

## Pengaruh Ketebalan Substrat Mikroserat Acak Polipropilena Terhadap Kinerja Filtrasi Udara Membran Nanoserat Poliakrilonitril

### *The Effect of Nonwoven Microfiber Substrate Polypropylene Thickness to Air Filtration Performance of Polyacrylonitrille Nanofiber*

Abdul Rajak<sup>1\*</sup>, Tri Siswandi Syahputra<sup>1</sup>, Muhammad Miftahul Munir<sup>2</sup>, Khairurrijal<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, Jurusan Sains, Institut Teknologi Sumatera

<sup>2</sup>Program Studi Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung

\*E-mail: rajak@fi.itera.ac.id

#### ABSTRACT

Since a nanofiber medium on itself is soft and fragile and cannot be used alone as air filters. Coating nanofiber on a rigid substrate to form a composite that can be handled readily is necessary. Beside can improve the filtration efficiency, adding the substrate will also save the use of nanofibers mat itself. The aim of this study is to evaluate the effect of substrate thickness on the performance of nanofibers mat in aerosol filtration in order to find the optimum thickness of substrate that can increase the quality of nanofiber filter. The substrate used was a low cost microfiber non-woven fabric made from polypropylene (PP). The nanofibers mat was composed of electrospun polyacrylonitrile (PAN) with concentration of 9 wt.% which dissolved at N,N dimethylformamide (DMF). Five variations of PP different in thickness was used as substrate. From the SEM image, it was found that there is increasing fiber diameter of PAN after electrospun into PP substrate. From the porosity estimation of each nanofiber, it was found that the porosity decreased with increasing the substrate thickness. For test the performance of nanofiber filter, the particles of polystyrene latex (PSL) which generated by atomizer was used as the aerosol particle. In addition, to evaluate the performance filter in PM<sub>2.5</sub> filtration, the experiment was carried out with generate the smoke from burning incense. Air filtration performance of all variations is obtained by comparison the results of measurement including: pressure drop, efficiency and quality factor. From the results, there is limitation on the substrates thickness based on the value of the quality factor obtained. Overall, PP nonwoven as the substrates gives the great contribution on the efficiency of PAN nanofiber.

**Keywords:** substrate, polypropylene, thickness, nanofiber, air filtration.

#### PENDAHULUAN

Filtrasi udara menggunakan media filter berbahan serat merupakan salah satu metode paling efektif untuk memisahkan partikel berukuran nano, submikro dan mikro yang bertebaran di udara (Kim *et al.*, 2006; Yun *et al.*, 2007). Membran nanoserat telah dilaporkan oleh beberapa peneliti memiliki kinerja filtrasi udara yang baik dibandingkan dengan membran filter konvensional. Hal ini dikarenakan membran nanoserat memiliki karakteristik unik seperti memiliki rasio luas permukaan terhadap volume besar, massa persatuan luas kecil, ukuran pori kecil dan morfologi serta keseragaman diameter yang dapat dikontrol (Leung, *et al.*, 2010; Yun *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010). Salah satu teknik untuk memproduksi membran nanoserat yang populer saat ini adalah pemintalan elektrik (*electrospinning*). Teknik ini dipilih karena mampu menghasilkan nanoserat dengan kualitas yang baik, selain itu metode ini juga

lebih sederhana dan murah dibandingkan dengan metode pembuatan nanoserat lainnya (Li *et al.*, 2004; Rutledge & Fridrikh, 2007; Munir *et al.*, 2009). Morfologi nanoserat dari hasil pemintalan elektrik dapat dikontrol melalui pengaturan parameter larutan polimer seperti: konsentrasi, viskositas, tegangan permukaan, konduktivitas, dan pengaturan parameter proses seperti: laju alir, tegangan tinggi dan jarak antara jarum-kolektor (Munir *et al.*, 2009).

Beberapa bahan polimer telah berhasil disintesis menjadi nanoserat untuk aplikasi media filter udara diantaranya : poliakrilonitril (PAN) (Yun *et al.*, 2007, 2010; Balgis *et al.*, 2015), poliamida (PA) (Matulevicius *et al.*, 2014), selulosa asetat (CA) (Chattopadhyay *et al.*, 2016), polisulfon (PSU) (Huang *et al.* 2006) dan beberapa kombinasinya (Yang *et al.*, 2015; Matulevicius *et al.*, 2016; Nicosia *et al.*, 2016; S. Zhang *et al.*, 2016). Namun demikian, membran nanoserat umumnya memiliki sifat

yang rapuh dan mudah rusak, sehingga dirinya sendiri tidak dapat digunakan sebagai media filtrasi udara (Leung *et al.*, 2010). Dalam studi kasus aplikasi filter udara, untuk dapat meningkatkan kekuatan mekanik membran nanoserat dapat dilakukan dengan cara membuat membran nanoserat dengan ketebalan yang cukup besar, namun dengan ketebalan besar, maka resistansi dari membran ini juga akan meningkat. Filter udara yang baik seharusnya memiliki resistansi serendah mungkin dan efisiensi sebesar mungkin (Bao *et al.*, 2016). Untuk mengatasi permasalahan ini, beberapa usaha telah dilakukan, salah satunya adalah dengan cara mengintegrasikan membran nanoserat dengan substrat yang lebih kuat. Substrat umumnya tersusun dari serat-serat secara acak (*nonwoven*) berukuran mikrometer. Beberapa peneliti menjelaskan bahwa dengan menambahkan substrat akan dapat meningkatkan efisiensi filtrasi udara (Wang, *et al.*, 2008; Yoon, *et al.*, 2008; Leung *et al.*, 2009, 2010). Substrat komersial seperti HEPA (*high efficiency particulate air*), ULPA (*ultra-low particulate air*) dan serat kaca (*fiber glass*) umumnya digunakan sebagai substrat oleh para peneliti terdahulu (Yun *et al.*, 2007). Namun, filter substrat komersial ini masih sangat terbatas dan mahal, sehingga harus ditinjau ulang lagi penggunaannya sebagai substrat. Leung *et al.* (2010) dan Wang *et al.* (2008) telah mendemonstrasikan secara eksperimen penggunaan substrat berbahan alternatif murah, namun grup peneliti ini membahas pengaruh ketebalan membran nanoserat terhadap efisiensi filtrasi, sedangkan pengaruh ketebalan substrat itu sendiri belum dipelajari secara detail. Ketebalan filter merupakan parameter fisis yang memiliki peranan penting, maka mempelajari pengaruh ketebalan substrat terhadap kinerja filtrasi menjadi hal menarik. Dalam penelitian ini telah dibahas secara detail pengaruh ketebalan substrat terhadap kinerja filtrasi membran nanoserat.

Pada penelitian ini, substrat mikro serat dari bahan polipropilena (PP) dengan lima variasi ketebalan digunakan sebagai lapisan tambahan untuk meningkatkan efisiensi dan sebagai penopang membran nanoserat. Substrat PP ini telah banyak digunakan untuk beragam aplikasi, dikarenakan karakteristiknya yang baik seperti pori yang terkoneksi secara acak satu sama lain, kekuatan termal dan kimia yang

baik serta bahan yang relatif murah (Zhao *et al.*, 2012). Dalam hal ini membran nanoserat dari bahan polimer poliakrilonitril (PAN) disintesis di atas substrat PP tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari efek ketebalan substrat yang diberikan pada membran nanoserat terhadap kinerja filtrasinya sehingga dapat diperoleh suatu nilai ketebalan optimum. Pengujian kinerja filtrasi diuji dengan mengukur parameter uji filter udara seperti: penurunan tekanan (*pressure drop*), efisiensi, dan faktor kualitas (*quality factor*). Pengujian ini dilakukan dengan mengalirkan model polusi udara berupa partikel aerosol polistirena lateks (PSL) melalui filter. Untuk menguji kinerja filtrasi membran nanoserat dalam menyaring partikel yang lebih besar yang berukuran kurang dari 2,5  $\mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>), digunakan model polutan yang berasal dari asap hasil pembakaran dupa, yaitu telah dilaporkan dan direkomendasikan bahwa asap ini sangat sesuai untuk memodelkan polutan dalam ranah PM<sub>2.5</sub> oleh Zhang *et al.* (2016).

## METODE

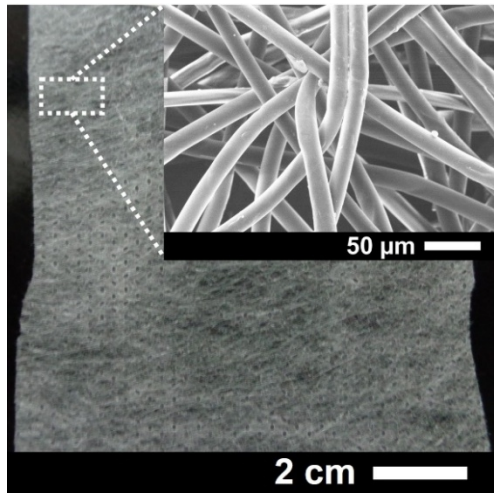
### Material

Bahan polimer poliakrilonitril (PAN) dengan berat molekul 150 kg/mol digunakan sebagai bahan pembuatan membran nanoserat, PAN dilarutkan dalam pelarut dimetilformamida (DMF), keduanya merupakan bahan pro analisis yang diperoleh dari Sigma-Aldrich, Singapura. Larutan PAN dibuat dengan konsentrasi 9 % berat, kemudian diaduk menggunakan *hot plate magnetic stirrer* pada suhu 80 °C sampai diperoleh larutan yang homogen.

Sedangkan untuk substrat mikroserat polipropilena (PP), diperoleh dari perusahaan lokal PT. Spunindo Jaya Nonwoven Manufacture. Tabel 1 menunjukkan 5 macam mikroserat PP dengan berbagai macam ketebalan yang kami gunakan dalam studi ini. Gambar 1 menunjukkan struktur fisis secara makroskopik dan mikroskopik yang diperoleh melalui citra SEM dari substrat PP. Dari hasil pengukuran, substrat PP memiliki diameter rata-rata 19,02  $\mu\text{m}$ .

Tabel 1. Mikroserat polipropilena (PP) yang digunakan

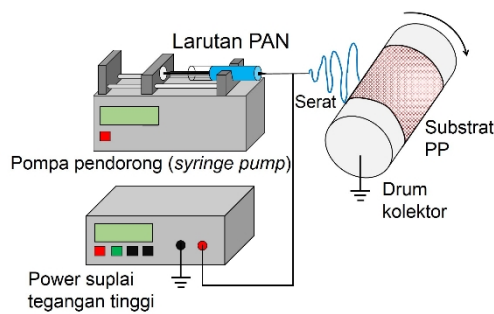
Kode Sampel	Massa basis (gt/m <sup>2</sup> )	Ketebalan (mm)
PP1	13	0,12
PP2	20	0,18
PP3	30	0,26
PP4	40	0,29
PP5	50	0,32



Gambar 1. Substrat polipropilena dan citra SEMnya.

**Pemintalan Elektrik**

Gambar 2 menunjukkan skematik diagram dari teknik pemintalan elektrik yang digunakan dalam pembuatan membran nanoserat. Jarum dengan diameter 0,8 mm (21G), laju alir larutan 10 μL/menit, tegangan positif 14 kV dan jarak kolektor silinder terhadap jarum sebesar 10 cm ditetapkan sebagai parameter proses. Kolektor silinder berputar digunakan sebagai pengumpul membran nanoserat yang dikeluarkan dari jarum, kolektor tersebut dibuat dari bahan logam alumunium dengan diameter 5 cm dan panjang 18 cm. Sebelum proses pemintalan dimulai, permukaan kolektor dilapisi oleh lembaran substrat terlebih dahulu. Pada masing-masing variasi ketebalan substrat, proses pemintalan dijalankan selama 80 menit untuk mendapatkan ketebalan nanoserat PAN yang sama.



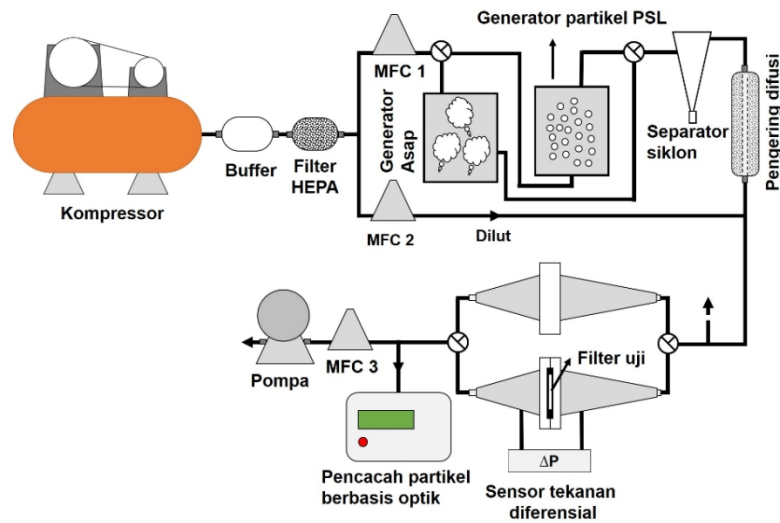
Gambar 2. Diagram skematik alat pemintalan elektrik yang digunakan untuk memproduksi nanoserat.

**Karakterisasi Nanoserat**

Hasil membran nanoserat yang diperoleh kemudian dilakukan karakterisasi meliputi: pengamatan morfologi melalui mikroskop elektron (*scanning electron microscope*, SEM, JEOL JSM-6510LV). Sifat fisis membran nanoserat seperti kerapatan dan porositas diukur dengan menimbang massa basis (*basic weight*) atau massa serat per satuan luas menggunakan timbangan digital presisi Fujitsu FSR-A320 dan ketebalan serat diukur menggunakan mikrometer sekrup digital Sylvac S228.

**Pengujian Kinerja Filter Udara**

Gambar 3 menunjukkan diagram skematik sistem uji filter udara yang digunakan untuk mengukur parameter filtrasi aerosol. *Buffer* yang berupa tabung ditempatkan pada input aliran aerosol agar aliran udara dari pompa menjadi stabil. Regulator aliran udara (*mass flow controller*, MFC) dengan kapasitas maksimum 20 LpM digunakan untuk mengontrol debit (Q) aliran udara pada sistem. Partikel aerosol polistirena lateks (PSL) dan asap dupa digunakan sebagai model polutan aerosol. PSL dalam bentuk suspensi dengan pelarut air suling diatomisasi menjadi aerosol menggunakan sebuah atomizer, selanjutnya hasil aerosol yang mengandung partikel PSL dialirkan ke dalam sistem. Untuk menghitung jumlah partikel PSL sebelum dan sesudah filter, digunakan pencacah partikel berbasis optik (*optical particle counter*, OPC, Rion KC-03), ukuran partikel yang dapat diukur oleh OPC mulai dari rentang 0,3 sampai 2 μm. Untuk mengurangi jumlah partikel yang mengalir berlebihan, sistem diluter digunakan untuk mengencerkan atau mengurangi jumlah partikel dengan cara mencampurkannya dengan udara bersih, sistem diluter ini dikontrol alirannya menggunakan perangkat MFC. Separator siklon dan pengering difusi yang dipasang secara berturut-turut digunakan untuk memisahkan partikel aerosol dengan uap air yang ikut mengalir ke dalam sistem, sehingga tidak mempengaruhi pengukuran efisiensi. Penurunan tekanan atau *pressure drop* filter diukur dengan menggunakan sebuah sensor tekanan diferensial Sensirion SDP500, yang diukur dengan mengatur kecepatan aliran udara pada filter atau lebih dikenal sebagai *face velocity*. Dalam sistem ini, membran nanoserat yang diuji dipotong secara melingkar dengan diameter 2,5 cm dan ditempatkan pada sebuah *filter holder*. Selanjutnya jumlah partikel sebelum dan setelah filter diukur dengan mengalirkan udara yang mengandung partikel aerosol ke bagian filter holder yang tidak ada filter (*filter holder* bagian atas) dan ada filter secara berurutan.



Gambar 3. Diagram skematik alat tes kinerja filter udara

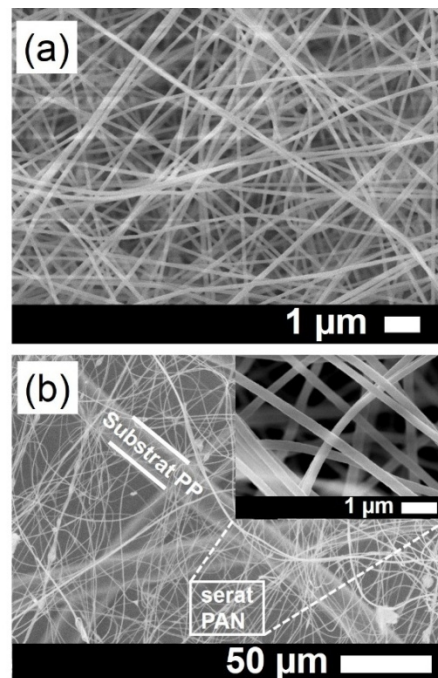
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Morfologi Membran Kombinasi Nanoserat dan Substrat

Gambar 4(a) menunjukkan citra SEM dari nanoserat PAN sebelum dikombinasikan dengan substrat. Dari hasil pengukuran, diameter rata-rata diperoleh sebesar  $340 \text{ nm} \pm 76$ . Hasil ini jauh lebih kecil dibandingkan diameter substrat PP yang telah diukur sebelumnya yakni pada nilai  $19,02 \text{ } \mu\text{m}$ . Yoon *et al.* (2008) melaporkan bahwa kombinasi antara serat yang memiliki diameter besar (orde mikrometer) dan diameter kecil (orde nanometer) dapat meningkatkan efisiensi filtrasi udara tanpa secara signifikan meningkatkan resistansinya.

Gambar 4 (b) adalah citra SEM kombinasi antara nanoserat PAN dan substrat PP. Dari citra ini, rata-rata diameter serat PAN meningkat menjadi  $480 \pm 95 \text{ nm}$  (sisipan gambar 4(b)). Peningkatan ini disebabkan oleh bahan substrat yang berperan sebagai isolator sehingga membatasi antara jarum yang bermuatan dengan silinder logam, sehingga dapat mengurangi gaya tarikan listrik serat ke arah kolektor. Hasil yang serupa telah dijelaskan oleh Zhao *et al.*, (2013) yang menggunakan substrat non-konduktif pada pembuatan nanoserat. Grup tersebut membuat simulasi perbedaan pembentukan medan listrik di ujung jarum dengan menggunakan aluminium foil dan substrat non-konduktif sebagai kolektor serat yang pada akhirnya dapat menimbulkan peningkatan diameter serat yang dihasilkan.

Terjadinya ikatan interkoneksi antara serat dari PAN dan substrat selama proses pemintalan elektrik, menghasilkan lembaran nanoserat yang terbentuk menjadi lebih kuat dan tidak mudah rusak dibandingkan tidak menggunakan substrat. Leung *et al.* (2010) menjelaskan bahwa parameter penting yang berperan dalam hal ini adalah massa basis (*basis weight*), yaitu massa serat per satuan luas. Akibat terjadinya ikatan ini, menyebabkan massa basis menjadi meningkat.



Gambar 4. Citra SEM, (a) nanoserat PAN, (b) kombinasi nanoserat PAN dan substrat PP.

**Kerapatan Serat dan Porositas Membran**

Selain morfologi dan diameter serat, parameter penting lainnya yang sangat berpengaruh terhadap efisiensi filter yaitu kerapatan serat (*packing density*) dan porositas. Kerapatan serat merupakan fraksi volume padatan dalam hal ini serat terhadap total volume serat seperti yang diekspresikan pada persamaan 1. Kerapatan serat umumnya bergantung pada waktu proses pemintalan serat (Leung *et al.*, 2010).

$$\alpha = \frac{W}{\rho_b L} \tag{1}$$

dimana  $\alpha$  adalah kerapatan serat  $W$  adalah massa basis ( $\text{gr/cm}^2$ ),  $\rho_b$  adalah massa jenis material polimer yang digunakan ( $\text{gr/cm}^3$ ) dan  $L$  adalah ketebalan membran (cm). Pada membran yang terdiri dari dua atau lebih lapisan, maka total kerapatan serat dapat dihitung menggunakan persamaan 2 (Leung *et al.*, 2010).

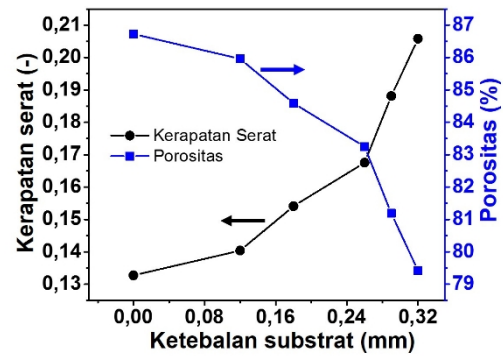
$$\alpha_{1,2} = \frac{W_1 + W_2}{(\rho_1 L_1 + \rho_2 L_2)} \tag{2}$$

Kerapatan serat kombinasi PAN dan substrat PP dapat dihitung dengan menggunakan massa jenis polipropilena sebesar  $0,91 \text{ gr/cm}^3$  (Debnath *et al.*, 2013) dan PAN sebesar  $1,18 \text{ gr/cm}^3$  (Mei *et al.*, 2013). Sedangkan porositas kebalikan dari kerapatan serat.

Porositas didefinisikan sebagai area kosong dalam membran. Sehingga porositas ( $\phi$ ) dan diekspresikan pada persamaan 3 (Matulevicius *et al.*, 2014).

$$\phi = [1 - \alpha] \times 100\% \tag{3}$$

Gambar 5 menunjukkan hasil perhitungan kerapatan serat dan porositas. Pada gambar ini terlihat bahwa ketebalan substrat sangat berperan dalam meningkatkan kerapatan serat dengan asumsi bahwa kerapatan serat PAN tetap untuk setiap variasi. Peningkatan kerapatan ini menurut Rao *et al.*, (1988) juga akan meningkatkan resistansi filter (dalam hal ini *pressure drop*), sehingga secara otomatis efisiensi juga akan meningkat..



Gambar 5. Pengaruh penambahan substrat terhadap kerapatan serat dan porositas.

**Kinerja Filtrasi Udara**

Kinerja media filter udara umumnya ditunjukkan dengan hasil pengukuran penetrasi, penurunan tekanan (*pressure drop*), efisiensi dan faktor kualitas, yaitu masing-masingnya diekspresikan sebagai berikut:

$$P_n = \frac{N_2}{N_1} \tag{4}$$

$$\eta = 1 - P_n = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \tag{5}$$

$$\Delta P = \frac{\mu \cdot f_v \cdot L}{K} \tag{6}$$

$$Q_F = \frac{-\ln(P_n)}{\Delta P} \tag{7}$$

dengan :

- $P_n$  = penetrasi (-)
- $N_1$  = jumlah partikel sebelum melewati Filter (-)
- $N_2$  = jumlah partikel setelah melewati filter (-)
- $\eta$  = efisiensi (%)
- $\Delta P$  = penurunan tekanan atau *pressure drop* (Pa)
- $\mu$  = viskositas udara
- $f_v$  = kecepatan udara atau *face velocity* (cm/s)
- $K$  = permeabilitas udara (H/m)
- $L$  = ketebalan filter (mm)
- $Q_F$  = faktor kualitas (1/Pa)



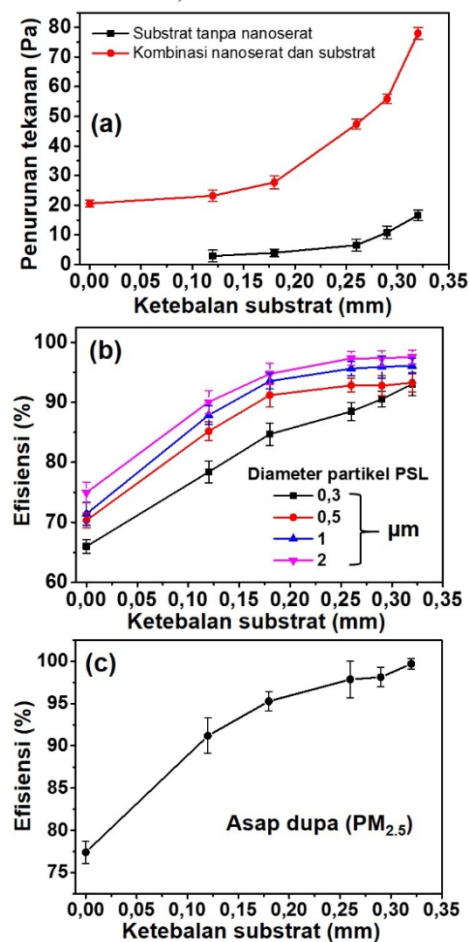
Parameter yang paling penting dalam menilai baik atau tidaknya suatu media filter udara adalah faktor kualitas atau *quality factor*, karena parameter ini membandingkan antara efisiensi filter dengan resistansi atau nilai penurunan tekanannya (persamaan 7). Suatu media filter udara dapat dengan mudah ditingkatkan efisiensinya hanya dengan menambahkan ketebalannya, namun sejalan dengan ini resistansinya juga akan meningkat, sehingga filter ini akan sulit untuk dilewati oleh udara. Oleh karena itu media filter yang baik adalah memiliki nilai faktor kualitas yang tinggi atau dengan kata lain memiliki efisiensi semaksimal mungkin namun dengan penurunan tekanan atau resistansi serendah mungkin.

Gambar 6(a)-(c) menunjukkan hasil pengukuran penurunan tekanan dan efisiensi dari nanoserat PAN dan kombinasinya dengan substrat PP. Gambar 6(a) menunjukkan hasil pengukuran penurunan tekanan pada *face velocity* atau kelajuan aliran udara sebesar 5,23 cm/s. Hal ini menunjukkan terjadinya peningkatan penurunan tekanan seiring dengan penambahan ketebalan substrat PP. Hal ini sesuai dengan hukum Darcy bahwa penurunan tekanan meningkat seiring dengan ketebalan filter (Miguel, 2003).

Gambar 6(b) dan 6(c) secara berturut-turut menunjukkan hasil pengukuran efisiensi filter dalam menyaring partikel PSL dengan ukuran 0,3; 0,5; 1; 2  $\mu\text{m}$  dan asap dupa ( $\text{PM}_{2.5}$ ). Dari kedua kurva ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan efisiensi yang signifikan seiring dengan penambahan ketebalan substrat PP. Jika dibandingkan antara hasil pengukuran filtrasi PSL dan asap dupa, maka hasil peningkatan filtrasi asap dupa lebih signifikan, hal ini disebabkan pada partikel asap ( $\text{PM}_{2.5}$ ) dengan ukuran yang rata-rata di atas 1  $\mu\text{m}$ , mekanisme penangkapan partikel di udara oleh filter didominasi oleh impaksi (*impaction*) dibandingkan dua mekanisme yang lain yaitu intersepsi (*interception*) dan difusi (*diffusion*) yang terjadi pada partikel berukuran kurang dari 1  $\mu\text{m}$ , dimana mekanisme secara impaksi memberikan peluang penangkapan partikel udara yang lebih tinggi (Lee, 1981; Wang & Otani, 2012).

Dari gambar 6(b) dan 6(c), terlihat peningkatan efisiensi filtrasi naik seiring dengan kenaikan ketebalan substrat, hal ini dapat dijelaskan dengan perbedaan diameter serat substrat PP yang jauh lebih besar dibandingkan nanoserat PAN. Kehadiran serat

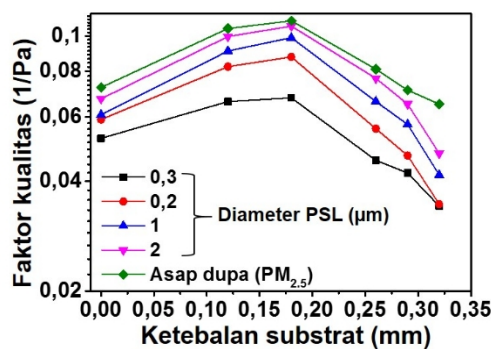
substrat PP memiliki peranan penting dalam meningkatkan efisiensi penangkapan partikel dengan mekanisme impaksi, partikel-partikel berukuran besar ( $> 1\mu\text{m}$ ) yang bergerak bersamaan dengan aliran udara lebih memiliki peluang untuk menabrak serat dengan diameter yang besar (Lee, 1981; Wang and Otani, 2012). Sedangkan partikel udara yang ukurannya lebih kecil ( $< 1\mu\text{m}$ ) memiliki pergerakan random dengan lintasan zig-zag yang disebut sebagai gerak Brownian (Wang & Otani, 2012), partikel-partikel ini dapat ditangkap oleh mekanisme difusi dan impaksi oleh serat dengan diameter yang kecil dalam hal ini nanoserat PAN (Lee, 1981; Wang and Otani, 2012). Oleh karena itu, kombinasi antara serat substrat dengan nanoserat PAN dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi filtrasi (Yoon *et al.*, 2008).



Gambar 6. Pengaruh dari ketebalan substrat terhadap (a) penurunan tekanan, (b) efisiensi penyaringan PSL dan (c) efisiensi penyaringan asap dupa ( $\text{PM}_{2.5}$ ).

**Pengaruh Ketebalan Substrat Terhadap Faktor Kualitas**

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara ketebalan substrat dan faktor kualitas. Dari gambar ini dapat disimpulkan bahwa faktor kualitas dapat ditingkatkan dengan menambah ketebalan substrat. Dari gambar 7 terlihat bahwa faktor kualitas meningkat sampai mencapai suatu nilai titik maksimum, dan kemudian turun seiring dengan ketebalan. Berdasarkan gambar 7, nilai optimum faktor kualitas diperoleh pada ketebalan substrat 0,18 mm (PP2). Secara teori dan simulasi, Dharmannolla *et al.* (2008) telah mendemonstrasikan bahwa peningkatan faktor kualitas sampai pada titik optimum tertentu bergantung pada ketebalan dan massa dari media filter yang diukur. Pada paper ini, faktor kualitas terbaik diperoleh pada kombinasi membran nanoserat PAN dan substrat PP2.

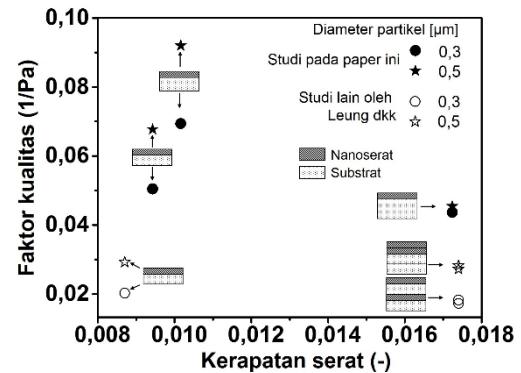


Gambar 7. Pengaruh ketebalan substrat terhadap faktor kualitas membran nanoserat

**Perbandingan Dengan Studi Lain**

Hasil data dari penelitian ini juga dibandingkan dengan hasil studi lain yang dilakukan oleh Leung *et al.* (2010). Namun pada penelitian tersebut, nanoserat divariasikan ketebalannya yang kemudian dikombinasikan dengan substrat pada ketebalan konstan. Data yang ditampilkan pada paper tersebut direkonstruksi ulang dan kemudian ditampilkan bersamaan dengan hasil pada penelitian ini, hasil rekonstruksi ulang ini disajikan pada Gambar 8. Dari gambar ini, dapat terlihat sangat jelas bahwa faktor kualitas yang diperoleh dari penelitian ini memiliki nilai lebih tinggi dari penelitian perbandingan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa faktor kualitas dapat ditingkatkan hanya dengan menambah ketebalan substrat tanpa harus menambah ketebalan nanoserat. Namun demikian, ada

batasan tertentu dari ketebalan substrat yang dapat ditambahkan pada nanoserat.



Gambar 8. Data perbandingan hasil penelitian ini dengan studi lain

**KESIMPULAN**

Pengaruh ketebalan substrat mikroserat polipropilena (PP) terhadap peningkatan efisiensi dan faktor kualitas dari membran nanoserat poliakrilonitril (PAN) telah dipelajari secara detail. Hasil pengukuran kinerja filtrasi udara menunjukkan bahwa substrat PP memberikan kontribusi terhadap efisiensi dan faktor kualitas nanoserat PAN, baik dalam menyaring partikel PSL maupun partikel asap (PM<sub>2,5</sub>). Efisiensi maksimum diperoleh pada kombinasi nanoserat PAN dan substrat PP5 dengan nilai: 93,04; 93,27; 96,1 dan 97,56% untuk penyaringan partikel PSL dengan diameter 0,3; 0,2; 1 dan 2 μm secara berturut-turut. Namun demikian, walaupun kombinasi ini memiliki efisiensi tertinggi dibandingkan yang lain, kombinasi ini juga memiliki nilai penurunan tekanan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, dalam hal faktor kualitas menjadi yang paling rendah. Peningkatan faktor kualitas mencapai nilai maksimum sampai pada penambahan ketebalan PP2 yaitu 0,18 mm. Hasil pengujian penyaringan asap menunjukkan peningkatan efisiensi lebih signifikan dibandingkan penyaringan partikel PSL.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) Institut Teknologi Sumatera (ITERA) atas dukungan pendanaan selama kegiatan penelitian melalui skema Hibah Mandiri ITERA tahun 2017.

## DAFTAR PUSTAKA

- Balgis, R., Kartikowati, C.W., Ogi, T., Gradon, L., Bao, L., Seki, K., & Okuyama K., 2015. Synthesis and Evaluation of Straight and Bead-free Nanofibers for Improved Aerosol Filtration, *Chem. Eng. Sci.* 137: 947-954.
- Bao, L., Seki, K., Niinuma, H., Otani, Y., Balgis, R., Ogi, T., Gradon, L., & Okuyama, K., 2016. Verification of Slip Flow in Nanofiber Filter Media Through Pressure Drop Measurement at Low-pressure Conditions, *Sep. Purif. Technol.* 159: 100-107.
- Chattopadhyay, S., Hatton, T.A., & Rutledge, G.C., 2016. Aerosol Filtration Using Electrospun Cellulose Acetate Fibers, *J. Mater. Sci.* 51: 204-217.
- Debnath, S., & Madhusootheran, M., 2013. Studies on Compression Behaviour of Polypropylene Needle Punched Nonwoven Fabrics Under Wet Condition, *Fibers Polym.* 14: 854-859.
- Dharmanolla, S., & Chase, G.G., 2008. Computer Program for Filter Media Design Optimization, *J. Chinese Inst. Chem. Eng.* 39: 161-167.
- Huang, H.-L., & Yang, S., 2006. Filtration Characteristics of Polysulfone Membrane Filters, *J. Aerosol Sci.* 37: 1198-1208.
- Kim, C.S., Bao, C.S., Okuyama, K., Shimada, M., & Niinuma, H., 2006. Filtration Efficiency of a Fibrous Filter for Nanoparticles, *J. Nanoparticle Res.* 8: 215-221.
- Lee, K.W., 1981. Maximum Penetration of Aerosol Particles in Granular Bed Filters, *J. Aerosol Sci.* 12: 79-87.
- Leung, W.W.-F., Hung, C.-H., & Yuen, P.-T., 2009. Experimental Investigation on Continuous Filtration of Sub-micron Aerosol by Filter Composed of Dual-layers Including a Nanofiber Layer, *Aerosol Sci. Technol.* 43: 1174-1183.
- Leung, W.W.-F., Hung, C.-H., & Yuen, P.-T., 2010. Effect of Face Velocity, Nanofiber Packing Density and Thickness on Filtration Performance of Filters with Nanofibers Coated on a Substrate, *Sep. Purif. Technol.* 71: 30-37.
- Li, D., & Xia, Y., 2004. Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel?. 16 (14).
- Matulevicius, J., Kliucininkas, L., Martuzevicius, D., Krugly, E., Tichonovas, & M., Baltrusaitis, J., 2014. Design and Characterization of Electrospun Polyamide Nanofiber Media for Air Filtration Applications, *J. Nanomater.* 2014, (14).
- Matulevicius, J., Kliucininkas, L., Prasauskas, T., Buivydiene, D., & Martuzevicius, D., 2016. The Comparative Study of Aerosol Filtration by Electrospun Polyamide, Polyvinyl Acetate, Polyacrylonitrile and Cellulose Acetate Nanofiber Media, *J. Aerosol Sci.* 92: 27-37.
- Mei, Y., Wang, Z., & Li, X., 2013. Improving Filtration Performance of Electrospun Nanofiber Mats by A Bimodal Method, *J. Appl. Polym. Sci.* 128: 1089-1094.
- Miguel, A.F., 2003. Effect of Air Humidity on The Evolution of Permeability and Performance of A Fibrous Filter During Loading with Hygroscopic and Non-hygroscopic Particles, *J. Aerosol Sci.* 34: 783-799.
- Munir, M.M., Iskandar, F., Khairurrijal, K., & Okuyama, K., 2009. High Performance Electrospinning System for Fabricating Highly Uniform Polymer Nanofibers, *Rev. Sci. Instrum.* 80: 026-106.
- Munir, M.M., Suryamas, A.B., Iskandar, F., & Okuyama, K., 2009. Scaling Law on Particle-to-fiber Formation During Electrospinning., *Polymer*, 50: 4935-4943.
- Nicosia, A., Keppler, T., Müller, F.A., Vazquez, B., Ravegnani, F., Monticelli, P., & elosi, F., 2016. Cellulose Acetate Nanofiber Electrospun on Nylon Substrate as Novel Composite Matrix for Efficient, Heat-resistant, Air Filters, *Chem. Eng. Sci.*, 153: 284-294.
- Rao, N., & Faghri, M., 1988. Computer Modeling of Aerosol Filtration by Fibrous Filters, *Aerosol Sci. Technol.* 8: 133-156.
- Rutledge, G.C., & Fridrikh, S. V., 2007. Formation of Fibers by Electrospinning, *Adv. Drug Deliv. Rev.* 59: 1384-1391.
- Wang, C., & Otani, Y., 2012. Removal of Nanoparticles from Gas Streams by Fibrous Filters: A Review, *Ind. Eng. Chem. Res.* 52: 5-17.
- Wang, J., Kim, S.C., & Pui, D.Y.H., 2008. Figure of Merit of Composite Filters with Micrometer and Nanometer Fibers, *Aerosol Sci. Technol.* 42: 722-728.
- Yang, Y., Zhang, S., Zhao, X., Yu, J., & Ding, B., 2015. Sandwich Structured Polyamide-6/polyacrylonitrile Nanonets/bead-on-string Composite Membrane for Effective Air Filtration, *Sep. Purif. Technol.* 152: 14-22.



- Yoon, K., Hsiao, B.S., & Chu, B., 2008. Functional Nanofibers for Environmental Applications, *J. Mater. Chem.* 18: 5326-5334.
- Yun, K.M., Hogan, C.J., Matsubayashi, Y., Kawabe M., Iskandar, F., & Okuyama K., 2007. Nanoparticle Filtration by Electrospun Polymer Fibers, *Chem. Eng. Sci.* 62: 4751-4759.
- Yun, K.M., Suryamas, A.B., Iskandar, F., Bao, L., Niinuma, H., & Okuyama, K., 2010. Morphology Optimization of Polymer Nanofiber for Applications in Aerosol Particle Filtration, *Sep. Purif. Technol.*, 75: 340-345.
- Zhang, Q., Welch, J., Park, H., Wu, C.-Y., Sigmund, W., & Marijnissen, J.C.M., 2010. Improvement in Nanofiber Filtration by Multiple Thin Layers of Nanofiber Mats, *J. Aerosol Sci.* 41: 230-236.
- Zhang, R., Liu, C., Hsu, P.-C., Zhang, C., Liu, N., Zhang, J., Lee, H.R., Lu, Y., Qiu, Y., & Chu, S., 2016. Nanofiber Air Filters with High-temperature Stability for Efficient PM<sub>2.5</sub> Eemoval from The Pollution Sources, *Nano Lett.* 16: 3642-3649.
- Zhang, S., Tang, N., Cao, L., Yin, X., Yu, J., & Ding, B., Highly Integrated Polysulfone/Polyacrylonitrile/Polyamide-6 Air Filter for Multilevel Physical Sieving Airborne Particles, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 8: 29062-29072.
- Zhao, J., Shi, Q., Luan, S., Song, L., Yang, H., Stagnaro, P., & Yin, J., 2012. Polypropylene Non-woven Fabric Membrane via Surface Modification with Biomimetic Phosphorylcholine in Ce (IV)/HNO<sub>3</sub> Redox System, *Mater. Sci. Eng. C.* 32: 1785-1789.
- Zhao, S., Zhou, Q., Long, Y.-Z., Sun, G.-H., & Zhang, Y., 2013. Nanofibrous Patterns by Direct Electrospinning of Nanofibers onto Topographically Structured Non-conductive Substrates, *Nanoscale.* 5: 4993-5000.

