

ANALISIS REDUKSI AEROSOL OLEH PENYEMPROT DALAM MODEL SUNKUP PWR MENGGUNAKAN METODE ESTIMASI ANALITIK

Hendro Tjahjono

PTRKN – BATAN, email: hendro@batan.go.id, telp.0816745881

ABSTRAK

ANALISIS REDUKSI AEROSOL OLEH PENYEMPROT DALAM MODEL SUNKUP PWR MENGGUNAKAN METODE ESTIMASI ANALITIK. Terjadinya kecelakaan parah pada suatu PLTN tipe PWR dengan melelehnya sebagian teras karena hilangnya kemampuan pendinginan akibat LOCA (*Loss Of Cooling Accident*) akan diikuti dengan masuknya uap dan partikel aerosol serta gas-gas yang tak terkondensasi ke dalam ruang sungkup. Komposisi dan ukuran partikel aerosol sangat beragam tergantung pada sumber dominan dihasilkannya aerosol tersebut. Dengan ukuran partikel yang sangat kecil, kurang dari 1 mikron sampai beberapa mikron, pengendalian di atmosfer pengungkung relatif sulit sehingga harus ditangkap terlebih dahulu dalam air melalui air pendingin yang disemprotkan. Dalam hal ini, karakteristik tangkapan aerosol oleh butiran air yang disemprotkan tersebut sangat penting untuk diketahui. Penelitian dilakukan melalui eksperimen menggunakan model sungkup PWR yang telah dikembangkan sejak tahun 2010 dengan nama FESPECo. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mendapatkan data estimasi karakteristik kemampuan sistem penyemprot dalam mereduksi aerosol di dalam model sungkup tersebut. Dalam analisis ini digunakan metode utama estimasi analitik yang dikembangkan oleh PORCHERON dkk, dikombinasikan dengan beberapa literatur yang lain. Hasilnya menunjukkan bahwa pada model sungkup FESPECo, dengan variasi debit air semprot dari 1 ml/detik hingga 6 ml/detik, variasi diameter butiran dari 100 μ m hingga 400 μ m dan variasi diameter aerosol dari 0,2 μ m hingga 5 μ m diperoleh variasi konstanta waktu reduksi aerosol mulai dari 0,000548 detik⁻¹ hingga 0,0845 detik⁻¹. Dapat disimpulkan bahwa laju reduksi aerosol di dalam sungkup akan semakin tinggi dengan naiknya debit air semprot, makin kecilnya ukuran butiran air semprot dan makin besarnya ukuran aerosol.

Kata kunci: Sungkup PWR, reduksi aerosol, penyemprot, metode analitik.

ABSTRACT

ANALYSIS OF AEROSOL REDUCTION BY SPRAYER INSIDE PWR CONTAINMENT MODEL USING ANALYTICAL ESTIMATION METHOD. Severe accident on PWR with core melt due to LOCA will be followed with entering steam and aerosol particles as well as non condensable gas into containment. Aerosol composition and particle size vary depending on the dominant source of the aerosol produced. With the particle size is very small, less than 1 micron to several microns, controlling in the containment atmosphere is relatively difficult that must be captured first in the water through the sprayed cooling water. In this case, the characteristics of aerosol captured by the sprayed water droplets is very important to be known. The research concerning will be done using PWR containment model names FESPECo which has been developed since the year of 2010. The objective of this analysis is to obtain the estimated characteristic data of sprayed water ability in reducing the aerosol in containment model. The main method used is an analytical estimation method developed by PORCHERON et al, combined with other literatures. The results show that in FESPECo, with the range of flow varied from 1 ml/sec to 6 ml/sec, droplet diameter varied from 100 μ m to 400 μ m, and aerosol diameter varied from 0,2 μ m to 5 μ m, so the time constant of reducing aerosol varied from 0,000548 s⁻¹ to 0,0845 s⁻¹. It can be concluded that the aerosol reduction rate increase with the increasing of spray flowrate, decreasing of droplet size and increasing of aerosol size.

Keywords: PWR Containment, aerosol reduction, sprayer, analytical method.

PENDAHULUAN

Kejadian kecelakaan parah pada suatu PLTN tipe PWR dengan melelehnya sebagian teras karena hilangnya kemampuan pendinginan akibat LOCA (*Loss Of Cooling Accident*) akan diikuti dengan masuknya uap dan partikel aerosol serta gas-gas yang tak terkondensasi ke dalam ruang pengungkung.

Komposisi partikel aerosol tergantung pada sumber dominan dihasilkannya aerosol tersebut[1,2,3], yakni bisa dari produk fisi, dari bahan lelehan kelongsong dan bahan bakar, lelehan batang kendali, interaksi lelehan dengan beton, atau dari proses penggenangan teras pada temperatur tinggi, semua itu memberikan komposisi aerosol yang beragam. Pengungkung reaktor PWR mempunyai dua fungsi, pertama adalah melindungi reaktor dari gangguan eksternal (tornado, hantaman pesawat, banjir, dsb.) dan fungsi kedua adalah untuk mencegah/mengurangi keluarnya zat-zat radioaktif ke lingkungan. Kinerja pengungkung ditentukan sejauh mana mampu menjalankan kedua fungsi tersebut. Karena aerosol bersumber dari teras reaktor atau material lain yang bereaksi dengan lelehan teras reaktor, maka kandungan zat radioaktif relatif tinggi sehingga harus bisa dicegah keluarnya ke lingkungan. Dengan ukuran partikel yang sangat kecil, yaitu bisa lebih kecil dari 1 mikron sampai beberapa mikron, pengendalian di atmosfer pengungkung relatif sulit sehingga harus ditangkap terlebih dahulu dalam air, yaitu melalui air pendingin yang disemprotkan atau terikat dalam kondensat uap. Dalam hal ini, karakteristik tangkapan aerosol oleh air yang disemprotkan tersebut sangat penting untuk diketahui. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sejauh mana sistem penyemprot sungkup mampu mereduksi jumlah aerosol tersebut. Metode yang digunakan adalah melalui eksperimen menggunakan model sungkup PWR yang telah dikembangkan sejak tahun 2010[4,5] dengan nama FESPECo. Namun demikian, sebelum dilaksanakannya eksperimen, perlu diestimasi terlebih dahulu karakteristik kemampuan sistem penyemprot dalam mereduksi aerosol di dalam sungkup, untuk tujuan inilah analisis reduksi aerosol dilakukan. Dalam analisis ini digunakan metode estimasi analitik yang juga digunakan oleh PORCHERON dkk.[6,7] dan telah divalidasi hasilnya dengan hasil eksperimen reduksi aerosol yang telah dilakukan sebelumnya di fasilitas TOSQAN [7]. Fasilitas ini berupa bejana berbentuk silinder dengan tinggi 4 m dan diameter dalam 1,5 m, volume 7 m³, yang dilengkapi dengan penyemprot, injektor uap dan aerosol, serta mampu mengukur konsentrasi aerosol yang tercampur dengan uap dan udara di ruang bejana secara *real-time*. Pengukuran jumlah aerosol yang tertangkap oleh air semprot dilakukan dengan teknik sampling. Metode estimasi analitik tersebut kemudian diaplikasikan menggunakan data geometri dan hidrodinamik dari model sungkup FESPECo yang lebih kecil dengan tinggi bejana silinder 1,5 m dan dengan diameter 0,8 m.

TEORI

Mekanisme tangkapan aerosol oleh butiran air semprot

Aerosol merupakan partikel-partikel berbagai ukuran yang bisa terdiri dari berbagai jenis senyawa yang berada di atmosfer sungkup dan bergabung dalam campuran uap dan udara. Reduksi aerosol oleh butiran air semprot bisa berlangsung melalui beberapa fenomena dasar berikut[6,7,8,9]:

- a. **Tumbukan Inertial (TI)**, yaitu bergabungnya aerosol ke butiran air semprot akibat tumbukan langsung dengan butiran tersebut. Efisiensi dari tumbukan ini didefinisikan sebagai perbandingan antara penampang efektif tumbukan dengan luas penampang dari butiran air semprot. Besar efisiensi ini merupakan fungsi dari bilangan Stokes (*Stk*) yang untuk $Stk \geq 0,2$, diestimasi menggunakan persamaan (1),

$$\varepsilon_{TI} = \left[\frac{Stk}{Stk + 0,5} \right]^2 \frac{Re/60}{1 + Re/60} \quad (1)$$

dengan Bilangan Stokes,

$$Stk = \frac{d_p^2 \rho_p v_w}{9\mu_g d_w} \quad (2)$$

dan Bilangan Reynold

$$Re = \frac{\rho_g v_w d_w}{\mu_g} \quad (3)$$

dengan d_p diameter aerosol (m), ρ_p densitas aerosol (kg/m³), v_w kecepatan butiran air (m/detik), μ_g viskositas dinamik campuran udara/uap (kg/m.detik) dan d_w diameter butiran air (m).

- b. **Intersepsi (I)**, yaitu tergabungnya aerosol ke butiran air akibat bersinggungan yang bukan karena tumbukan langsung. Efisiensi dari fenomena ini sebanding dengan perbandingan diameter antara partikel aerosol dengan butiran, yang dirumuskan secara sederhana melalui persamaan (3)

$$\varepsilon_I = 3 \left(\frac{d_p}{d_w} \right) \quad (4)$$

- c. **Diffusi Brownian (DB)**, yaitu tergabungnya partikel ke butiran air melalui mekanisme diffusi yang dipicu oleh gerakan acak dari partikel. Efisiensi dari diffusi Brownian ini diestimasi dengan persamaan (4) sebagai fungsi Bilangan Reynold dan Bilangan Peclet.

$$\varepsilon_{DB} = 3,02 Re^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (5)$$

dengan

$$Pe = \frac{v_w d_w}{\alpha_w} \quad (6)$$

dengan α_w adalah diffusivitas termal air (m²/detik)

- d. **Termoforesis (T)**, merupakan fenomena tergabungnya partikel aerosol pada butiran air semprot yang disebabkan gradien temperatur gas di dekat permukaan butiran air dengan temperatur partikel aerosol berada di antara gradien temperatur tersebut. Dalam fenomena ini arah gerakan aerosol di daerah gradien tersebut selalu menuju ke temperatur yang lebih rendah. Nilai efisiensi dari fenomena ini dirumuskan pada persamaan (7),

$$\varepsilon_T = 4K_T f_v (T_g - T_w) \frac{v_g}{\rho_g T_g v_w d_w} \quad (7)$$

Dengan K_T adalah koefisien termoforesis yang merupakan fungsi dari Bilangan Knudsen Kn dengan nilai $K_T=0,2$ untuk $Kn \ll 1$ [], f_v adalah koefisien ventilasi dengan $f_v=1$ jika tidak ada ventilasi.

- e. **Diffusioforesis (D)**, merupakan penggabungan aerosol dengan butiran air akibat adanya kondensasi uap, jadi aerosol bergabung ke butiran air semprot bersama kondensat. Efisiensi dari fenomena ini dirumuskan dengan persamaan (8)

$$\varepsilon_D = 4f_v \frac{\sqrt{BM_w}}{X_p \sqrt{BM_p} + X_w \sqrt{BM_w}} \frac{\alpha}{v_w d_w} \ln \left(\frac{P - P_{sat}}{P_{ud}} \right) \quad (8)$$

dengan BM_w adalah Berat Molekul air (gr/mol), BM_p adalah Berat Molekul partikel aerosol (gr/mol), X_p adalah fraksi molar partikel dan X_w adalah fraksi molar air, P adalah tekanan ruang/campuran (Pa), P_{sat} adalah tekanan saturasi pada temperatur butiran air (Pa) dan P_{ud} adalah tekanan udara (Pa).

Kelima mekanisme tangkapan aerosol tersebut tidak sepenuhnya bersifat independen satu sama lain, sehingga efisiensi gabungannya bukan merupakan penjumlahan aljabar dari masing-masing efisiensinya tetapi dirumuskan dalam pendekatan persamaan (9) berikut

$$E = 1 - (1 - \varepsilon_{TI})(1 - \varepsilon_I)(1 - \varepsilon_{DB})(1 - \varepsilon_T)(1 - \varepsilon_D) \quad (9)$$

Persamaan kesetimbangan massa aerosol di dalam sungkup

Di dalam sungkup, perubahan massa aerosol per satuan waktu dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$\boxed{\text{Perubahan massa aerosol di sungkup per detik}} = - \boxed{\text{Massa aerosol yang tertangkap butiran air per detik}} + \boxed{\text{Massa aerosol yang masuk sungkup per detik}} - \boxed{\text{Massa aerosol terdeposisi di dinding sungkup per detik}}$$

Kesetimbangan massa tersebut dapat dituliskan dalam bentuk persamaan (10) yang merupakan persamaan diferensial orde satu.

$$\frac{dm_p}{dt} = -\lambda \cdot m_p(t) + \frac{dm_{in}}{dt} - \frac{dm_d}{dt} \quad (10)$$

Dengan (dm_p/dt) adalah laju perubahan massa aerosol dalam sungkup (kg/detik), λ adalah konstanta waktu reduksi aerosol oleh air semprot (1/detik), (dm_{in}/dt) adalah laju penambahan aerosol ke sungkup dari sumbernya (kg/detik), dan (dm_d/dt) adalah laju reduksi aerosol akibat pengendapan di dinding sungkup (kg/detik).

Jika selama penyemprotan laju produksi aerosol yang masuk sungkup tidak ada lagi, dan laju pengendapan aerosol di dinding sungkup diabaikan, maka solusi persamaan (10) menjadi

$$m_p = m_{p0} e^{-\lambda t} \quad (11)$$

dengan m_{p0} adalah massa aerosol pada kondisi awal sebelum disemprot (kg).

Nilai konstanta waktu reduksi aerosol (λ) merupakan fungsi dari debit air semprot Q_w ($m^3/detik$), tinggi semprot H (m), volume ruang sungkup (m^3), diameter butiran air semprot d_w (m) dan Efisiensi tangkapan aerosol oleh butiran air E , sesuai persamaan (12).

$$\lambda = \frac{3Q_w H E}{2V d_w} \quad (12)$$

METODOLOGI

Data analisis

Data yang digunakan dalam analisis ini terdiri dari data geometris, data termohidrolik dan data sifat fisis bahan yang digunakan. Semua data berada dalam rentang data eksperimen yang akan dilakukan di fasilitas model sungkup FESPECo yang ditunjukkan pada Gambar 1.

a. Data geometris:

- Tinggi penyemprot $H = 1$ m
- Volume ruang sungkup $V = 0,75$ m^3

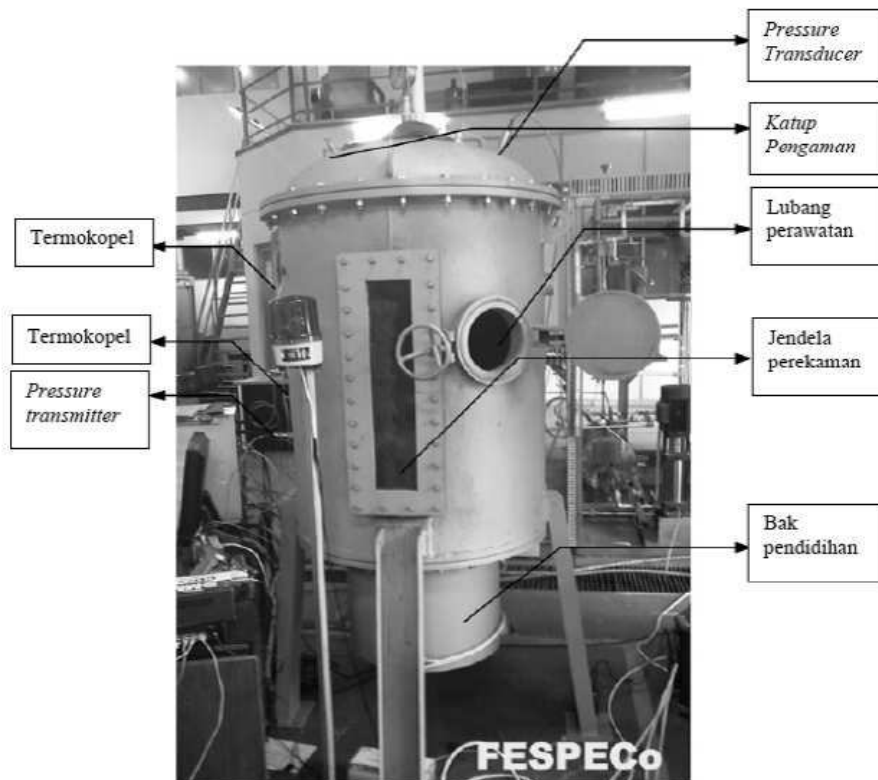
b. Data termohidrolik:

- Tekanan awal $P = 3$ bar
- Tekanan parsial udara $P_{ud} = 1$ bar
- Tekanan saturasi pada temperature air $P_{sat} = 0,042$ bar
- Debit air semprot bervariasi yaitu $Q_w = 1, 2, 4$ dan 6 ml/detik ($1e-6 m^3/detik$)
- Diameter rata-rata butiran air semprot, bervariasi $d_w = 100, 200, 300, 400$ μm
- Diameter aerosol bervariasi dari $d_p = 0,2$ μm s/d 5 μm dengan jenis aerosol adalah SiC untuk menyesuaikan data aerosol pada referensi []
- Temperatur butiran air semprot $T_w = 30$ $^{\circ}C$

- Temperatur gas campuran $T_g=120\text{ }^\circ\text{C}$
- Massa awal aerosol $m_{p0}=200\text{ mg}$ (d disesuaikan dengan konsentrasi pada ref [1])
- Kecepatan butiran air semprot, bervariasi sesuai debit, yaitu $v_w=0,5, 1, 2$ dan 3 m/detik
- Fraksi massa aerosol diabaikan terhadap massa air.

c. Data sifat fisis:

- Densitas aerosol $\rho_p=3200\text{ kg/m}^3$
- Data sifat fisis dari air, udara dan uap langsung diperoleh dalam program sifat fisis yang telah disiapkan sebelumnya.



Gambar 1. Fasilitas Eksperimen Containment (FEPECo)

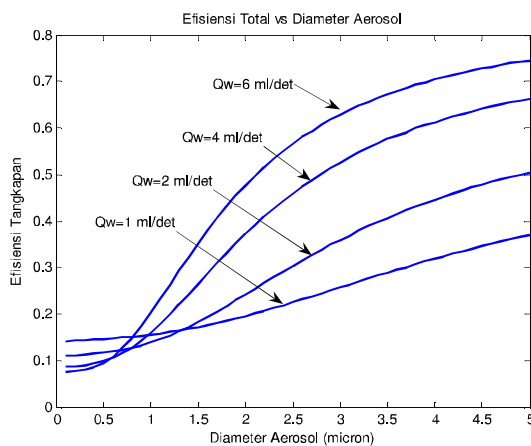
TATA KERJA

Analisis dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

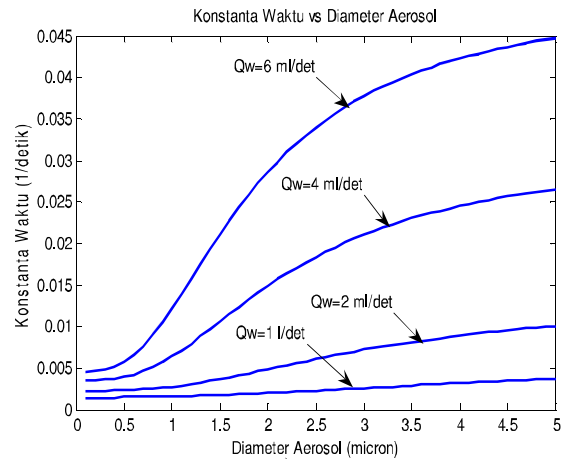
- Menyusun program perhitungan menggunakan program aplikasi Matlab berdasarkan persamaan-persamaan yang diberikan di bab teori.
- Menyiapkan data input dengan mengambil d_p dan Q_w sebagai variabel
- Menghitung efisiensi tangkapan aerosol oleh butiran air semprot untuk masing-masing mekanisme tangkapan menggunakan persamaan (1), (4), (5), (7) dan (8)
- Menghitung efisiensi gabungan dari seluruh mekanisme (E) menggunakan persamaan (9)
- Menghitung konstanta waktu reduksi aerosol di dalam sungkup (λ) menggunakan persamaan (12)
- Mengolah data hasil dan menampilkan dalam bentuk grafik atau tabel.
- Melakukan pembahasan terhadap setiap data hasil dan menarik kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh dari diameter aerosol terhadap efisiensi tangkapan total dan konstanta waktu reduksi aerosol untuk berbagai debit air semprot pada suatu nilai tertentu dari diameter rata-rata butiran (diambil untuk diameter butiran sebesar 200 μm) diberikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



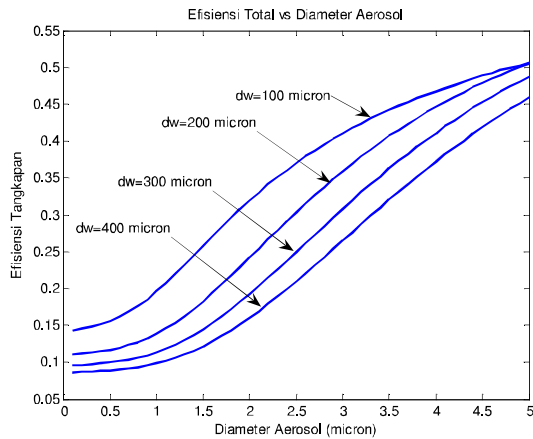
Gambar 2. Kurva $E(d_p)$ pada variasi debit dengan diameter droplet $d_w=200 \mu\text{m}$



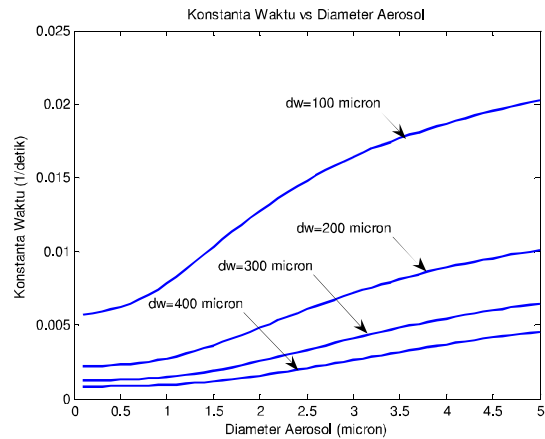
Gambar 3. Kurva $\lambda(d_p)$ pada variasi debit dengan diameter droplet $d_w=200 \mu\text{m}$

Gambar 2 menunjukkan bahwa efisiensi total tangkapan aerosol oleh butiran air semakin tinggi dengan dengan naiknya ukuran aerosol. Hal ini menunjukkan bahwa aerosol dengan ukuran lebih besar akan lebih mudah ditangkap oleh butiran air. Secara umum, dengan semakin besar debit air semprot yang digunakan, semakin rapat pula jarak antar butiran di dalam ruang sungkup sehingga memperbesar peluang bertemunya dengan aerosol. Untuk ukuran aerosol yang sangat kecil ($d_p < 0,7$ micron), efisiensi lebih tinggi justru terjadi untuk debit yang lebih kecil. Hal ini disebabkan dari 5 mekanisme tangkapan aerosol, ada dua mekanisme, yaitu termoforesis dan difusioforesis, yang efisiensinya berbanding terbalik dengan debit. Hal ini baru terlihat dominan untuk ukuran aerosol sangat kecil. Pada Gambar 3 konsistensi terlihat untuk seluruh nilai ukuran aerosol, bahwa dengan naiknya debit kenaikan konstanta waktu reduksi aerosol terhadap naiknya ukuran aerosol juga lebih tajam.

Pada Gambar 4 dan Gambar 5 ditunjukkan bagaimana pengaruh dari ukuran butiran air semprot (*droplet*) terhadap efisiensi tangkapan aerosol dan terhadap konstanta waktu reduksi aerosol. Bisa dipahami bahwa dengan naiknya ukuran butiran air, maka baik efisiensi maupun konstanta waktu akan turun. Hal ini disebabkan naiknya ukuran butiran akan menurunkan luas kontak keseluruhan antara butiran dengan aerosol sehingga memperkecil tangkapannya.

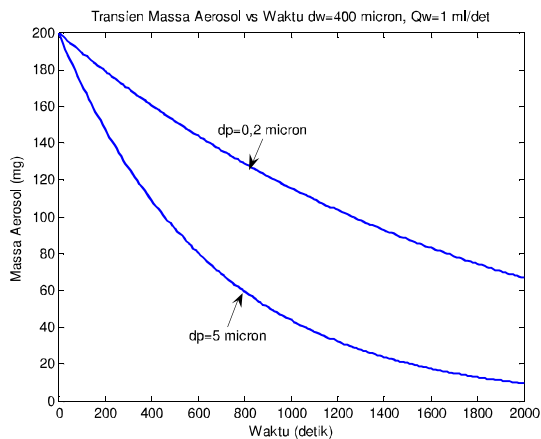


Gambar 4. Kurva $E(dp)$ dengan variasi diameter droplet pada debit $Q_w=2$ ml/det

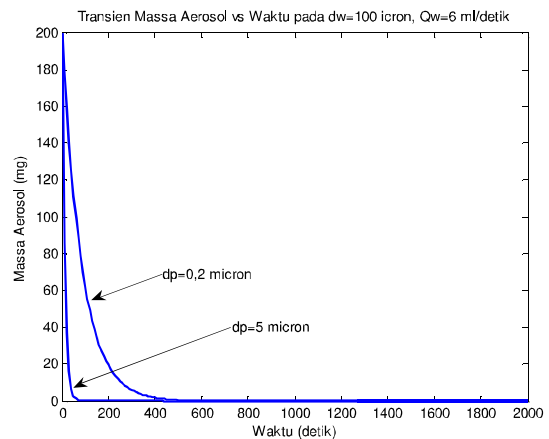


Gambar 5. Kurva $\lambda(dp)$ dengan variasi diameter droplet pada debit $Q_w=2$ ml/det

Pada Gambar 6 dan Gambar 7 ditunjukkan kurva transien dari massa aerosol di dalam sungkup ketika disemprot. Kedua gambar tersebut menunjukkan dua kondisi yang jauh berbeda, Gambar 6 untuk debit yang terendah dan ukuran butiran tertinggi, yaitu debit 1 ml/detik dengan diameter butiran 400 μm , sedangkan di Gambar 7 untuk debit tertinggi dan ukuran butiran terendah, yaitu dengan debit 6 ml/detik dan diameter butiran 100 μm . Pada masing-masing gambar ditunjukkan dua kurva, yakni untuk diameter aerosol terendah dan tertinggi. Terlihat perbedaan yang tajam antara kedua gambar tersebut yang menunjukkan semakin cepatnya aerosol tereduksi jika debit air semprot diperbesar dan ukuran butiran diperkecil. Pereduksian aerosol juga semakin cepat untuk ukuran aerosol yang lebih besar.



Gambar 6. Perbandingan transien massa aerosol untuk dua nilai dp pada $dw=400$ μm , $Q_w=1$ liter/det



Gambar 7. Perbandingan transien massa aerosol untuk dua nilai dp pada $dw=100$ μm , $Q_w=6$ liter/det

KESIMPULAN

Dari hasil analisis ini dapat disimpulkan bahwa laju reduksi aerosol di dalam sungkup akan semakin tinggi dengan naiknya debit air semprot, makin kecilnya ukuran butiran air semprot dan dengan makin besarnya ukuran aerosol. Pada model sungkup FESPECo, dengan variasi debit air semprot dari 1 ml/detik hingga 6 ml/detik, variasi diameter butiran dari 100 μ m hingga 400 μ m, dan variasi diameter aerosol dari 0,2 μ m hingga 5 μ m, diperoleh variasi konstanta waktu reduksi aerosol mulai dari 0,000548 detik⁻¹ hingga 0,0845 detik⁻¹.

DAFTAR PUSTAKA

1. Dokumen No. NEA/CSNI/R(2009)5, "State-Of-The-Art Report On Nuclear Aerosols", Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety of Nuclear Installation, 2009.
2. NUREG-1465, "Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants", 1995.
3. Assessment Report: ONR-GDA-AR-11-020b Revision 0, "Containment and Severe Accident Assessment of the EDF and AREVA UK EPR™ Reactor", Office for Nuclear Regulation, 2011.
4. Hendro Tjahjono, Susyadi. Giarno, Adhi Rahardian, "Pemodelan Sungkup PWR untuk Eksperimen Dinamika Pembebanan dan Kondensasi", Laporan Teknis PTRKN, 2010.
5. Hendro Tjahjono, Surip Widodo, Susyadi, "Analisis tanggapan pengungkung reaktor PWR secara eksperimental", Usulan Penelitian 2012.
6. E. Porcheron, P. Lemaitre and D. Marchand, "Aerosol Removal by Emergency Spray in PWR Containment", Journal of Energy and Power Engineering 5 (2011) 600-611.
7. E. Porcheron, P. Lemaitre, A. Nuboer, V. Rochas, J. Vendel, "Experimental investigation in the TOSQAN facility of heat and mass transfers in a spray for containment application", Nuclear Engineering and Design 237 (2007) 1862-1871.
8. S. Mimouni, J-S. Lamy, J. Lavieville, S. Guieu, M. Martin, "Modelling Of Sprays In Containment Applications With A CMFD Code", Severe Accident Research Network (SARNET) of the 6th EC Framework Programme, 2007.
9. S. P. Bakanov , "Thermophoresis in Gases at Small Knudsen Numbers", Aerosol Science and Technology, USSR Academy of Sciences, 31 Lenin Prospect, Moscow, 117915, USSR, <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02786829108959515>, Published online: 08 Jun 2007.

DISKUSI/ TANYA JAWAB :

PERTANYAAN : (Agung Abadi Kiswandono, Program S3-Kimia UGM)

- Kesimpulan yang diambil dari penelitian ini, apakah juga mengacu pada ke-5 mekanisme yang ada, kira-kira berapa efisiensi masing-masing yang didapatkan?
- Pada laju aerosol $Q_w=1$ ml/det relatif lebih kecil dibandingkan dengan $Q_w=2$ ml/det – 6 ml/det, kira-kira apa penjelasannya?

JAWABAN : (Hendro Tjahjono, PTRKN-BATAN)

- Kesimpulan sudah mengacu pada kelima mekanisme tangkapan. Tetapi tidak dirinci untuk masing-masing mekanisme tangkapan.
- Karena dengan laju alir lebih kecil, untuk ukuran butiran yang sama, jarak antar butiran menjadi lebih renggang sehingga jumlah aerosol yang lolos dari butiran penyemprot akan lebih banyak. Dengan kata lain, kenaikan efisiensi terhadap kenaikan ukuran aerosol relatif tidak signifikan dibandingkan pada debit yang besar.