

ANALISIS PENDINGINAN SIRKULASI ALAM PADA TERAS DAN KOLAM PENYIMPANAN BAHAN BAKAR BEKAS PWR-1000

Muh. Darwis Isnaini dan M. Subekti

PTRKN – BATAN, Kawasan Puspiptek Gd.80 Serpong, Tangerang, 15310.

Email : darwis@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS PENDINGINAN SIRKULASI ALAM PADA TERAS DAN KOLAM PENYIMPANAN BAHAN BAKAR BEKAS PWR-1000. Telah dilakukan suatu analisis termohidrolika sirkulasi alam kondisi tunak pada teras dan kolam penyimpanan sementara bahan bakar PLTN PWR-1000. Dengan merujuk pada kecelakaan Fukushima, maka suatu analisis perlu dilakukan untuk mengetahui kemampuan pendinginan sirkulasi alam kondisi steady state teras PWR-1000 setelah beroperasi 1 tahun dan shutdown dalam waktu 0,1 detik. Analisis dilakukan dengan tahapan menghitung panas sisa dari perangkat bahan bakar, dan menghitung distribusi suhu pendingin dan bahan bakar dengan kode COBRA-EN. Selain itu, analisis ini juga untuk mengetahui kemampuan pendinginan sirkulasi alam kondisi steady state pada kolam penyimpanan bahan bakar bekas setelah bahan bakar digunakan dalam operasi reaktor selama 1 tahun dan shutdown selama 10 hari, dilakukan dengan kode COOLOD-N2. Hasil perhitungan pada pendingin sirkulasi alam tekanan tinggi 15 MPa pada kanal teras menunjukkan bahwa panas rerata peluruhan setelah shutdown 0,1 detik masih sebesar 236,28 MW. Peluruhan panas dengan pendinginan sirkulasi alam menghasilkan suhu saturasi pendingin 342,82°C, suhu keluaran pendingin sebesar 342,82°C, suhu maksimum kelongsong 343,65°C dan suhu maksimum meat di tengah bahan bakar sebesar 375,45°C. Selanjutnya telah terjadi pendidihan sepanjang bahan bakar 1,39 m atau 38,1% ujung bagian atas rod bahan bakar. Adapun hasil perhitungan pada pendinginan sirkulasi alam pada kolam penyimpanan bahan bakar setelah bahan bakar digunakan dalam operasi reaktor selama 1 tahun dan shutdown selama 10 hari, menunjukkan bahwa panas peluruhan sebesar 8,36 MW tidak mampu didinginkan dengan pendinginan sirkulasi alam, dan terjadi pendidihan sepanjang 75 – 80% panjang rod bahan bakar. Kedua hasil analisis tersebut merekomendasikan bahwa setelah reaktor shutdown maka pendinginan perangkat bahan bakar di dalam teras maupun di dalam kolam penyimpanan sementara bahan bakar harus dilakukan secara konveksi paksa untuk menghindari terjadinya pendidihan

Kata kunci: Sirkulasi alam teras, COBRA-EN, kolam penyimpanan bahan bakar, COOLOD-N2, PWR-1000.

ABSTRACT

NATURAL CIRCULATION COOLING ANALYSIS IN PWR-1000'S CORE AND SPENT FUEL STORAGE. The analysis of natural circulation cooling in PWR-1000's core and spent fuel storage was done. Referring to Fukushima accident, an analysis is required for knowing the capability of natural circulation cooling in steady state condition of PWR-1000 core after operated 1 year and shutdown in 0.1 second. The analysis was done using step calculate the decay heat from fuel assemblies, and calculate the meat and coolant temperature distribution using COBRA-EN code. Furthermore, the analys is also for knowing the capability of natural circulation in steady state condition of fuel storage after fuel has been used in reactor operation for 1 year and shutdown time for 10 days, using COOLOD-N2 code. The calculation result of natural circulation with high pressure of 15 MPa in core channel showed that averaged decay heat is still 236.28 MW after shutdown 0.1 second. Decay heat with natural circulation resulted that the coolant saturation temperature is 342.82°C, coolant outlet temperature is 342.82°C, cladding maximum temperature is 343.65°C, and meat maximum temperature in the middle fuel is 375.45°C. Furthermore boiling was occurred for fuel length of 1.39 m or 38.1% on upper side of fuel rod. The calculation result for fuel storage after fuel has been used in reactor operation for 1 year and shutdown time for 10 day, showed that decay heat of 8.36 MW can not be cooled by natural circulation and boiling will be happened for 75-80% fuel rod length. Both analysis results recommend that the fuel cooling either in core or in fuel storage must be done by forced convection after reactor shutdown, to avoid boiling.

Keywords: Core natural circulation, COBRA-EN, spent fuel storage, COOLOD-N2, PWR-1000.

1. PENDAHULUAN

Sebagaimana telah diberitakan bahwa, telah terjadi gempa dengan kekuatan 9 skala Richter pada hari Jum'at, 11 Maret 2011 pada pukul 14.46 waktu Jepang, yang diikuti oleh Tsunami setinggi hingga 10 meter yang telah melanda dan memporak-porandakan pantai timur Jepang^[1]. Dilaporkan oleh sumber resmi pemerintah Jepang, bahwa sistem keselamatan sebelas PLTN melakukan tanggapan reaktif terhadap gempa tersebut dengan menghentikan reaktor secara otomatis (*automatic shutdown*) sehingga reaksi fisi praktis terhenti. Dalam laporan selanjutnya^[2,3,4] disebutkan adanya kegagalan sistem pendinginan setelah reaktor padam otomatis pada PLTN yang berada di lokasi Fukushima Daiichi. Setelah reaktor padam, di dalam bahan bakar PLTN masih terkandung energi panas dalam jumlah cukup besar yang disebut panas peluruhan (*decay heat*), walaupun energi panas ini secara bertahap akan menurun kuantitasnya, tetapi untuk mengambil energinya diperlukan pendinginan. Kegagalan sistem pendinginan konveksi paksa untuk mengambil panas peluruhan (*decay heat removal system*) maka akan mengakibatkan terjadinya penumpukan panas yang dapat menyebabkan timbulnya pendidihan pada air pendingin.

Selain terjadi kerusakan pada reaktor, ternyata kerusakan juga terjadi pada kolam penyimpanan bahan bakar bekas. Kolam penyimpan bahan bakar bekas (*spent fuel storage pools*) berfungsi untuk menyimpan sementara bahan bakar bekas (*spent/discharged fuel*) dan bahan bakar baru yang akan dipakai untuk pertukaran dan pemuatan kembali bahan bakar ke dalam teras reaktor^[6]. Bahan bakar bekas adalah bahan bakar bekas yang telah dipakai untuk pembangkitan daya di dalam teras reaktor dalam kurun waktu tertentu. Oleh karena bahan bakar bekas masih mengandung produk hasil belah fisi yang memancarkan berbagai jenis partikel atau sinar seperti α , β dan γ , maka kolam penyimpan bahan bakar bekas harus dilengkapi dengan pompa pendingin yang mampu menyediakan sirkulasi pendingin secara paksa (*forced convection*) untuk mendinginkan panas γ yang dipancarkan oleh bahan bakar bekas. Kecukupan pendingin diperlukan tidak saja dari aspek ketinggian permukaan air tetapi juga kemampuan terjadinya sirkulasi yang kontinyu. Disamping itu, pendingin berfungsi sebagai perisai agar paparan radiasi di permukaan kolam penyimpan memenuhi batas yang ditetapkan. Pada kondisi pendinginan normal, temperatur kolam penyimpan bahan bakar dipertahankan sekitar 25 sampai 40°C, dengan sirkulasi pendingin paksa yang memerlukan catu daya listrik, tinggi level air kolam dan temperatur pendingin harus selalu dipantau. Akibat dari padamnya pasokan listrik, maka pompa pendingin pada kolam bahan bakar bekas tidak beroperasi, sehingga pendinginan berubah dari sirkulasi paksa menjadi sirkulasi alam.

Sebagaimana yang terjadi pada PLTN BWR Fukushima, kejadian yang sama juga bisa di PLTN jenis PWR-1000 yaitu matinya pompa pendingin pada kolam bahan bakar bekas, akibatnya pendingin pada kolam bahan bakar berubah dari sirkulasi paksa menjadi sirkulasi alam. Di dalam makalah ini akan disajikan beberapa analisis yaitu (1) hasil analisis pendinginan sirkulasi alam kondisi *steady state* pada teras reaktor PWR-1000 setelah shutdown 0,1 detik dengan menggunakan kode COBRA-EN^[5], dan (2) hasil analisis pendinginan sirkulasi alam kondisi *steady state* pada kolam penyimpanan bahan bakar bekas PWR-1000 dengan menggunakan kode COOLOD-N2^[6].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kemampuan pendinginan sirkulasi alam pada teras reaktor selesai *shutdown* dan pada kolam bahan bakar bekas sebagai akibat listrik yang mengoperasikan pompa sirkulasi paksa mati.

Dipilihnya kode COBRA-EN untuk analisis sirkulasi alam setelah reaktor shutdown, karena kode ini memang digunakan untuk analisis reaktor PLTN jenis air ringan (PWR dan BWR) dengan tekanan tinggi, adapun moda sirkulasi alam digantikan dengan cara memasukkan inpu laju alir yang sangat kecil.

Sedangkan dipilihnya kode COOLOD-N2 untuk menyelesaikan analisis sirkulasi alam pada kolam penyimpanan bahan bakar, karena kode COOLOD-N2 secara umum dapat digunakan untuk perhitungan distribusi suhu dengan bahan bakar berbentuk pelat maupun bentuk batang silinder (*rod*), untuk kondisi pendinginan sirkulasi paksa maupun sirkulasi alam. Dari persamaan-persamaan yang berhubungan dengan tekanan kerja dan sifat-sifat pendingin yang ada di dalam kode COOLOD-N2 adalah dipakai untuk reaktor riset dengan bentuk kolam terbuka (kolam yang berhubungan dengan udara luar dengan tekanan rendah sekitar 1 atmosfer). Sebagaimana diketahui bahwa perangkat bahan bakar PLTN PWR-1000 adalah berbentuk silinder (*rod*), dan kolam bahan bakar bekas adalah kolam terbuka, maka dapat diambil hipotesis bahwa perhitungan distribusi suhu bahan bakar bekas PWR-1000 dapat dilakukan dengan kode COOLOD-N2.

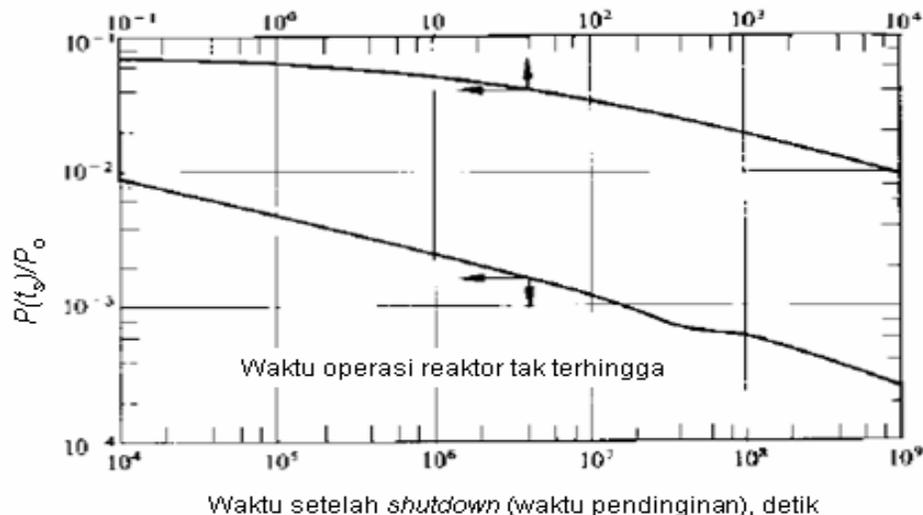
2. TEORI

2.1. Panas Peluruhan Produk Fisi

Setelah beberapa hari operasi reaktor, radiasi β dan γ dipancarkan dari sejumlah produk fisi peluruhan sebesar kurang lebih 7% dari daya termal total luaran reaktor. Ketika reaktor di padamkan (*shutdown*), akumulasi produk fisi terus meluruh dan melepaskan energi di dalam reaktor. Energi peluruhan produk fisi cukup besar dalam bentuk nyata, dan itu berarti harus tetap dilakukan pendinginan pada teras reaktor setelah reaktor padam, kecuali jika hanya diperasikan pada daya sangat rendah. Jika tidak dilakukan pendinginan, temperatur bahan bakar akan naik ke suatu titik yang akan membahayakan integritas bahan bakar dan produk fisi bisa terlepas.

Jika suatu reaktor telah dioperasikan dengan daya termal konstan P_o dalam jangka waktu yang cukup panjang akan membentuk konsentrasi radioaktif produk fisi menjadi setimbang (*equilibrium*). Karena laju produksi produk fisi sebanding dengan daya reaktor, hal ini akan berakibat aktivitas produk fisi pada sembarang waktu setelah reaktor padam (*shutdown*) juga sebanding dengan P_o . Rasio $P(t_s)/P_o$ di mana $P(t_s)$ adalah daya (laju pelepasan energi) yang berasal dari produk fisi pada waktu t_s setelah padam, dan P_o adalah daya operasi reaktor.

Pada Gambar 1, ditunjukkan rasio sebagai fungsi t_s dalam detik, untuk reaktor termal berbahan bakar U^{235} . Gambar tersebut pada energi yang dapat diperoleh lagi per fisi sebesar 200 MeV. Pada gambar tersebut juga dipergunakan untuk memberi nilai daya peluruhan produk fisi untuk reaktor yang telah dioperasikan selama waktu tertentu t_o dan kemudian dipadamkan.



Gambar 1. Rasio $P(t_s)/P_o$ dari daya peluruhan produk fisi dengan daya operasi reaktor sebagai fungsi waktu t_s setelah padam (*shutdown*).^[7]

Rasio $P(t_o, t_s)/P_o$ di mana t_s adalah waktu pendinginan kembali (reaktor mati), ditentukan dari persamaan :

$$\frac{P(t_o, t_s)}{P_o} = \frac{P(t_s)}{P_o} - \frac{P(t_o + t_s)}{P_o} \quad (1)$$

Kedua suku sebelah kanan dari persamaan (1) dapat dicari nilainya pada Gambar 1.

Jika di dalam bahan bakar U^{235} di dalam reaktor tersebut juga terkandung sejumlah U^{238} , maka peluruhan dari U^{239} dan Np^{239} yang terbentuk dari serapan (*absorption*) neutron di dalam U^{238} juga harus diperhitungkan dengan menggunakan persamaan peluruhan radioaktif berikut:

$$\frac{P_{29}}{P_o} = 2,28 \times 10^{-3} C \left(\frac{\sigma_{a25}}{\sigma_{f25}} \right) \left[1 - e^{-4,91 \times 10^{-4} t_o} \right] e^{-4,91 \times 10^{-4} t_s} \quad (2)$$

dan

$$\frac{P_{39}}{P_o} = 2,17 \times 10^{-3} C \left(\frac{\sigma_{a25}}{\sigma_{f25}} \right) \left[\left(1 - e^{-3,41 \times 10^{-4} t_o} \right) e^{-3,41 \times 10^{-4} t_s} - 7,0 \times 10^{-3} \left(1 - e^{-4,91 \times 10^{-4} t_o} \right) e^{-4,91 \times 10^{-4} t_s} \right] \quad (3)$$

dimana:

P_{29} dan P_{39} : masing-masing daya peluruhan dari U^{239} dan Np^{239}

C : faktor konversi = 0,88

σ_{a25} : luasampang lintang termal efektif serapan dari U^{235}

σ_{f25} : luasampang lintang termal efektif pembelahan dari U^{235}

t_o dan t_s : waktu operasi dan waktu setelah padam, dalam detik.

Untuk waktu setelah padam lebih dari satu tahun, maka nilai dari persamaan 2 dan 3 adalah sangat kecil sekali, sehingga dianggap nol.

2.2. Kode COBRA-EN

Kode (paket program computer) COBRA-EN (akronim dari *COolant Boiling in Rod Arrays*) adalah suatu kode yang dikembangkan untuk menganalisis termohidrolika teras dan elemen bakar nuklir yang berbentuk *rod bundle* (perangkat bahan bakar berbentuk silinder) untuk menghitung distribusi entalpi, aliran, suhu dan batas keselamatan terhadap pelepasan pendidihan inti (*departure from nucleate boiling – DNB*) di dalam perangkat elemen bakar dan teras reaktor daya jenis air ringan, termasuk jenis PWR dan BWR yang mempunyai tekanan operasi tinggi. Kode COBRA-EN menggunakan konsep dasar analisis sub kanal, di mana perangkat elemen bakar atau teras reaktor dibagi ke dalam beberapa sub kanal yang mempunyai batasan-batasan yang didefinisikan oleh permukaan elemen bakar sebelahnya. Sub kanal secara aksial dibagi menjadi volume-volume kontrol yang diskrit (*discrete*) dimana persamaan-persamaan konservasi massa, energi dan momentum digunakan di dalamnya, dan variabel laju aliran massa, tekanan, entalpi dan densitas didefinisikan sebagai harga rerata secara volume.

2.3. Kode COOLOD-N2

Program perhitungan komputer (*code*) COOLOD-N2 adalah suatu program komputer yang dipergunakan untuk perhitungan distribusi suhu dua dimensi, yaitu arah radial (arah ketebalan *meat* dan pelat) (*y*) dan arah aksial (*z*). Perhitungan dilakukan dengan cara mengasumsikan pembangkitan panas di dalam *meat* bahan bakar konstan ke arah radial ($Q = q''/y_U = \text{konstan}$) atau hanya terjadi konduksi panas satu dimensi. Program ini dibuat dan dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)*, yang awalnya digunakan pada komputer *mainframe*, tetapi sekarang sudah dirubah ke versi komputer pribadi (PC)^[9].

Kode COOLOD-N2 secara umum dapat digunakan untuk perhitungan distribusi suhu dengan bahan bakar berbentuk pelat maupun bentuk batang silinder (*rod*), untuk kondisi pendinginan sirkulasi paksa maupun sirkulasi alam. Dari persamaan yang berhubungan dengan tekanan kerja dan sifat-sifat pendingin yang ada di dalam kode COOLOD-N2 adalah dipakai untuk reaktor riset dengan bentuk kolam terbuka (kolam yang berhubungan dengan udara luar dengan tekanan rendah sekitar 1 atmosfer). Sebagaimana diketahui bahwa perangkat bahan bakar PLTN PWR-1000 adalah berbentuk silinder (*rod*), dan kolam bahan bakar bekas adalah kolam terbuka, maka dapat diambil hipotesis bahwa perhitungan distribusi suhu bahan bakar bekas PWR-1000 dapat dilakukan dengan kode COOLOD-N2.

3. TATA KERJA

Tahap pertama dalam pemodelan adalah inventarisasi data input yang kemudian dikompilasi parameter yang diperlukan dalam menyusun input.

Tabel 1. Desain perangkat bahan bakar PWR-1000^[8,9,10].

Jenis PLTN	PWR1000-Tipikal
Desainer	Westinghouse
Daya Termal (MW)	3411
Laju alir efektif (kg/j)	59,053 x 10 ⁶
Tekanan operasi (MPa)	15,17
Suhu inlet pendingin (°C)	292,60
Suhu outlet pendingin (°C)	328,30
Diameter Teras (cm)	337,06
Tinggi Teras (cm)	366,0
Desain Perangkat B. Bakar	
Jumlah perangkat	193
Tipe	17 x 17
Ukuran perangkat (cm x cm)	21,40 x 21,40
Jumlah rod / perangkat	264
Jarak antar pusat rod (cm)	1,26
Diameter rod (cm)	0,914
Diameter pelet (cm)	0,784
Tebal kelongsong (cm)	0,0572
Bahan kelongsong	Zircaloy-4
Fluks panas rerata (kW/m ²)	622,09
Fluks panas maks. (kW/m ²)	1555,21

3.1. Analisis konveksi alam kondisi *steady state* setelah reaktor *shutdown* tekanan tinggi

Dari Tabel 1, teras PWR-1000 tersusun atas 193 perangkat bahan bakar, dengan jumlah rod bahan bakar sebanyak 264 per perangkat bahan bakar. Diasumsikan reaktor PWR-1000 setelah beroperasi selama 1 tahun sedang *shutdown* dengan kondisi masih bertekanan tinggi sekitar 15 MPa, mengalami padam listrik dan tidak terdapat pendingin darurat, sehingga pendinginan dihitung pada kondisi setelah 0,1 detik *shutdown* hanya menggunakan sirkulasi alam.

Perhitungan panas peluruhan, setelah PWR-1000 dioperasikan 1 tahun dan *shutdown* 0,1 detik.

$$\text{Daya termal} = 3411 \text{ MWt}$$

$$\text{Waktu operasi } t_o = 1 \text{ tahun} = 1 \times 365 \times 24 \times 3600 = 3,1536 \times 10^7 \text{ detik}$$

$$\text{Waktu shut down } t_s = 0,1 \text{ detik} = 10^{-1} \text{ detik.}$$

$$\text{Waktu seluruhnya} = t_o + t_s = 3,1536 \times 10^7 \text{ detik}$$

$$\text{Jadi : } \frac{P}{P_o} = \frac{P(10^{-1})}{P_o} - \frac{P(3,1536 \times 10^7)}{P_o}$$

$$\text{Dari Gambar 1 diperoleh : } \frac{P}{P_o} = 0,070 - 0,00073 = 0,06927$$

$$\text{Jadi } P = 0,06927 \times 3411 \text{ MW} = 236,28 \text{ MW.}$$

Perhitungan distribusi suhu pendingin kelongsong dan *meat* bahan bakar dilakukan dengan menggunakan kode COBRA-EN.

3.2. Analisis konveksi alam kondisi *steady state* pada kolam penyimpanan bahan bakar, tekanan rendah.

Pada waktu penggantian (*reshuffle*) bahan bakar, dilakukan prosedur dengan urutan pengosongan perangkat bahan bakar dari teras reaktor ke kolam penyimpanan bahan bakar sementara (*spent fuel storage*), pengecekan dan perawatan, dan terakhir pemuatan ulang perangkat bahan bakar ke dalam teras dengan komposisi 2/3 bagian dari perangkat yang lama dan 1/3 bagian perangkat bahan bakar baru. Waktu yang diperlukan untuk mengosongkan perangkat bahan bakar dari teras reaktor ke kolam bahan bakar diperkirakan memakan waktu sekitar 10 hari. Kolam penyimpanan bahan bakar berbentuk kolam terbuka sehingga bertekanan rendah, dengan pendinginan dilakukan secara konveksi paksa. Dengan asumsi bahwa dalam waktu 10 hari, setelah perangkat dipindahkan ke kolam penyimpanan penyimpanan bahan bakar, kemudian mengalami listrik padam, sehingga pendinginan perangkat bahan bakar hanya secara sirkulasi alam.

Perhitungan distribusi suhu pendingin dan *meat* bahan bakar PLTN PWR-1000 dilakukan dengan langkah:

Perhitungan panas peluruhan, setelah PWR-1000 dioperasikan 1 tahun, dengan waktu *shutdown* 10 hari.

$$\text{Daya termal} = 3411 \text{ MWt}$$

$$\text{Waktu operasi } t_o = 1 \text{ tahun} = 1 \times 365 \times 24 \times 3600 = 3,1536 \times 10^7 \text{ detik}$$

$$\text{Waktu } \textit{shutdown} \ t_s = 10 \text{ hari} = 10 \times 24 \times 3600 = 8,64 \times 10^5 \text{ detik.}$$

$$\text{Waktu seluruhnya} = t_o + t_s = 3,24 \times 10^7 \text{ detik}$$

$$\text{Jadi : } \frac{P}{P_o} = \frac{P(8,64 \times 10^5)}{P_o} - \frac{P(3,24 \times 10^7)}{P_o}$$

$$\text{Dari Gambar 1 diperoleh : } \frac{P}{P_o} = 0,0032 - 0,00075 = 0,00245$$

$$\text{Jadi } P = 0,00245 \times 3411 \text{ MW} = 8,36 \text{ MW.}$$

Tabel 2. Besarnya tekanan pendingin masukan sebagai fungsi kedalaman air, untuk analisis dengan kode COOLOD-N2.

Kedalaman air (m)	Tekanan masukan (kg/cm ²)
0	1,03323
1	1,13216
2	1,23110
4	1,42896
6	1,62683
8	1,82470
10	2,02256

Perhitungan distribusi suhu pendingin, kelongsong dan *meat* bahan bakar dilakukan dengan menggunakan kode COOLOD-N2. Analisis dilakukan sebagai fungsi kedalaman air dalam kolam di atas permukaan bahan bakar yang berarti perangkat bahan bakar tetap terendam air. Fungsi kedalaman air tersebut ditunjukkan oleh besarnya tekanan masukan, seperti tertera pada Tabel 2.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis konveksi alam kondisi *steady state* setelah reaktor shutdown tekanan tinggi

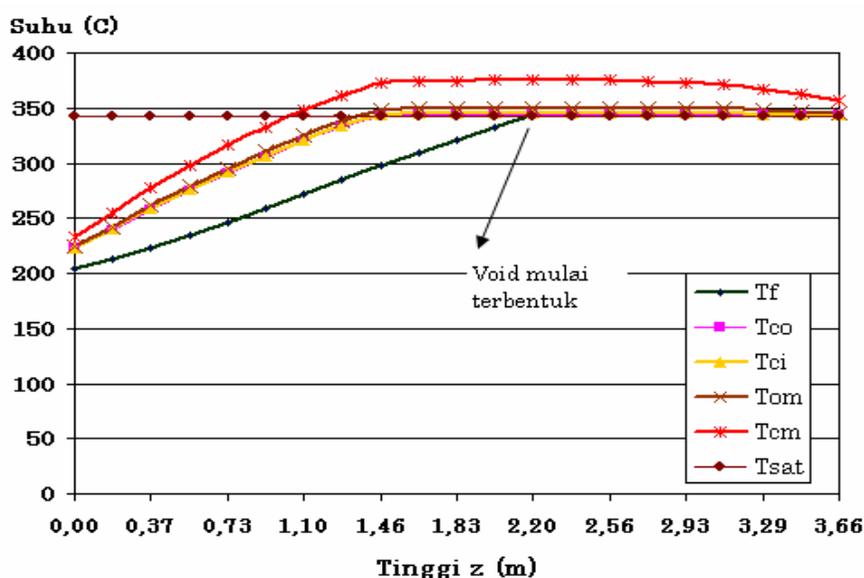
Hasil perhitungan suhu maksimum tengah *meat*, suhu kelongsong, suhu *outlet* pendingin pada perangkat bahan bakar PWR-1000 setelah shutdown dirangkum pada Tabel 3 dan Gambar 2.

Tabel 3. Perhitungan suhu bahan bakar PWR-1000, dengan moda sirkulasi alam.

Parameter	PWR-1000
Data masukan:	
▪ Daya (MW)	236,28
▪ Suhu <i>inlet</i> pendingin (°C)	200,0
▪ Tekanan teras (MPa)	15,0
▪ Daya radial F_Q	1,0
Hasil keluaran :	
Suhu T (°C)	
T <i>meat</i> maks	375,45
T <i>meat</i> outer	349,95
T <i>clad</i> inner	345,05
T <i>clad</i> outer	343,65
T out pend.	342,82
T saturasi rerata (C)	342,82
Fraksi void pada kanal (%)	38,1
Panjang kanal aliran void (m)	1,39
Laju alir (kg/s)	0,00161
Fluks panas maks. q'' (W/cm ²)	4,307

Dari Tabel 3 terlihat bahwa panas peluruhan dari PWR-1000 setelah beroperasi 1 tahun dengan waktu *shutdown* 0,1 detik masih cukup besar yakni 236,28 MW. Perhitungan dengan kondisi tekanan teras dan suhu masukan pendingin seperti kondisi operasi yaitu masing-masing sebesar 15 MPa dan 200°C untuk kanal rata-rata diperoleh suhu keluaran pendingin sebesar 342,82°C, suhu maksimum permukaan kelongsong sebesar 343,65°C dan suhu maksimum tengah *meat* bahan bakar sebesar 375,45°C. Dari hasil itu menunjukkan besarnya suhu keluaran pendingin sama dengan suhu saturasi yakni mencapai 342,82°C, hal ini berarti sudah terjadi pembentukan void (gelembung) atau pendidihan.

Gambar 2 menunjukkan kurva distribusi suhu pendingin, suhu kelongsong bagian luar dan dalam, suhu *meat* bahan bakar bagian luar dan tengah, serta suhu saturasi sebagai fungsi tinggi rod bahan bakar. Dari Gambar 2 tersebut menunjukkan bahwa sekitar 38,1 % atau sekitar 1,39 m ujung bagian atas rod bahan bakar sudah terjadi pendidihan sehingga terbentuk void. Hal ini berlawanan dengan kondisi operasi PWR di mana dijaga untuk tidak terjadi pembentukan void. Hal ini terjadi karena daya peluruhan setelah shut down masih sangat tinggi (236,28 MW) meskipun tekanan teras juga tinggi, pendinginan sirkulasi alam tidak mampu untuk memindahkan panas dari bahan bakar, sehingga terjadi pendidihan. Dari hasil ini menunjukkan bahwa setelah shutdown dengan kondisi masih bertekanan tinggi, reaktor PWR-1000 tetap harus didinginkan dengan pendinginan sirkulasi paksa, agar tidak terjadi pendidihan.



Gambar 2. Distribusi suhu pendingin, kelongsong (luar dan dalam) dan *meat* (luar dan tengah) sebagai fungsi tinggi rod bahan bakar.

4.2. Analisis konveksi alam kondisi *steady state* pada kolam penyimpanan bahan bakar, tekanan rendah

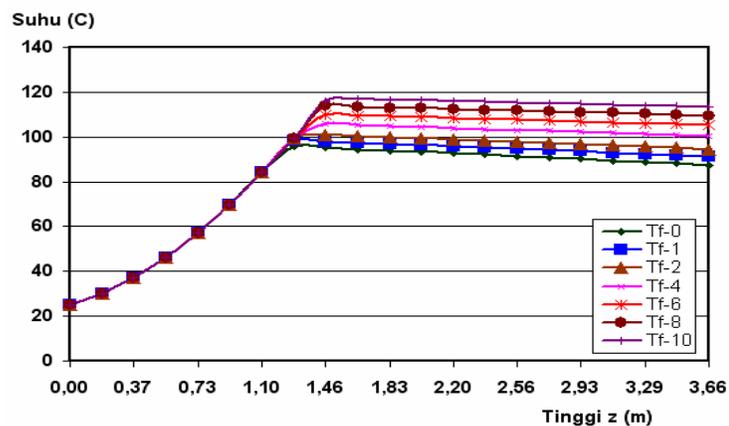
Analisis konveksi alam kondisi *steady state* pada kolam penyimpanan bahan bakar dilakukan dengan variasi ketinggian air dari 0, 1, 2, 4, 6, 8 dan 10 m di atas permukaan perangkat bahan bakar. Hal ini berarti perangkat bahan bakar masih terendam air pendingin. Di dalam kode COOLOD-N2, variasi ketinggian air ditunjukkan dengan besarnya tekanan inlet pendingin.

Hasil perhitungan pendinginan sirkulasi alam pada kolam penyimpanan sementara bahan bakar ditunjukkan pada Tabel 4.

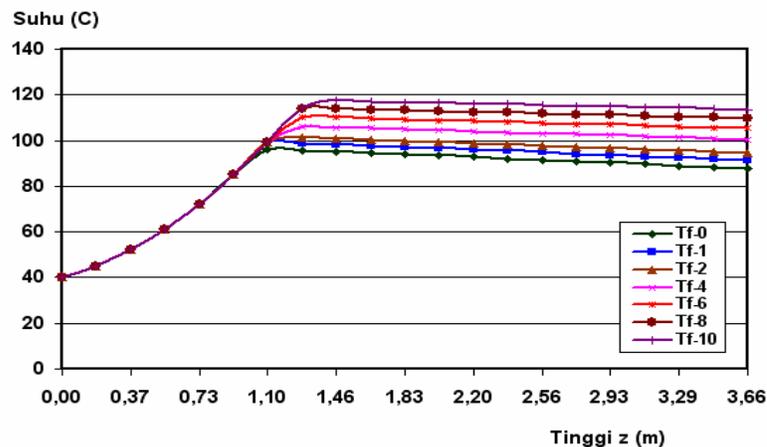
Tabel 4. Hasil perhitungan pendinginan sirkulasi alam pada kolam penyimpanan sementara bahan bakar, sebagai fungsi kedalaman air.

PARAMETER	Kedalaman air (m)			
	0	2	6	10
Masukan:				
Daya (MW)	8,36	8,36	8,36	8,36
Tin (C)	25	25	25	25
P in (kg/cm ²)	1,0332	1,2311	1,6268	2,0226
Hasil:				
Suhu (C)				
T out pend.	87,45	94,53	105,28	113,49
T maks clad	100,37	105,87	114,72	121,90
T maks meat	101,78	107,28	116,21	123,39
T saturasi	87,45	94,53	105,28	113,49
Panjang kanal void (cm)	292,8	292,8	274,5	274,5

Dari Tabel 4, menunjukkan besarnya suhu pendingin, kelongsong dan tengah meat sebagai fungsi kedalaman air yang merendam di atas perangkat bahan bakar pada pendinginan sirkulasi alam. Dari hasil tersebut terlihat bahwa suhu saturasi lebih kecil dibanding suhu kelongsong, hal tersebut menunjukkan sudah terjadi pendidihan. Sebagai gambaran yang lebih jelas akan ditunjukkan pada Gambar 3, 4 dan 5.

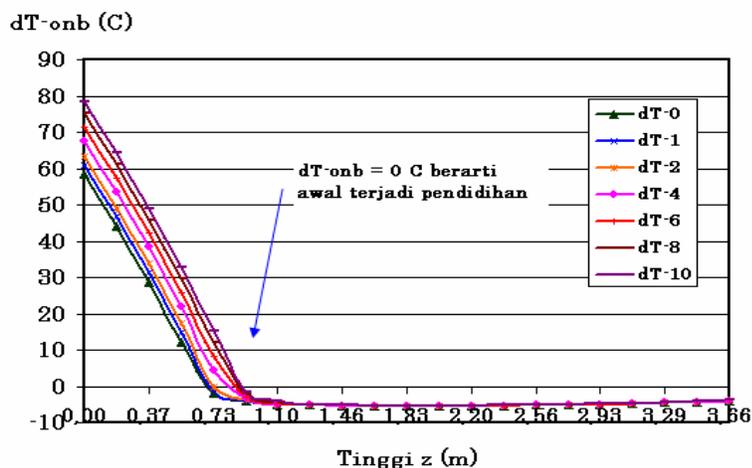


Gambar 3. Distribusi suhu pendingin sebagai fungsi kedalaman air, untuk suhu masukan 25°C.



Gambar 4. Distribusi suhu pendingin sebagai fungsi kedalaman air, untuk suhu masukan 40°C.

Dari Gambar 3 dan 4 menunjukkan distribusi suhu pendingin sebagai fungsi kedalaman air, masing-masing untuk suhu masukan pendingin sebesar 25 dan 40°C. Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa dengan kedalaman air 0 sampai 10 meter di atas perangkat bahan bakar tidak mampu untuk mendinginkan panas sisa peluruhan sebesar 8,36 MW setelah reaktor shutdown selama 10 hari di dalam kolam penyimpanan sementara bahan bakar. Dengan semakin rendah kedalaman air, maka panjang kanal yang terjadi pendidihan semakin panjang. Pada kedalaman air 0 sampai 4 m, panjang kanal yang terjadi pendidihan sepanjang 292,8 cm (80% panjang rod), sedangkan untuk kedalaman di atas 6 m, panjang kanal yang terjadi pendidihan 274,5 cm (75% panjang rod).



Gambar 5. Distribusi selisih suhu awal pendidihan inti (dT_{-onb}) sebagai fungsi kedalaman air, untuk suhu masukan 25°C.

Gambar 5 menunjukkan distribusi selisih suhu awal pendidihan inti (dT_{-onb}) sebagai fungsi kedalaman air, untuk suhu masukan 25°C. Gambar tersebut mempunyai arti bahwa semakin rendah kedalaman air kolam yang menutupi bahan bakar, akan mempunyai perbedaan antara suhu kelongsong dan suhu pendingin (selisih terhadap suhu awal pendidihan) semakin kecil yang berarti semakin mendekati suhu didih air, selebihnya untuk daerah yang sudah mengalami pendidihan mempunyai arti bahwa dengan semakin rendah kedalaman air akan mengakibatkan fraksi void yang terjadi akan semakin besar.

Dari analisis di atas, terlihat bahwa setelah shut down 10 hari, seluruh perangkat bahan bakar PWR 1000 masih menghasilkan panas peluruhan sebesar 8,36 MW, di mana panas peluruhan tersebut tidak mampu dipindahkan secara konveksi alam kondisi steady state, terbukti dengan terjadinya pendidihan. Oleh sebab itu pendinginan perangkat bahan bakar di kolam penyimpanan sementara bahan bakar harus dilakukan secara konveksi paksa.

5. KESIMPULAN

Dari hasil analisis sirkulasi alam kondisi steady state pada teras reaktor PWR 1000 setelah shutdown dengan tekanan tinggi dengan menggunakan kode COBRA-EN, menunjukkan panas peluruhan sebesar 236,28 MW tidak dapat didinginkan dengan pendinginan sirkulasi alam kondisi steady state, bertekanan tinggi, karena terjadi pendidihan sekitar 38,1% atau 1,39 m ujung bagian

atas perangkat bahan bakar. Demikian juga pada analisis sirkulasi alam kondisi steady state pada kolam penyimpanan sementara bahan bakar reaktor PWR 1000 bekas pakai bertekanan rendah setelah shutdown selama 10 hari dengan menggunakan kode COOLOD-N2, menunjukkan panas peluruhan sebesar 8,36 MW tidak dapat didinginkan dengan pendinginan sirkulasi alam kondisi steady state, karena terjadi pendidihan sepanjang 75% sampai 80% dari panjang rod bahan bakar bagian atas. Dari kedua hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa setelah reaktor shutdown maka pendinginan perangkat bahan bakar di dalam teras maupun di dalam kolam penyimpanan sementara bahan bakar harus dilakukan secara konveksi paksa untuk menghindari terjadinya pendidihan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. <http://internasional.kompas.com/read/2011/03/11/14404835/Gempa.Jepang.Timbulkan.Tsunami.4.Meter>
- [2]. http://www.batan.go.id/ptrkn/index.php?option=com_content&task “Kecelakaan PLTN di Jepang (1)”, Maret 2011.
- [3]. Matthias Braun, “The Fukushima Daiichi Incident” AREVA, April , 2011
- [4]. http://www.batan.go.id/ptrkn/index.php?option=com_content&task “Kecelakaan PLTN di Jepang (4)”, Maret 2011.
- [5]. BASILE, D., et al., COBRA-EN: an Upgraded version of the COBRA-3C/MIT Code for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of LWR Fuel Assemblies and Cores, (May 2001), Printed in 2010 .
- [6]. Masanori KAMINAGA, “COOLOD-N2: A Computer Code, for the Analyses of the Steady State Thermal-Hydraulics in Research Reactors” JAERI-M 94-052, Japan Atomic Energy Research Institute, 1994.
- [7]. Lamarsh, John. R., “Introduction to Nuclear Engineering” 2nd edition, Addison Wesley Publishing Company, 1983, hal. 350 – 352.
- [8]. Anonim, Simplified Passive Advanced Light Water Reactor Plant Program, AP600 Standard Safety Analysis Report, US Department of Energy, DE-AC03-90SFI8495, Westinghouse Electric Company, June 1992
- [9]. UHCIDA MASA AKI, Thermal-Hydraulics of Nuclear Reactors, Tokai Training Center, Nuclear Technology and Education Center, JAERI, Japan, 2001.
- [10]. MUH. DARWIS ISNAINI, Verifikasi desain geometri rod bahan bakar PWR1000 Tipikal buatan Mitsubishi dan Westinghouse, Prosiding Seminar Nasional TKPFN ke-16, PTRKN-BATAN dan ITS, Surabaya, Juli 2010

DISKUSI / TANYA JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Pudjijanto, MS., PTRKN-BATAN)

- Asumsi apa yang digunakan dalam perhitungan sirkulasi alam di teras PLTN dengan kode COBRA-EN?.

JAWABAN: (M. Darwis Isnaeni, PTRKN-BATAN)

- Pada prinsipnya kode COBRA-EN digunakan untuk perhitungan sirkulasi paksa. Dalam perhitungan sirkulasi alam diasumsikan saat listrik mati, maka pompa pendingin primer mati, sehingga reaktor scram. Pada kondisi sesungguhnya, ada aliran “coast-down flow” yang diakibatkan oleh roda gila (fly wheel). Tetapi dalam perhitungan ini diasumsikan tidak ada “coast-down flow”, sehingga perhitungan dilakukan dengan sirkulasi alam langsung dengan cara memberi input data laju alir yang kecil (1/40 laju alir nominal, sehingga bilangan Re menjadi sangat kecil) yang menunjukkan aliran laminar.