

PENENTUAN EFISIENSI FILTER HEPA DENGAN AEROSOL DIOCTHYL PHTHALATE

ID0000070

Bunawas, Otto P. Ruslanto, Gatot Suhariyono
Pusat Standardisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi - BATAN

ABSTRAK

PENENTUAN EFISIENSI FILTER HEPA DENGAN AEROSOL DIOCTHYL PHTHALATE. Telah dilakukan penentuan penapisan aerosol sangat halus dengan filter HEPA (High Efficiency Particulate Air) secara percobaan berdasarkan pada pengukuran konsentrasi aerosol Diocthyl Pthalate (DOP) monodispersi sebelum dan setelah melewati filter uji. Dengan cara ini, dapat ditentukan efisiensi filter sebagai fungsi diameter aerosol dalam rentang 0,017 - 0,747 μm . Dari hasil pengujian diperoleh efisiensi rata-rata filter Whatman - 41 ; Whatman - 42 dan Whatman GF/A masing-masing sebesar 56,14 % ; 95,74 % dan 99,65 %. Filter serat gelas Gelman A dan membran Whatman, memenuhi kriteria sebagai filter HEPA sesuai standar IAEA, karena mempunyai efisiensi minimum 99,90%.

ABSTRACT

DETERMINATION OF HEPA FILTER EFFICIENCY WITH DIOCTHYL PHTHALATE AEROSOL. Ultrafine aerosol filtration by HEPA (High Efficiency Particulate Air) filter has been determined experimentally, based on the measurement of monodisperse Diocthyl Pthalate (DOP) aerosol concentration before and after passing the test filter. Using this technique, filter efficiency can be determined as a function of aerosol diameter with range from 0.017 to 0.747 μm . The average efficiencies for Whatman - 41; Whatman - 42 and Whatman GF/A filters were 56.14 %; 95.74 %; and 99.65 % respectively. Gelman A fiber glass and Whatman membrane filter have fulfilled criterion as HEPA filter according to standard of IAEA, because of their minimum efficiency of 99.90 %.

PENDAHULUAN

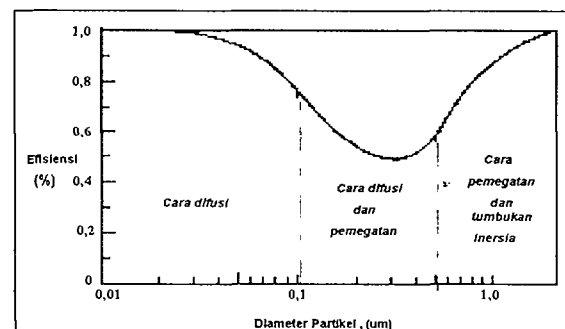
Dalam industri nuklir yang menggunakan zat radioaktif yang mudah terbang, diperlukan sistem pembersih udara agar daerah kerja dan lingkungan bebas dari kontaminasi aerosol radioaktif. Sistem yang umum digunakan yaitu melalui penyaringan (filtrasi) dengan filter HEPA (High Efficiency Particulate Air) sesuai standar IAEA[1].

Filter yang baik dapat ditinjau dari kemampuannya dalam menyaring partikel aerosol berbahaya, terutama yang berdiameter kurang dari 1 μm (ultrafine). Partikel yang sangat halus ini kemungkinan besar terhisap oleh manusia dan mengendap di paru-paru[2]. Dengan demikian filter yang digunakan haruslah mempunyai efisiensi yang tinggi terhadap partikel-partikel tersebut.

Untuk pengujian efisiensi filter, biasanya digunakan aerosol Diocthyl Pthalate (DOP) dengan pertimbangan mudah untuk diproduksi. Bentuk aerosol tersebut mendekati bulat dan bersifat tidak korosif. Efisiensi filter berdasarkan perhitungan teoritis, berharga minimum untuk diameter aerosol berbentuk bola dengan ukuran 0,3 μm [3]. Oleh karena itu, aerosol DOP dengan diameter 0,3 μm

digunakan oleh perusahaan yang memproduksi filter untuk pengujiannya.

Efisiensi penyaringan filter bergantung pada diameter partikel khususnya untuk diameter partikel antara 0,01 - 1,2 μm , karena adanya beberapa mekanisme pengendapan seperti difusi Brown, pemegatan, dan tumbukan inersia (Gambar 1)[4].



Gambar 1. Efisiensi filter vs ukuran partikel; ilustrasi perbedaan cara penyaringan [4].

Dalam makalah ini, akan dilakukan penentuan efisiensi filter sebagai fungsi diameter partikel dengan menggunakan peralatan standar sesuai rekomendasi Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA).

TEORI

Apabila partikel melewati filter berserat, maka sebagian partikel akan terperangkap pada filter. Efisiensi pengumpulan partikel, dinyatakan dengan persamaan :

$$E = 1 - \frac{N_{out}}{N_{in}} \quad (1)$$

dengan N_{out} dan N_{in} masing-masing adalah konsentrasi partikel yang keluar dan masuk dari filter ($partikel/cm^3$). Perbandingan antara partikel yang keluar dan masuk filter disebut penetrasi dan dirumuskan sebagai berikut :

$$p = \frac{N_{out}}{N_{in}} \quad (2)$$

jumlah partikel yang melewati filter bergantung pada ketebalan filter (h), sehingga perubahan konsentrasi fungsi elemen ketebalan (d_h) adalah :

$$\frac{dN}{N} = -\gamma d_h \quad (3)$$

dengan γ adalah koefisien penangkapan. Dari hasil integrasi persamaan (3) untuk jumlah partikel yang keluar dan masuk filter, hasil yang diperoleh adalah :

$$\ln \frac{N_{out}}{N_{in}} = -\gamma h$$

$$p = e^{-\gamma h} \quad (4)$$

Substitusi persamaan (4) ke dalam persamaan (1), diperoleh persamaan efisiensi filter yaitu

$$E = 1 - e^{-\gamma h} \quad (5)$$

Menurut Hinds [4], koefisien penangkapan (γ) bergantung pada diameter serat (d_f), kepadatan filter (α) dan porositas filter (ε), $\varepsilon = 1 - \alpha$ dan dinyatakan dengan persamaan :

$$\gamma = \frac{4 \alpha \eta_t}{\pi (1 - \alpha) d_f} \quad (6)$$

dengan η_t adalah efisiensi serat tunggal. Bila Persamaan (6) disubstitusikan ke Persamaan (5) diperoleh persamaan efisiensi filter yaitu :

$$E = 1 - e^{-\frac{4 \alpha h \eta_t}{\pi (1 - \alpha) d_f}} \quad (7)$$

Besar harga kepadatan filter (α) dan diameter serat (d_f) dapat ditentukan dengan mikrometer. Persoalan yang sedang dikaji adalah penentuan efisiensi serat tunggal (η_t) yang secara teoritis dapat digunakan untuk memperkirakan efisiensi total filter (E).

Mekanisme Penyaringan

Penyaringan partikel sewaktu melewati filter berserat, ditentukan oleh tiga mekanisme pengendapan yaitu difusi Brown, pemegatan dan tumbukan inersial. Efisiensi serat tunggal (η_t) dapat diasumsikan sebagai pendekatan pertama penjumlahan efisiensi difusi (η_D), efisiensi pemegatan (η_p) dan efisiensi tumbukan inersia (η_r) [5].

Mekanisme Difusi Brown

Partikel sangat halus dengan ukuran kurang dari $0,1 \mu m$ akan bergerak secara acak (difusi Brown). Difusi Brown ini akan bertambah besar dengan menurunnya diameter partikel, yang dituangkan dalam persamaan sebagai berikut [4]:

$$D = \frac{k T C}{3\pi \mu d_p} \quad (8)$$

dengan :

D=koefisien difusi partikel
 ($m^2 / detik$)

T = suhu udara ($^{\circ}K$)

k = tetapan Boltzman

μ = viskositas udara
 ($N detik / m^2$)

d_p = diameter partikel (m)

C = koreksi kelinieran Cunningham

$$= 1 + 2,492 \frac{\lambda}{d_p} + 0,84 \frac{\lambda}{d_p} \exp(-0,435 \frac{d_p}{\lambda})$$

λ = jalan bebas rerata molekul gas
 (m)

Partikel yang bergerak secara difusi Brown arahnya dapat menyimpang dari garis alir udara melewati filter kemudian menabrak dan menempel pada serat (Gambar 2). Mekanisme pengendapan secara difusi Brown ditentukan oleh parameter bilangan Peclet (Pe) yang didefinisikan sebagai :

$$Pe = \frac{dt U_o}{D} \quad (9)$$

dengan U_o adalah kecepatan aliran udara di dalam filter (m/detik).

Dari hasil eksperimen Steckina dkk. [5] persamaan hubungan antara efisiensi difusi dan bilangan Peclet dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\eta_D = 2,7 Pe^{-2/3} \quad (10)$$

Persamaan (10) berlaku untuk kepadatan filter (α) antara 0,005 dan 0,4. Lee dan Liu [6] secara empiris melakukan koreksi persamaan (10) untuk kepadatan filter yang sembarang menjadi :

$$\eta_D = 1,6 \left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} \quad (11)$$

dengan :

$$K = \text{faktor hidrodinamis Kuwabara} \\ = -\frac{1}{2} \ln \alpha - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4}$$

Mekanisme Pemegatan

Bila partikel mengikuti garis alir secara sempurna, maka dapat dianggap gerak inersia dan difusi Brown diabaikan. Sewaktu mengikuti garis alir, partikel berdiameter (d_p) akan menabrak dan menempel pada serat tunggal berdiameter (d_f), lihat gambar 3.

Efisiensi pemegatan serat tunggal (η_p), bergantung pada parameter pemegatan (R) yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

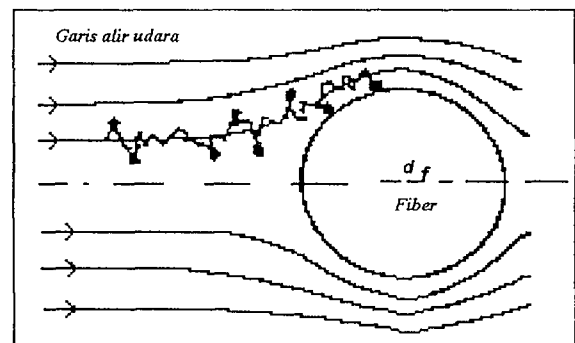
$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad (12)$$

Bila dipakai model aliran Kuwabara, maka efisiensi pemegatan dapat dinyatakan dengan persamaan :

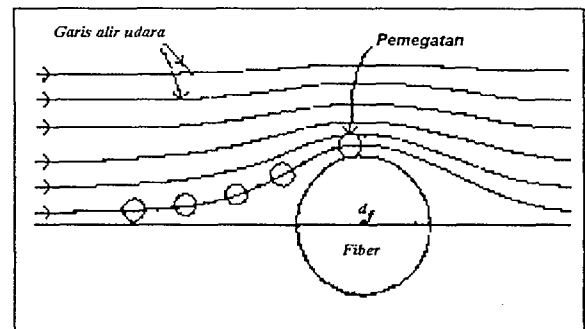
$$\eta_p = \frac{1}{2K} \left[\left(\frac{1}{1+R} \right) - (1+R) + 2(1+R) \ln(1+R) \right] \quad (13)$$

Persamaan (13) oleh Lee dan Liu [6] disederhanakan dalam bentuk :

$$\eta_p = 0,6 \left(\frac{1-\alpha}{K} \right) \frac{R^2}{1+R} \quad (14)$$



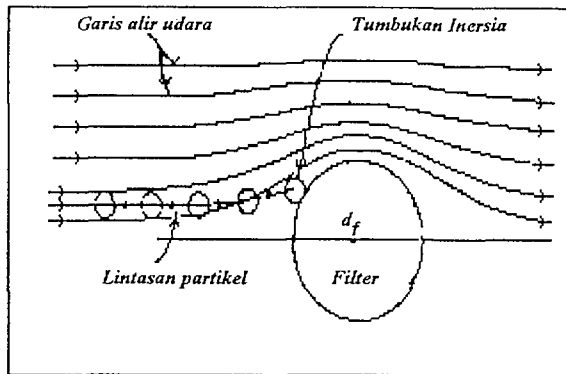
Gambar 2. Pengendapan partikel oleh serat tunggal melalui difusi Brown.



Gambar 3. Pengendapan partikel oleh serat tunggal melalui pemegatan.

Mekanisme Tumbukan Inersia

Partikel dengan diameter agak besar ($> 0,5 \mu\text{m}$) sewaktu melewati filter berserat arah gerakannya tidak cepat menyesuaikan diri dengan arah gerak garis alir udara. Hal ini karena adanya pengaruh inersia dari partikel tersebut, yang mengakibatkan penyimpangan dari garis alir dan menabrak serat (Gambar 4).



Gambar 4. Pengendapan partikel pada serat tunggal melalui tumbukan inersia.

Fraksi pengendapan melalui mekanisme tumbukan inersia ditentukan oleh parameter bilangan Stokes (Stk) dan dinyatakan dengan persamaan [4] :

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 C U_0}{18 \eta d_f} \quad (15)$$

dengan ρ_p adalah kerapatan partikel (Kg/m^3). Berdasarkan data percobaan Steckina dkk, efisiensi tumbukan untuk serat tunggal dinyatakan dengan persamaan [5] :

$$\eta_T = \left[(29,6 - 28 \alpha^{0,62}) R^2 - 27,5 \right] \frac{Stk}{2K^2} \quad (16)$$

untuk $R < 0,4$

$$\eta_T = 2,0 \frac{Stk}{2K^2} \quad (17)$$

untuk $R > 0,4$

KARAKTERISTIK FILTER UJI

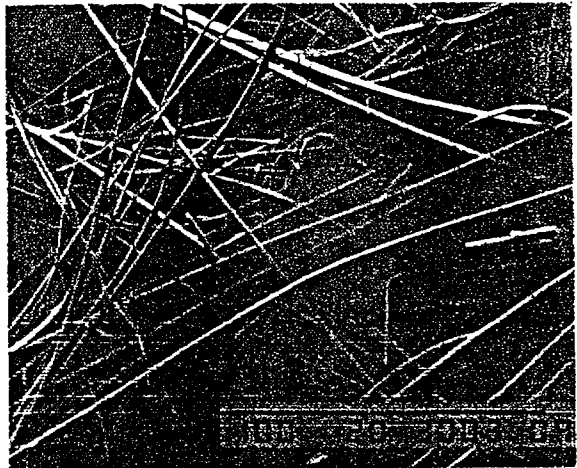
Karakteristik filter yang dievaluasi efisiensinya meliputi jenis filter, tebal, kepadatan dan diameter serat (Tabel 1). Sedangkan pada Gambar 5 diperlihatkan tampak lintang permukaan filter yang diamati di bawah mikroskop elektron JEOL (Jepang) yang ada di PAIR-BATAN.

Data karakteristik filter akan digunakan untuk memperkirakan efisiensi serat

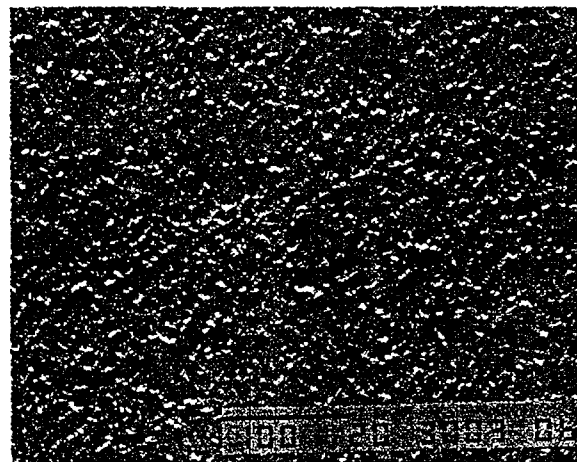
tunggal dan efisiensi penyaringan filter secara teori.



Gambar 5a. Filter serat selulosa Whatman 41 Perbesaran 200 X



Gambar 5b. Filter serat gelas Gelman A Perbesaran 500 X



Gambar 5c. Filter selulosa Nitrat Whatman Membrane Berpori (0,8 μm)

TATA KERJA

Metode Pengujian Efisiensi Filter [7, 8, 9]

Campuran 0,01% larutan DOP dan 99,9% propanol dimasukkan ke dalam pengabut (atomizer) model 3070 (TSI-USA). Sistem pemasok udara bersih dan kering model 3074 (TSI-USA) dengan tekanan maksimal 30 psi dialirkan ke atomizer, sehingga akan terpancar aerosol DOP polidisersi. Aerosol ini dialirkan ke tabung pengering model 3072 (TSI-USA) dan dinetralisasi dengan cara dipapari sumber Kr-85 untuk membuat muatan listrik pada partikel dalam kesetimbangan Boltzman. Partikel ini pada umumnya netral atau membawa satu atau dua muatan positif atau negatif. Aerosol ini lalu diklasifikasi secara elektrostatis dengan jalan mengalirkan ke penganalisis mobilitas differensial (DMPS) model 3922 (TSI-USA). Aerosol monodispersi dengan diameter tertentu ini, lalu dilewatkan melalui filter uji. Konsentrasi aerosol DOP sebelum dan setelah melewati filter uji diukur dengan pencacah partikel terkondensasi (CPC) model 3022 (TSI-USA). Bagan peralatan ditunjukkan pada Gambar 6.

Efisiensi pengamatan filter, ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut [4]:

$$\text{Efisiensi pengamatan (EP)} = 1 - \frac{N_{out}}{N_{in}} \quad (17)$$

dengan N_{out} dan N_{in} konsentrasi aerosol DOP setelah dan sebelum melewati filter ($\text{partikel}/\text{m}^3$). Persamaan (17) meliputi hilangnya partikel di dalam tempat filter (holder) dan kasa. Untuk mengoreksi hilangnya

partikel tersebut, aerosol dialirkan pada sistem yang sama tanpa filter di dalam holder dan konsentrasi aerosol sebelum dan sesudah melewati holder diukur sehingga didapat efisiensi holder (Eh). Efisiensi filter sebenarnya dapat dihitung dengan persamaan [10]:

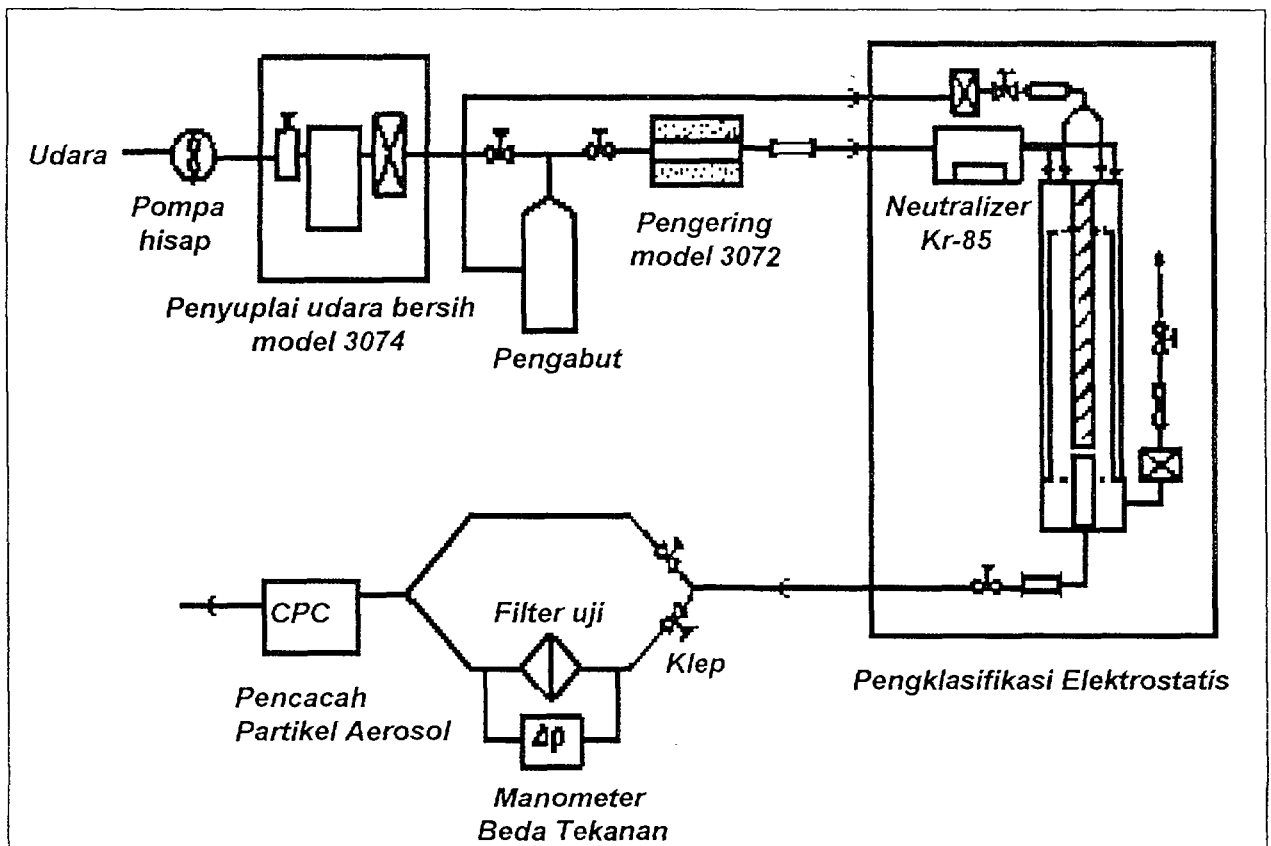
$$\text{Efisiensi filter (Ef)} = 1 - \frac{1 - Ep}{1 - Eh} \quad (18)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Efisiensi penyaringan pada filter Whatman 41 bergantung pada diameter aerosol DOP yang melewatinya (lihat Gambar 7). Efisiensi minimum sebesar 44,96 % terjadi untuk partikel berukuran 0,221 μm . Hal ini terjadi karena mekanisme pengendapan secara difusi Brown telah mulai menurun, sedangkan mekanisme pemegatan belum dominan. Partikel dengan diameter 0,221 μm terlampaui kecil dibandingkan dengan serat diameter 6,4 μm (dengan $R = 0,03$). Padahal harga parameter pemegatan (R) harus lebih besar dari 0,05 agar mekanisme pemegatan dominan, sehingga partikel akan mudah mengikuti garis alir dan lolos dari filter. Untuk partikel lebih besar dari diameter 0,221 μm , efisiensi cenderung naik kembali karena mekanisme pemegatan sudah mulai dominan. Perbedaan antara perkiraan secara teori dan percobaan sekitar 23 %, disebabkan karena teori berdasarkan model filter ideal yaitu ukuran serat sama dan tersusun teratur [4]. Sedangkan susunan serat pada Whatman 41 tersusun secara acak (lihat Gambar 5a).

Tabel 1. Data karakteristik filter uji [1]

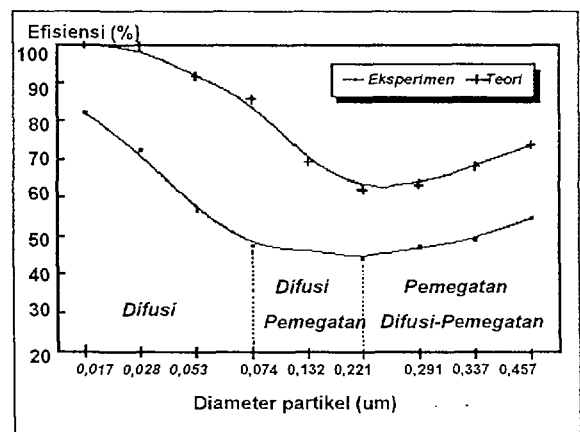
No	Nama filter	Jenis filter	Tebal (m)	Diameter lubang (m)	Diameter serat (m)	Kepadatan (α)
1	Whatman 41	Selulosa ester	$18 \cdot 10^{-5}$	-	$6,4 \cdot 10^{-6}$	0,35
2	Whatman 42	Selulosa ester	$18 \cdot 10^{-5}$	-	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,38
3	Whatman F/A	Serat gelas	$25 \cdot 10^{-5}$	-	$0,2 \cdot 10^{-6}$	0,025
4	Gelman A	Serat gelas	$10 \cdot 10^{-5}$	-	$0,17 \cdot 10^{-6}$	0,010
5	Whatman Membran	Selulosa nitrat	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-7}$	-	-



Gambar 6. Sistem pengujian efisiensi filter

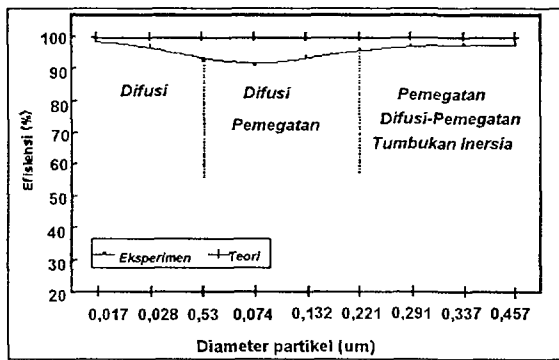
Walaupun filter Whatman 42 terbuat dari bahan yang sama dengan filter Whatman 41 yaitu selulosa ester, tetapi karena mempunyai diameter serat yang lebih kecil yaitu 1,6 μm , maka efisiensinya lebih tinggi. Hal ini terjadi karena harga parameter pemegatan R sebesar 0,04 sudah mendekati syarat minimum yang diperkirakan oleh Lee dan Liu [6], sehingga mekanisme pengendapan secara pemegatan memegang peranan yang berarti dalam proses pengendapan aerosol DOP pada filter. Selain itu susunan serat lebih homogen dan teratur. Efisiensi minimum yaitu 90 % terjadi pada partikel ukuran 0,074 μm , penyebabnya serupa dengan filter Whatman 41. Diameter partikel lebih dari 0,291 μm , mekanisme pengendapan secara tumbukan inersia mulai terlihat perannya, walaupun masih kecil dibandingkan pengendapan secara pemegatan. Ini terjadi karena bilangan Stokes (Stk) masih lebih kecil dari 0,01, padahal agar proses tumbukan inersia dominan harga Stk

harus $\geq 0,1$ [6]. Efisiensi filter Whatman 42 untuk diameter partikel antara 0,017 dan 0,457 μm berkisar antara 91,31 dan 98,52 % (rerata 95,74%), dan perbedaan dengan teori sebesar 4,26% (lihat Gambar 8).

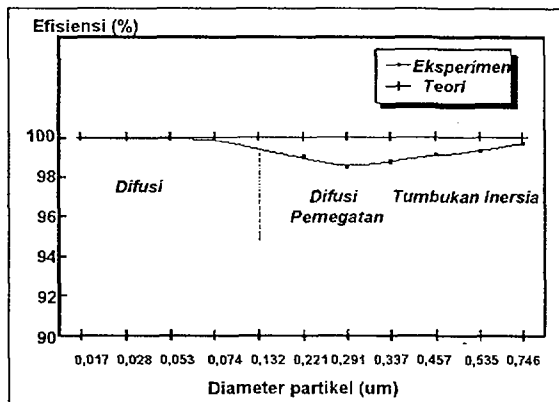


Gambar 7. Efisiensi filter Whatman 41 secara teori dan percobaan.

Efisiensi filter Whatman GF/A dan Gelman A tinggi yaitu masing-masing 99,65 dan 99,97 %, karena terbuat dari serat gelas dan memiliki serabut (serat) yang lebih banyak dibandingkan filter Whatman 41 atau 42. Filter ini mempunyai diameter serat kecil dan tidak begitu padat (Gambar 5b) sehingga mekanisme pengendapan secara pemegatan, difusi maupun tumbukan inersia menjadi dominan. Ini terjadi karena ukuran diameter serat kecil sehingga kelengkungan garis alir menjadi kecil pula, sehingga kecepatan garis alir naik yang akan mempersulit bagi partikel untuk menyesuaikan dengan garis alir dan menabrak serat. Perbedaan harga efisiensi dari hasil percobaan dan perhitungan teoritis untuk filter Whatman GF/A sebesar 0,35 % dan untuk Gelman A sebesar 0,03 %.



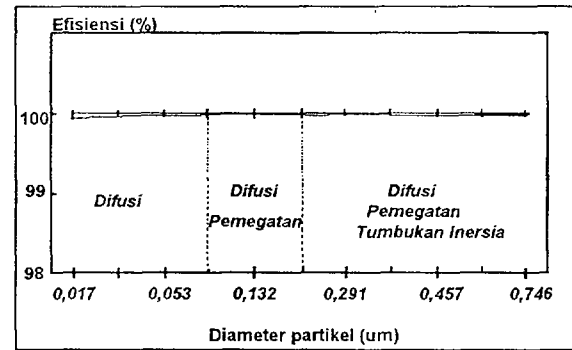
Gambar 8. Efisiensi filter Whatman 42 secara teori dan percobaan.



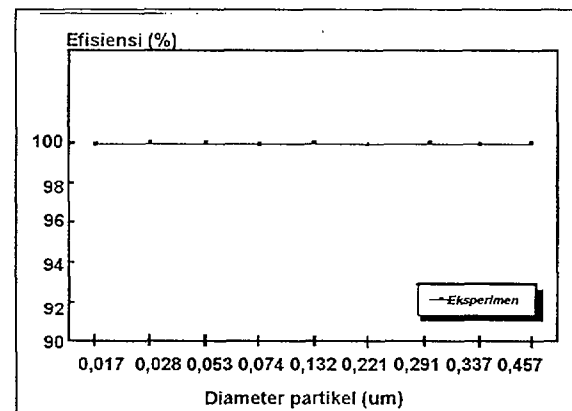
Gambar 9. Efisiensi filter Whatman GF/A secara teori dan percobaan.

Efisiensi filter membran berpori Whatman yang terbuat dari bahan selulosa

nitrat halus berkisar antara 99,91 dan 99,98% (Gambar 11). Hal ini terjadi karena partikel yang berukuran di bawah 1 μm dapat dengan mudah terperangkap di dalam lubang yang berukuran 0,8 μm . Distribusi pengendapan filter membran berpori lebih merata dengan koefisien absorpsi yang rendah, sehingga filter ini banyak dipakai untuk sampling partikel radioaktif pemancar alpha dan pengukuran dengan spektroskopi alpha [11]. Akan tetapi filter ini rapuh dan harganya relatif mahal (\pm Rp. 1000 / buah).



Gambar 10. Efisiensi filter Gelman A secara teori dan percobaan.



Gambar 11. Efisiensi filter Whatman membran secara percobaan.

Filter Gelman A dan Whatman membran berpori memenuhi kriteria filter HEPA sesuai standar Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA), karena mempunyai efisiensi $\geq 99,90\%$. Sedangkan filter Whatman GF/A yang seharusnya termasuk kelompok filter HEPA, sedikit mengalami penurunan efisiensinya. Hasil yang diperoleh dalam

penelitian ini, sesuai dengan hasil penelitian orang lain untuk jenis filter yang sama [11].

KESIMPULAN

1. Dari hasil percobaan, diperoleh bahwa efisiensi filter bergantung pada diameter partikel dan karakter filter (diameter serat dan kerapatan filter).
2. Perbedaan harga efisiensi filter dari hasil percobaan dan perhitungan teoritis untuk Whatman 41, Whatman 42, Whatman GF/A dan Gelman A adalah masing-masing 23,44 %, 4,26 %, 0,35 % dan 0,03 %.
3. Filter Gelman A dan Membran berpori memenuhi kriteria sebagai filter HEPA sesuai standar IAEA, karena mempunyai efisiensi $\geq 99,90$ %.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Proyek PPKR-KL dengan nomer kode 15.07.13.94. Penulis mengucapkan terima kasih kepada sdr. Rhadeya Setiawan, S.Si atas bantuannya dalam pengambilan data dan diskusi.

DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA, Particulate Filtration in Nuclear Facilities, Technical Report Series No. 325 (1991).
2. ICRP, Human Respiratory Track Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66 (1994).
3. LEE K. W., and LIU B. Y. H., On the Minimum Efficiency and the Most Penetrating Particle Size for Fibrous Filters, J. Air Pollution Control Association vol. 30 No. 4 (1980) 377 - 381.
4. HINDS W. C., Filtration in Aerosol Technology, John Wiley and Sons, New York, USA (1982) 164 - 185.
5. STECHKINA I. B., KIRSCH A. A., AND FUCHS N. A., Studies on Fibrous Aerosol Filter-IV : Calculation of Aerosol Deposition in Model Filters in the Range of Maximum Penetration, Annual Occupational Hygienist 12 (1969) 1 - 82.
6. LEE K. W., and LIU B. Y. H., Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters, Aerosol Science and Technology, 1 (1982) 147 - 161.
7. BUNAWAS, OTTO P. RUSLANTO dan GATOT SUHARIYONO, Metode Penentuan Efisiensi Filter Sebagai Fungsi Diameter Aerosol dan Koreksinya, belum diterbitkan (1996).
PAYETS.,BOULAUD, MADELAINE,G., and RENOUX A., Penetration and Pressure Drop of a HEPA Filter During Loading with Submicron Liquid Particles, J. Aerosol Science. 23 (1992) 723 - 735.
8. HORN, H. G., Optimization of the Electrostatic Classification for the Generation of Monodisperse Aerosol for Filter Testing, J. Aerosol Science 22 (1991) 339 - 342.
9. YEH, H. C., and LIU, B. Y. H., Aerosol Filtration by Fibrous Filter-II : Experimental, J. Aerosol Science 5 (1974), 205 - 217.
10. LEE, K.W., and MUKUND RAMA-MURTHI, "Filter Collection", Aerosol Measurement : Principles, Technique, and Applications, Ch. 10, Willeke K. and Paul A. Baron (Ed.), New York : Van Nostrand Reinhold. 1993.

DISKUSI

Sahala Lumbanraja - PPKTN :

Menurut teori yang Anda terangkan bahwa filter yang digunakan untuk perhitungan secara teoritis dianggap ideal. Mengapa efisiensi filter Whatman 41 secara teoritis tidak merata (100%) bahkan hampir 50% untuk difusi, sedangkan untuk filter yang lainnya hampir 100% untuk semua kondisi. Faktor-faktor apa yang mempengaruhi perhitungan teoritis untuk Whatman 41 sehingga hasilnya tidak seperti untuk filter lainnya ?.

Bunawas :

Untuk filter Whatman 41, diameter filternya teratur (sama besar) sedangkan untuk filter Whatman GF/A atau Gelman 41 diameter filternya lebih teratur dan seragam, sehingga perbedaan antara teori dan eksperimen kecil. Faktor yang mempengaruhi yaitu keseragaman dan keteraturan diameter filter.

Susetyo Trijoko - PSPKR :

1. Kami ingin mengetahui contoh-contoh aerosol radioaktif dan dari mana sumbernya
2. Apakah hasil penelitian ini telah dibandingkan dengan spesifikasi yang dikeluarkan pabrik ?.

Bunawas :

1. Contoh aerosol radioaktif adalah aerosol tritium (HTO,HT) di reaktor, aerosol iodin (CH_3I , HOI) pada proses produksi isotop, aerosol radon di dalam rumah.
2. Ya, tetapi spesifikasi pabrik hanya untuk diameter aerosol 0,3 mikrometer.

M. Yazid - PPNY :

1. Apakah efisiensi filter HEPA tidak tercantum pada spesifikasi dari pabrik ?.
2. Apakah ada perbedaan antara efisiensi hasil pengukuran ini dengan spesifikasinya ?.

Bunawas :

1. Efisiensi filter tercantum tetapi nilainya rata-rata.
2. Untuk filter Gelman A dan membran berpori tidak ada perbedaan, tetapi untuk filter whatman GF/A hasil eksperimen yang diperoleh lebih kecil dibanding spesifikasi pabrik.

Budi Santoso - PPkTN :

Dalam grafik antara efisiensi terhadap diameter filter, bagaimana kecenderungan grafik tersebut, apakah semakin besar diameter filter semakin kecil efisiensi atau semakin besar ?.

Bunawas :

Untuk filter serat gelas dan membrane berpori ada kecenderungan efisiensi tinggi pada diameter 0,017-0,074 μm , lalu turun untuk diameter 0,291 μm dan ada kecenderungan naik lagi. Diameter fiber akan mempengaruhi jumlah fiber dan kepekatan, makin kecil diameter fiber maka efisiensi cenderung makin tinggi.

Soedjarwo Roestam - PPSM :

1. Apakah ada batas umur filter ini yang masih dapat dipertanggung jawabkan efisiensinya ?.

2. Bagaimana cara membersihkan bila filter tersebut sudah terkontaminasi atau kotor ?.

Bunawas :

1. Setiap filter ada umur pemakaian (lama), untuk filter HEPA kalau efisiensinya sudah lebih kecil dari 99,90% maka filter sebaiknya diganti dengan yang baru.
2. Filter yang sudah terkontaminasi tidak bisa dibersihkan dan jangan dipakai lagi serta harus diperlakukan sebagai limbah.