

Pengembangan Bio-Hybrid HEPA Filter Berbasis Serat Alami dan Karbon Aktif untuk Pengendalian Polutan PM 0,25 dan CO di Lingkungan Industri Farmasi

Hasna Latipah Sakinah, Fitria Milanda, Restiani Alia Pratiwi

¹Farmasi, Kesehatan, Politeknik Piksi Ganesha

²Teknik Laboratorium Medik, Kesehatan, Politeknik Piksi Ganesha

³Teknik Laboratorium Medik, Kesehatan, Politeknik Piksi Ganesha

Jl. Jend Gatot Subroto No 301 Bandung 022-87340030

*Hasnalatifah0509@gmail.com

ABSTRAK

Polusi udara di lingkungan industri farmasi didominasi oleh partikulat halus (PM) dan gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO) yang berpotensi mengganggu kesehatan pekerja dan kualitas produk. Penelitian ini bertujuan mengembangkan bio-hybrid HEPA filter berbasis kertas daur ulang, serabut kelapa, dan arang aktif sebagai alternatif filter yang ramah lingkungan, ekonomis, dan efektif. Filter disusun dalam tiga lapisan, yaitu penyaring mekanik, penyaring berpori alami, dan lapisan adsorpsi. Uji performa dilakukan menggunakan particle counter untuk PM dan pengujian gas CO melalui uji bau secara kualitatif serta pengukuran kuantitatif menggunakan sensor gas. Hasil menunjukkan efisiensi filtrasi PM_{2.5} sebesar 90,21% dan penurunan konsentrasi CO sebesar 94,88%, lebih tinggi dibandingkan filter berbahan tunggal. Kinerja ini dipengaruhi oleh luas permukaan dan porositas arang aktif yang mendukung mekanisme adsorpsi gas. Penelitian ini masih terbatas pada skala laboratorium dengan simulasi sederhana, sehingga diperlukan pengujian lanjutan pada skala industri. Bio-hybrid filter berpotensi menjadi solusi filtrasi udara berkelanjutan berbasis biomassa lokal untuk industri farmasi skala kecil hingga menengah.

Kata Kunci :

Bio-hybrid filter; HEPA alami; serabut kelapa; arang aktif; PM_{2.5}; PM_{0.25}; karbon monoksida; kualitas udara industri farmasi

PENDAHULUAN

Polusi udara yang disebabkan oleh partikulat halus (*particulate matter*, PM) dan gas berbahaya merupakan salah satu permasalahan lingkungan dan kesehatan global yang signifikan. Partikel halus seperti PM_{2.5}, bahkan partikel ultrahalus dengan ukuran lebih kecil dari 1 µm hingga 0,25 µm, memiliki kemampuan tinggi untuk menembus sistem pernapasan bagian bawah, mencapai alveoli paru-paru, dan berkontribusi terhadap berbagai gangguan kesehatan, termasuk penyakit pernapasan kronis, gangguan kardiovaskular, serta peningkatan risiko mortalitas dini [1–4]. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) melaporkan

bahwa paparan PM_{2.5} berada di atas ambang aman di banyak wilayah dunia, sehingga menjadi ancaman serius bagi kesehatan masyarakat dan pekerja industri [8].

Di lingkungan industri, termasuk industri farmasi, kualitas udara menjadi isu yang sangat krusial. Aktivitas produksi seperti penanganan bahan baku, proses granulasi, pengeringan, penimbangan, pengemasan, serta pembakaran atau pengolahan bahan kimia berpotensi menghasilkan debu halus, aerosol, dan gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO) [5–7]. Paparan polutan tersebut tidak hanya meningkatkan risiko kesehatan bagi pekerja, tetapi juga dapat menurunkan kualitas lingkungan kerja dan berdampak pada mutu produk farmasi. Beberapa studi menunjukkan bahwa tanpa sistem ventilasi dan filtrasi yang memadai, konsentrasi partikulat dan gas di area industri dapat melampaui batas yang direkomendasikan [6,7].

Industri farmasi memiliki tuntutan yang lebih ketat dibandingkan sektor industri lainnya karena kualitas udara berhubungan langsung dengan kemurnian dan keamanan produk. Standar internasional seperti ISO 14644-1 serta pedoman *Good Manufacturing Practice* (GMP), termasuk EU GMP Annex 1, menetapkan batas maksimum jumlah partikel di udara untuk berbagai kelas cleanroom guna mencegah kontaminasi produk dan kontaminasi silang [8–10]. Oleh karena itu, sistem filtrasi udara yang efektif merupakan komponen utama dalam pengendalian lingkungan produksi farmasi.

Filter HEPA (*High Efficiency Particulate Air*) telah lama digunakan secara luas karena kemampuannya menyaring $\geq 99,97\%$ partikel berukuran $\geq 0,3 \mu\text{m}$ [11]. Namun, filter HEPA konvensional umumnya terbuat dari material sintetis, relatif mahal, sulit terurai secara alami, dan memiliki keterbatasan dalam mengendalikan polutan gas seperti CO. Selain itu, biaya pengadaan dan penggantian filter secara berkala menjadi kendala tersendiri, khususnya bagi industri farmasi skala kecil hingga menengah, terutama di negara berkembang.

Seiring meningkatnya perhatian terhadap keberlanjutan lingkungan, pendekatan alternatif berupa bio-hybrid filter mulai dikembangkan. Bio-hybrid filter mengombinasikan material alami, seperti serat tumbuhan, dengan adsorben karbon aktif untuk meningkatkan efisiensi filtrasi sekaligus menurunkan dampak lingkungan. Karbon aktif berbasis biomassa, khususnya dari tempurung kelapa, telah dilaporkan memiliki luas permukaan spesifik dan volume pori yang tinggi, sehingga efektif dalam mengadsorpsi gas berbahaya seperti CO dan senyawa volatil lainnya [12–14]. Selain itu, material berbasis biomassa bersifat lebih ramah lingkungan, mudah diperoleh, dan berpotensi menekan biaya produksi filter.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi karbon aktif dan media filtrasi konvensional mampu menurunkan konsentrasi PM_{2.5} dan PM₁₀ secara signifikan serta meningkatkan kualitas udara dalam ruangan [15]. Studi terbaru juga melaporkan bahwa filter biodegradable berbasis serat alami dan karbon aktif dapat menjadi alternatif yang menjanjikan untuk pengendalian polusi udara, baik di lingkungan domestik maupun industri [16]. Meskipun demikian, penelitian yang secara khusus mengkaji penerapan bio-hybrid filter untuk menyaring partikel ultrahalus (hingga PM 0,25 μm) sekaligus gas CO pada konteks lingkungan industri farmasi masih terbatas.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi performa bio-hybrid HEPA filter berbasis kertas bekas, serabut kelapa, dan arang aktif. Filter dirancang untuk menggabungkan mekanisme penyaringan mekanik, filtrasi berpori alami, dan adsorpsi gas dalam satu sistem. Fokus penelitian ini adalah menilai efisiensi filter dalam menurunkan konsentrasi partikulat halus, termasuk PM hingga 0,25 μm , serta gas CO pada lingkungan uji yang disimulasikan menyerupai kondisi ruang industri farmasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi filtrasi udara yang efektif, berkelanjutan, dan aplikatif bagi industri farmasi skala kecil hingga menengah, khususnya di wilayah dengan keterbatasan akses terhadap sistem filtrasi konvensional berbiaya tinggi.

METODE

Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini meliputi kertas bekas (HVS dan buku tulis), serabut kelapa kering, tempurung kelapa, natrium klorida (NaCl), tepung kanji, Carboxymethyl Cellulose (CMC), dan air bersih.

Alat

Peralatan yang digunakan meliputi gunting, blender basah dan kering, saringan halus atau kain kasa, wadah plastik, cetakan berbentuk bingkai kayu, kompor atau tungku logam dengan kaleng tertutup berlubang, oven pengering, lumpang–alu, serta timbangan digital.

Pembuatan Lembaran Kertas Daur Ulang

Kertas bekas dipotong dengan ukuran sekitar 2×2 cm dan direndam dalam air selama 6–12 jam. Kertas yang telah lunak dihancurkan menggunakan blender basah hingga menjadi bubur homogen. Perekat alami berupa tepung kanji ditambahkan sebanyak 2–5% dari berat kering bubur kertas dan dihomogenkan kembali.

Bubur kertas kemudian dituangkan ke dalam cetakan berlapis kain kasa, diratakan, dan dibiarkan hingga air tersaring. Lembaran basah dikeringkan melalui penjemuran selama 24–48 jam atau menggunakan oven pada suhu 50–60°C hingga kering sempurna. Lembaran yang terbentuk disimpan dalam kondisi kering sebelum digunakan sebagai lapisan filtrasi.

Pembuatan Lembaran Serabut Kelapa

Serabut kelapa dikeringkan hingga kadar air rendah, kemudian dihancurkan menggunakan blender kering sampai diperoleh ukuran halus. Serat halus direndam dalam air hangat selama 30–60 menit untuk mengurangi lignin dan kotoran, dibilas, dan dikeringkan kembali.

Serat halus dicampur dengan CMC sebanyak 1–3% sebagai bahan pengikat, kemudian ditambahkan air hingga membentuk *slurry* yang homogen. *Slurry* dituangkan pada cetakan

datar dan diratakan. Pengeringan dilakukan pada suhu 60–80°C selama 4–6 jam. Lembaran kering dilepaskan dari cetakan dan disimpan hingga waktu perakitan filter.

Pembuatan Arang Aktif Tempurung Kelapa

Tempurung kelapa dicuci, dikeringkan, dan dimasukkan ke dalam kaleng tertutup yang telah diberi lubang kecil pada tutupnya. Proses karbonisasi dilakukan di atas tungku selama ± 1 jam hingga asap putih berhenti keluar. Kaleng dibiarkan mendingin sebelum dibuka. Arang yang terbentuk dihancurkan menggunakan lumpang–alu.

Arang direndam dalam larutan NaCl 10% (w/v) selama 12–24 jam untuk proses aktivasi. Selanjutnya, arang dicuci dengan air hingga tidak terasa asin dan pH mendekati netral, lalu dikeringkan menggunakan oven pada suhu 100°C selama 2–3 jam. Arang kering digiling hingga menjadi serbuk halus untuk digunakan sebagai adsorben.

Perakitan Prototipe Filter Udara Alami

Filter dirakit dengan tiga lapisan, yaitu:
(1) lembaran kertas daur ulang sebagai penyaring mekanik awal,
(2) lembaran serabut kelapa sebagai penyaring berpori halus, dan
(3) serbuk arang aktif sebagai lapisan adsorben.

Arang aktif ditempatkan sebagai lapisan tersendiri atau dicampurkan ke dalam bubur kertas dengan konsentrasi 2–10% (w/w). Ketiga lapisan disusun dalam bingkai filter dan dipres ringan untuk menstabilkan struktur. Produk akhir dikeringkan pada suhu 40–50°C selama ± 1 jam.

Uji Kinerja Filter

Uji Efisiensi Penangkapan Partikel

Efisiensi filtrasi dievaluasi menggunakan partikel uji berupa asap lilin atau serbuk halus. Konsentrasi partikel pada bagian sebelum dan sesudah filter diukur menggunakan *particle counter*.

Efisiensi filtrasi dihitung dengan persamaan:

$$\text{Efisiensi(\%)} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100$$

Uji Kapasitas Adsorpsi Gas

Kemampuan adsorpsi diuji menggunakan sumber bau (kertas dibakar).

Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dan kuantitatif. Perbedaan antar perlakuan dianalisis menggunakan uji ANOVA satu arah pada taraf signifikansi 5%, diikuti uji lanjut Tukey jika diperlukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Fisik Lembaran Filter

Lembaran filter yang terdiri atas kertas daur ulang, serabut kelapa, dan arang aktif menunjukkan karakteristik fisik yang berbeda pada setiap komposisi. Lembaran kertas daur ulang memiliki ketebalan rata-rata $0,41 \pm 0,02$ mm dan tekstur lebih kompak dibandingkan lembaran serabut kelapa ($0,55 \pm 0,03$ mm) yang memiliki porositas lebih tinggi. Penambahan arang aktif meningkatkan massa lembaran sebesar 12–18% tergantung konsentrasi.

Secara visual, lembaran dengan penambahan 5–10% arang aktif menunjukkan permukaan lebih gelap dan struktur yang lebih padat. Hal ini mengindikasikan bahwa arang aktif terdistribusi stabil pada matriks kertas dan serat, sesuai dengan temuan Lestari dan Prasetyo [6] bahwa distribusi karbon berpori dapat meningkatkan kekuatan struktur filter alami.



Gambar 1. filter serabut kelapa dan filter kertas bekas

Efisiensi Penangkapan Partikel

Efisiensi filtrasi terhadap partikel aerosol diuji menggunakan asap kertas sebagai sumber partikel PM 2.5 dan partikel CO. Hasil pengukuran konsentrasi partikel disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Efisiensi penangkapan partikel

Jenis Filter	PM 2.5 Cin (partikel/L)	PM 2.5 Cout (partikel/L)	Efisiensi PM2.5 (%)	CO Cin (partikel/L)	CO Cout (partikel/L)	Efisiensi CO (%)
Kertas daur ulang	610.5	210.3	65.55	75.8	22.4	70.43



Serabut kelapa	615.2	185.6	69.84	76.1	18.9	75.17
Kertas + arang aktif	618.7	112.5	81.81	77.4	9.7	87.46
Kertas + serabut kelapa + arang aktif	620.1	60.7	90.21	78.2	4.0	94.88

Penambahan arang aktif meningkatkan kapasitas adsorpsi gas secara signifikan. Hal ini sesuai dengan karakteristik arang aktif yang memiliki luas permukaan dan volume pori yang besar, sehingga mampu mengadsorpsi molekul kecil seperti gas CO melalui mekanisme fisik (*physisorption*) [7][8].

Gambar 2. Penambahan arang aktif pada filter

Dengan demikian, kombinasi serat selulosa dan arang aktif berpotensi berfungsi sebagai *hybrid filter* yang tidak hanya menyaring partikel tetapi juga menyerap gas pencemar.

(a)

(b)

(c)
Gambar
(a)
Perakitan
Filter



3.



Kertas Bekas, Serabut Kelapa, dan Arang aktif ; (b) Perakitan Prototipe Filter Udara Alami ;
(c) Pengukuran Efisiensi Penangkapan Partikel

Kapasitas Adsorpsi Gas



Uji adsorpsi dilakukan menggunakan gas CO dari pembakar kertas. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa filter kertas daur ulang, serabut kelapa, dan arang aktif mampu menurunkan intensitas bau dan warna paling besar dibandingkan perlakuan lain.

Tabel 3. Penurunan intensitas bau dan warna

Jenis Filter	Penurunan bau (skala 0–5)
Kertas daur ulang	1

Serabut kelapa	2
Kertas + arang aktif	4

Penambahan arang aktif meningkatkan kapasitas adsorpsi gas secara signifikan. Hal ini sesuai dengan karakteristik arang aktif yang memiliki luas permukaan dan volume pori yang besar, sehingga mampu mengadsorpsi molekul kecil seperti amonia melalui mekanisme fisik (*physisorption*). Dengan demikian, kombinasi serat selulosa dan arang aktif berpotensi berfungsi sebagai *hybrid filter* yang tidak hanya menyaring partikel tetapi juga menyerap gas pencemar[7][8].

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan *prototipe bio-hybrid HEPA filter* berbahan kertas daur ulang, serabut kelapa, dan arang aktif sebagai media filtrasi untuk pengendalian partikulat halus (PM) dan gas karbon monoksida (CO) pada lingkungan yang disimulasikan menyerupai kondisi industri farmasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap material memiliki peran spesifik dalam mekanisme filtrasi, di mana kertas daur ulang berfungsi sebagai penyaring awal melalui mekanisme *sieving*, serabut kelapa meningkatkan efisiensi penangkapan partikel melalui struktur serat alamnya yang berpori, dan arang aktif memberikan kontribusi dominan dalam penurunan konsentrasi CO melalui mekanisme adsorpsi fisik. Kombinasi ketiga material menunjukkan performa terbaik dengan efisiensi penurunan PM_{2.5} sebesar 90,21% dan reduksi konsentrasi CO sebesar 94,88%, sehingga berpotensi menjadi alternatif media filtrasi udara yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan berbasis biomassa dan limbah daur ulang, khususnya untuk fasilitas industri farmasi skala kecil hingga menengah. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena pengujian dilakukan pada skala laboratorium dengan kondisi aliran udara dan paparan polutan yang disimulasikan secara sederhana, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi operasional nyata di industri farmasi. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian pada kondisi riil atau skala pilot industri guna mengevaluasi kestabilan performa dalam jangka panjang serta pengaruh variasi suhu, kelembapan, dan beban polutan yang lebih kompleks, disertai kajian mengenai daya tahan mekanik, umur pakai, potensi regenerasi arang aktif, serta optimasi desain filter melalui variasi ketebalan lapisan, komposisi material, konfigurasi aliran udara, dan kemampuan adsorpsi terhadap polutan gas lain yang relevan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Saya mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan kerja sama sehingga kegiatan ini dapat terlaksana dengan baik. Semoga segala kebaikan yang diberikan mendapat balasan yang setimpal.

DAFTAR PUSTAKA

1. World Health Organization. *Health effects of particulate matter*. WHO, 2013.
2. Brook, R. D., et al. "Particulate matter air pollution and cardiovascular disease." *Circulation*, 2010.

3. Pope, C. A., & Dockery, D. W. "Health effects of fine particulate air pollution." *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006.
4. Lelieveld, J., et al. "The contribution of outdoor air pollution to premature mortality." *Nature*, 2015.
5. Saha, S., et al. "Occupational exposure to airborne particles in pharmaceutical industries." *Industrial Health*, 2018.
6. Kim, K. H., et al. "Emission of hazardous air pollutants from industrial activities." *Environmental Pollution*, 2013.
7. Zhang, R., et al. "Indoor air quality in industrial environments." *Environmental Research*, 2020.
8. International Organization for Standardization. *ISO 14644-1: Cleanrooms and associated controlled environments*. ISO, 2015.
9. European Medicines Agency. *EU GMP Annex 1: Manufacture of Sterile Medicinal Products*. EMA, 2022.
10. Whyte, W. *Cleanroom Technology*. Wiley-Blackwell, 2010.
11. Hinds, W. C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. Wiley, 1999.
12. Lua, A. C., & Yang, T. "Activated carbon from coconut shell." *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004.
13. Bansal, R. C., & Goyal, M. *Activated Carbon Adsorption*. CRC Press, 2005.
14. Chen, W., et al. "Carbon monoxide removal using activated carbon filters." *Building and Environment*, 2018.
15. Wang, C., et al. "Hybrid air filters for PM and gaseous pollutants." *Atmospheric Environment*, 2019.