

ANALISIS TRANSIEN PARAMETER TERMAL DROPLET DALAM MENARA PENDINGIN PLTN

Hendro Tjahjono

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir BATAN
Kawasan Puspipetek gedung 80, Tangerang-15310
Email: hendro@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS TRANSIEN PARAMETER TERMAL DROPLET DALAM MENARA PENDINGIN PLTN. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang menggunakan air sungai sebagai pendingin kondensor, pada umumnya masih memerlukan menara pendingin untuk mengurangi penggunaan air sungai secara berlebihan yang bisa mengganggu ekosistem di dalamnya. Di dalam menara pendingin, air hangat dari kondensor dijatuhkan dalam bentuk butiran/droplet dari ketinggian tertentu sehingga terjadi pendinginan di udara. Proses perpindahan kalor dari droplet ke udara menjadi faktor utama yang menentukan dalam disain suatu menara pendingin dan sekaligus berpengaruh signifikan terhadap efisiensi PLTN. Ada dua jenis perpindahan kalor pada menara pendingin, yaitu melalui penguapan (kalor laten) dan perbedaan temperatur dengan udara (kalor sensibel). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui secara kuantitatif, pengaruh dari ukuran droplet dan tinggi jatuhnya terhadap transien fluks kalor dan profil temperatur dalam droplet sebagai fungsi waktu selama jatuh.. Analisis dilakukan dengan menyusun perhitungan numerik menggunakan metode beda hingga dengan skema eksplisit untuk memecahkan persamaan konduksi dalam koordinat bola. Temperatur udara inlet diasumsikan konstan sebesar 30°C dan perpindahan kalor sensibel berlangsung secara konveksi yang merupakan fungsi kecepatan jatuh dan radiasi sebagai fungsi temperatur. Sebagai variabel dalam analisis ini adalah diameter droplet dan ketinggian jatuh. Hasil analisis menunjukkan bahwa efektivitas perpindahan kalor akan semakin tinggi dengan semakin kecilnya droplet dan semakin tingginya posisi jatuh. Dari hasil analisis diperoleh transien temperatur sebagai fungsi waktu dan juga fungsi radius untuk berbagai tinggi jatuh dan diameter droplet. Analisis untuk PLTN 1000 MW dengan tinggi jatuh 20 m dan diameter droplet 2 mm memberikan temperatur rata-rata droplet yang dihasilkan di saat jatuh sebesar 31,6°C untuk temperatur awal 40°C dan debit pendingin yang diperlukan mencapai 58,3 m³/detik.

Kata kunci: menara pendingin, PLTN, efektivitas perpindahan kalor, droplet.

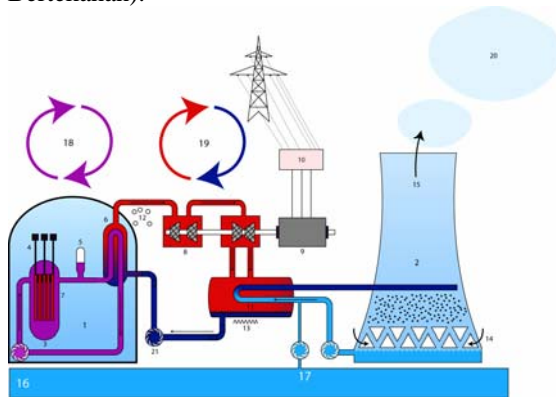
ABSTRACT

THERMAL PARAMETER TRANSIENT ANALYSIS OF DROPLETS IN NUCLEAR POWER PLANT COOLING TOWER. In Nuclear Power Plant using fresh water from river as condenser cooling, a cooling tower still used for decreasing the amount of fresh water used so that could reduce the negative impact to the environment. Inside a cooling tower, warm water coming from condenser drops from a certain level of height in a form of droplet and being cooled by the air. The heat transfer between droplets and the air determines significantly the effectiveness of cooling tower. The heat transfer process involves latent heat transfer owing to vaporization of small portion of water and sensible heat transfer owing to difference in temperature of water and air. The objective of this research is to determine the influence of droplets size and its fall height to temperature transient during the fall. The analysis is performed explicitly using finite difference method in spherical coordinate to resolve the transient conduction equation. The air temperature is supposed constant as 30°C and the sensible heat transfer is performed by convection and radiation. As independent variable in this analysis are droplets size and fall height. The result shows that the heat transfer effectiveness is higher as droplet size is small and fall height is high. For NPP of 1000 MWe, with the fall height of 20 m and the droplet diameter of 2 mm, the final average temperature of droplets is 31.6°C for 40°C initially and the volume rate of cooling water is 58.3 m³/s.

Keywords: cooling tower, NPP, heat transfer effectiveness, droplets.

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan jenis pembangkit termal yang mengkonversi energi kalor dari hasil reaksi fisi di teras reaktor menjadi energi kerja mekanik di turbin yang kemudian dikonversi menjadi energi kerja elektrik di generator. Sesuai dengan prinsip Carnot [1] yang mengemukakan siklus ideal konversi kalor menjadi kerja, tidak mungkin konversi tersebut berlangsung dengan efisiensi termodinamik mencapai 100% sehingga akan selalu terdapat sejumlah kalor yang harus di buang ke lingkungan, yaitu ke air (laut atau sungai) atau ke udara atmosfer oleh suatu sistem pembuang kalor akhir atau Ultimate Heat Sink. Menurut IAEA Safety Series No. 50-SG-D6 [2] ada 9 cara pembuangan kalor akhir yang salah satu diantaranya adalah dengan menggunakan menara pendingin basah yang dilengkapi dengan fasilitas pemasok air pengganti (*make-up facility*). Cara ini umumnya diterapkan pada PLTN yang menggunakan air sungai sebagai pendingin kondensor. Dengan cara ini penggunaan air sungai secara berlebihan yang bisa mengganggu ekosistem di dalamnya dapat dikurangi. Gambar 1 memperlihatkan skema lengkap proses perpindahan kalor mulai dari teras reaktor hingga menara pendingin dari suatu PLTN jenis PWR (Pressurized Water Reactor atau Reaktor Air Bertekanan).



Gambar 1. Proses perpindahan kalor pada PWR

Dengan adanya menara pendingin tersebut, penggunaan air sungai hanya untuk menggantikan air yang ikut menguap atau terseret ke udara yang tidak lebih dari 5% debit air pendingin kondensator. Di dalam menara pendingin, air hangat dari kondensator dijatuhkan dalam bentuk butiran/droplet dari ketinggian tertentu sehingga terjadi pendinginan di udara. Ada dua mekanisme perpindahan kalor dalam proses pendinginan ini yaitu, perpindahan kalor laten melalui penguapan sebagian kecil air dan perpindahan kalor sensibel

yang disebabkan perbedaan temperatur antara permukaan droplet dan udara. Dari literatur [3], perpindahan kalor laten memegang peran yang dominan yaitu sekitar 80% dari total kalor yang dipindahkan. Air yang telah mendingin ditampung pada kolam penampung dan disirkulasikan kembali ke kondensator. Proses perpindahan kalor dari droplet ke udara menjadi faktor utama yang menentukan dalam disain suatu menara pendingin dan sekaligus berpengaruh signifikan terhadap efisiensi PLTN. Semakin efektif perpindahan kalor pada droplet, semakin dingin air yang digunakan untuk pendingin kondensator sehingga temperatur kondensasi uap bisa semakin rendah yang menaikkan efisiensi termodinamik PLTN. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui secara kuantitatif, pengaruh dari ukuran droplet dan tinggi jatuhnya terhadap transien fluks kalor dan profil temperatur dalam droplet sebagai fungsi waktu selama jatuh. Dengan mengetahui parameter termal tersebut dapat dilakukan estimasi ketinggian jatuh dan ukuran droplet yang optimal sehingga debit pendingin kondensator yang diperlukan dapat ditentukan. Penelitian seperti ini tentu saja telah dilakukan oleh negara pembuat PLTN untuk dijadikan dasar dalam disain menara pendingin, tetapi data detilnya tidak mudah diperoleh.

Metode yang digunakan adalah dengan memecahkan persamaan konduksi pada koordinat silinder sebagai fungsi waktu dan ruang dalam arah radial. Pemecahan dilakukan secara numerik menggunakan metode beda hingga dengan skema eksplisit yang disusun dalam suatu paket program berbasis Matlab.

2. TEORI

Efisiensi termodinamik dari suatu siklus Rankine atau siklus uap yang diterapkan pada PLTN tipe PWR didefinisikan sebagai perbandingan antara daya mekanik efektif yang dihasilkan dengan daya kalor yang diserap dari hasil reaksi fisi dan diteruskan ke pembangkit uap. Daya mekanik efektif yang dihasilkan merupakan selisih antara daya yang dihasilkan turbin dengan daya yang digunakan untuk menggerakkan pompa, khususnya pompa sekunder. Dari daya mekanik yang dihasilkan turbin dikonversi menjadi daya elektrik pada generator. Efisiensi dari konversi energi kalor ke elektrik merupakan perbandingan antara daya listrik yang dihasilkan generator dengan daya kalor pada reaktor. Besar efisiensi konversi energi ini berkisar 33% atau hanya sepertiga daya kalor reaktor yang dikonversi menjadi daya listrik. Sedang dua pertiga sisanya masih dalam bentuk kalor yang harus dibuang ke lingkungan atau

sebagian dimanfaatkan untuk proses desalinasi air laut atau proses-proses lain yang membutuhkan energi termal. Besar efisiensi termodinamik ditentukan oleh perbandingan antara temperatur panas dalam siklus dengan temperatur dinginnya (dalam derajat Kelvin). Semakin besar perbandingan tersebut semakin tinggi efisiensi siklusnya sehingga semakin besar pula daya listrik yang dihasilkan untuk daya kalor yang sama. Temperatur panas dibatasi oleh batas kemampuan material reaktor terhadap temperatur. Sedangkan temperatur dingin ditentukan oleh temperatur pendingin pada kondensor serta efektifitas kondensornya. Pada PLTN yang menggunakan air laut sebagai pendingin kondensor, temperatur dinginnya sama dengan temperatur air laut tersebut. Sedang pada PLTN yang menggunakan air sungai sebagai pendingin, karena keterbatasan debit sungai yang bisa digunakan, pada umumnya masih membutuhkan pendingin tambahan untuk mensirkulasikan kembali air sungai yang telah didinginkan tersebut ke kondensor. Dengan cara ini, penggunaan air sungai hanya diperlukan sebagai pengganti air yang hilang. Pendingin tambahan yang umumnya digunakan berupa menara pendingin dengan udara pendingin mengalir secara paksa maupun alamiah.

Di dalam menara pendingin, air dari kondensor yang akan didinginkan dijatuhkan dari suatu ketinggian tertentu dalam bentuk butiran-butiran kecil yang disebut droplet. Efektifitas dari menara pendingin ditentukan oleh efektifitas perpindahan kalor dari droplet ke udara. Semakin kecil ukuran droplet dan semakin lama waktu kontak dengan udara, semakin efektif pendinginan droplet. Namun, dengan semakin kecilnya ukuran droplet, kemungkinan terseret oleh aliran udara ke atas juga lebih besar dan hal ini juga tidak dikehendaki. Ada dua mekanisme perpindahan kalor dari droplet, yaitu melalui penguapan (kalor laten) dan karena perbedaan temperatur permukaan droplet dengan udara (kalor sensibel). Mekanisme penguapan merupakan proses yang tergantung dari banyak parameter seperti temperatur dan kelembaban udara, kecepatan aliran udara, tinggi jatuh, dan parameter lain yang tergantung pada geometri dari menara pendingin. Penelitian ini membatasi untuk tidak membahas dimensi maupun bentuk dari menara pendingin tersebut tetapi hanya mengambil kesimpulan-kesimpulan penting dari literatur yang berkaitan dengan karakteristik penguapan dalam menara pendingin untuk PLTN. Jenis menara pendingin dipilih terutama jenis cerobong hiperbolik yang mengalirkan udara secara alamiah berdasarkan efek cerobong. Jenis ini yang paling banyak digunakan di PWR. Tinggi menara bisa mencapai 200 m dengan diameter

bagian bawah mencapai 100 m. Air hangat dari kondensor dikucurkan dari suatu ketinggian tertentu yang dianggap mencukupi dan tidak terlalu tinggi untuk mengurangi beban pompa yang dibutuhkan. Dari literatur [3] dikatakan bahwa besarnya perpindahan kalor laten kurang lebih 4 kali lipat dari besar perpindahan kalor sensibel. Kecepatan aliran udara dalam menara jenis ini berkisar antara 1,2 s/d 1,8 m/s. Dengan demikian bisa dikatakan bahwa perpindahan kalor keseluruhan berkisar 5 kali lipat dari perpindahan kalor sensibel. Dari literatur juga dikatakan bahwa rasio penguapan tidak lebih dari 2% dari volume droplet sehingga diameter droplet dalam analisis ini bisa diasumsikan konstan.

Perpindahan kalor sensibel bisa berlangsung secara konveksi maupun radiasi. Yang terakhir ini relatif kecil karena temperatur droplet dan perbedaan temperatur dengan udara yang relatif kecil. Koefisien perpindahan kalor sensibel (h_s) dapat dirumuskan sebagai gabungan dari konveksi alam (h_{KA}), konveksi paksa (h_{KP}) dan radiasi (h_R) sebagai berikut:

$$h_s = h_{KA} + h_{KP} + h_R \quad (1)$$

Untuk konveksi alam pada bola, dihitung dengan formula empiris yang diusulkan Yuge [4]:

$$h_{KA} = \frac{k}{D} (2 + 0,43.Ra^{1/4}) \quad (2)$$

dengan k konduktivitas termal udara ($W/m^{\circ}C$), D diameter droplet (m) dan Ra bilangan Rayleigh

$$Ra = \frac{g\beta(T_p - T_{ud})D^3}{\nu\alpha} \quad (3)$$

dengan g percepatan gravitasi (m/s^2), β koefisien ekspansi termal udara (K^{-1}), ν viskositas kinematik udara (m^2/s), α difusivitas termal udara (m^2/s), T_p temperatur rata-rata permukaan droplet ($^{\circ}C$) dan T_{ud} temperatur udara ($^{\circ}C$).

Untuk konveksi paksa pada bola, dapat dihitung dari persamaan Mc.Adam [4]

$$h_{KP} = \frac{k}{D} (0,37.Re^{0,6}) \quad (4)$$

dengan bilangan Reynold sebagai fungsi kecepatan droplet jatuh V (m/s) adalah

$$Re = \frac{V.D}{\nu} \quad (5)$$

Sedangkan h_R merupakan koefisien perpindahan kalor yang dihitung dari ekuivalensi fluks radiasi terhadap fluks konveksi yang dirumuskan sebagai berikut:

$$h_R = \varepsilon\sigma(T_p^3 + T_p^2 T_{ud} + T_p T_{ud}^2 + T_{ud}^3) \quad (6)$$

dengan ε koefisien emisi dan σ konstantan Stefan-Boltzmann ($5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

Dari ketiga koefisien perpindahan kalor tersebut, hanya konveksi paksa yang dianggap bergantung pada kecepatan jatuh sehingga nilainya berbeda sepanjang perjalanan jatuh. Dengan mengetahui nilai h_s , nilai koefisien perpindahan kalor total (h_T) yang menggabungkan kalor laten dan kalor sensibel didekati dengan hubungan

$$h_T = 5.h_s \quad (7)$$

Mekanisme perpindahan kalor di dalam droplet sebagai fungsi waktu dan ruang dalam arah radial (r) mengikuti persamaan konduksi kalor berikut [4,5]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2}(rT) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

Pemecahan persamaan konduksi tersebut dilakukan dengan metode numerik beda hingga dalam skema eksplisit. Kondisi awal yang diambil adalah temperatur homogen di seluruh droplet sebesar temperatur air ketika keluar dari kondensor. Sedangkan kondisi batas permukaan berlaku kondisi batas Neuman:

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = -h_T(T_p - T_{ud}) \quad (9)$$

dengan k konduktivitas termal droplet ($\text{W/m}^\circ\text{C}$), T_p temperatur permukaan droplet ($^\circ\text{C}$) dan T_{ud} temperatur udara ($^\circ\text{C}$). Pemilihan interval waktu dt dan lebar segmen ruang dr dipilih sedemikian sehingga kriteria kestabilan perhitungan untuk satu dimensi dapat dipenuhi yaitu [6]:

$$Fo(Bi + 1) \leq 0,5 \quad (10)$$

dengan Fo bilangan Fourier

$$Fo = \frac{\alpha dt}{dr^2}$$

dan Bi adalah bilangan Biot

$$Bi = \frac{h_T dr}{k}$$

Sehingga kriteria untuk pemilihan step waktu menjadi

$$dt \leq 0,5 \frac{dr^2}{\alpha(Bi + 1)} \quad (11)$$

3. TATAKERJA

Sebagai data analisis dalam hal ini adalah PLTN PWR berdaya elektrik 1000 MWe dengan efisiensi konversi 33% [7,8]. Sebagai variabel dalam analisis ini adalah diameter droplet dan tinggi jatuh. Diameter droplet yang ditinjau adalah 1,5 mm, 2 mm, 3 mm dan 4 mm, sedangkan tinggi jatuh dimulai dari 5m, 10 m, 15 m dan 20 m. Kecepatan aliran udara ke atas ditetapkan sebesar 1,5 m/s yang merupakan rata-rata kecepatan udara pada menara pendingin PLTN. Dengan kecepatan udara tersebut, hambatan jatuhnya droplet diperhitungkan dan hasilnya dimasukkan sebagai koreksi terhadap nilai percepatan gravitasi.

Analisis diawali dengan memperkirakan waktu jatuh droplet untuk kemudian dijadikan batas waktu perhitungan. Waktu jatuh droplet (t_j) dirumuskan sebagai:

$$t_j = \sqrt{\frac{2H}{g_e}} \quad (11)$$

dengan H tinggi jatuh (m) dan g_e percepatan gravitasi ekuivalen (m/s^2).

Dalam arah radial, droplet dibagi dalam 10 segmen dengan lebar yang sama. Selama waktu jatuh juga dibagi dalam interval waktu tertentu yang memperhitungkan kriteria kestabilan sesuai persamaan (11).

Setelah transien temperatur dihitung, termasuk juga profilnya dalam arah radial, nilai temperatur rata-rata pada saat jatuh juga dihitung. Demikian juga, besarnya energi kalor yang dikeluarkan oleh setiap droplet dapat ditentukan dengan cara mengintegrasikan terhadap waktu daya kalor yang dikeluarkan droplet selama jatuh, yaitu:

$$Q_d = \int_0^{t_j} A.h_T(T_p - T_{ud})dt \quad (12)$$

dengan A luas permukaan droplet (m^2).

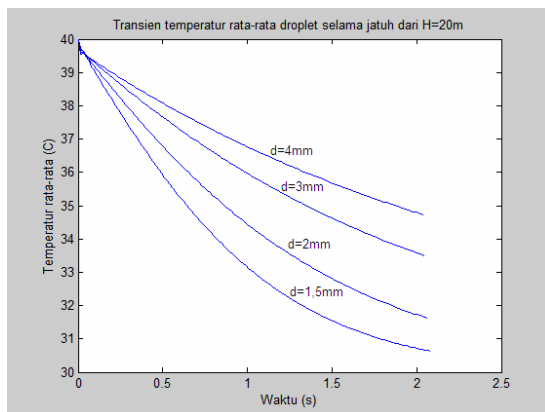
Dari besar energi yang dikeluarkan oleh setiap droplet tersebut dapat dihitung jumlah droplet per satuan waktu yang diperlukan untuk membuang daya kalor PLTN yang besarnya sekitar dua kali daya listriknya. Dengan demikian, debit pendingin yang diperlukan dapat diestimasi, yaitu merupakan perkalian antara jumlah droplet per satuan waktu dengan volume droplet.

Perhitungan dilakukan dengan menyusun program menggunakan perangkat lunak aplikasi Matlab [9].

Hasil analisis kemudian ditampilkan dalam bentuk kurva-kurva yang menggambarkan transien temperatur dan juga profil radialnya.

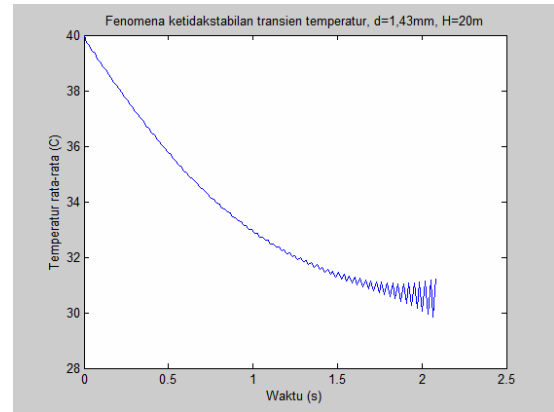
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Transien temperatur rata-rata droplet selama jatuh sebagai fungsi waktu dan diameter droplet untuk ketinggian jatuh sebesar 20 m diberikan pada Gambar 2. Terlihat bahwa semakin kecil ukuran droplet, temperaturnya menjadi semakin cepat menurun yang menunjukkan semakin efektifnya perpindahan kalor, baik sensibel maupun laten karena dengan semakin kecilnya droplet, luas permukaan kontak total akan semakin besar. Selain itu, waktu kontak dengan udara juga semakin lama karena naiknya hambatan karena dorongan aliran udara untuk gaya berat yang tetap.



Gambar 2. Transien temperatur rata-rata droplet selama jatuh untuk H=20 m

Pada Gambar 3 diberikan contoh bagaimana ketidakstabilan perhitungan mulai muncul ketika pemilihan step waktu tidak cukup kecil selama jatuhnya droplet. Di saat awal kestabilan dengan step waktu tertentu masih bisa dipenuhi karena bilangan Biot masih relatif kecil dengan kecepatan jatuh yang masih rendah (h_T rendah). Dengan naiknya kecepatan jatuh, bilangan Biot membesar dan kriteria kestabilan tidak lagi terpenuhi sehingga fluktuasi temperatur terjadi.

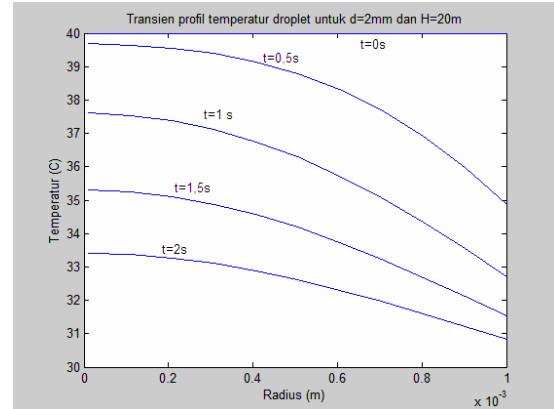


Gambar 3. Fluktuasi temperatur droplet pada d=1,43 mm dan H=20 m

Untuk mengatasi hal itu, step waktu minimal yang digunakan dipilih nilai terendah, yaitu pada kecepatan droplet tertinggi dengan menghitung terlebih dahulu kecepatan tersebut, yaitu kecepatan pada posisi droplet terendah.

Gambar 4 menunjukkan profil radial temperatur droplet selama jatuh sebagai fungsi waktu.

Terlihat dari profil tersebut suatu keteraturan proses penurunan temperatur sebagai fungsi waktu dengan titik tengah droplet merupakan titik maksimumnya.



Gambar 4. Transien profil radial temperatur droplet untuk d=2 mm dan H=20 m

Walaupun tidak diperlihatkan dalam gambar-gambar di atas, perhitungan untuk ketinggian 5 m, 10 m dan 15 m juga dilakukan dan hasilnya berimpit dengan kurva yang diperoleh pada Gambar 2 dengan waktu jatuh yang semakin pendek. Hal ini berarti, dengan semakin rendahnya tinggi jatuh droplet, temperatur akhir yang diperoleh semakin tinggi dan juga berarti debit yang diperlukan semakin besar untuk mengambil kalor yang sama di kondensor.

Dari hasil perhitungan debit dan temperatur akhir untuk ketinggian jatuh 20 m dan temperatur awal 40°C dengan berbagai ukuran droplet diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengaruh ukuran droplet terhadap debit dan temperatur akhir untuk H=20 m

Diameter (mm)	Debit (m ³ /s)	T-akhir (°C)
1,5	48,5	30,63
2	58,3	31,62
3	83,4	33,48
4	113,5	34,74

Sebagai pembanding, jika dihitung dari sisi kondensor, untuk menyerap kalor sebesar 2000 MWth dengan perbedaan temperatur sebesar (40-30,63) atau 9,37°C diperlukan debit pendingin sebesar $q_v = P / (\rho \cdot c_p \cdot \Delta T)$, atau

$$q_v = \frac{10^9}{(1000)(4180)(9,37)} = 51,63 \text{ m}^3 / \text{det}$$

sehingga masih berada dalam orde yang sesuai untuk diameter droplet antara 1,5 – 2 mm.

Beberapa hal yang masih perlu dikembangkan dalam analisis ini adalah yang terkait dengan karakteristik disain menara pendinginnya yang memang belum diperhitungkan secara detil dalam analisis ini. Beberapa besaran yang terkait dengan karakteristik menara pendingin seperti orde besarnya penguapan dan kecepatan udara yang diambil dalam analisis ini hanyalah orde besaran rata-rata saja sehingga masih perlu dikembangkan lebih detil dalam analisis lebih lanjut.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam disain menara pendingin, efektivitas perpindahan kalor sangat dipengaruhi oleh ukuran droplet dan tinggi jatuh. Semakin tinggi posisi jatuh dan semakin kecil ukuran droplet, maka semakin efektif perpindahan kalornya. Untuk diameter droplet 2 mm dengan tinggi jatuh 20 m diperoleh temperatur rata-rata 31,6 °C dan debit pendingin sebesar 58,3 m³/s.

Walaupun ditinjau dari efektivitas perpindahan kalor lebih baik, namun pemilihan ukuran droplet yang semakin kecil dan tinggi jatuh yang semakin tinggi juga berdampak pada semakin besarnya air pengganti yang harus disediakan dan juga semakin besarnya daya pompa yang diperlukan untuk menaikkan air ke tempat yang lebih tinggi. Kedua dampak tersebut belum diperhitungkan dalam analisis ini. Selain itu, adanya fluktuasi temperatur pada ukuran

droplet yang terlalu kecil juga perlu dipertimbangkan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. William C. Reynolds dan Henry C. Perkins, "Termodinamika Teknik", penerbit Erlangga, diterjemahkan oleh Filino Harahap, 1991.
- [2]. IAEA, "Ultimate Heat Sink and Directly Associated Heat Transport Systems for Nuclear Power Plants", Safety Series No.50-SG-D6, 1981.
- [3]. Robert H. Perry & Don Green, "Perry's Chemical Engineers Handbook", sixth edition, McGraw-Hill Int. Editions, 1987.
- [4]. Holmann, J.P., "Heat Transfer", SI Metric Edition, McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [5]. Frank P. Incropera dan David P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", fourth edition, Wiley & Sons, 1996.
- [6]. T. BASARUDDIN, "Metoda Beda Hingga", Penerbit PT. Elex Media Komputindo, kerjasama Gramedia dan Pusat Antar Universitas Ilmu Komputer Universitas Indonesia, 1994.
- [7]. Samuel Glasstone dan Alexander Sesonske, "Nuclear Reactor Engineering" VRN Company, 1981.
- [8]. Maurice Gauthron, "Introduction au Genie Nucleaire", INSTN, CEA, Paris, 1986.
- [9]. DUANE HANSELMAN dan BRUCE LITTLEFIELD, "Mastering MATLAB 5, a comprehensive tutorial and reference", Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey, 1998.

TANYA JAWAB