

OPTIMASI PENDINGINAN EKSTERNAL PADA MODEL SUNGKUP PWR-1000 MENGGUNAKAN METODE ESTIMASI ANALITIK

Hendro Tjahjono
Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir, BATAN
Email: hendro@batan.go.id

Diterima editor 10 Maret 2014
Disetujui untuk publikasi 30 April 2014

ABSTRAK

OPTIMASI PENDINGINAN EKSTERNAL PADA MODEL SUNGKUP PWR-1000 MENGGUNAKAN METODE ESTIMASI ANALITIK. Sungkup reaktor merupakan benteng terakhir dalam menahan terlepasnya zat-zat radioaktif ke lingkungan ketika terjadi suatu kecelakaan reaktor. Oleh karena itu integritasnya harus selalu dipertahankan yang antara lain dilakukan dengan cara mencegah dilampauinya batas desain tekanan dan temperatur yang bisa terjadi pada kondisi kecelakaan melalui pendinginan sungkup yang mencukupi. Pada reaktor generasi III+ yang menerapkan konsep pendinginan pasif seperti AP1000, sungkup didinginkan secara eksternal melalui konveksi alamiah pada celah udara dan guyuran air pendingin di permukaan luar sungkup. Karakteristik pendinginan eksternal ini akan diteliti secara eksperimental melalui model sungkup PWR1000 berskala 1/40. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai debit optimal yang diperlukan dalam pendinginan model sungkup sebelum konfirmasi secara eksperimental dilakukan. Metode yang digunakan adalah dengan melakukan pemodelan analitis dan pemrograman berbasis Matlab yang mampu mengestimasi nilai-nilai parameter pendinginan eksternal seperti laju alir, temperatur dan daya kalor yang dievakuasi. Penerapan program pada sungkup AP1000 juga dilakukan untuk bisa dibandingkan dengan data desain. Hasilnya menunjukkan kesesuaian dengan data desain sungkup AP1000 dengan debit optimal sebesar 9,5 liter/detik yang mampu mengevakuasi kalor sebesar 21,6 MW. Sedangkan pada model sungkup diperoleh debit optimal sebesar 22 cc/detik yang mampu mengevakuasi kalor sebesar 37 KW. Disimpulkan bahwa dengan penelitian ini karakteristik pendinginan eksternal sungkup reaktor PWR mampu diestimasi dan bersamaan dengan itu dapat diketahui nilai optimal dari debit pendingin yang diperlukan.

Kata kunci: pendinginan eksternal, sungkup PWR, estimasi analitik, AP1000.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF EXTERNAL COOLING ON PWR-1000 CONTAINMENT MODEL USING ANALYTICAL ESTIMATION METHOD. Reactor containment is the last barrier in avoiding the release of radioactive substances into the environment in the event of a reactor accident. Therefore, its integrity must always be maintained, among others, performed in a manner to prevent the exceeding of pressure and temperature design limit that could occur in an accident, through adequate containment cooling. In generation III⁺ reactors which passive cooling concepts are applied such as the AP1000, the containment is externally cooled by natural convection in the air gap and a splash of cooling water in the outer surface. External cooling characteristics will be investigated experimentally through PWR1000 containment models of 1/40 scale. The purpose of this research is to determine the optimal flow of cooling required in the model before confirming experimentally performed. The method used is to perform analytical modeling and programming based on Matlab which is able to estimate the values of external cooling parameters such as flow rate, temperature and heat power evacuated. Implementation of the program on the AP1000 containment is also performed to be compared with the design data. The results shows the conformity with the AP1000 containment design data with optimal flow of 9.5 liters/sec that is able to evacuate the heat of 21.6 MW. While for the containment model, the optimal flow obtained at 22 cc / sec which is capable of evacuating the heat by 37 KW. This study concluded that the characteristics of the external cooling of PWR containment could be estimated and in conjunction, the optimal cooling flow required can be determined.

Keywords: external cooling, PWR containment, analytical estimation, AP1000.

PENDAHULUAN

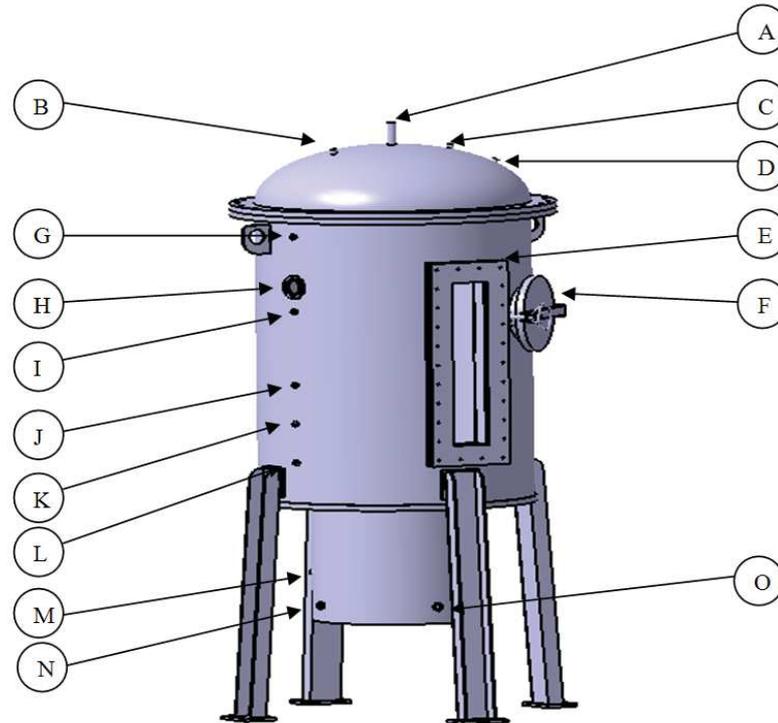
Sungkup reaktor tipe PWR (*Pressurized Water Reaktor*) merupakan penghalang terakhir dalam mencegah terlepasnya zat-zat radioaktif ke lingkungan ketika terjadi kecelakaan parah pada teras reaktor. Oleh karena itu, tekanan di dalam sungkup harus dijaga agar tidak sampai melampaui tekanan desainnya untuk menjaga integritas struktur dari sungkup tersebut. Pembentukan tekanan di dalam sungkup terutama terjadi akibat produksi uap yang berasal dari berbagai sumber penyebab seperti kecelakaan kehilangan pendingin primer (*Loss Of Cooling Accident*, LOCA), kebocoran pendingin sekunder, atau dari pembukaan katup pada tabung tekan (*pressurizer*). Walaupun reaktor sudah dipadamkan ketika terjadi kecelakaan kehilangan pendingin, namun produksi uap masih terus berlangsung dengan tetap adanya kalor peluruhan dalam waktu yang lama. Hal ini dimitigasi dengan melakukan pendinginan yang cukup terhadap sungkup yang mampu mengambil seluruh kalor yang dihasilkan dari kalor peluruhan yang dalam 1 jam saja nilainya sudah turun di bawah 1% dari daya termal reaktor sebelum padam, yakni kurang dari 30 MWth untuk PWR-1000 MWe. Penurunan tekanan yang terbentuk dapat dilakukan dengan mengkondensasikan kembali uap yang diproduksi tersebut. Dalam reaktor PWR generasi II yang sedang beroperasi dewasa ini, pengkondensasian uap tersebut dilakukan dengan penyemprot internal yang beroperasi secara aktif [1].

Fitur-fitur keselamatan yang beroperasi secara aktif menjadi tidak berfungsi ketika terjadi kejadian *station black-out* (SBO) dengan padamnya seluruh sumber energi listrik, baik yang berasal dari luar maupun dari dalam. Dengan mempertimbangkan hal tersebut, maka pada reaktor generasi baru, fitur keselamatan pasif mulai dikembangkan termasuk sistem pendinginan sungkup secara pasif. Contohnya, pada reaktor AP1000 desain Westinghouse yang tergolong dalam generasi III⁺, pendinginan sungkup dilakukan secara eksternal melalui kanal konveksi alamiah dengan menggunakan efek cerobong pada celah antara sungkup dalam yang berbahan baja tahan karat dan sungkup luar dari konstruksi beton. Antara sungkup baja dan beton masih ada lapisan baja kedua yang berfungsi untuk mengarahkan aliran udara dingin dari luar sungkup beton bagian atas turun terlebih dahulu untuk kemudian mendinginkan permukaan sungkup baja mulai dari bagian bawah hingga bagian atas. Udara yang memanas setelah mendinginkan permukaan sungkup akan naik dan menarik udara dingin masuk untuk mendinginkan permukaan luar sungkup. Jika proses ini masih belum mencukupi untuk menurunkan tekanan di dalam sungkup, di bagian atas sungkup telah disediakan sejumlah kurang lebih 3000 m³ air pendingin yang akan diguyurkan secara perlahan ke permukaan luar sungkup bagian atas. Persediaan air sejumlah itu diperkirakan baru habis setelah 72 jam, waktu yang diperkirakan mencukupi untuk melakukan tindakan-tindakan penyelamatan reaktor yang diperlukan. Dengan guyuran secara perlahan tersebut diharapkan air akan mengalir dalam bentuk lapisan tipis di permukaan sungkup yang memudahkan terjadinya penguapan atau pendidihan yang mampu menyerap kalor dari dalam sungkup lebih banyak [2,3,4].

Efektivitas pendinginan eksternal dengan mengguyurkan air pendingin di atas sungkup akan diteliti secara eksperimental di laboratorium keselamatan termohidrolika reaktor, Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir BATAN di kawasan Puspipetek Tangerang Selatan. Penelitian dilakukan menggunakan model sungkup reaktor PWR dengan skala panjang 1/40 dibandingkan sungkup PLTN tipe PWR berdaya 1000 MWe seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Model sungkup ini memiliki diameter sebesar 1 m dan tinggi bagian silinder sebesar 1 m, ditambah tinggi bagian kubah atas sebesar 0,25 m. Air pendingin eksternal diguyurkan dari atas di sekitar titik pusat dengan debit tertentu yang akan dioptimasi sedemikian sehingga mampu memberikan pengambilan daya kalor sebesar-besarnya [5]. Untuk mengoptimasi debit air pendingin eksternal yang diperlukan tersebut, perlu dilakukan analisis menggunakan model matematik dan empiris. Untuk tujuan inilah, analisis pendinginan eksternal sungkup ini dilakukan.

Analisis dilakukan dengan terlebih dahulu menyusun model mekanisme perpindahan kalor yang sedekat mungkin dengan kondisi riil. Dari pemodelan tersebut kemudian disusun program perhitungan berbasis Matlab07 untuk kemudian digunakan dalam simulasi pendinginan guna mendapatkan nilai debit optimal yang memberikan daya kalor pengambilan kalor tertinggi. Proses pendinginan yang efektif dicapai melalui perubahan wujud, yaitu penguapan atau pendidihan. Untuk itu, temperatur permukaan pendingin harus diusahakan cukup tinggi hingga mencapai temperatur saturasinya atau mendekati temperatur tersebut guna mengefektifkan penguapannya. Hal ini bisa lebih dicapai dengan

semakin tipisnya aliran pendingin, sehingga mekanisme perpindahan kalor konduksi diasumsikan lebih dominan dibandingkan dengan konveksi. Dengan demikian perpindahan kalor dari uap di dalam sungkup ke udara luar berlangsung berturut-turut melalui mekanisme kondensasi uap di permukaan dalam sungkup, konduksi pada ketebalan sungkup, konduksi pada lapisan tipis air pendingin dan penguapan di permukaan luar air pendingin. Mekanisme konduksi dan penguapan di pendingin bisa diganti dengan mekanisme pendidihan jika temperatur pendingin telah mencapai temperatur didihnya.



Keterangan gambar :

- | | |
|---|----------------------------------|
| A. Lokasi guyuran air pendingin eksternal | H. Jendela kaca untuk penerangan |
| B. <i>Pressure Transducer 2</i> | I. Termokopel 4 |
| C. <i>Safety Valve</i> | J. Termokopel 3 |
| D. Termokopel 6 | K. <i>Pressure Transducer 1</i> |
| E. Jendela kaca | L. Termokopel 2 |
| F. Lubang <i>maintenance</i> | M. Termokopel 1 |
| G. Termokopel 5 | N. Pemanas |
| | O. Lubang drain |

Gambar 1. Model sungkup PWR

Untuk menguji program perhitungan yang disusun, juga dilakukan penerapan untuk pendinginan sungkup AP1000 dan membandingkan hasilnya dengan hasil analisis yang disajikan dalam Dokumen Kendali Desain (*Design Control Document*) [6].

Dengan analisis ini diharapkan dapat diketahui pengaruh variasi parameter termohidrolik dari pendingin dan uap seperti laju pendingin, temperatur uap, kelembaban udara, terhadap karakteristik perpindahan kalor dan massa pada model sungkup. Pengaruh dari pelapis non konduktif seperti cat di permukaan luar sungkup juga bisa dievaluasi dengan analisis ini.

Terkait dengan pendinginan eksternal sungkup AP1000 dengan guyuran air, A.D. Pasek dkk. [7,8,9] telah melakukan penelitian baik melalui eksperimen maupun melalui analisis menggunakan perangkat lunak. Beberapa hasil penelitian tersebut dapat digunakan untuk memperkaya pemahaman fenomena pendinginan eksternal melalui pembasahan permukaan dari suatu sungkup reaktor.

TEORI

Mekanisme pendinginan eksternal bisa berupa konveksi alamiah dan radiasi ke lingkungan untuk sungkup kering, atau melalui penguapan/pendidihan untuk sungkup yang menggunakan guyuran air tipis di permukaan luar sungkup. Fenomena breakdown dimungkinkan terjadi pada aliran tipis namun dalam estimasi ini tidak diperhitungkan dan aliran diasumsikan stabil. Dengan tipisnya lapisan pendingin tersebut, transfer kalor secara konduksi jauh lebih dominan dibandingkan dengan konveksi. Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai (k/d) yang jauh lebih besar dibandingkan dengan nilai heat transfer koefisien konveksi $(Nu.k/L)$, dengan k adalah konduktivitas termal air (W/mK), d adalah tebal lapisan pendingin, Nu adalah bilangan Nusseltz, dan L adalah panjang karakteristik aliran pendingin (m). Dengan menggunakan dimensi yang ada pada PLTN AP1000, dapat ditunjukkan bahwa koefisien perpindahan kalor konveksi besarnya tidak lebih dari 5% dari nilai k/d sehingga pengambilan asumsi yang mengabaikan faktor konveksi dibanding konduksi masih bisa dibenarkan [10,11].

Dengan sepenuhnya konduksi, maka mekanisme perpindahan kalor dari dalam sungkup ke udara luar akan berlangsung secara berturut-turut melalui:

- Kondensasi uap dipermukaan sisi dalam dinding sungkup
- Konduksi di dalam dinding sungkup
- Konduksi di lapisan air pendingin atau
- pendidihan jika temperatur air telah mencapai temperatur saturasinya.
- Penguapan dipermukaan air

Kelima mekanisme perpindahan kalor tersebut memberikan resistansi termal yang diuraikan dalam paragraf lebih lanjut.

Kondensasi Uap di Permukaan Sisi Dalam Dinding

Ruang di dalam sungkup berisi campuran antara udara yang sejak sebelum kecelakaan terjadi telah ada di dalam sungkup dan uap air yang dihasilkan dari kebocoran pendingin reaktor. Walaupun reaktor telah dipadamkan, produksi uap tersebut masih terus berlangsung dengan masih adanya kalor peluruhan di teras reaktor. Oleh karena itu, untuk mencegah kenaikan tekanan akibat bertambahnya jumlah uap di dalam ruang, laju kondensasi minimal harus mampu mengimbangi laju penguapannya. Dengan kata lain besarnya daya kalor kondensasi harus lebih besar dari daya kalor penguapannya.

Besar koefisien perpindahan kalor kondensasi pada sungkup untuk kondisi murni uap (tanpa gas tak terkondensasi seperti udara) bisa didekati dengan persamaan (1) untuk pelat [10]

$$h_{i_0} = 0,943 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_u) k^3 h_{fg}}{\mu_l (T_{sat} - T_s) R} \right]^{0,25} \quad (1)$$

dengan:

h_{i_0} : koefisien perpindahan kalor kondensasi tanpa gas (W/m²K)

g : percepatan gravitasi (m/detik²)

ρ_l : massa jenis air (kg/m³)

ρ_u : massa jenis uap (kg/m³)

k : konduktivitas termal air (W/mK)

h_{fg} : kalor laten kondensasi (J/kg)

μ_l : viskositas dinamik air (kg/m.detik)

T_{sat} : temperatur saturasi (K)

T_s : temperatur permukaan dalam dinding sungkup (K)

R : jari-jari sungkup (m)

Adanya gas yang tak bisa terkondensasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap koefisien perpindahan kalor kondensasi. Caruso G. - Naviglio A. [12] telah melakukan penelitian terkait pengaruh gas tak bisa terkondensasi terhadap koefisien perpindahan kalor kondensasi dan diperoleh korelasi yang ditunjukkan pada persamaan (2)

$$h_i = 0,0118 W_{nc}^{-0,86} h_{i0} \quad (2)$$

dengan :

h_i : koefisien perpindahan kalor kondensasi dengan ada gas (W/m²K)

W_{nc} : fraksi massa gas tak terkondensasi

Sehingga resistansi termal antara uap dengan dinding sungkup diberikan pada persamaan (3)

$$R_{th_{in}} = \frac{1}{h_i} \quad (3)$$

dengan R_{th_i} : Resistansi termal kondensasi di permukaan dalam sungkup (m²K/W)

Konduksi di Dalam Dinding Sungkup dan di Lapisan Air Pendingin

Resistansi termal dalam dinding sungkup dan lapisan air dirumuskan dalam persamaan (4) dan (5).

$$R_{th_s} = \frac{d_s}{k_s} \quad (4)$$

dan

$$R_{th_a} = \frac{d_a}{k_a} \quad (5)$$

dengan:

R_{th_s} : Resistansi termal dinding sungkup (m²K/W)

R_{th_a} : Resistansi termal lapisan air pendingin (m²K/W)

d_s : tebal dinding sungkup (m)

d_a : tebal lapisan air pendingin (m)

k_s : konduktivitas termal dinding sungkup (W/mK)

k_a : konduktivitas termal air (W/m)

Pendidihan Pada Lapisan Air

Jika temperatur lapisan air pendingin telah mencapai temperatur saturasi pada tekanan 1 atmosfer, maka lapisan air pendingin memasuki fasa pendidihan dengan koefisien perpindahan kalor didekati dengan korelasi Stephen Abdelsalam yang dimodifikasi oleh B.Manikandaprabu dkk. [13] pada persamaan (6).

$$h_d = 0,559 \times 10^{10} \left(\frac{k_l}{R} \right) \left(\frac{\varphi R}{T_s k_l} \right)^{0,43} \left(\frac{h_{fg} R^2}{\alpha^2} \right)^{-1,58} \left(\frac{c_p T_s R^2}{\alpha^2} \right)^{1,26} \left(\frac{\rho_l - \rho_u}{\rho_l} \right)^{5,22} \quad (6)$$

dengan:

h_d : koefisien perpindahan kalor pendidihan (W/m²K)

k_l : konduktivitas termal air (W/mK)

k_u : konduktivitas termal uap (W/mK)

φ : fluks kalor (W/m²)

α : diffusivitas termal air (m²/detik)

c_p =kalor jenis air (J/kgK)

Sehingga resistansi termal antara dinding luar sungkup dengan lapisan air diberikan pada persamaan (7)

$$Rth_d = \frac{1}{h_d} \quad (7)$$

dengan Rth_d : Resistansi termal pendidihan di permukaan luar sungkup (m^2K/W)

Penguapan di Permukaan Air

Peristiwa penguapan merupakan peristiwa lepasnya molekul-molekul air di permukaan ketika terdapat perbedaan konsentrasi uap air antara daerah dekat dengan permukaan dan daerah di posisi yang lebih jauh. Dibandingkan dengan pendidihan yang juga merupakan peristiwa perubahan wujud dari air ke uap, penguapan hanya terjadi di permukaan air saja sedangkan pendidihan terjadi di seluruh volume. Karena setiap peristiwa perubahan wujud dari air ke uap selalu membutuhkan kalor yang cukup besar, maka peristiwa penguapan juga akan memberikan koefisien perpindahan kalor yang relatif besar jika dibandingkan dengan konveksi tanpa perubahan fasa [14,15,16]. Kroger and Branfield [16] mengusulkan korelasi seperti diberikan pada persamaan (8).

$$h_u = \frac{0,2106 + 0,0026 \cdot v_a \left(\frac{\rho_{av}^2}{\mu g (\rho_{avi} - \rho_{avom})} \right)^{1/3}}{\left(\frac{\mu}{g c_p \rho_{av} k^2 (\rho_{avi} - \rho_{avom})} \right)^{1/3}} \quad (8)$$

dengan:

h_u : koefisien perpindahan kalor penguapan (W/m^2K)

v_a : kecepatan aliran air (m/detik)

μ : viskositas dinamik air (kg/m.detik)

ρ_{avi} : massa jenis udara lembab awal atau di lingkungan bebas (kg/m^3)

ρ_{avom} : massa jenis udara lembab di permukaan air (kg/m^3)

ρ_{av} : massa jenis udara lembab rata-rata (kg/m^3)

Massa jenis udara lembab di lingkungan bebas ditentukan dari tingkat kelembaban udara, dan bisa dihitung menggunakan persamaan (9).

$$\rho_{avi} = (1 + W_i) \left[1 - \frac{W_i}{W_i + 0,622} \right] \left(\frac{p_a}{287,08 T_a} \right) \quad (9)$$

dengan W_i : ratio antara massa uap air dengan massa udara kering, dengan

$$W_i = 0,622 \frac{p_{vi}}{p_a - p_{vi}} \quad (10)$$

p_a : tekanan udara lingkungan (Pa)

T_a : temperatur udara lingkungan (K)

p_{vi} : tekanan relatif uap di udara lingkungan (Pa), yang dihitung dengan

$$p_{vi} = \Phi \times 2,368745 \times 10^{11} \exp \left(- \frac{5406,1915}{T_a} \right) \quad (11)$$

dengan Φ adalah kelembaban relatif udara

Demikian juga halnya untuk massa jenis udara lembab di permukaan air bisa dihitung menggunakan persamaan (12).

$$\rho_{avom} = (1 + W_o) \left[1 - \frac{W_o}{W_o + 0,622} \right] \left(\frac{p_a}{287,08 T_o} \right) \quad (12)$$

dengan W_o : ratio antara massa uap air dengan massa udara kering, dengan

$$W_o = 0,622 \frac{P_{v_o}}{P_a - P_{v_o}} \quad (13)$$

T_o : temperatur udara di permukaan (K)

p_{v_o} : tekanan relatif uap di permukaan air (Pa), yang bisa dihitung dengan mengambil kelembaban relatif di permukaan air $\Phi=1$.

$$p_{v_o} = 2,368745 \times 10^{11} \exp\left(-\frac{5406,1915}{T_o}\right) \quad (14)$$

Dengan diketahuinya koefisien perpindahan kalor penguapan, maka besar fluks massa yang menguap dapat dihitung dengan persamaan (15)

$$\phi_{mu} = \frac{h_u(T_o - T_a)}{h_{fg}} \quad (15)$$

dan resistansi termal penguapan sebesar

$$Rth_u = \frac{1}{h_u} \quad (16)$$

dengan ϕ_{mu} : fluks massa penguapan ($\text{kg/m}^2\text{detik}$)

Rth_u : resistansi termal penguapan ($^{\circ}\text{C.m}^2/\text{W}$)

Fluks Kalor Yang Dipindahkan

Ketika temperatur lapisan air belum mencapai temperatur saturasi pada tekanan udara luar (100°C), maka fluks kalor yang dipindahkan bersama dengan penguapan tersebut diberikan dalam persamaan (17)

$$q_u = \frac{(T_{in} - T_{ud})}{Rth_T} \quad (17)$$

dengan q_u : fluks kalor yang dipindahkan dari uap di dalam sungkup ke lingkungan (W/m^2)

Rth_T : tahanan termal total terhitung mulai dari uap ke udara ($^{\circ}\text{C.m}^2/\text{W}$), dengan

$$Rth_T = Rth_{in} + Rth_s + Rth_a + Rth_u \quad (18)$$

Jika permukaan sungkup dilapisi cat, maka harus diintroduksi tahanan termal Rth_c dari cat ke dalam persamaan (19), menjadi

$$Rth_T = Rth_{in} + Rth_s + Rth_c + Rth_a + Rth_u \quad (19)$$

Dengan t_c tebal lapisan cat (m) dan k_c konduktivitas termal cat (W/mK), maka $Rth_c = \frac{t_c}{k_c}$.

Distribusi Temperatur

Dengan diketahuinya fluks kalor yang dipindahkan dari uap di dalam sungkup ke udara luar, maka temperatur pada masing-masing lapisan bisa dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

- Temperatur permukaan dalam sungkup:

$$Ts_{in} = T_{in} - Rth_{in} \cdot q_u \quad (20)$$

- Temperatur permukaan luar sungkup:

$$Ts_{out} = Ts_{in} - Rth_s \cdot q_u \quad (21)$$

- Temperatur permukaan luar cat:

$$Tc_{out} = Ts_{out} - Rth_c \cdot q_u \quad (22)$$

- Temperatur permukaan luar lapisan air:

$$Ta_{out} = Tc_{out} - Rth_a \cdot q_u \quad (23)$$

atau

$$Ta_{out} = T_{ud} + Rth_u \cdot q_u \quad (24)$$

Konveksi dan Radiasi di Permukaan Sungkup

Ketika sebagian permukaan sungkup tidak lagi terlapis oleh air pendingin karena telah menguap, maka permukaan sungkup tersebut mengalami kondisi kering sehingga pembuangan kalor ke udara sekitar hanya melalui konveksi alamiah dan radiasi dengan koefisien perpindahan kalor total diberikan oleh persamaan (25).

$$h_T = h_C + h_R \quad (25)$$

dengan h_C : koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m^2K)
 h_R : koefisien perpindahan kalor radiasi (W/m^2K) yang dirumuskan sebagai

$$h_R = \sigma \epsilon (T_p^3 + T_p^2 \cdot T_{ud} + T_p \cdot T_{ud}^2 + T_{ud}^3) \quad (26)$$

dengan σ : konstanta Stefan-Boltzmann = $5,669 \times 10^{-8} W/m^2K^4$
 ϵ : emisivitas permukaan sungkup
 T_p : temperatur permukaan sungkup (K)
 T_{ud} : temperatur udara sekitar (K)

Sedangkan koefisien perpindahan kalor konveksi alamiah merupakan fungsi dari Bilangan Nusselt Nu sesuai persamaan (27).

$$h_C = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (27)$$

dengan k adalah konduktivitas termal udara (W/mK) dan D adalah dimensi karakteristik permukaan (m). Untuk estimasi Nu , Massimo Corcione [17] mengusulkan hubungan pada persamaan (28), yaitu

$$Nu = 1,05 \times Ra^{0,213} \quad (28)$$

dengan Bilangan Rayleigh

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \alpha} \quad (29)$$

dengan β : koefisien ekspansi termal udara ($1/K$)
 $\Delta T = (T_p - T_{ud})$
 ν : viskositas kinematik udara ($m^2/detik$)
 α : difusivitas termal udara ($m^2/detik$)

Khusus untuk sungkup AP1000 yang menggunakan celah udara dan cerobong, Nanang dkk. [18] telah melakukan penelitian secara eksperimental pada model sungkup AP1000 dengan skala 1/40 untuk mendapatkan korelasi pendinginan melalui konveksi alamiah pada celah udara dengan rentang Bilangan Rayleigh $2,09 \times 10^6 < Ra < 1,24 \times 10^{12}$ dalam persamaan (30).

$$Nu = 7,086 \times Ra^{0,1906} \quad (30)$$

Sedangkan untuk permukaan bagian atas sungkup dengan $7,51 \times 10^5 < Ra < 7,08 \times 10^{10}$ direkomendasikan persamaan (31).

$$Nu = 1,308 \times Ra^{0,2527} \quad (31)$$

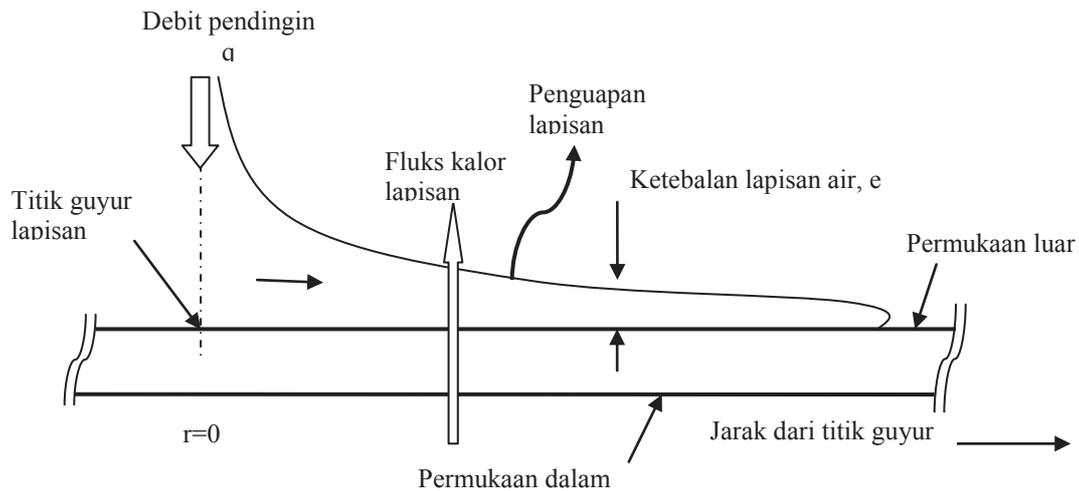
METODOLOGI

Optimasi pendinginan eksternal dilakukan dengan terlebih dahulu menyusun model pendinginan eksternal yang dilanjutkan dengan menyusun program perhitungan menggunakan aplikasi Matlab. Kemudian dilakukan pengujian program dengan cara menerapkannya untuk sungkup AP1000 dan membandingkan hasilnya dengan data desain pendinginan eksternal. Selanjutnya, dilakukan penerapan program pada model sungkup PWR sehingga karakteristik perpindahan kalor dan massa bisa diketahui.

Model sungkup PWR merepresentasikan sungkup bagian dalam saja dari AP1000 tanpa sungkup kedua serta cerobong. Oleh karena itu terdapat perbedaan model konveksi udara di permukaan lapisan air di model sungkup dan di AP1000.

Modelisasi Pendinginan Eksternal

Air pendingin dengan debit tertentu yang diguyurkan pada titik guyur dimodelkan tersebar merata sepanjang permukaan luar sungkup membentuk suatu lapisan tipis seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Modelisasi pendinginan eksternal sungkup

Di permukaan bagian atas sungkup, air akan menyebar secara radial dan diasumsikan merata sehingga ketebalan lapisan akan berkurang. Kecepatan aliran air merupakan fungsi debit aliran dan tebal lapisan yang juga tergantung jarak radial dari titik guyur. Dengan mengkombinasikan hubungan ketebalan dengan kecepatan yang diturunkan dari persamaan Bernoulli ($e = v^2/2g$) dan hubungan kecepatan dengan debit, radius dan ketebalan ($V=q/2\pi re$), maka diperoleh pendekatan nilai kecepatan karakteristik

$$v = \left(\frac{gq}{\pi r}\right)^{1/3} \quad (32)$$

Sehingga estimasi ketebalan karakteristik lapisan menjadi

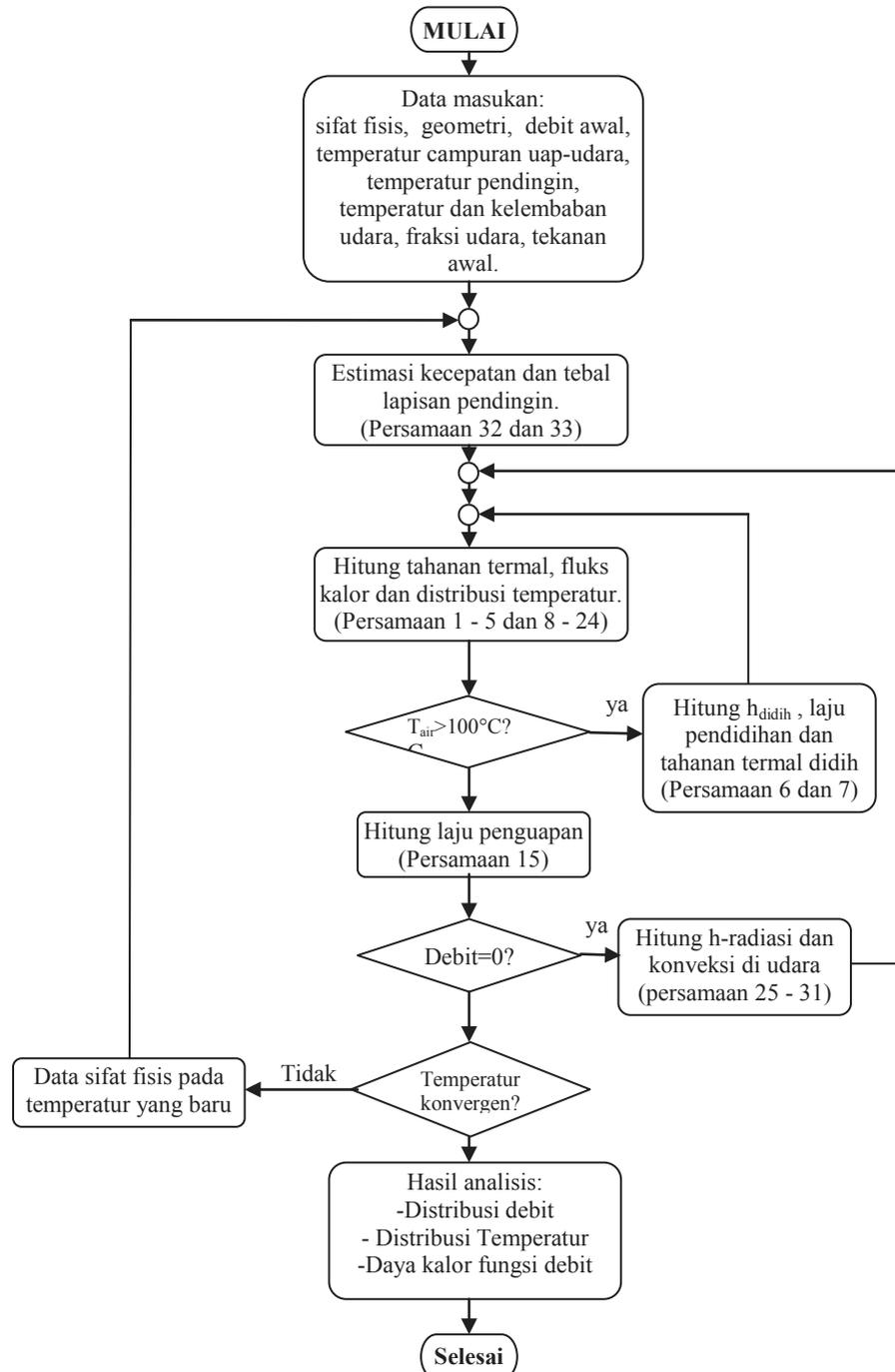
$$e = \frac{1}{2g} \left(\frac{gq}{\pi r}\right)^{2/3} \quad (33)$$

Ketika air pendingin sudah sampai di dinding vertikal sungkup ($r = R$, jari-jari sungkup) lapisan pendingin sudah sedemikian tipis sehingga efek gesekan menjadi dominan. Gaya gesek antara lapisan pendingin dengan dinding ini mampu mengimbangi gaya gravitasi sehingga kecepatan turun pendingin diasumsikan konstan. Dengan asumsi tersebut, maka ketebalan lapisan pendingin hanya dipengaruhi oleh debit aliran yang terus mengalami penurunan akibat penguapan yang terjadi.

Diagram Alir Program Analisis Pendinginan Eksternal

Diagram alir program analisis pendinginan yang disusun dengan bahasa pemrograman Matlab07 diberikan pada Gambar 3. Program diawali dengan data masukan yaitu data geometri dan sifat fisis yang didasarkan pada kondisi temperatur awal. Selanjutnya dilakukan perhitungan kecepatan dan ketebalan lapisan dengan persamaan (31) dan (32), untuk kemudian dilakukan perhitungan temperatur pada setiap lapisan, mulai dari temperatur permukaan dalam sungkup, temperatur permukaan luar, dan temperatur permukaan lapisan air. Jika temperatur air telah mencapai temperatur didihnya (100°C), maka dilakukan perhitungan koefisien perpindahan kalor dan massa pendidihan, dan hasilnya digunakan untuk menghitung ulang distribusi temperatur. Kemudian, dengan adanya penguapan maupun pendidihan, dilakukan perhitungan debit aliran yang jika debit mencapai nol maka

berarti permukaan sungkup tidak terbasahi lagi dan mekanisme perpindahan kalor berlangsung melalui konveksi alamiah dan radiasi di udara. Dengan perbedaan mekanisme tersebut, dilakukan koreksi kembali perhitungan distribusi temperatur. Setiap temperatur baru yang diperoleh dalam setiap iterasi dibandingkan dengan temperatur sebelumnya yang jika belum konvergen, dilakukan koreksi kembali sifat-sifat fisis air sampai dicapai kondisi konvergen untuk kemudian ditampilkan hasil-hasil analisis yang memang diperlukan.



Gambar 3. Diagram alir program analisis pendinginan eksternal

Aplikasi Program Pada Desain Sungkup AP1000

Tujuan diaplikasikannya program pada desain sungkup AP1000 adalah untuk mengevaluasi sejauh mana program analisis ini masih memberikan hasil yang bisa mendekati data desain AP1000. Informasi penting yang tersedia di dokumen control desain yang terkait dengan pendinginan eksternal

ini adalah tersedianya volume air pendingin sejumlah 3000 m³ untuk bisa membuang kalor peluruhan selama 72 jam. Data parameter dari sungkup AP1000 diberikan pada Tabel 1. Temperatur saturasi uap di dalam sungkup diambil nilai sedemikian sehingga tekanan sungkup telah mendekati tekanan desainnya yaitu 5 bars.

Tabel 1. Data Parameter Sungkup AP1000

| No | Parameter | Nilai |
|----|---|-------|
| 1 | Diameter (m) | 39,6 |
| 2 | Tinggi bagian vertikal (m) | 43,0 |
| 3 | Tebal dinding sungkup (mm) | 44,4 |
| 4 | Volume ruang sungkup (m ³) | 55481 |
| 5 | Temperatur lingkungan (°C) | 30 |
| 6 | Temperatur uap dalam sungkup (°C) | 145 |
| 7 | Temperatur air pendingin eksternal (°C) | 30 |
| 8 | Kelembaban relatif udara | 0,75 |
| 9 | Tekanan parsial udara dalam sungkup (bar) | 1 |

Program analisis dijalankan dengan memvariasikan debit pendingin dan menghitung berapa daya kalor yang bisa dibuang / didisipasikan ke lingkungan dipermukaan sungkup melalui mekanisme penguapan pada lapisan tipis pendingin. Hasil analisis kemudian diplot dalam kurva daya kalor sebagai fungsi debit pendingin, sehingga diperoleh suatu nilai debit optimal, yaitu yang bisa memberikan nilai daya kalor maksimal. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan data desain AP1000 yang ada dalam dokumen kontrol desain. Kelayakan program analisis ini dapat dinilai dari kedekatan hasil analisis ini dengan data desain AP1000.

Aplikasi Program Pada Model Sungkup PWR1000.

Selanjutnya, aplikasi program dilakukan pada model sungkup PWR-1000 dengan tujuan untuk mengkarakterisasi kebutuhan debit pendinginan eksternal yang diperlukan. Selain untuk menentukan debit optimal yang diperlukan, program analisis yang telah disusun juga digunakan untuk menginvestigasi sejauh mana pengaruh debit terhadap distribusi temperatur di permukaan sungkup. Pengaruh dari adanya lapisan cat di permukaan sungkup juga akan dievaluasi. Data parameter yang digunakan dalam model sungkup PWR-1000 diberikan pada Tabel 2. Dalam investigasi ini, selain variasi debit juga bisa dilakukan variasi beberapa parameter yang diperlukan untuk menguji pengaruhnya terhadap kemampuan pendinginan sungkup seperti variasi kelembaban, temperatur internal, ketebalan cat pelapis, temperatur saturasi uap maupun temperatur air pendingin. Namun khusus dalam penelitian ini, investigasi lebih difokuskan untuk mengetahui pengaruh debit terhadap kemampuan pendinginan sungkup. Dalam hal ini parameter selain debit ditetapkan sebagai parameter masukan yang konstan.

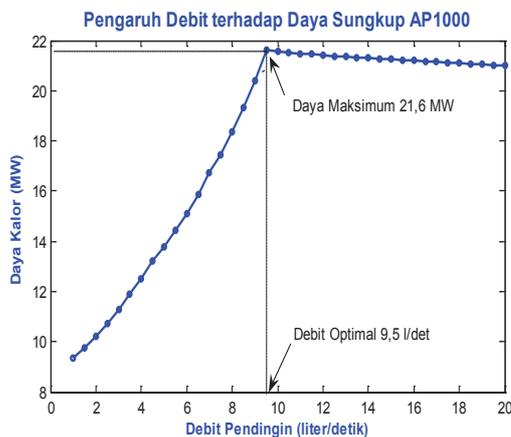
Tabel 2. Data parameter model sungkup PWR-1000

| No | Parameter | Nilai |
|----|---|-------|
| 1 | Diameter (m) | 1 |
| 2 | Tinggi bagian vertikal (m) | 1 |
| 3 | Tebal dinding sungkup (mm) | 4 |
| 4 | Tebal lapisan cat (mm) | 0,1 |
| 5 | Konduktivitas termal cat (W/mK) | 0,5 |
| 6 | Temperatur lingkungan (°C) | 30 |
| 7 | Temperatur uap dalam sungkup (°C) | 145 |
| 8 | Temperatur air pendingin eksternal (°C) | 30 |
| 9 | Kelembaban relatif udara (%) | 75 |
| 10 | Tekanan parsial udara dalam sungkup (bar) | 1 |

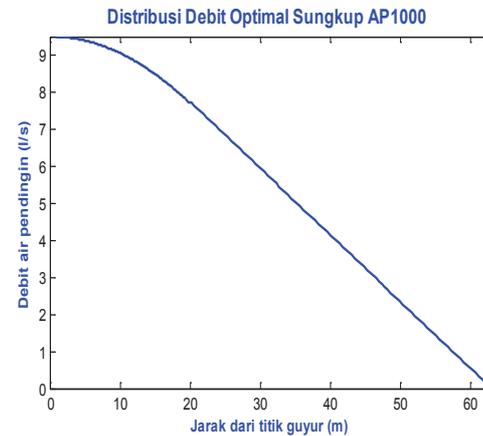
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Aplikasi Program Pada Desain Sungkup AP1000

Dengan memvariasikan debit pendingin yang diguyurkan mulai dari 1 liter/detik sampai dengan 20 liter/detik, dan untuk masing-masing debit dihitung besarnya daya kalor yang mampu dibuang oleh pendinginan eksternal tersebut. Hubungan antara daya sungkup sebagai fungsi debit pendingin ditampilkan melalui Gambar 4.



Gambar 4. Daya sungkup AP1000 vs debit pendingin



Gambar 5. Distribusi debit menjauhi titik guyur pada kondisi optimal

Dari Gambar 4 dapat ditunjukkan bahwa daya kalor yang bisa dibuang oleh sistem pendingin sungkup naik terhadap debit aliran pendingin dan mencapai suatu nilai maksimum (21,6 MW) pada suatu nilai debit tertentu (debit optimal 9,5 liter/detik) yang kemudian menurun secara landai dengan naiknya debit melampaui nilai optimalnya. Hal ini menunjukkan bahwa ketika debit pendingin masih di bawah nilai optimal, debit pendingin tidak mencukupi untuk mampu menjangkau seluruh permukaan sungkup karena telah habis menguap sebelum seluruh permukaan terlingkupi. Bagian yang tidak terlingkupi oleh lapisan air pendingin menjadi kering dengan koefisien perpindahan kalornya yang rendah sehingga daya yang bisa dibuang juga masih rendah. Dengan naiknya debit pendingin, permukaan yang kering berkurang sehingga daya kalor yang bisa dibuang semakin tinggi. Dengan semakin tingginya debit, tebal lapisan pendingin juga meningkat yang akan meningkatkan tahanan termalnya. Jadi naiknya debit pendingin akan menimbulkan dua dampak yang saling berlawanan pengaruhnya terhadap daya kalor total yang bisa dibuang yaitu pertama, akan mengurangi daerah yang tidak terbasahi sehingga akan menaikkan daya kalor yang dibuang, dan ke-dua, akan menambah ketebalan lapisan pendingin sehingga akan mengurangi daya kalor karena tahanan termal meningkat. Kedua dampak yang saling berlawanan tersebut akan memberikan suatu nilai optimal terhadap debit yang mampu membuang daya kalor secara maksimal. Dari penurunan daya yang relatif kecil pada debit di atas nilai optimal menunjukkan bahwa pengaruh dampak pertama jauh lebih dominan dibandingkan dampak yang ke-dua. Hal ini juga bisa ditunjukkan dari kurva pada Gambar 5 yang merupakan kurva penurunan debit akibat penguapan dengan memilih debit optimal (9,5 liter/detik) sebagai debit yang diguyurkan. Terlihat bahwa debit akan menurun sepanjang perjalanan menjauhi titik guyur hingga mencapai nol tepat di ujung dinding sungkup (bagian dinding pembuang kalor terbawah).

Dalam desain AP1000, air yang tersedia untuk pendinginan eksternal adalah sebesar 3000 m³, dan jumlah tersebut didesain mampu untuk membuang kalor peluruhan selama 72 jam, yang berarti besar debit rata-rata yang diguyurkan pada AP1000 adalah sebesar 11,574 liter/detik (dari pembagian 3000 m³/72jam). Walaupun nilai ini melampaui debit optimal yang dianalisis di sini, namun mengingat penurunan daya sangat kecil untuk debit lebih besar dari nilai optimal, maka hasil analisis yang dibuat bisa dianggap sudah mampu memprediksi debit minimal yang diperlukan untuk mendinginkan sungkup AP1000.

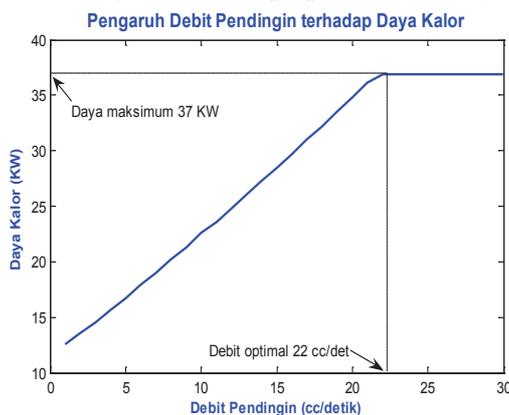
Dari besarnya daya kalor yang bisa dievakuasi oleh pendingin eksternal sungkup yang sebesar lebih dari 20 MW sudah bisa dianggap mampu melampaui nilai kalor peluruhan setelah 1 hari reaktor trip yang besarnya kurang dari 15 MW. Dengan lebih besarnya daya kalor yang bisa dievakuasi ke lingkungan dibandingkan dengan daya kalor yang dibangkitkan, maka penurunan temperatur sungkup diharapkan bisa terjadi.

Hasil Aplikasi Program Pada Model Sungkup PWR1000.

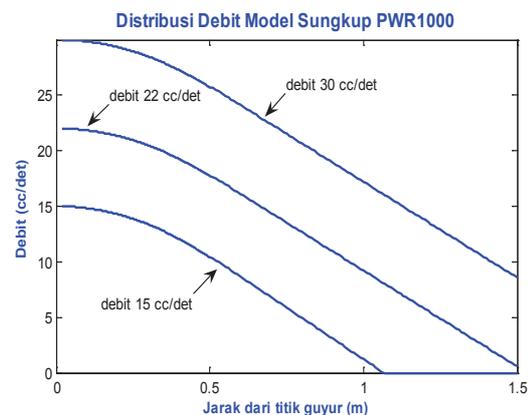
Setelah diperoleh hasil yang bisa sebanding dengan hasil desain AP1000, program analisis diterapkan pada model sungkup PWR1000 dengan data masukan diberikan pada Tabel 2. Sedikit perbedaan dari program adalah pada perhitungan koefisien perpindahan kalor di perkukaan sungkup bagian vertical dengan Bilangan Nusseltz pada AP1000 dihitung dengan persamaan (30) sedangkan pada model sungkup menggunakan persamaan (28). Penggunaan persamaan dengan Bilangan Rayleigh untuk temperatur konstan diambil dengan pertimbangan batasan keselamatan sungkup didasarkan pada batasan tekanan uap yang dalam kondisi jenuh juga merupakan batasan temperatur.

Pengaruh dari debit pendingin terhadap daya kalor yang bisa dievakuasi oleh sungkup diberikan pada Gambar 6. Terlihat bahwa dengan naiknya debit pendingin, daya kalor yang bisa dievakuasi dari sungkup meningkat hampir linier sampai suatu nilai maksimum sebesar 37 KW pada debit sebesar 22 cc/detik. Selanjutnya kenaikan debit tidak lagi mampu menaikkan daya kalor yang bisa dievakuasi dari sungkup, dan cenderung stagnan. Jika hanya dilihat dari luas area permukaan untuk evakuasi kalor, seharusnya besar daya yang bisa dievakuasi dari model sungkup adalah $1/40^2$ kali besar kalor yang bisa dievakuasi dari AP1000 yakni sebesar 13,6 KW (diperoleh dari $21,6 \text{ MW}/40^2$). Hasil analisis menunjukkan besar daya kalor yang bisa dievakuasi yang lebih tinggi, yakni sebesar 37 KW. Hal ini disebabkan resistansi termal pada model sungkup lebih rendah dibandingkan dengan resistansi termal pada AP1000, yaitu karena lebih tipisnya dinding model sungkup dan lebih tipisnya lapisan pendingin sehingga masuk ke rejim pendidihan yang menaikkan koefisien perpindahan kalor. Satu perbedaan lagi dibandingkan dengan penerapan pada AP1000 adalah daya kalor relatif tidak turun ketika debit yang diberikan melebihi nilai optimalnya. Ini berarti pemberian debit pendingin melampaui nilai optimalnya tidak mengurangi besarnya daya kalor yang bisa dievakuasi.

Dengan program yang dibuat juga disimulasikan distribusi debit sepanjang perjalanan dari titik guyur hingga bagian terbawah dari dinding model sungkup untuk 3 macam debit berbeda, yaitu 15 cc/detik, 22 cc/detik dan 30 cc/detik yang merepresentasikan debit di bawah, tepat dan di atas debit optimal. Hasil analisis ditunjukkan pada Gambar 7 dan terlihat bahwa pada kondisi debit optimal yaitu 22 cc/detik, habisnya aliran tepat di ujung terjauh dari titik guyur, sedangkan untuk debit yang lebih kecil, aliran telah habis menguap sebelum ujung terjauh sehingga meninggalkan suatu daerah tak terbasahi dengan koefisien perpindahan kalor yang rendah..



Gambar 6. Daya model sungkup vs debit pendingin



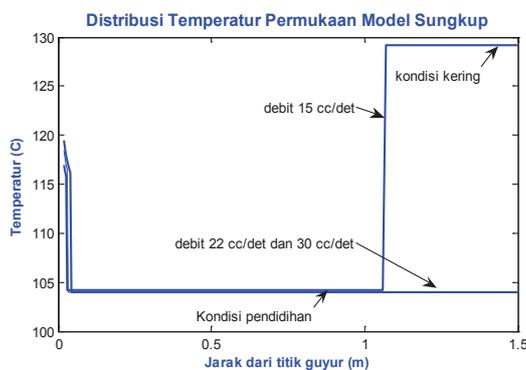
Gambar 7. Distribusi debit model sungkup PWR1000

Untuk debit lebih besar dari debit optimal, air masih tersisa di ujung terjauh, namun kelebihan air pendingin ini tidak lagi mampu menaikkan daya kalor yang bisa dievakuasi karena mekanisme pengambilan kalor dari sungkup didominasi oleh penguapan yang lebih dipengaruhi oleh temperatur

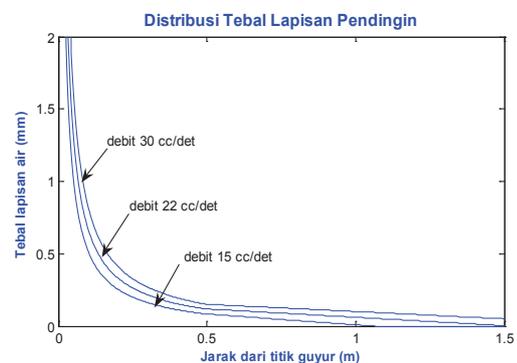
dan luas permukaan air, bukan oleh debit aliran. Profil penurunan debit yang hampir sejajar dari ketiga kurva menunjukkan laju penguapan per satuan luas yang hampir sama karena ketiganya telah memasuki rejim pendidihan sehingga faktor perbedaan ketebalan tidak lagi berpengaruh signifikan terhadap resistansi termalnya

Telah dimasukinya rejim pendidihan seperti telah disebut sebelumnya dapat ditunjukkan dari distribusi temperatur permukaan sungkup pada Gambar 8. Rejim pendidihan dapat ditunjukkan dari temperaturnya yang konstan di permukaan karena temperatur didih air sama yaitu 100°C pada tekanan udara luar 1 atmosfer. Ketika pendidihan terjadi, resistansi termal dari lapisan air bisa dikatakan sangat kecil dan hampir tidak tergantung pada tebal lapisannya. Untuk debit yang lebih kecil dari debit optimal, seperti dalam simulasi ini adalah 15 cc/detik, air pendingin telah habis menguap pada jarak 1 m dari titik guyur sehingga sebagian permukaan sungkup tak terbasahi dengan koefisien perpindahan kalor yang rendah. Hal ini menyebabkan naiknya temperatur permukaan sungkup secara drastis. Selain itu, dengan turunnya koefisien perpindahan kalor di daerah permukaan kering, besar fluks kalor juga turun sehingga daya kalor total yang bisa dievakuasi juga turun.

Pada Gambar 9 ditunjukkan penurunan ketebalan lapisan sepanjang jarak dari titik guyur. Ditunjukkan bahwa di daerah radial, yaitu mulai dari titik guyur di pusat kubah sungkup hingga dinding vertikal, tebal lapisan pendingin menurun secara drastis yang disebabkan oleh naiknya radius dan penguapan. Di daerah vertikal, tidak ada lagi perubahan radius sehingga penurunan ketebalan hanya disebabkan oleh penguapan. Perlu dicermati bahwa analisis ini dibuat dengan tanpa memperhitungkan gaya lekat (adhesi) antara air dan permukaan sungkup yang bisa mengubah pola aliran dari pola yang teratur menjadi pola yang terpecah dalam bentuk butiran. Ada kemungkinan, dengan lapisan yang sangat tipis seperti pada Gambar 9, gaya dorong gravitasi tidak cukup kuat untuk mendorong lapisan air di permukaan sehingga menunggu tercapai ketebalan tertentu terlebih dahulu, sehingga aliran lebih bersifat diskrit dalam bentuk paket-paket massa. Hasil eksperimen pada model sungkup ini akan digunakan untuk memvalidasi dan mengkoreksi analisis yang dibuat ini.



Gambar 8. Distribusi temperature permukaan model sungkup



Gambar 9. Distribusi tebal lapisan pendingin di permukaan sungkup

KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat lebih dipahami karakteristik pendinginan eksternal dari sungkup reaktor PWR melalui mekanisme penguapan dari lapisan air pendingin di permukaan dan pengaruh parameter debit terhadap kemampuan sungkup dalam mengevakuasi kalor. Secara khusus diperoleh suatu nilai debit yang optimal yang mampu mengevakuasi kalor secara maksimal. Penerapan metode analisis pada AP1000 memberikan nilai debit optimal sebesar 9,5 liter/detik yang mampu mengevakuasi daya kalor sebesar 21,6 MW dan pada model sungkup PWR1000 beskala 1/40 diperoleh nilai debit optimal sebesar 22 cc/detik yang mampu mengevakuasi daya kalor sebesar 37 KW. Pemberian debit kurang dari nilai optimal tersebut akan menurunkan kemampuan evakuasi kalor secara signifikan, sedangkan untuk debit melebihi nilai optimal tersebut penurunan kemampuan evakuasi relatif bisa diabaikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada Kepala Bidang Pengembangan Fasilitas Keselamatan Reaktor dan staf yang banyak membantu memberikan data kondisi eksperimen yang akan dilakukan sehingga data analisis yang digunakan dalam penelitian ini masih dalam batas yang mampu direalisasikan dalam eksperimen. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para peneliti bidang konversi energi di ITB dan BATAN Bandung yang telah banyak mempublikasikan hasil-hasil penelitian terkait pendinginan sungkup reaktor AP1000.

DAFTAR PUSTAKA:

1. Hashim Muhammad, Yoshikawa Hidekazu, Matsuoka Takeshi, Yang Ming. Common cause failure analysis of PWR containment spray system by GO-FLOW methodology. *Nuclear Engineering and Design*. 2013; 262: 350–357.
2. YE Cheng. A study of long-term completely passive cooling of the AP1000 reactor. *Proceedings of ICAPP 2013, Jeju Island, Korea; 2013*.p. 14-18.
3. Wang Yan. Preliminary study for the passive containment cooling system analysis of the advanced PWR. *Asian Nuclear Prospects 2012, Energy Procedia* 39; 2013.p. 240 – 247.
4. Andi Sofrany Ekariansyah, Surip Widodo, Susyadi, D.T. Sony Tjahyani, Hendro Tjahjono. Verifikasi kecelakaan hilangnya aliran air umpan pada reaktor daya PWR maju. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. 2012; 14(2): 76-90.
5. Hendro Tjahjono, Susyadi. Giarno, Adhi Rahardian. Pemodelan sungkup PWR untuk eksperimen dinamika pembebanan dan kondensasi. *Laporan Teknis PTRKN-BATAN; 2010*.
6. Westinghouse Inc. Design of Structures, Components, Equipment and Systems”, AP1000 Design Control Document, Revision 18; 2011.
7. A.D. Pasek, E. Umar, A. Suwono and R.E. Manalu. Experimental study on the heat transfer characteristics of a nuclear reactor containment wall cooled by gravitationally falling water. Presented at International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering 2011, Bali, Indonesia; 2011.
8. A. D. Pasek, E. Umar, A. Suwono and D. Anggraini. Numerical analysis of natural convection air cooling on containment of AP-1000 reactor model. *Proceedings of 5th International Conference on Cooling and Heating Technologies, Bandung; 2010*.
9. A.D. Pasek, D. Hidayanti, N.P. Tandian, E. Umar and A. Suwono. Numerical study on the characteristics of the AP1000 passive containment cooling system by the laminar subcooled falling water film. *Proceedings of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion, Tongyeong, Korea; 2009*.
10. Incropera & De Witt. *Fundamental of heat and mass transfer*. John Wiley & Son, 4th edition, 1996.
11. J.P. Holman, “Heat Transfer, SI Metric Edition”, McGraw-Hill Book Company; 1986.
12. Caruso G. - Naviglio A. The influence of noncondensable gases on condensation inside tubes: An experimental analysis. Technical Report of Project Contract No. FI4S CT-96-0042 supported by the MURST and EU; 1996.
13. B.Manikandaprabu, S.Mohankumar & R.Kathiravan. “Pool Boiling Of Water Over A Stainless Steel Flat Plate Heater”, *International Journal of Instrumentation, Control and Automation (IJICA)* ISSN: 2231-1890, Vol-1 Iss-3,4, 2012.
14. Chokri Debbissi Hfaiedh, Abdelaziz Nasr*, Sassi Ben Nasrallah. Evaporation of a binary liquid film flowing down the wall of two vertical plates. *International Journal of Thermal Sciences*. 2013; 72: 34-46.

15. Satish G. Kandlikar, Wai Keat Kuan, Abhijit Mukherjee. Experimental study of heat transfer in an evaporating meniscus on a moving heated surface. *Transactions of the ASME*, Vol. 127; 2005.
16. D.G.Kroger dan G.R.Branfield. Evaporation from a water surface. *R&D Journal of South African Institution of Mechanical Engineering* . 2007; 23.
17. Massimo Corcione. Heat transfer correlations for free convection from upward-facing horizontal rectangular surfaces. *Wseas Transactions On Heat And Mass Transfer*, Manuscript received Jun. 23, 2007; revised; 2007.
18. Nanang Triagung Edi Hermawan¹, Ari Darmawan Pasek, dan Efrizon Umar. Karakteristik perpindahan panas pada pendinginan model sungkup reaktor AP1000 dengan udara yang bersirkulasi alamiah. *LIPI Press 2011 Teknologi Indonesia*; 2011.