

SINTESIS NANOSERAT POLI(VINIL ALKOHOL) DALAM BENTUK LEMBARAN DENGAN PEMINTAL ELEKTRIK MULTI NOZEL DAN KOLEKTOR DRUM

SYNTHESIS OF POLY(VINYL ALCOHOL) NANOFIBERS MEMBRANE VIA MULTI NOZZLE SPINNERET AND DRUM COLLECTOR

A. Y. Nuryantini¹, M. P. Ekaputra¹, M. M. Munir², T. Suciati³, Khairurrijal^{1*}

¹KK Fisika Material Elektronik,

²KK Fisika Teoretik Energi Tinggi & Instrumentasi, Fakultas Matematika & Ilmu Pengetahuan Alam,

³KK Farmasetika, Sekolah Farmasi,
Institut Teknologi Bandung, Indonesia

Diterima: 1 Februari 2014. Disetujui: 2 Maret 2014. Dipublikasikan: Juli 2014

ABSTRAK

Sistem pemintalan elektrik jarum tunggal dan kolektor bidang memiliki kelemahan, yaitu laju produksi yang rendah. Untuk mengatasinya digunakan sistem jarum banyak yang berjejer (multi nozel) dan kolektor berbentuk silinder berputar (kolektor drum). Banyaknya jarum dimaksudkan untuk menambah laju produksi, kolektor drum berputar dimaksudkan agar dihasilkan nanoserat dalam bentuk lembaran yang seragam. Tujuan penelitian adalah untuk menguji pengaruh medan listrik pada proses pemintalan elektrik multi nozel dan kolektor drum berputar, serta mengontrol morfologi nanoserat poli(vinil alkohol)/PVA yang dihasilkan dengan cara mengubah laju alir larutan. Hasil penelitian yang didapat adalah: (1) telah berhasil dibuat nanoserat PVA dalam bentuk lembaran yang menumpuk di kolektor drum, (2) pada pemintalan elektrik dengan sistem multi nozel terjadi distorsi medan listrik pada ujung jarum yang menyebabkan serat pada kolektor tidak rata, (3) morfologi nanoserat PVA yang dihasilkan pada laju alir 0,4 dan 0,6 $\mu\text{l}/\text{jam}$ banyak mengandung butiran, sedangkan pada laju alir 0,8 $\mu\text{l}/\text{jam}$ jumlah butiran berkurang.

ABSTRACT

Electrospinning system with single needle and planar collector has the disadvantage of a low productivity. To overcome this problem drum collector and multi-nozzle system were employed. The multi-nozzle system was used to improve the production rate, while the drum collector was used for maintaining the uniformity of the size. The purposes of this study were to examine the influence of electric field in the electrospinning process and to control the morphology of the obtained poly(vinyl alcohol)/PVA nanofibers by changing the solution flow rate. The obtained results were: (1) PVA nanofibers membrane have been successfully produced stacked on the drum collector, (2) distortion of the electric field at the tip of the needle was occurred, which results in inhomogeneous thickness of the stacked nanofibers, and (3) the morphology of the obtained nanofibers at the flow rates of 0.4 and 0.6 $\mu\text{l}/\text{hour}$ have many beads while at 0.8 $\mu\text{l}/\text{hour}$ the number of beads decreased.

© 2014 Jurusan Fisika FMIPA UNNES Semarang

Keywords: drum collector; flow rate; multi nozzle; nanofibers membrane

*Alamat Korespondensi:
Jalan Ganesa 10, Bandung 40132
E-mail: krijal@fi.itb.ac.id

PENDAHULUAN

Nanoteknologi semakin banyak diminati oleh berbagai kalangan, baik di kalangan industri maupun kalangan peneliti. Salah satu bidang nanoteknologi yang banyak menarik perhatian adalah nanoserat. Pergeseran ukuran serat dari ukuran mikron menjadi ukuran nano disebabkan serat dalam ukuran nano memiliki keunggulan yang lebih kaya. Beberapa keunggulan nanoserat di antaranya memiliki nilai perbandingan antara luas permukaan dan volume yang lebih besar jika dibandingkan dengan serat sejenis dalam ukuran besar. Nilai perbandingan untuk nanoserat lebih besar seribu kali (10^3) dibandingkan dengan mikroserat (Huang *et al.*, 2003). Kelebihan tersebut membuat nanoserat bersifat lebih reaktif karena atom-atom di permukaan serat dapat bersentuhan langsung dengan material lain (Abdullah *et al.*, 2008). Kelebihan lainnya adalah lembaran nanoserat memiliki sifat kelenturan dan sifat mekanik yang unggul seperti kekenyalan, fleksibilitas, dan kekuatan tariknya (Huang *et al.*, 2003), nanoserat juga memiliki porositas yang tinggi (Yoon *et al.*, 2006).

Karena memiliki sifat yang unggul tersebut, nanoserat sudah banyak diaplikasikan untuk berbagai macam kepentingan, pada bidang energi misalnya digunakan sebagai pembuatan sel surya (Iskandar *et al.*, 2010; Munir *et al.*, 2008a; Munir *et al.*, 2008b), penghematan energi melalui pemanfaatan fosfor untuk lampu hemat energi (Suryamas *et al.*, 2009; Suryamas *et al.*, 2010; Suryamas *et al.*, 2011; Munir *et al.*, 2007), pada bidang kimia berupa katalis (Widiyandari *et al.*, 2009), pada bidang elektronik yaitu dalam pengembangan piranti sensor (Munir *et al.*, 2011).

Pada tubuh manusia sebenarnya ada sejumlah wujud yang berdimensikananometer dan berbentuk nanoserat. Kita mengenal *double helix* DNA yang memiliki diameter sekitar 2 nm dan ribosom dengan diameter sekitar 25 nm. Jaringan dan organ tubuh manusia seperti kulit, tulang, dentin, kolagen dan tulang rawan merupakan nanoserat secara bentuk dan struktur (Abdullah, 2009). Karena memiliki bentuk dan struktur yang mirip dengan jaringan dan organ tubuh manusia, nanoserat dapat pula diaplikasikan pada bidang biomedika, seperti untuk penutup luka (Chellamani *et al.*, 2012), rekayasa jaringan (Lu & Ding, 2008), pembawa obat (Sill *et al.*, 2008), dan aplikasi lainnya.

Banyak teknik yang dilakukan oleh para ahli maupun peneliti untuk membuat nanoser-

at, di antaranya teknik penarikan (*drawing*), pencetakan (*template synthesis*), pemisahan fasa (*phase separation*), penyusunan (*self assembly*), dan pemintalan elektrik (*electrospinning*) (Ramakrishna *et al.*, 2005). Dari beberapa teknik pembuatan nanoserat di atas, pemintalan elektrik merupakan salah satu teknik yang memiliki kelebihan dibandingkan teknik lain. Kelebihan tersebut di antaranya proses pembuatan serat yang mudah, serat yang dihasilkannya sangat panjang dan kontinu, ukuran serat dapat dikontrol dengan mengubah parameter proses, dapat dibuat dari beragam material (Ramakrishna *et al.*, 2005; Munir *et al.*, 2008). Pembuatan nanoserat dengan teknik pemintalan elektrik dilakukan dengan cara memberikan muatan pada larutan yang akan dilewatkan pada medan listrik yang tinggi. Sistem pemintalan elektrik terdiri dari sumber tegangan tinggi, kolektor, pompa, penyemprot dengan jarum tunggal (Munir *et al.*, 2008). Pemintalan elektrik dengan jarum tunggal dan kolektor bidang dikenal dengan sistem konvensional.

Untuk menghasilkan nanoserat yang dapat diterapkan pada berbagai bidang, pemintal elektrik perlu dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan. Sistem pemintalan elektrik dengan jarum tunggal memiliki kelemahan, yaitu laju produksi yang rendah (Chase *et al.*, 2011). Beberapa peneliti kemudian mengembangkan sistem pemintalan untuk meningkatkan laju produksi seperti Tomaszewski *et al.*, melaporkan sistem pemintalan elektrik banyak jarum dengan bentuk berjajar, eliptik, dan konsentrik (Tomaszewski *et al.*, 2005). Chase *et al.*, mengembangkan sistem pemintalan elektrik dengan tabung berpori (*porous tubes*), gelembung (*bubble launched*), dan lapisan tipis yang ditiup (*blown-film*) (Chase *et al.*, 2011). Senturk-Ozer *et al.*, menggunakan sistem jarum banyak dengan menggunakan skrup ganda (*twin screw extruder*) (Senturk *et al.*, 2012).

Pada penelitian kami, untuk mengatasi kelemahan rendahnya laju produksi, digunakan pemintalan elektrik dengan sistem jarum banyak yang berjejer (multi nozel) dan kolektor berbentuk silinder yang dapat berputar (kolektor drum). Banyaknya jarum dimaksudkan untuk menambah laju produksi, kolektor berbentuk silinder agar dihasilkan nanoserat dalam bentuk lembaran, sedangkan kolektor berputar berfungsi untuk mempertahankan keseragaman nanoserat yang dihasilkan. Tujuan penelitian ini adalah untuk menguji pengaruh medan listrik di dalam proses pemintalan ele-

trik multi nozel dan kolektor drum dan mengontrol morfologi nanoserat poli(vinil alkohol)/PVA yang dihasilkan. Selama proses pembuatan nanoserat tersebut, pengamatan pengaruh medan listrik dan pengontrolan morfologi nanoserat dilakukan dengan cara mengubah laju alir larutan. Nanoserat dalam bentuk lembaran yang dihasilkan memiliki potensi sebagai penutup luka.

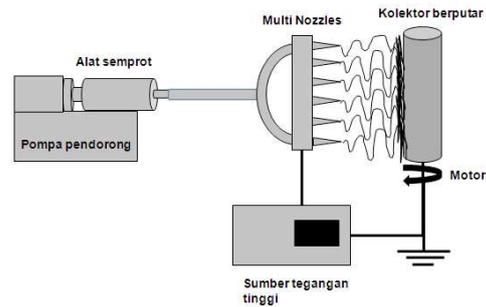
METODE

Untuk mengamati proses pemintalan elektrik dengan sistem jarum banyak dan kolektor drum berputar, digunakan bahan poli(vinil alkohol)/PVA. PVA dengan massa molekul 22.000 g/mol diperoleh dari Bratachem, Indonesia. Sebagai bahan pelarut digunakan aquades. PVA dilarutkan dalam aquades dan diaduk dengan menggunakan pengaduk magnetik selama 3 jam pada suhu 80°C, sehingga diperoleh larutan PVA 10 % berat yang homogen sebagai larutan awal (precursor).

Tahap selanjutnya dilakukan pemintalan dengan menggunakan sistem pemintal elektrik jarum banyak dan kolektor drum berputar. Skema sistem pemintalan elektrik jarum banyak dan kolektor drum berputar yang digunakan tampak pada Gambar 1. Cara pemintal diawali dengan memasukkan larutan awal pada penyemprot berupa kotak memanjang dengan jarum sebanyak enam buah berjajar dengan jarak antar jarum 2,5 cm. Jarak antara ujung jarum dan kolektor adalah 10 cm. Drum kolektor sebagai katoda dibungkus oleh aluminium foil tempat serat terdepositasi. Drum kolektor dihubungkan ke tanah. Penyemprot kemudian didorong oleh pompa dengan laju alir yang tetap dijaga. Tegangan tinggi dihubungkan pada ujung jarum. Larutan yang keluar dari ujung jarum ditarik medan listrik membentuk pancaran berupa Kerucut Taylor. Pancaran bergerak menuju kolektor sebagai penampung nanoserat yang dihasilkan.

Pengaruh medan listrik pada proses pemintalan elektrik pada sistem jarum banyak dan kolektor drum berputar diamati menggunakan kamera digital. Untuk mengamati pengaruh besarnya tegangan terhadap penyimpanan larutan yang keluar dari ujung jarum dilakukan variasi tegangan dari 7-11 kV. Untuk melakukan pengontrolan morfologi nanoserat, laju alir diubah-ubah dari 0,4 - 0,8 $\mu\text{l}/\text{jam}$. Untuk menganalisis struktur mikro nanoserat yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy*

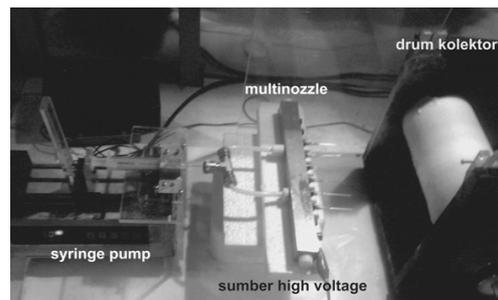
(SEM) tipe JEOL-JSM-6510LV.



Gambar 1. Skema sistem pemintal elektrik jarum banyak dan kolektor drum berputar.

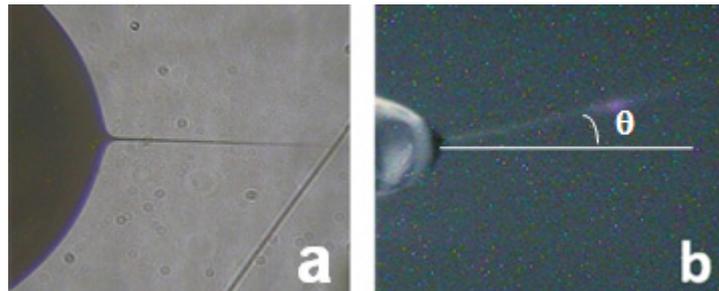
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kami telah berhasil membangun pemintal elektrik sistem jarum banyak dan kolektor drum yang dapat berputar. Jarum sebanyak enam buah diletakkan pada batang baja anti karat (*stainless steel*) berbentuk kotak. Jarum diletakkan berjajar dengan jarak antar jarum 2,5 cm. Bagian tengah batang baja dilubangi sebagai tempat larutan. Larutan didorong oleh pompa pendorong dengan laju alir yang dapat dikontrol. Kolektor berbentuk silinder terbuat dari aluminium pejal dan dipasang pada poros yang menahan putaran silinder. Kolektor dihubungkan pada motor untuk memutarinya. Kolektor berbentuk silinder dibuat dengan tujuan untuk menghasilkan nanoserat dalam bentuk lembaran.



Gambar 2. Sistem pemintal elektrik jarum banyak dan kolektor drum yang dapat berputar (Iskandar, 2014).

Pembuatan nanoserat dengan menggunakan pemintal elektrik sistem jarum banyak yang berjajar, terjadi fenomena berbeda dengan sistem pemintal elektrik konvensional. Pada sistem jarum banyak, ada interaksi medan listrik di sekitar seluruh ujung nozel. Interaksi medan listrik tersebut menyebabkan penyimpangan atau pembelokan larutan yang



Gambar 3. Kerucut Taylor pada (a) nozel tunggal, (b) multi nozel.

disemprotkan dari setiap nozel. Peristiwa ini dapat diamati dari Kerucut Taylor pada Gambar 3 (b) yang diperoleh dari hasil eksperimen pemintalan PVA 10 % berat dengan menggunakan nozel sebanyak enam buah yang diletakkan sejajar secara horizontal pada tegangan 10 kV.

Peristiwa pembelokan larutan yang dipancarkan oleh setiap nozel terjadi karena adanya interaksi muatan akibat kehadiran larutan bermuatan lain yang keluar dari jarum yang dijajarkan. Peristiwa serupa pernah dilaporkan oleh Angammana dan Jayaram dalam simulasi dua jarum yang dijejerkan (Angammana & Jayaram, 2011). Pembelokan larutan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada peristiwa pemintalan elektrik, larutan diberi muatan dan dilewatkan pada daerah yang memiliki medan listrik tinggi. Medan listrik adalah ruang di sekitar muatan listrik yang berpengaruh terhadap muatan yang lain. Besarnya medan listrik adalah:

$$E = \frac{F_E}{q} \quad (1)$$

dengan E adalah kuat medan listrik (N/C), q muatan listrik (C), dan F_E gaya listrik (N).

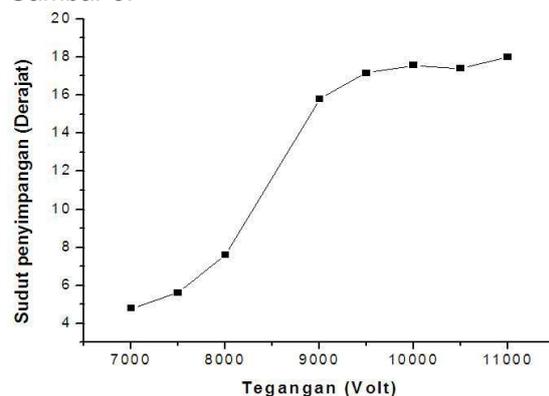
Ketika ada dua muatan atau lebih berdekatan, timbul gaya interaksi antar muatan tersebut. Gaya interaksi antara dua muatan atau lebih dapat dinyatakan dengan Hukum Coulomb yang diberikan oleh persamaan:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2)$$

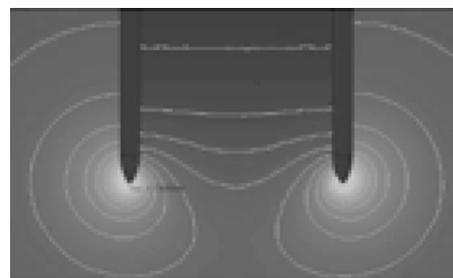
dengan k adalah sebuah konstanta (Nm^2/C^2), q besarnya muatan (C), dan r jarak kedua muatan (m).

Besarnya sudut penyimpangan pancaran larutan terhadap garis horizontal (θ), sangat dipengaruhi oleh besarnya tegangan. Semakin besar tegangan, semakin besar pula penyimpangannya (Angammana & Jayaram, 2011). Peristiwa ini dapat dilihat pada grafik pengaruh tegangan terhadap sudut penyimp-

pangan yang tampak pada Gambar 4. Pada tegangan 7 – 11 kV sudut penyimpangan cenderung naik. Kenaikan tegangan dari 8 kV menuju 9 kV menyebabkan sudut penyimpangan naik secara tajam. Akan tetapi, ketika tegangan dinaikkan lagi sampai 11 kV, sudut penyimpangan cenderung turun, bahkan mendekati saturasi. Terjadinya peristiwa saturasi disebabkan penyimpangan pancaran dari nozel mendapat gaya tolak dari muatan pada larutan yang keluar dari nozel lain di sampingnya. Peristiwa interaksi muatan dari pancaran dua nozel pada peristiwa pemintalan elektrik dapat dilihat dari Gambar 5.



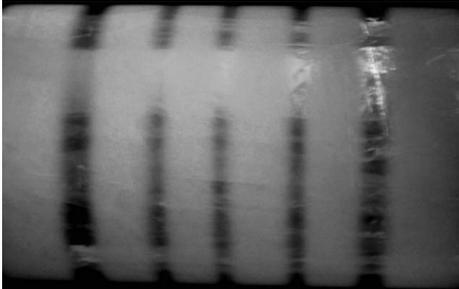
Gambar 4. Variasi sudut penyimpangan larutan PVA terhadap tegangan.



Gambar 5. Distribusi medan listrik pada dua jarum bermuatan (Angammana & Jayaram, 2011).

Akibat terjadinya penyimpangan pancaran larutan, nanoserat yang dihasilkan pada

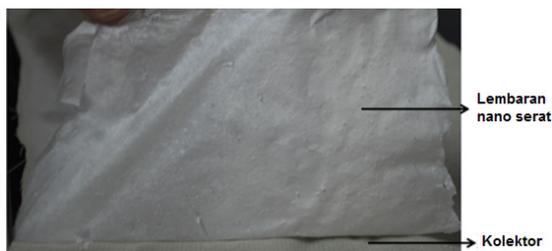
kolektor tidak rata, tetapi membentuk sebuah pola yaitu ada bagian kolektor yang terisi serat dan ada yang kosong, seperti yang telah dilaporkan sebelumnya (Nuryantini *et al*, 2014). Gambar 6 menunjukkan pola nanoserat pada kolektor yang dihasilkan oleh sistem jarum banyak.



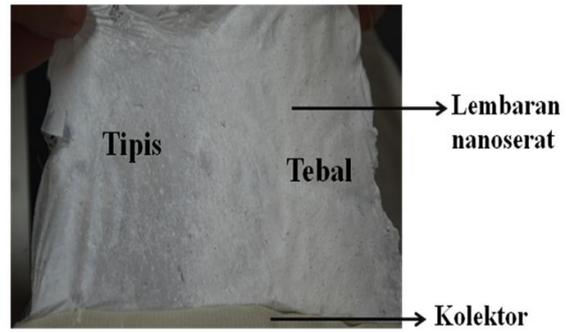
Gambar 6. Pola nanoserat pada kolektor yang dihasilkan oleh sistem jarum banyak.

Namun, secara sederhana, peristiwa tersebut dapat diatasi dengan cara menggeser kolektor dalam selang waktu tertentu. Hasilnya diperoleh nanoserat berupa lembaran dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan pemintalan elektrik konvensional. Lembaran yang dihasilkan tampak pada Gambar 7. Kelemahan menggeser kolektor secara manual diperlukan kecermatan dalam menentukan jarak pergeseran. Jika tidak cermat dalam menggeser kolektor akan diperoleh lembaran yang tidak rata ketebalannya, seperti tampak pada Gambar 8.

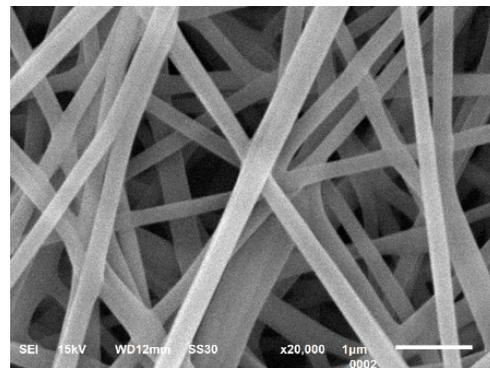
Morfologi nanoserat PVA yang dihasilkan dari pemintalan elektrik jarum banyak dan kolektor drum berputar ditunjukkan pada Gambar 9. Parameter pembentukan serat yaitu konsentrasi PVA 10 % berat, besarnya tegangan 15 kV, jarak antara ujung nozel dengan kolektor 10 cm, diameter luar jarum 0,6 mm, rotasi kolektor drum 50 rpm, dan laju alir 1 μ l/jam. Dari hasil citra SEM tampak bahwa nanoserat PVA ukurannya hampir seragam rata-rata (256 \pm 1,23) nm, dengan morfologi serat tanpa ada butiran.



Gambar 7. Lembaran nanoserat PVA yang dihasilkan dengan pemintalan elektrik multi nozel dan kolektor silinder berputar.



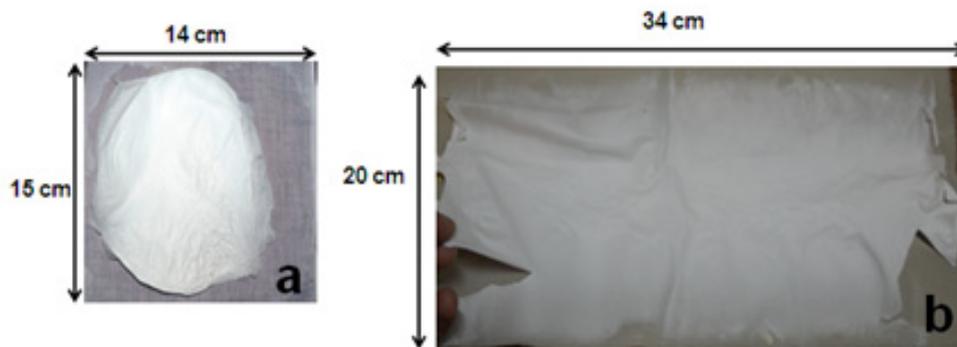
Gambar 8. Lembaran nanoserat PVA yang tidak merata ketebalannya akibat pergeseran yang tidak cermat dihasilkan dengan pemintalan elektrik multi nozel dan kolektor drum.



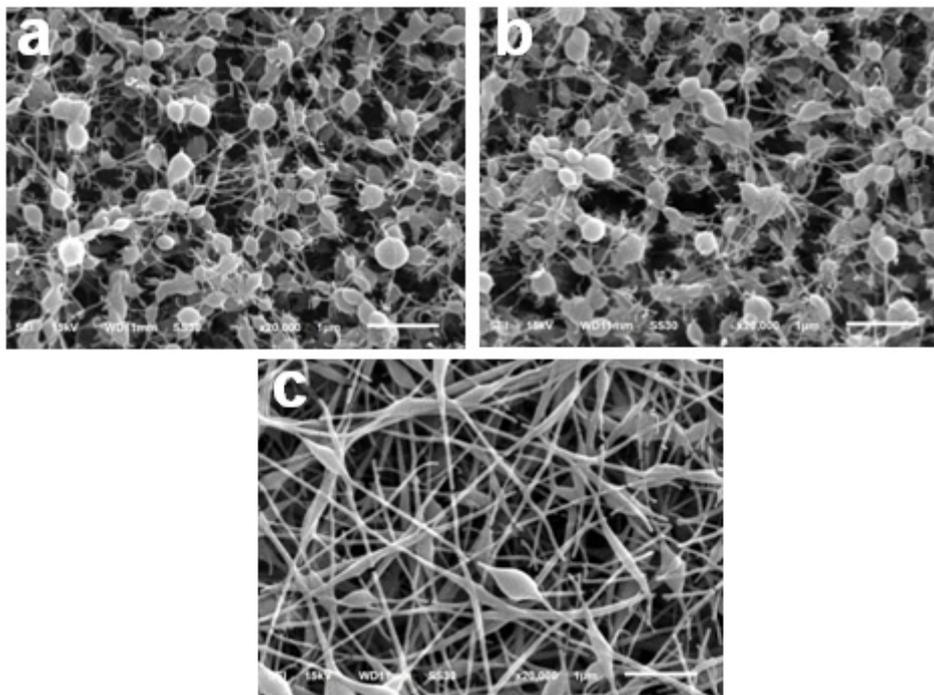
Gambar 9. Citra SEM PVA 10 % berat dengan besarnya tegangan yang digunakan 15 kV, laju alir 1 μ l/jam, jarak nozel-kolektor 10 cm, diameter luar jarum 0,6 mm.

Lembaran nanoserat yang dihasilkan oleh sistem jarum banyak dan kolektor drum berputar lebih luas dibandingkan dengan lembaran yang dihasilkan oleh sistem konvensional. Perbandingan luas lembaran nanoserat yang dihasilkan oleh masing-masing sistem tampak pada Gambar 10.

Nanoserat dalam bentuk lembaran memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai penutup luka. Kelebihan serat dalam ukuran nano sebagai penutup luka adalah memiliki luas permukaan dan volume yang lebih besar jika dibandingkan dengan serat sejenis dalam ukuran besar, sehingga bersifat lebih reaktif karena atom-atom di permukaan serat dapat bersentuhan langsung dengan material lain (Abdullah *et al*, 2008). Nanoserat juga memiliki porositas yang tinggi (Yoon *et al*, 2006), sehingga nanoserat dapat memenuhi persyaratan perban ideal seperti permeasi gas yang lebih tinggi dan perlindungan luka dari infeksi dan dehidrasi. Dengan demikian, proses penyembuhan luka dapat dilakukan dengan lebih



Gambar 10. Perbandingan luas lembaran nanoserat yang dihasilkan oleh: (a) sistem konvensional, (b) sistem jarum banyak dengan kolektor drum.



Gambar 11. Citra SEM PVA 10 % berat yang dicampur dengan larutan kitosan 2 % berat dengan perbandingan 50 : 50 yang dipintal dengan tegangan 15 kV, jarak nozel dan kolektor 10 cm, diameter luar 0,6 mm, rotasi kolektor drum 50 rpm, dengan laju alir : (a) 0,4 (b) 0,6 (c) 0,8 $\mu\text{l}/\text{jam}$.

cepat dan lebih baik.

Untuk menghasilkan lembaran nanoserat dengan kualitas baik, maka perlu mengontrol morfologi dan jumlah butiran serat nano. Banyak faktor yang mempengaruhi pembentukan nanoserat agar diperoleh nanoserat yang halus tanpa butiran. Faktor-faktor tersebut adalah berat molekul, viskositas larutan, tegangan permukaan, konduktivitas larutan, tegangan yang digunakan, laju alir larutan, suhu, jenis kolektor, diameter nozel, jarak antara ujung nozel dan kolektor (Ramakrishna *et al.*, 2005). Pada penelitian ini, jumlah butiran dan morfologi serat diatur dengan cara yang mudah, yaitu

mengubah nilai laju alir. Besarnya laju alir berpengaruh pada diameter serat dan ukuran butiran (Ramakrishna *et al.*, 2005).

Gambar 11 merupakan citra SEM PVA 10 % berat yang dicampur dengan kitosan 2 % berat dengan perbandingan massa PVA : Kitosan = 50 : 50. Larutan dipintal dengan tegangan sebesar 15 kV, jarak antara ujung nozel dan kolektor 10 cm, diameter luar 0,6 mm, rotasi kolektor drum 50 rpm, dengan laju alir yang divariasikan dari 0,4 - 0,8 $\mu\text{l}/\text{jam}$. Didapatkan bahwa pada laju alir yang rendah yaitu 0,4 dan 0,6 $\mu\text{l}/\text{jam}$, serat dengan morfologi yang baik belum terbentuk. Pada kondisi ini

morfologi serat masih berupa butiran. Pada laju alir 0,8 $\mu\text{l}/\text{jam}$ jumlah butiran berkurang, serat sudah mulai terbentuk dengan ukuran rata-rata ($88 \pm 1,29$) nm. Hal ini sejalan dengan yang dikemukakan oleh Miftah *et al.*, bahwa jumlah butiran berkurang sejalan dengan penambahan besarnya laju alir (Miftah *et al.*, 2009).

PENUTUP

Lembaran PVA yang terbentuk dari penumpukan nanoserat telah berhasil dibuat dengan menggunakan pemintalan elektrik sistem jarum banyak yang berjejer (*multi nozzle*) dan kolektor berbentuk silinder yang dapat berputar (kolektor drum). Pada pemintalan elektrik dengan sistem *multi nozzle* terjadi distorsi medan listrik pada ujung jarum, yang menyebabkan serat pada kolektor tidak rata. Morfologi nanoserat yang dihasilkan dapat dikontrol dengan mengubah parameter laju alir larutan. Agar nanoserat yang dihasilkan oleh pemintal elektrik sistem jarum banyak pada kolektor rata, perlu modifikasi kembali alat pemintal elektrik yang dapat menggeser kedudukan penyemprot bergerak secara otomatis ke samping kanan dan kiri. Lembaran nanoserat hasil pemintalan elektrik yang dihasilkan dengan alat pemintal elektrik sistem jarum banyak dan kolektor silinder berputar memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai penutup luka.

UCAPAN TERIMAKASIH

Kegiatan penelitian ini didukung oleh Kementerian Negara Riset dan Teknologi, melalui insentif Riset Sistem Inovasi Nasional (SINas) tahun 2013 (No. Identitas RT-2013-1881).

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M., Virgus, Y., Nirmin & Khairurrijal. (2008). Review: Sintesis Nanomaterial. *Jurnal Nanosains & Nanoteknologi*, 1: 33-57.
- Abdullah, M. 2009. *Pengantar Nanosains*. Bandung: Penerbit ITB.
- Angammana, C. J., Jayaram, S. H. (2011). Effects of Electric Field on the Multi-jet Electrospinning Process and Fiber Morphology. *IEEE Transaction*, 47:1-4.
- Beck, R., Guterres, S & Pohlmann, A. (2011). *Nanocosmetics and Nanomedicines: New Approaches for Skin Care*. New York: Springer.
- Chase, G. G., Varabhas, J. S., Reneker, D. H. (2011). New Methods to Electrospin Nanofibers. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 6: 32-38.
- Chellamani, K. P., Sundaramoorthy, P., Suresham, T. (2012). Wound Dressing Made Out of Poly Vinyl Alcohol/Chitosan Nanomembranes. *Journal of Academia and Industrial Research*, 1: 342-347.
- Fan, L-P., Zhang, K-H., Sheng, X-Y., He, C-L., Li, J., Mo, X-M., Wang, H-S. (2010). A Novel Skin-Care Product Based on Silk Fibroin Fabricated by Electrospinning. *Proceedings of 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE)*, 1- 4.
- Huang, Z.-M., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M., dan Ramakrishna, S. (2003). A Review on Polymer Nanofibers by Electrospinning and Their Applications in Nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63: 2223-2253.
- Iskandar, F., Suryamas, A. B., Kawabe, M., Munir, M. M., Okuyama, K., Tarao, T., dan Nishitani, T. (2010). Indium Tin Oxide Nanofiber Film Electrode for High Performance Dye Sensitized Solar Cells. *Japanese Journal of Applied Physics*, 49: 0102131- 0102133.
- Iskandar. (2014). *Sistem Elektrospinning Multinozel-Drum Kolektor dan Aplikasinya dalam Pembuatan Nanoserat Nikel Oksida untuk Material Anoda Baterai Li ion*. Tesis tidak diterbitkan. Bandung: SPS ITB.
- Lu, P. & Ding, B. (2008). Applications of Electrospun Fibers. *Nanotechnology*, 2: 169-182.
- Munir, M. M., Yun, K. M., Iskandar, F., Yabuki, A. & Okuyama, K. (2007). Heating Profile Effect on Morphology, Crystallinity, and Photoluminescent Properties of $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}^{3+}$ Phosphor Nanofibers Prepared using an Electrospinning Method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 46: 6705-6709.
- Munir, M. M., Widiyandari, H., Iskandar, F., dan Okuyama, K. (2008a). Patterned Indium Tin Oxide Nanofiber Films and Their Electrical and Optical Performance. *Nanotechnology*, 19: 3756011-3756017.
- Munir, M. M., Iskandar, F., Yun, K.M., Okuyama, K., dan Abdullah, M. (2008b). Optical and Electrical Properties of Indium Tin Oxide Nanofibers Prepared by Electrospinning. *Nanotechnology*, 19: 1456031-1456036.
- Munir, M. M., Iskandar, F., Khairurrijal, dan Okuyama, K. (2008c). A Constant-Current Electrospinning System for Production of High Quality Nanofibers. *Review of Scientific Instruments*, 79: 1- 4.
- Munir, M. M., Iskandar, F., Djamal, M., dan Okuyama, K. (2011). Morphology of Controlled Electrospun Nanofibers for Humidity Sensor Application. *AIP Conference Proceedings*, 1415: 223-226.
- Nuryantini, A. Y., Munir, M. M., Ekaputra, M. P., Suciati, T. & Khairurrijal. (2014). Electrospinning of Poly(Vinyl Alcohol)/Chitosan via Multi-Nozzle Spinneret and Drum Collector. *Advanced Materials Research*, 896: 41-44.
- Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W-E., Lim, T-C., dan Ma, Z. (2005). *An Introduction to Electro-*

- spinning and Nanofibers*. Singapore: World Scientific.
- Sill, T. J. & Von Recum, H. A. (2008). Electrospinning: Applications in Drug Delivery and Tissue Engineering. *Biomaterials*, 29: 1989-2006.
- Senturk-Ozer, S., Ward, D., Gevgilili, H., Kalyon, D. M. (2012). Dynamics of Electrospinning of Poly(caprolactone) via a Multi-Nozzle Spinneret Connected to a Twin Screw Extruder and Properties of Electrospun Fibers. *Polymer Engineering and Science*, 10: 1-12.
- Suryamas, A. B., Munir, M. M., Iskandar, F., dan Okuyama, K. (2009). Photoluminescent and Crystalline Properties of $Y_{3-x}Al_5O_{12} : Ce_x^{(3+)}$ Phosphor Nanofibers Prepared by Electrospinning. *Journal of Applied Physics*, 105: 0643111-0643115.
- Suryamas, A. B., Munir, M. M., Ogi, Hogan, C. J., Okuyama, K. (2010). Photoluminescent ZrO(2) Eu(3+) Nanofibers Prepared via Electrospinning. *Japanese Journal of Applied Physics*, 49: 1150031-1150036.
- Suryamas, A. B., Munir, M. M., Ogi, T., Khairurrijal, dan Okuyama, K. (2011). Intense Green and Yellow Emissions from Electrospun BCNO Phosphor Nanofibers. *Journal of Materials Chemistry*, 21: 12629-12631.
- Taylor, G. (1969). Electrically Driven Jets. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical and Physical Sciences*, 313(1515): 453-475.
- Tomaszewski, W., Szadkowski, M. (2005). Investigation of Electrospinning with the Use of a Multi-jet Electrospinning Head. *Fibres & Textiles In Eastern Europe*, 13: 22-26.
- Widiyandari, H., Munir, M. M., Iskandar, F. & Okuyama, K. (2009). Morphology-Controlled Synthesis of Chromia-titania Nanofibers via Electrospinning Followed by Annealing. *Materials Chemistry & Physics*, 116: 169-174.
- Yoon, K., Kim, K., Wang, X., Fang, D., Hsiao, B. S., Chu, B. (2006). High Flux Ultrafiltration Membranes Based on Electrospun Nanofibrous PAN Scaffolds and Chitosan Coating. *Polymer*, 47: 2434-2441.