Filter Udara Multifungsi dari Limbah Plastik dan Bahan Alam - tahun ke-1

PPMI FMIPA ITB 2026 – Riset

Muhamad Azwar Annas[1], Aditya Aryashakti Putra Rahmawan[1], Suprijadi[1], Irfan Dwi Aditya[1], Muhammad Miftahul Munir[1]

[1] Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Abstrak

Muatan *electret* pada filter udara meluruh selama pemakaian, sehingga cara filter memanfaatkan muatannya sama pentingnya dengan jumlah muatannya. Penelitian ini membandingkan dua cara menggabungkan limbah PVC dan *styrofoam* (EPS) menjadi membran nanofiber: dicampur dalam satu lapisan (*co-spun*, CO) atau dilapis (*bilayer*). Pada *pressure drop* yang sebanding, tangkapan mekanik keduanya setara, tetapi muatan pada CO menekan penetrasi partikel sekitar 7 kali lebih kuat. Setelah muatan dinetralkan, CO mempertahankan efisiensi 83,59%, melampaui respirator N95 (76,64%) dan KN95 (48,98%), meski dengan *pressure drop* yang lebih tinggi.

Keyword: Filter *electret*, Limbah plastik, *Co-electrospinning*, *Bilayer*, Netralisasi muatan, Filtrasi udara

Pendahuluan

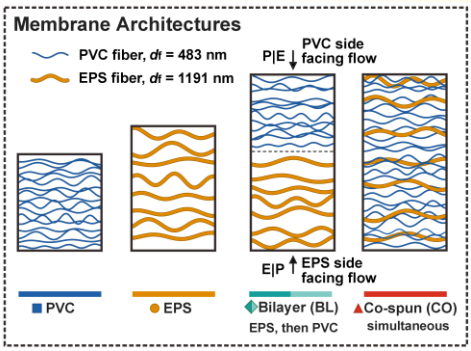
Partikel berukuran 0,1–0,3 µm paling sulit ditangkap filter serat. Ukurannya terlalu besar untuk ditangkap kuat oleh difusi, tetapi terlalu kecil untuk ditangkap efisien oleh intersepsi dan impaksi. Filter *electret* mengatasi masalah ini dengan muatan listrik yang menambah gaya tarik elektrostatik, sehingga efisiensinya tinggi pada *pressure drop* rendah. Namun, muatan ini meluruh akibat kelembapan, suhu, aerosol minyak, dan pembebanan partikel. Akibatnya, filter yang terlalu bergantung pada muatan dapat kehilangan banyak efisiensinya selama dipakai.

Limbah PVC dan EPS jarang didaur ulang, tetapi dapat dipintal menjadi nanofiber dengan ukuran serat berbeda dan digabung secara dicampur (*co-spun*) atau dilapis (*bilayer*). Kedua arsitektur ini belum pernah dibandingkan dalam keadaan bermuatan maupun setelah dinetralkan. Penelitian ini bertujuan mengetahui arsitektur mana yang memanfaatkan muatan *electret* lebih efektif.

Metodologi

Limbah PVC dan EPS masing-masing dilarutkan 21 wt% dalam DMF:DL-limonene (3:1) dan dipintal dengan *electrospinning* dua *nozzle* berkolektor drum (10 µL/menit; +15 kV PVC dan +9,5 kV EPS; 10 cm). CO dipintal serentak, sedangkan *bilayer* berurutan, EPS lalu PVC (Gambar 1), selama 400, 600, dan 800 s per polimer. Efisiensi partikel NaCl netral 20–400 nm diukur pada 5,3 cm/s dalam keadaan bermuatan (C) dan setelah netralisasi IPA (N), juga untuk N95 dan KN95. Peran muatan dinyatakan dengan retensi R dan faktor reduksi penetrasi P_N/P_C, dengan η efisiensi pada MPPS (*most penetrating particle size*) dan penetrasi $P = 1 - \eta$:

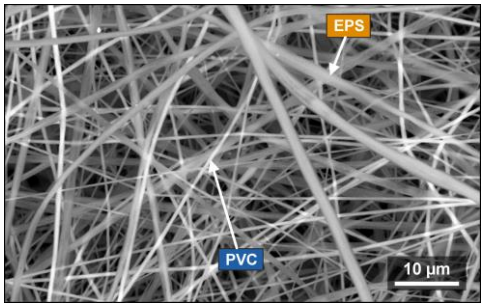
$$R = \frac{\eta_N}{\eta_C} \times 100\%, \qquad \frac{P_N}{P_C} = \frac{1-\eta_N}{1-\eta_C}$$



Gambar 1. *Arsitektur membran: PVC dan EPS tunggal, bilayer (BL; EPS dipintal lebih dulu, lalu PVC; diuji sebagai P\|E atau E\|P), dan co-spun (CO; kedua polimer dipintal serentak).*

Hasil & Pembahasan

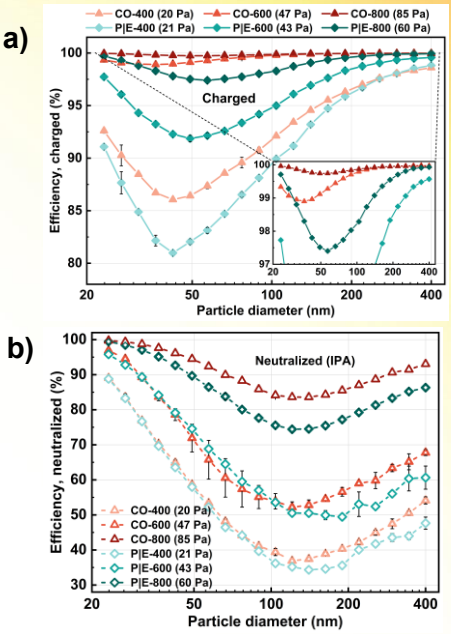
Serat PVC (483 ± 103 nm) dan EPS (1191 ± 235 nm) membentuk populasi bimodal yang tercampur pada membran CO (Gambar 2). Diameter pori rata-rata CO dan *bilayer* serupa (2,50–2,87 µm), tetapi distribusi pori CO lebih sempit (d_{BP}/MFP 1,16 vs 1,63–1,82). FTIR tidak menunjukkan pita baru, dan semua membran hidrofobik (sudut kontak air 132,9–143,0°).



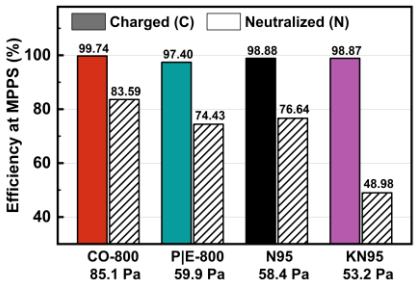
Gambar 2. *Citra SEM membran co-spun (CO): serat PVC halus (terang) dan serat EPS kasar (redup) bercampur.*

Pada *pressure drop* yang sebanding, yaitu 400 s (20,0 vs 20,9 Pa) dan 600 s (46,9 vs 42,9 Pa), kurva CO dan P|E setelah netralisasi hampir berimpit (Gambar 3b), sehingga tangkapan mekanik keduanya setara. Namun, dalam keadaan bermuatan CO selalu lebih efisien (Gambar 3a). Pada 600 s, efisiensi CO di MPPS 98,90% dibanding 91,87%, dan P_N/P_C-nya 43,4, sekitar 7 kali P|E (6,2). Pada 800 s, CO mencapai 99,74% (85,1 Pa) dibanding 97,40–97,64% untuk *bilayer* (59,9 Pa), dan arah pemasangan *bilayer* hampir tidak berpengaruh. Bahkan CO-600 lebih efisien daripada P|E-800 untuk partikel di atas ±30 nm, meski *pressure drop*-nya lebih rendah. Keunggulan CO terbesar pada partikel terkecil, yang gaya elektrostatiknya paling lemah.

Tanpa pemuatan tambahan, CO-800 lebih efisien daripada N95 dan KN95, baik sebelum maupun sesudah netralisasi (Gambar 4). Namun, *pressure drop*-nya lebih tinggi (85,1 vs 58,4 dan 53,2 Pa), sehingga *quality factor* bermuatannya lebih rendah (0,070 vs 0,077 dan 0,084 Pa^{-1}). Pemintalan serentak juga memangkas waktu produksi menjadi separuh.



Gambar 3. *Efisiensi filtrasi CO dan P|E pada 400, 600, dan 800 s per polimer: a) bermuatan, dengan inset perbesaran 97–100%, dan b) setelah netralisasi IPA. Angka dalam kurung: pressure drop pada 5,3 cm/s.*



Gambar 4. *Efisiensi pada MPPS sebelum (C) dan sesudah (N) netralisasi; angka di bawah nama sampel: pressure drop pada 5,3 cm/s.*

Muatan terutama berada pada serat EPS, dan gaya dipol terinduksi hanya efektif pada jarak pendek. Pada *bilayer*, serat EPS terkumpul dalam satu lapisan terbuka; pada CO, serat EPS tersebar di antara serat PVC halus sehingga partikel berulang kali melintas dekat serat bermuatan.

Kesimpulan

Mencampur serat limbah PVC dan EPS dalam satu lapisan (*co-spun*) memanfaatkan muatan *electret* jauh lebih efektif daripada melapisnya (*bilayer*). Pada *pressure drop* yang sebanding, tangkapan mekanik keduanya setara, tetapi muatan pada CO menekan penetrasi partikel sekitar 7 kali lebih kuat, terutama untuk partikel terkecil. Tanpa pemuatan tambahan, CO-800 lebih tahan terhadap hilangnya muatan daripada N95 dan KN95, dengan *pressure drop* lebih tinggi dan waktu produksi separuh dari *bilayer*.

Luaran Riset

"Mixing, not layering: co-spun waste PVC/EPS nanofibers make better use of electret charge in air filters" **Separation and Purification Technology,** Under reviewed