aerospace Sciences*. Vol. 74. Pp. 48 - 61.
- Wu, S., Li, F., Wu, Y., Xu, R., & Li, G. 2010. Preparation of Novel Poly(Vinyl Alcohol)/SiO₂ Composite Nanofiber Membranes with Mesostructure and Their Application for Removal of Cu²⁺ from Waste Water. *Chemical Communications*. Vol. 46. No. 10. Pp. 1694 - 1696.
- Xue, J., Wu, T., Dai, Y., & Xia, Y. 2019. Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications. *Chemical Reviews*. Vol. 119. No. 8. Pp. 5298 - 5415.
- Zhang, C., Yuan, X., Wu, L., Han, Y., & Sheng, J. 2005. Study on Morphology of Electrospun Poly(Vinyl Alcohol) Mats. *European Polymer Journal*. No. 41(3), 423–432. doi:10.1016/j.eurpolymj.2004
- Zhang, C., Li, Y., Wang, P., & Zhang, H. 2020. Electrospinning of Nanofibers: Potentials and Perspectives for Active Food Packaging. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Vol. 19. Pp. 479 - 502.