

TINJAUAN TENTANG TEKNOLOGI *ELECTROSPINNING* PADA PROSES PEMBUATAN SERAT *NANOFIBERS*

Oleh :
Muhammad Ichwan dan Bambang Riyadi Irawan
Staf Pengajar Sekolah Tinggi Teknologi Tekstil

ABSTRACT

Electrospinning has been recognized as an efficient technique for the fabrication of polymer nanofibers. Various polymers have been successfully electrospun into ultrafine fibers in recent years mostly in solvent solution and some in melt form. Potential applications based on such fibers specifically their use as reinforcement in nanocomposite development have been realized. In this paper, a review is presented on the researches and developments related to electrospun polymer nanofibers including processing and applications. Information of those polymers together with their processing conditions for electrospinning of ultrafine fibers has been summarized in the paper. Other issues regarding the technology limitations, research challenges, and future trends are also discussed.

INTISARI

Electrospinning telah diakui sebagai teknik yang efisien untuk pembuatan nanofiber polimer. Berbagai jenis polimer telah berhasil dipintal dengan teknik ini menjadi serat *ultrafine* dalam beberapa tahun terakhir, sebagian besar dalam larutan pelarut dan beberapa dalam bentuk lelehan. Potensi aplikasi *nanofiber* khususnya digunakan sebagai penguat dalam pengembangan nanokomposit telah terwujud. Dalam tulisan ini, tinjauan disajikan pada penelitian dan pengembangan yang berkaitan dengan *nanofiber electrospun* polimer termasuk pengolahan dan aplikasinya. Informasi tentang polimer beserta kondisi proses untuk *electrospinning* serat *ultrafine* telah disajikan dalam paper ini. Isu-isu lain mengenai keterbatasan dalam hal teknologi, tantangan penelitian serta tren masa depan juga dibahas.

1. Pendahuluan

Diameter polimer bila diperkecil dari ukuran mikrometer (10–100 μm) ke ukuran nano meter (10×10^{-3} – $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}$), memunculkan beberapa karakter yang mengagumkan seperti luas permukaan yang sangat besar dibandingkan volum (untuk *nanofiber* perbandingan ini mencapai 10^3 kali dari *microfiber*), sifat permukaan bahan dapat diatur sesuai fungsi yang diinginkan, serta menghasilkan sifat mekanik yang unggul (seperti kekakuan, kekuatan tarik) dibandingkan jenis material yang telah dikenal selama ini. Sifat yang luar biasa tersebut membuat polimer *nanofiber* menjadi pilihan terbaik untuk berbagai aplikasi bahan yang penting. Beberapa teknik untuk menghasilkan polimer *nanofiber* selain dari *electrospinning* telah dikembangkan diantaranya teknik *drawing* (Ondarcuhu et al., 1998), *template synthesis* (Feng L et al., 2002; Martin

CR,1996), *phase separation* (Ma PX et al.,1999) dan *self assembly* (Liu GJ et al.,1999;Whitesides GM et al.,2002). Teknik *drawing* hampir sama dengan dengan proses pemintalan kering, hanya polimer yang memiliki sifat viscoelastik yang mampu menahan deformasi akibat *stress* dan penarikan sambil tetap mempertahankan gaya kohesi polimernya saja yang dapat diproses dengan teknik ini. Pada teknik *template synthesis*, diperlukan *nanoporous* membran sebagai templat guna menghasilkan *nanofiber*, kelemahan teknik ini adalah tidak dapat menghasilkan filamen serat yang kontinyu. Teknik *phase separation* meliputi proses pelarutan, pembuatan jel, ekstraksi dengan pelarut, pembekuan dan pengeringan yang menghasilkan material busa yang berpori nano, proses ini memerlukan tahapan dan waktu yang lama. *Self-assembly* adalah proses dimana secara individu, komponen yang telah disiapkan sebelumnya akan mengatur diri dengan sendirinya ke fungsi dan pola yang diinginkan, proses ini juga sangat memakan waktu untuk menghasilkan polimer nanofiber yang kontinyu. Oleh karena itu teknik *electrospinning* dianggap sebagai teknik yang paling cocok untuk dikembangkan untuk menghasilkan produk masal filamen *nanofiber* dari berbagai jenis polimer.

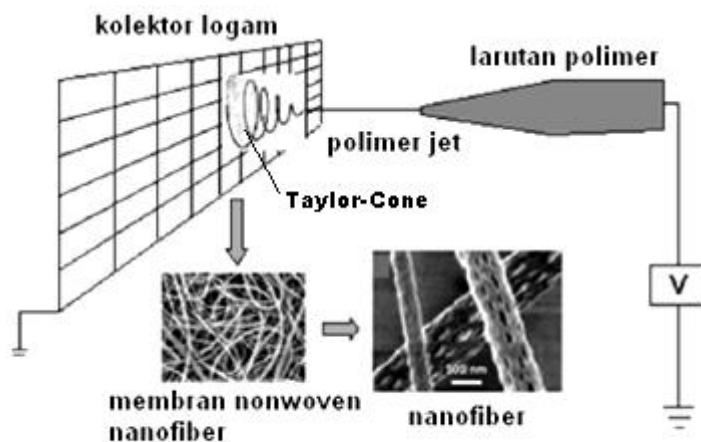
Istilah *Electrospinning* berasal dari *electrostatic spinning* yang digunakan sejak tahun 1994, namun ide ini sudah ada sejak 60 tahun sebelumnya tepatnya pada tahun 1934, Formhals mempublikasikan beberapa patent hasil eksperimennya yang memproduksi polimer filamen menggunakan gaya elektrostatis (Formhals A,1934). Filamen terbentuk dari larutan diantara dua elektroda yang muatannya berlawanan, satu elektroda ditempatkan ke dalam larutan sedangkan elektroda yang lain ditempatkan pada kolektor filamen. Filamen terbentuk setelah larutan disemprotkan melalui lubang spinneret, larutan yang bermuatan keluar dengan kecepatan tinggi seperti jet, pelarutnya menguap sehingga terbentuk serat pada kolektor. Kondisi proses yang mempengaruhi hasil pemintalan yaitu perbedaan potensial (besarnya tergantung dari sifat dari larutan polimer seperti berat molekul dan viskositas), serta jarak antara spinneret dan kolektor (apabila jarak kurang jauh mengakibatkan filamen akan menempel pada kolektor maupun antar filament karena pelarutnya belum menguap seluruhnya).

2. Pokok bahasan

2.1. Proses

2.1.1 Aspek Fundamental

Suatu skema yang menjelaskan proses *electrospinning* polimer nanofiber ditunjukkan oleh gambar 1 berikut:



Gambar 1. Skema proses electrospinning [4]

Proses *electrospinning* memerlukan minimal tiga komponen yaitu : Sumber listrik bertegangan tinggi, tabung kapiler dengan pipet atau jarum dengan lubang halus (spinneret), dan dinding atau layar kolektor logam. Tegangan tinggi diperlukan untuk menghasilkan semprotan jet dari polimer yang bermuatan listrik yang keluar dari spinneret, sebelum mencapai dinding kolektor, pelarut yang ada pada polimer menguap sehingga polimer menjadi padat dan terkumpul pada dinding kolektor sebagai web yang terbentuk dari serat nano yang saling terhubung (Deitzel JM et al., 2001; Feng L et al., 2002). Elektroda pertama ditempatkan pada larutan polimer dan elektroda kedua pada dinding kolektor logam yang umumnya di-ground. Muatan listrik yang ditujukan ke bagian ujung dari tabung kapiler/spinneret yang berisi larutan polimer menghasilkan larutan polimer yang bermuatan listrik di permukaannya. Gaya tolak menolak dari muatan listrik sejenis dan kontraksi dari muatan listrik di permukaan pada elektroda menyebabkan gaya yang berlawanan dengan gaya tegangan permukaan (Feng L et al., 2002). Saat muatan listrik bertambah, larutan polimer pada ujung tabung kapiler yang awalnya berbentuk lonjong akan memanjang membentuk kerucut yang dikenal sebagai Taylor-cone. Dengan bertambahnya muatan listrik lebih lanjut hingga mencapai nilai kritis menyebabkan gaya tolak menolak mengatasi gaya tegangan permukaan larutan polimer sehingga menimbulkan semprotan jet yang berasal dari ujung Taylor-cone (Taylor GI, 1969). Larutan polimer ini mengalami ketidakstabilan dan proses pertambahan panjang yang memungkinkan jet ini menjadi sangat panjang dan halus, sementara itu pelarut polimer menguap menyisakan serat yang bermuatan. Pada proses yang menggunakan polimer yang dilelehkan, semprotan jet menjadi padat ketika berjalan dari ujung spinneret menuju dinding kolektor. Sampai sejauh ini dari beberapa literatur telah diketahui ada sekitar lima puluh jenis polimer nanofiber telah dihasilkan dari proses *electrospinning* dengan diameter berkisar antara kurang dari 3 nm hingga lebih dari 1 μm . Umumnya polimer dilarutkan dengan suatu pelarut sebelum proses *electrospinning*. Proses pelarutan dan pemintalan berlangsung pada suhu

kamar dan tekanan normal. Larutan polimer ini kemudian dimasukkan ke tabung kapilier ber-spinneret untuk siap dipintal, kemudian suatu sumber arus DC mengalirkan muatan listrik dengan tegangan hingga beberapa puluh kV untuk proses *electrospinning*. Tabel 1 merangkum jenis polimer dan pelarut yang digunakan untuk menghasilkan polimer nanofiber dengan metoda *electrospinning*, sedangkan Tabel 2 merangkum beberapa jenis polimer yang dilelehkan sebelum melalui proses *electrospinning*. Dibanding proses *electrospinning* untuk larutan polimer, proses ini membutuhkan kondisi ruang yang vakum (Larrondo et al.,1981).

Tabel 1. Polimer yang dipintal dengan *electrospinning* dalam bentuk larutan (Schreuder et al.,2002;Jin HJ et al.,2002)

No	Polimer	Pelarut	Konsentrasi	Aplikasi
1	Nilon 6,6,	Asam Formiat	10 wt.%	Pakaian pelindung
2	Poliuretan (PU)	Dimetil Formamid Dimetil Formamid	10 wt.% 10 wt.%	Pakaian pelindung
3	Poliakrilonitril (PAN)	Dimetil Formamid 600	156 mg PAN/10- 5 m ³	Filter elektrik
4	Asam Polilaktat, (PLA) Mw =109,000	poli(d, l-asam laktat)	Dimetil Formamid Dimetil Formamid	Membran
5	Polivinil Alkohol, (PVA) Mn=65,000	Air distilasi		Penyembuh luka
6	Kolagen-Polietilene Oksida (PEO) Kolagen murni, MW 900 kD	HCl	8–16 wt.% 1–2 wt%	Penyembuh luka, rekayasa tisu
7	Polianilin (PANI) /Polietilen Oksida (PEO), PANI: Mw=120,000 Da, PEO: Mw=900,000 Da,	Pan/HCSA /PEO: 11–50	Kloroform 2–4 wt. %	Serat konduktif
8	Sutera			
9	Polietilen Oksida (PEO) Mw=1,000,000	Asam Formiat Air distilasi:Etanol (3:2)	0.8–16.2 wt.% 4 wt. %	Implan Kawat penghubung pada mikroelektronika

Tabel 2. Polimer yang dipintal dengan *electrospinning* dalam bentuk lelehan (Rangkupan R et al.,2001)

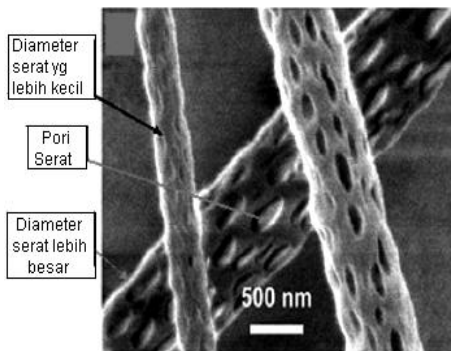
No.	Polimer	Spesifikasi material	Suhu Proses ($^{\circ}\text{C}$)
1	Polietilen, PE	HDPE, $M_w=1.35 \times 10^5$	200–220
2	Polipropilen, PP	Isotactic-PP, $MI=0.5$	220–240
3	Nilon 12, PA-12	$M_w=3.5 \times 10^4$	220
4	Polietilen tereftalat, PET	$M_w=4.6 \times 10^4$	270
5,	Polietilen naftalat, PEN	PEN $M_w=4.8 \times 10^4$	290
6	PET/PEN blends	75/25, 25/75 (wt.%),	290

2.1.2. Parameter Proses

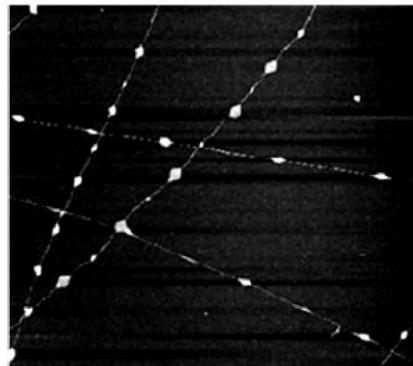
Beberapa parameter proses yang dapat mempengaruhi terbentuknya nanofiber pada proses *electrospinning* adalah :(a) Sifat larutan polimer seperti viskositas, elastisitas, konduktivitas, dan tegangan permukaan, (b) variabel alat : tekanan hidrostatik dari tabung kapilier, potensial listrik pada ujung spinneret, jarak antara ujung tabung kapiler/spinneret dengan dinding kolektor, (c) parameter ambien : suhu larutan, kelembaban ruang, kecepatan aliran udara di ruang *electrospinning* (Doshi J et al.,1995).

Hasil yang diharapkan pada proses *electrospinning* adalah : (1) diameter serat yang dihasilkan konsisten dan dapat dikontrol, (2) Permukaan serat bebas dari cacat/ cacat dapat dikontrol, (3) Filamen serat tunggal dapat dikumpulkan, diantara ketiga target tersebut diameter serat menjadi target utama dari proses *electrospinning*. Pembentukan serat nano terjadi akibat penguapan pelarut yang digunakan saat serat keluar dari spinneret menuju kolektor, maka diameter serat akan sangat dipengaruhi oleh ukuran dari semprotan jet dan konsentrasi polimer pada jet. Saat semprotan jet keluar dari spinneret menuju dinding kolektor, semprotan jet ini bisa tunggal atau terpecah menjadi semprotan jet yang lebih halus sehingga dihasilkan diameter serat yang berbeda-beda (Deitzel JM et al.,2001). Sepanjang semprotan jet dapat dijaga tidak terpecah, maka faktor yang paling berpengaruh terhadap diameter serat adalah viskositas larutan. Semakin tinggi konsentrasi polimer dalam larutan, maka akan semakin tinggi pula viskositas larutan sehingga menghasilkan serat dengan diameter yang lebih besar. Hal ini didukung oleh hasil penelitian yang menyatakan diameter serat bertambah dengan bertambahnya konsentrasi polimer, mengikuti

hukum kekuatan dan proposional terhadap pangkat tiga dari konsentrasi polimer.(Deitzel et al.,2001;Demir et al.,2002)



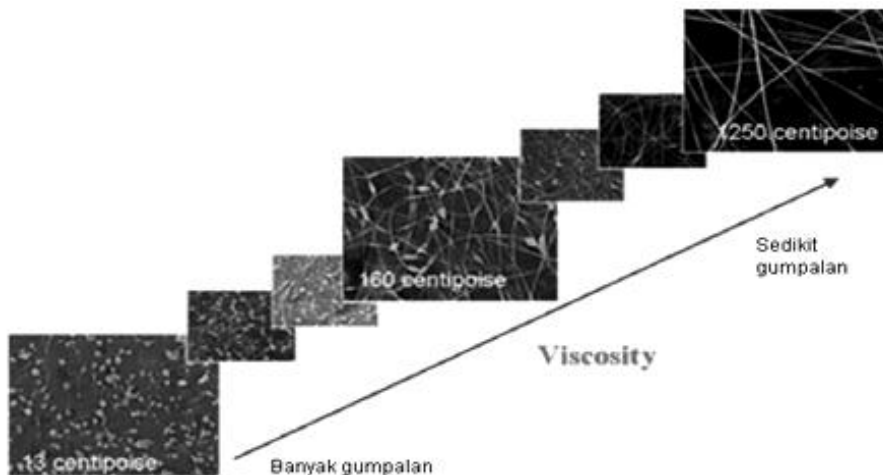
Gambar 2. PLLA nanofiber dengan variasi diameter serat dan porositi



Gambar 3. Photo hasil AFM dari PEO nanofiber yang memiliki gumpalan di sepanjang serat (beads)

Faktor lain yang sangat berpengaruh terhadap diameter serat adalah besarnya tegangan listrik yang digunakan, secara umum semakin besar tegangan listrik yang digunakan akan menyebabkan semakin banyak larutan polimer yang disemprotkan mengakibatkan semakin besarnya diameter serat. Masalah yang sering terjadi pada *electrospinning* adalah diameter serat sering tidak seragam, hal ini masih belum dapat diatasi, namun ada suatu pendekatan yang dilakukan Demir et al., 2002 yang melakukan *electrospinning* poliuretan pada suhu 70°C diperoleh diameter serat yang lebih seragam dibandingkan proses pada suhu kamar. Perlu dicatat bahwa viskositas dari larutan poliuretan dengan konsentrasi yang sama pada suhu tinggi jauh lebih rendah dibanding pada suhu kamar. Masalah lain yang dihadapi pada *electrospinning* adalah cacat berupa gumpalan/*beads* seperti pada gambar 3 dan pori serat seperti gambar 2 diatas. Salah satu penyebab munculnya gumpalan ini adalah konsentrasi polimer, Fang H et al.,2001 melaporkan bahwa pada konsentrasi yang lebih tinggi menghasilkan serat dengan gumpalan lebih sedikit. Pada percobaan dengan polimer *Polyethylene oxide* (PEO) menggunakan konsentrasi rendah sampai tinggi; 1%-4.5%, diperoleh hasil viskositas dari 13 cPs-1250 cPs, foto SEM pada gambar 4 menunjukkan gumpalan bulat timbul pada konsentrasi rendah dan berubah menjadi gumpalan lonjong dan akhirnya menghilang pada konsentrasi yang lebih tinggi. Doshi et al.,1995, menjelaskan bahwa dengan menurunkan tegangan permukaan larutan didapat serat nano tanpa gumpalan, namun perlu diperhatikan bahwa tidak selalu larutan dengan tegangan permukaan yang rendah lebih cocok untuk proses *electrospinning*. Feng L et al.,2002, dalam eksperimennya menggunakan dua macam pelarut yaitu aseton dan *dimethylacetamide* (DMAc) untuk melarutkan selulosa asetat. Aseton dengan tegangan permukaan 23,7 dyne/cm lebih rendah dari DMAc 34,7 dyne/cm, dimana penggunaan pelarut DMAc hanya menghasilkan gumpalan tanpa serat sedangkan pemakaian aseton pada selulosa asetat 5-8% menghasilkan serat

yang pendek dan gumpalan. Namun bila pelarut merupakan campuran aceton : DMAc dengan rasio 2 : 1 dapat menghasilkan serat nano tanpa gumpalan pada konsentrasi 15-25%.

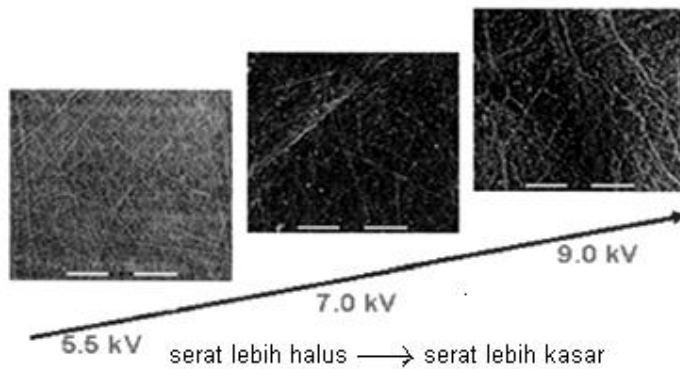


Gambar 4. Hasil foto SEM nanofiber dari polimer dengan variasi konsentrasi

Cara lain untuk menghilangkan gumpalan adalah dengan menambahkan suatu zat pengisi ke dalam larutan polimer. Zong et al. dalam risetnya mendapati dengan penambahan 1% garam ke dalam larutan polimer PLDA diperoleh serat nano bebas dari gumpalan, hal ini disebabkan penambahan garam akan meningkatkan kerapatan muatan listrik pada permukaan larutan jet selama proses *electrospinning*, sehingga lebih banyak muatan listrik pada semprotan jet. Ketika lebih banyak muatan yang terbawa oleh jet, gaya yang membuat serat jadi lebih panjang pun bertambah sehingga gumpalan jadi lebih kecil dan diameter serat lebih halus. Hal ini tidak berarti bahwa semakin tinggi potensial listrik menghasilkan serat nano yang lebih sedikit gumpalan dan lebih halus. Dietzel et al., 2001, meneliti pengaruh muatan listrik terhadap morfologi serat nano PEO menyimpulkan bahwa kenaikan potensial listrik pada *electrospinning* akan menghasilkan serat yang lebih kasar, seperti terlihat pada gambar 5.

2.1.3. Kesejajaran serat

Serat nano yang dihasilkan dari proses *electrospinning* pada umumnya dalam bentuk non-woven, aplikasinya terbatas untuk proses seperti filtrasi, jaringan tisu, lapisan film untuk implan dan pembalut luka. Agar aplikasinya dapat lebih luas, maka serat nano ini haruslah berupa serat filamen tunggal seperti serat filamen pada tekstil. Hal ini merupakan target tersulit untuk dicapai pada proses *electrospinning* karena lintasan jet dari polimer berada dalam arah tiga dimensi yang rumit yang disebabkan oleh ketidakstabilan lentur dari polimer ketimbang berupa garis lurus.

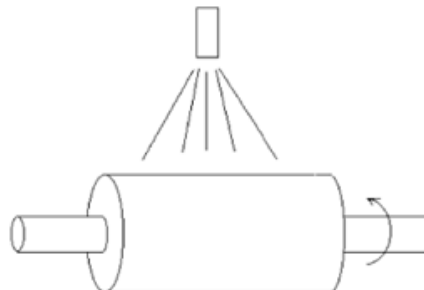


Gambar 5. Foto SEM serat nano POE dengan variasi potensial listrik [1,2]

Hingga saat ini belum ada serat nano tunggal yang panjang dan kontinyu dapat dihasilkan dari proses ini dan publikasi ilmiah tentang cara membuat serat nano yang sejajar dan lurus masih sangat sedikit. Berikut ini ada lima cara yang dapat dilakukan dalam usaha untuk mendapatkan serat nano yang lurus dan sejajar.

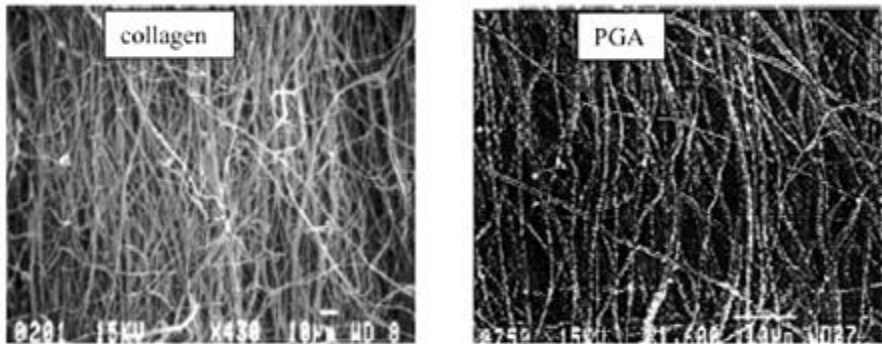
1. Silinder kolektor dengan rotasi kecepatan tinggi

Apabila silinder kolektor pada gambar 6 diputar dengan rpm tinggi (ribuan rpm) maka diharapkan serat nano fiber yang keluar dari spinneret menuju kolektor menjadi terorientasi mengelilingi silinder secara sejajar.



Gambar 6. Skema Silinder kolektor yang berputar [18]

Teknik ini telah dicoba oleh peneliti dari Virginia Commonwealth University untuk mendapatkan serat nanofiber Polyglycolic acid (PGA) menggunakan rpm 1000, dan untuk serat kolage tipe 1 menggunakan rpm 4500. Hasilnya terlihat pada gambar 7, dimana serat belum terlalu lurus.

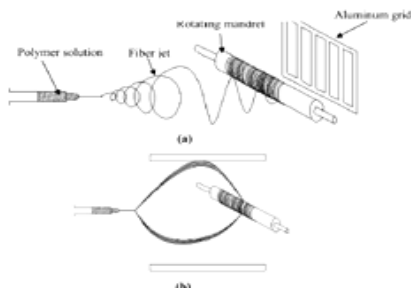


Gambar 7. Pelurusan serat nano kolagen dan Asam poliglikolik [18]

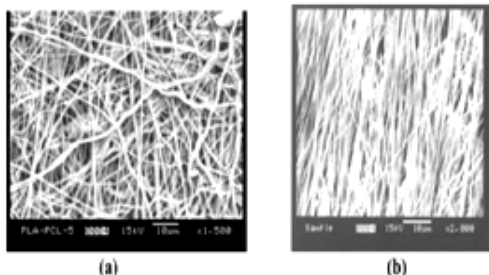
Mekanisme yang terjadi dapat diasumsikan sebagai berikut : pada saat kecepatan linier dari permukaan silinder yang berotasi yang berfungsi sebagai alat pengumpul serat sesuai dengan kecepatan jet yang akan menempel di kolektor maka serat akan terambil oleh permukaan kolektor mengelilingi silinder dengan ketat menyebabkan serat lebih lurus dan sejajar. Apabila kecepatan silinder lebih rendah daripada kecepatan pelurusan jet, maka serat akan menempel di kolektor secara random, yang mana gerakan cepat dari jet yang seperti chaos yang akan menentukan arah serat terdeposit pada kolektor. Namun ada batas maksimum dari kecepatan rotasi silinder ini, apabila terlalu cepat akan mengakibatkan putusya serat. Alasan mengapa serat tidak dapat lurus sempurna karean gerakan chaos dari jet tidak konsisten dan sulit untuk dikontrol.

2. Elektroda tambahan (Berry JP et al.,1990; Bornat A,1987)

Teknik kedua untuk mendapatkan serat nano yang lurus dan sejajar adalah dengan memasang elektroda tambahan di belakang silinder kolektor atau dipasang asimetri dengan kolektor seperti terlihat pada skema gambar 8 a dan 8 b, efek pelurusan yang terjadi ditunjukkan oleh hasil foto SEM pada gambar 9.



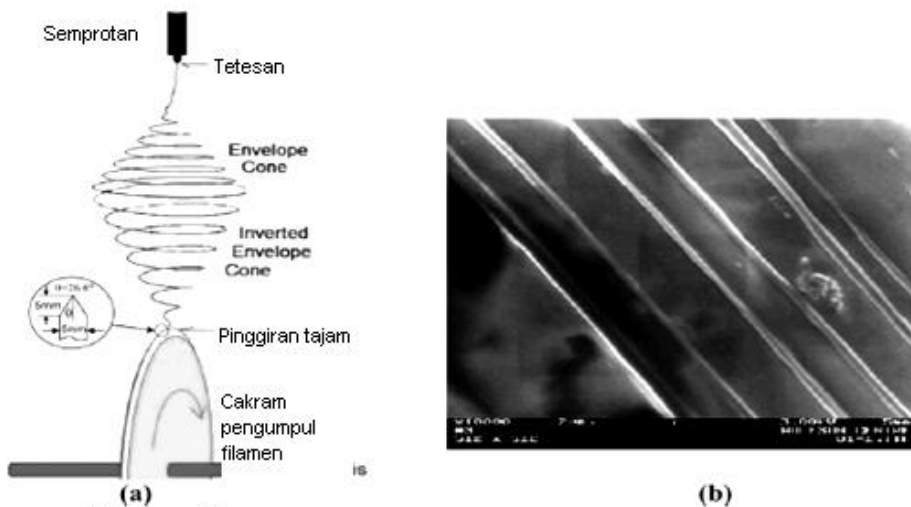
Gambar 8. Pelurusan serat nano menggunakan elektroda tambahan



Gambar 9. Copolimer PLA/PCL (a) tanpa, (b) menggunakan elektroda

3. Piringan tipis dan bersisi tajam

Sebuah kemajuan yang signifikan untuk mendapatkan serat nano yang lurus yaitu dengan menggunakan suatu piringan berputar dengan pinggiran yang runcing dan di-*grounded* seperti terlihat pada gambar 10 a. dan hasil serat nano PEO, pada 10 b. (Theron A et al., 2001).

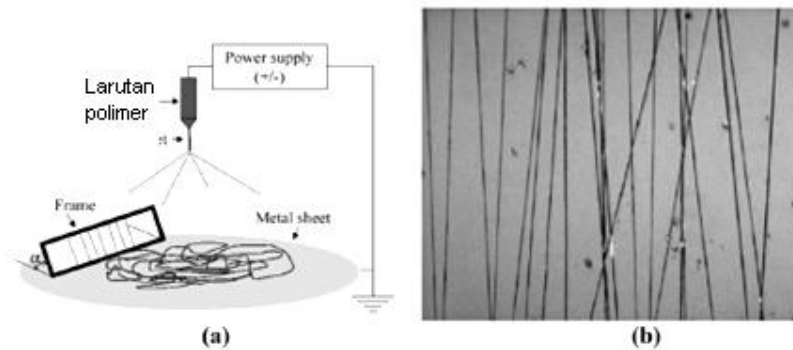


Gambar 10. (a) Seting alat untuk mendapatkan serat nano yang lurus dan sejajar, (b) hasil pelurusan serat nano PEO [21]

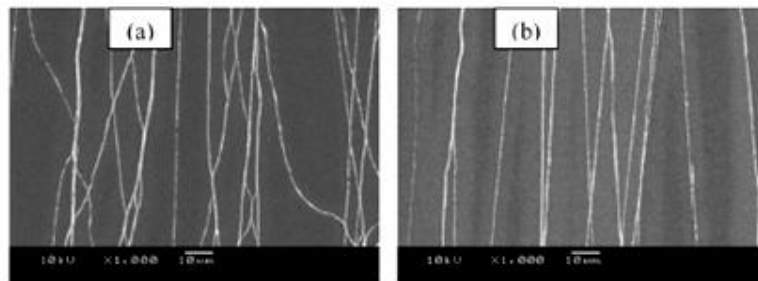
Bagian sisi dari piringan yang runcing menyebabkan terkonsentrasinya muatan listrik sehingga menarik serat nano secara kontinu hingga akhirnya tergulung bersama piringan yang berputar. Pada gambar 10 b terlihat serat nano PEO dengan diameter 100-400 nm terorientasi sejajar dan lurus dengan jarak pisah sekitar 1-2 micron. Adanya jarak yang memisahkan serat secara individu disebabkan muatan sejenis yang saling tolak menolak pada jet sebelum serat sampai ke sisi piringan yang ter-*grounded*. Hal ini berpengaruh terhadap morfologi dari serat yang diperoleh. Variasi dari jarak antar serat ini tergantung dari diameter serat dan besarnya muatan yang terdapat pada serat.

4. *Frame* kolektor

Pendekatan lain untuk mendapatkan serat nano yang lurus adalah dengan menempatkan *frame* kolektor berbentuk segi empat di bawah spinneret yang sedang menyemburkan jet dari polimer seperti terlihat pada gambar 11 a. Gambar 11 b menunjukkan contoh serat nano yang diluruskan menggunakan *frame* kolektor terbuat dari aluminium. Perbedaan jenis bahan *frame* kolektor akan menyebabkan perbedaan hasil pelurusan serat nano, sebagai contoh *frame* yang terbuat dari aluminium menghasilkan serat nano yang lebih lurus dibandingkan *frame* terbuat dari bahan kayu yang dipasang dengan sudut kemiringan 60° seperti ditunjukkan oleh foto SEM pada Gambar 12. Penelitian lebih lanjut sedang berlangsung guna meneliti pengaruh bentuk, ukuran dari batang *frame*, jarak antar batang *frame*, sudut kemiringan dari *frame*.

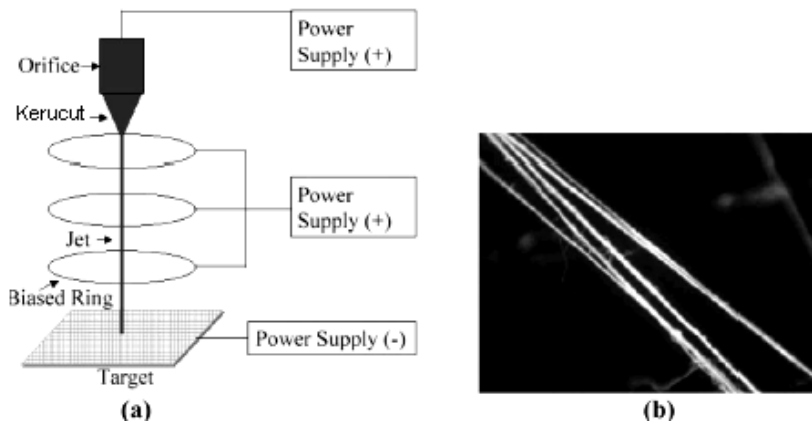


Gambar 11. Pelurusan serat nano POE dengan metoda frame kolektor



Gambar 12. Perbandingan hasil pelurusan serat dengan memakai frame (a) kayu, dan (b) aluminium[21]

5. *Multiple field* (Theron A et al.,2001)



Gambar 13. (a) Metoda Multiple field dan (b) Hasil pelurusan serat nano PEO[2]

Gambar 13 a menunjukkan skema metoda multiple field dimana gerakan semburan jet yang tidak beraturan selama perjalanannya menuju kolektor dapat diluruskan. Dengan cara ini deposisi dari serat nano di kolektor dapat dikontrol supaya menjadi lebih lurus dan sejajar. Gambar 13.b menunjukkan hasil serat nano PEO yang diluruskan menggunakan metoda ini.

3. Kesimpulan

Teknik *electrospinning* sudah ada sejak tahun 1934, melalui teknik ini dihasilkan serat dengan diameter berukuran nanometer yang memunculkan beberapa karakter seperti luas permukaan yang sangat besar dibandingkan volum, perubahan sifat permukaan bahan, serta sifat mekanik yang unggul dibandingkan jenis material lain. Proses *electrospinning* memerlukan minimal tiga komponen yaitu : Sumber listrik bertegangan tinggi, tabung kapiler dengan pipet atau jarum dengan lubang halus (spinneret), dan dinding atau layar kolektor logam. Beberapa parameter proses yang dapat mempengaruhi terbentuknya nanofiber pada proses *electrospinning* adalah :(a) Sifat larutan polimer seperti viskositas, elastisitas, konduktivitas, dan tegangan permukaan, (b) variabel alat : tekanan hidrostatik dari tabung kapiler, potensial listrik pada ujung spinneret, jarak antara ujung tabung kapiler/spinneret dengan dinding kolektor, (c) parameter ambien : suhu larutan, kelembaban ruang, kecepatan aliran udara di ruang *electrospinning*. Hasil yang diharapkan pada proses *electrospinning* adalah : (1) diameter serat yang dihasilkan konsisten dan dapat dikontrol, (2) Permukaan serat bebas dari cacat/ cacat dapat dikontrol, (3) Filamen serat tunggal lurus dan sejajar serta dapat dikumpulkan. Beberapa kendala yang dihadapi teknik ini adalah bagaimana mendapatkan serat filamen yang lurus dan sejajar dengan diameter yang konsisten, adanya gumpalan pada serat, dan adanya pori-pori pada serat. Untuk menjaga konsistensi diameter serat dan menghilangkan gumpalan serat dapat dilakukan dengan mengatur parameter proses. Kesejajaran serat dapat diatasi dengan penggunaan alat tambahan seperti silinder kolektor, elektroda tambahan, kolektor cakram, kolektor *frame*, *multiple field* . Diluar dari segala masalah tersebut, teknik ini merupakan teknik yang paling cocok untuk menghasilkan filamen serat berukuran nano, namun masih diperlukan banyak penelitian lanjut agar metoda ini dapat mencapai tingkat produksi komersilnya.

4. Daftar Pustaka

1. Berry JP. US patent 4965110, 1990.
2. Bornat A. Production of electrostatically spun products. US Patent 4689186. 1987.
3. Deitzel JM, Kleinmeyer J, Harris D, Tan NCB. The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles. *Polymer* 2001;42:261–72
4. Deitzel JM, Kleinmeyer J, Hirvonen JK, BeckTNC. Controlled deposition of electrospun poly(ethylene oxide) fibers. *Polymer* 2001;42:8163–70.
5. Demir MM, Yilgor I, Yilgor E, Erman B. Electrospinning of polyurethane fibers. *Polymer* 2002;43:3303–9.
6. Doshi J, Reneker DH. Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *J Electrostatics* 1995;35(2-3):151–60.
7. Fang H, Reneker DH. Electrospinning and formation of nanofibers. In: Salem DR, editor. *Structure formation in polymeric fibers*. Munich: Hanser;

2001. p. 225–46.
8. Feng L, Li S, Li H, Zhai J, Song Y, Jiang L, et al. Super-Hydrophobic Surface of Aligned Polyacrylonitrile Nanofibers. *Angew Chem Int Ed* 2002;41(7):1221–3.
 9. Formhals A. US patent 1,975,504, 1934.
 10. Jin HJ, Fridrikh S, Rutledge GC, Kaplan D. Electrospinning *Bombyx mori* silk with poly(ethylene oxide). *Abstracts of Papers American Chemical Society* 2002;224(1–2):408.
 11. Larrondo, Manley R., St J. Electrostatic fiber spinning from polymer melts, I. and Experimental observations on fiber formation and properties. *J Polymer Science: Polymer Physics Edition* 1981;19:909–20
 12. Liu GJ, Ding JF, Qiao LJ, Guo A, Dymov BP, Gleeson JT, et al. Polystyrene-block-poly (2-cinnamoyl ethyl methacrylate) nanofibers-Preparation, characterization, and liquid crystalline properties. *Chem-A European J* 1999;5:2740–9.
 13. Ma PX, Zhang R. Synthetic nano-scale fibrous extracellular matrix. *J Biomed Mat Res* 1999;46:60–72.
 14. Martin CR. Membrane-based synthesis of nanomaterials. *Chem Mater* 1996;8:1739–46.
 15. Matthews JA, Wnek GE, Simpson DG, Bowlin GL. Electrospinning of Collagen Nanofibers. *Biomacromolecules* 2002;3(2):232–8.
 16. Ondarcuhu T, Joachim C. Drawing a single nanofibre over hundreds of microns. *Europhys Lett* 1998;42(2):215–20.
 17. Rangkupan R, Reneker DH. Development of electrospinning from molten polymers in vacuum, Book of Abstracts. In: *New frontiers in fiber science, Spring Meeting* 2001.
 18. Schreuder-Gibson HL, Gibson P, Senecal K, Sennett M, Walker J, Yeomans W, et al. Protective textile materials based on electrospun nanofibers. *Journal of Advanced Materials* 2002;34(3):44–55
 19. Taylor GI. Electrically driven jets. *Proc R Soc London, Ser A* 1969;313:453–75.
 20. Theron A, Zussman E, Yarin AL. Electrostatic field-assisted alignment of electrospun nanofibres. *Nanotechnology* 2001;12:384–90
 21. Whitesides GM, Grzybowski B. Self-assembly at all scales. *Science* 2002;295:2418–21.