

ASPEK KESELAMATAN OPERASI PENYIMPANAN SEMENTARA BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS

Ahmad Indra Permana, Zainus Salimin, Badrus Zaman, Ratiko

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Email: indra_ahmad16@yahoo.com

Abstract

Facility of Instalation Storage for Spent Fuel (ISFSF) designed to be able to place Spent Nuclear Fuel (SNF) as result of 25 years Versatile Reactor – G. A. Siwabbesy added by 1 core unload. In normal operation, there is change of 8 SNF and there is 7 cycles in a year with storage capacity is 1448 SNF elements including used element control rod. Until the end of 2011, real situation of ISFSF has only 245 SNF and normal operation has 6 times change SNF each cycles and 4 cycles in a year, therefore storage capaccity of ISFSF can reach 60 operational years. After SNF moved from reactor fuel to ISFSF emits heat 42,10 watt each elements and heat total is 6 kW. ISFSF completed with cooler system to hold on water temperature not more than 35 °C and VAC hold on air temperation not more than 25 °C. Heat transfer in ISFSF shows the increasing 0,057 °C of water temperature each day in non operational cooler system and VAC operates into 67 °C abnormal temperature limit for 560 days. While in non opeartional cooler system condition and VAC, there is increasing 0,25 °C each day for water temperature with the achievement limitation 128 days and the air temperature becomes 35 °C each day in 2 hours 11 minutes. Value of radiation exposure in ISFSF between 0,14 – 0,77 µSv each hour is safe for workers and the environment. While surface contamination value of alpha from 0.00 to 0.00 Bq/cm², beta from 0.00 to 0.02 Bq/cm² and air contamination alpha values from 0.00 to 0.00 Bq/cm², beta from 0,00 to 0.23 Bq/cm², included into the low contamination areas and is still below the level of contamination.

Keyword: *ISFSF, SNF, Radiation exposure, Contamination of surface, Contamination of air*

Abstrak

Fasilitas Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (IPSB3) didisain untuk dapat menampung Bahan Bakar Nuklir Bekas (BBNB) yang ditimbulkan dari 25 tahun operasi Reaktor Serba Guna – G. A. Siwabbesy ditambah 1 *core unload*. Pada operasi normal terdapat penggantian 8 BBNB per siklus dan ada 7 siklus per tahun dengan kapasitas penyimpanan adalah 1448 elemen BBNB termasuk elemen batang kendali bekas. Keadaan sebenarnya IPSB3 sampai akhir tahun 2011 hanya terdapat 245 BBNB dan pada operasi normal terdapat penggantian 6 BBNB per siklus dan ada 4 siklus per tahun, maka kapasitas penyimpanan IPSB3 dapat mencapai 60 tahun operasi. BBNB setelah dipindahkan dari kolam reaktor ke IPSB3 memancarkan panas 42,10 Watt per elemen dan total panas 6 kW. IPSB3 dilengkapi dengan sistem pendingin untuk mempertahankan suhu air tidak melebihi 35 °C, dan VAC mempertahankan suhu udara tidak melebihi 25 °C. Perpindahan panas di IPSB3 menunjukkan terjadinya kenaikan suhu air kolam 0,057 °C/hari pada kondisi sistem pendingin tidak beroperasi dan VAC beroperasi dengan batas pencapaian suhu abnormal 67 °C selama 560 hari. Sedangkan pada kondisi sistem pendingin dan VAC tidak beroperasi, terjadi kenaikan suhu air 0,25 °C/hari dengan batas pencapaian suhu abnormal 128 hari dan suhu udara menjadi 35 °C/hari dalam waktu 2 jam 11 menit. Nilai paparan radiasi di IPSB3 antara 0,14 – 0,77 µSv/jam masih aman untuk para pekerja dan lingkungan sekitar. Sedangkan kontaminasi permukaan nilai alpha 0,00 – 0,00 Bq/cm², beta 0,00 – 0,02 Bq/cm² dan kontaminasi udara nilai alpha 0,00 – 0,00 Bq/cm², beta 0,00 – 0,23 Bq/cm², termasuk kedalam daerah kontaminasi rendah dan masih dibawah batas tingkat kontaminasi.

Kata kunci: IPSB3, BBNB, Paparan radiasi, Kontaminasi permukaan, Kontaminasi udara

I. PENDAHULUAN

Bahan Bakar Bekas Nuklir (BBNB) yang keluar dari Reaktor Serba Guna – G. A. Siwabbesy (RSG-GAS) disimpan sementara dalam *reactor pond* untuk pendinginan selama 100 hari atau lebih. Dalam pendinginan tersebut, panas akan turun dari 47.590 - 377,2 W per elemen BBNB. BBNB tersebut kemudian ditransfer ke Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (IPSB3) melalui Kanal Hubung (KH) yang berisi air untuk disimpan dalam rak pada bagian dasar kolam IPSB3. IPSB3 dilengkapi dengan sistem pendingin sehingga suhu air kolam dapat dipertahankan tetap 35 °C dan sistem ventilasi pengkondisian udara (VAC) sehingga suhu udara dapat dipertahankan 25 °C, sedangkan operasi abnormal suhu dipertahankan 67 °C^[1].

Sejak pengoperasian RSG-GAS tahun 1987 sampai dengan periode akhir tahun 2011, jumlah elemen BBNB telah mencapai 443 elemen. Pada saat ini, IPSB3 hanya berisi 245 elemen yang terdiri dari 208 elemen BBNB dan 37 elemen Batang Kendali Bahan (BKB). Kanal hubung telah digunakan untuk transfer 243 elemen BBNB dari RSG-GAS ke IPSB3, 231 target teriradiasi dari fasilitas Instalasi Produksi Radioisotop (IPR) ke IPSB3 dan 2 elemen BBNB dari Instalasi Radio Metalurgi (IRM) ke fasilitas IPSB3^[2].

Panas, kontaminasi zat radioaktif, dan radiasi dalam IPSB3 berasal dari BBNB dan transportasi target teriradiasi. Bahan bakar yang digunakan adalah tipe *Material Testing Reactor* (MTR) dengan bahan kelongsong logam paduan Al-Mg dan Al-Mg-Si yang mempunyai suhu kritis 193 °C dan titik leleh 650 °C. Pada suhu 100 °C kelongsong mengalami oksidasi membentuk lapisan pelindung, lapisan tersebut akan mengelupas pada suhu lebih dari 150 °C. Berdasarkan disain, IPSB3 dirancang untuk dapat menampung BBNB yang ditimbulkan dari 25 tahun operasi reaktor RSG – GAS dengan keadaan 7 siklus penggantian BBNB per tahun dan 8 elemen BBNB per siklus dikeluarkan dari reaktor atau IPSB3 mempunyai kapasitas penyimpanan 1448 BBNB^[1]. Saat ini pada operasi normal RSG-GAS hanya terdapat

4 siklus penggantian BBNB per tahun dan 6 elemen BBNB per siklus dikeluarkan dari reaktor. Pada kondisi tersebut dengan kapasitas penuh IPSB3 1448 elemen BBNB maka IPSB3 dapat digunakan untuk 60 tahun operasi RSG-GAS. Mengingat IPSB3 dapat dioperasikan pada proses jangka panjang dimana seiring dengan pertambahan waktu dan jumlah penduduk di daerah lokasi akan meningkat, maka aspek keselamatan operasi IPSB3 harus dikaji agar aman dari kenaikan suhu akibat panas peluruhan BBNB, dan keutuhan kelongsong BBNB dapat terjamin.

Tujuan penelitian dari pembuatan Tugas Akhir ini adalah:

1. Mencari persamaan model matematis untuk menghitung panas BBNB di IPSB3.
2. Melakukan perhitungan dan analisis perpindahan panas dari peluruhan BBNB ke air kolam dan dari air kolam ke udara di dalam IPSB3 pada 4 kondisi operasi dan jumlah BBNB sampai dengan kapasitas penuh.
3. Melakukan analisis aspek keselamatan operasi penyimpanan sementara bahan bakar nuklir bekas.

II. METODOLOGI

Metode penelitian yang digunakan yaitu dengan melakukan perhitungan dan analisis terhadap aspek keselamatan operasi penyimpanan sementara bahan bakar nuklir bekas. Perhitungan dan analisis menggunakan program *Matlab* untuk menghitung panas peluruhan dan mengetahui perpindahan panas bahan bakar nuklir bekas dalam kolam penyimpanan sementara dengan menghitung debit air pendingin dan suhu air kolam pada 4 kondisi operasi dan jumlah BBNB sampai kapasitas penuh IPSB3.

2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

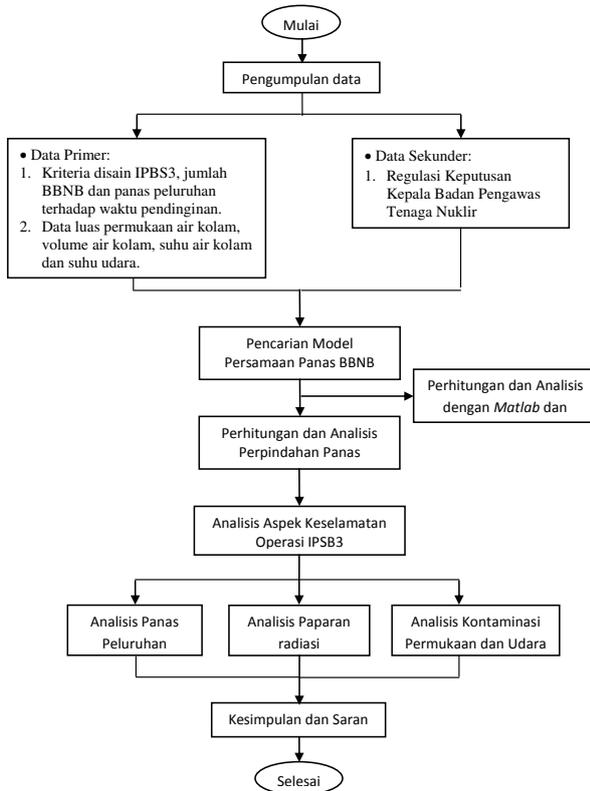
Penelitian dilaksanakan bulan Juni – September 2012. Tempat penelitian yaitu Reaktor Riset RSG-GAS, difokuskan pada Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (IPSB3), Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) BATAN, PUSPIPTEK Serpong, Tangerang.

2.2. Alat Penelitian

Alat yang digunakan, yaitu:

- Radiameter FAG-40FZ, untuk mengukur tingkat paparan radiasi lingkungan kerja IPSB3.
- Alpha Beta Sample Counter, untuk mengukur tingkat kontaminasi permukaan dan udara.
- Air Sampler, untuk mengambil *sample* dari udara.
- Kertas saring, sebagai media *sample* kontaminasi.

2.3. Diagram Alir Penelitian

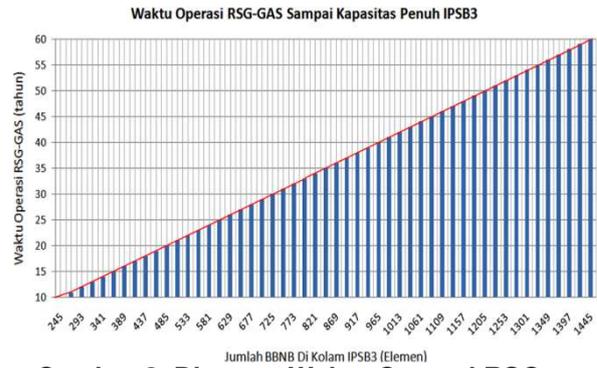


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Panas yang Ditimbulkan BBNB

Berdasarkan analisis pada kondisi saat ini 245 BBNB dengan 4 siklus penggantian BBNB per tahun dan 6 elemen BBNB per siklus dikeluarkan dari reaktor, jumlah BBNB yang disimpan di kolam IPSB3 sampai dengan kapasitas penuh 1448 BBNB, RSG-GAS dapat dioperasikan selama 60 tahun. Hasil analisis waktu operasi RSG-GAS terhadap jumlah BBNB sampai kapasitas penuh kolam IPSB3 ditunjukkan pada Gambar 2.



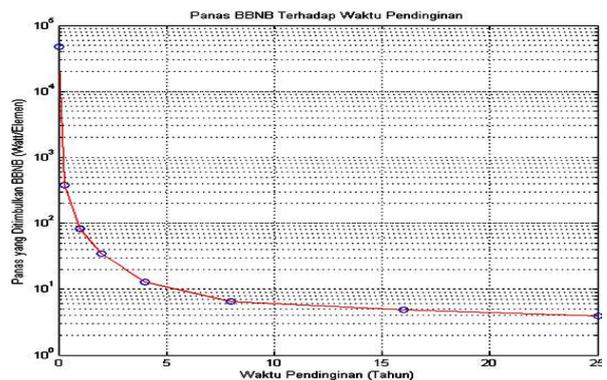
Gambar 2. Diagram Waktu Operasi RSG-GAS Terhadap Jumlah BBNB

Berdasarkan diagram di atas, waktu operasi RSG-GAS dapat mencapai 60 tahun dengan jumlah 1445 BBNB yang dapat disimpan di kolam IPSB3.

Hasil analisis berdasarkan panas yang ditimbulkan BBNB (MTR 300 G U 235, 72% Burn Up) sebagai fungsi waktu pada saat keluar reaktor ditunjukkan pada Tabel 1, dan dalam bentuk grafik ditunjukkan pada Gambar 3.

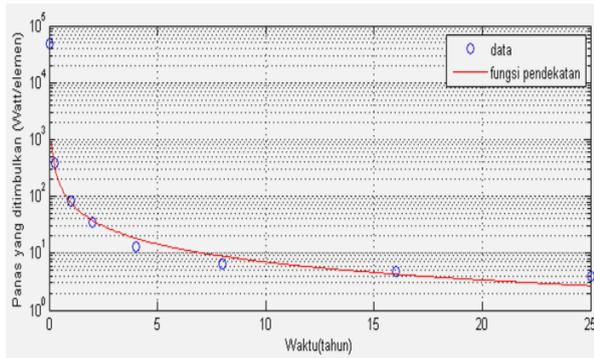
Tabel 1. Panas yang Ditimbulkan BBNB (MTR 300 G U 235, 72% Burn Up) Sebagai Fungsi Waktu Saat Keluar Reactor^[1]

| Waktu Pendinginan | Panas yang Ditimbulkan BBNB (Watt/elemen) |
|-------------------|---|
| 0 hari | 4,759E4 |
| 100 hari | 3,772E2 |
| 1 tahun | 8,262E1 |
| 2 tahun | 3,475E1 |
| 4 tahun | 1,273E1 |
| 8 tahun | 6,485E0 |
| 16 tahun | 4,819E0 |
| 25 tahun | 3,877E0 |



Gambar 3. Grafik Hubungan Panas BBNB Terhadap Waktu Pendinginan

Berdasarkan grafik di atas, didapatkan persamaan hubungan panas peluruhan BBNB terhadap waktu peluruhan dengan membuat grafik fungsi pendekatan *polynomial* orde 1 yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Fungsi Pendekatan Hubungan Panas BBNB Terhadap Waktu Pendinginan

Fungsi persamaan model matematis yang mendekati adalah:

$$Y = 78,0369 \cdot X^{-1,0462} \quad (1)$$

Dimana x adalah waktu (tahun), dan y adalah panas yang ditimbulkan BBNB (Watt/element).

Perhitungan jumlah panas total kapasitas IPSB3 245 BBNB dalam fungsi waktu dan panas peluruhannya selama 10 tahun operasi RSG-GAS menggunakan persamaan:

$$Q_P = 6 [f(2/4) + f(3/4) + f(4/4) + f(5/4) + \dots + f(10)] \quad (2)$$

Dari persamaan (1) dan (2), panas peluruhan 245 BBNB adalah 42,10 Watt/Element dan total panas peluruhan 6 kW. Sedangkan pada kapasitas penuh 1445 BBNB panas peluruhan sebesar 6,46 Watt/Element dan total panas peluruhan 8,9 kW. Hasil analisis hubungan total panas yang diterima air terhadap jumlah BBNB ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Hubungan Total Panas yang Diterima Air Terhadap Jumlah BBNB

Panas yang diterima air kolam IPSB3 sama besarnya dengan panas yang ditimbulkan BBNB. Berdasarkan diagram di atas, semakin banyak jumlah BBNB yang disimpan, maka panas yang diterima oleh air kolam akan semakin meningkat.

3.2. Perpindahan Panas BBNB dalam Kolam IPSB3

Kolam IPSB3 memiliki ukuran 14 m x 5 m, dan tinggi permukaan air 6,5 m. Sehingga luas permukaan kolam 70 m² dengan volume air 455 m³, dan massa air dalam kolam 455.000 kg atau 1.003.086,42 lb. Perpindahan panas yang terjadi di kolam IPSB3, yaitu:

1. Panas bahan bakar yang diterima air kolam (Q) sebesar 6 kw atau 20.472 Btu/jam.
2. Perpindahan panas radiasi (Q_R) dari permukaan air ke udara dalam ruangan sebesar 14.715,42 Btu/jam dengan suhu air kolam 35 °C dan suhu udara 25 °C.
3. Perpindahan panas konveksi (Q_C) dari permukaan air (sebagai bidang permukaan panas) ke udara di atas kolam sebesar 1.454,22 Btu/jam dengan koefisien transfer panas konveksi 0,193 Btu/(jam.ft².K) dan tebal fluida dimana transfer panas konveksi efektif 1m.
4. Jumlah panas yang ditransfer dari permukaan air ke udara (Q_T) sebesar 16.169,64 Btu/jam. Pada saat sistem pendingin air kolam berfungsi, suhu air menunjukkan 35 °C. Dianggap sebagian panas dari air diambil oleh udara melalui transfer panas radiasi dan konveksi.
5. Panas yang terakumulasi dalam air (Q_A) sebesar 4.302,36 Btu/jam
6. Kebutuhan air pendingin untuk mempertahankan suhu air kolam tetap pada 35 °C pada saat sistem pendingin dan vac beroperasi sebesar 0,181 m³/jam \approx 0,2 m³/jam.

Panas yang terakumulasi dalam air kolam sebesar 4.302,36 Btu/jam diambil oleh air pendingin yang suhu awal dan akhirnya berturut-turut 17 °C (62,6 °F) dan 23 °C (73,4 °F) dimana ΔT adalah (23 – 17) °C.

7. Kenaikan suhu air kolam pada kondisi sistem pendingin air tidak beroperasi dan sistem VAC beroperasi, suhu air kolam setelah 1 hari sistem pendingin mati menjadi 35,057 °C, sehingga kenaikan suhu air kolam sebesar 0,057 °C per hari

8. Kebutuhan air pendingin untuk mempertahankan suhu air kolam konstan 35 °C pada kondisi VAC tidak beroperasi sebesar 1 m³/jam.

9. Keadaan *Steady State* suhu air kolam
Suhu air kolam yang semula dipertahan konstan 35 °C oleh sistem pendingin, setelah sistem pendingin tidak berfungsi maka temperatur air kolam akan naik 0,057 °C per hari dari saat matinya sistem pendingin. Kenaikan tersebut akan berhenti pada saat panas yang diterima air dari bahan bakar hanya untuk menguapkan sejumlah air. Untuk menghindari adanya kenaikan suhu air agar jumlah air dalam kolam tetap, maka diperlukan penambahan sejumlah air seperti jumlah yang menguap sebesar 4,292 lb/jam ≈ 4,3 lb/jam ≈ 2 kg/jam ≈ 2 liter/jam.

Asumsi diambil temperatur abnormal 67 °C sebagai suhu kesetimbangan^[4]. Suhu abnormal tersebut dicapai dari saat sistem pendingin tidak beroperasi selama 560 hari.

Berdasarkan referensi *Table. Thermodynamic Properties of Steam*^[3], uap air pada suhu 67°C (153 °F) diperoleh: λ = 1.008 Btu/lb.

10. Waktu yang diperlukan untuk kenaikan udara dari 25 °C menjadi 35 °C pada kondisi sistem pendingin dan VAC tidak beroperasi selama 2 jam 11 menit.

Pada kondisi ini, sistem pendingin dan VAC tidak berfungsi pada waktu yang bersamaan, pada kondisi ini (t = 0) suhu air = 35 °C (95 °F = 555 °R) dan suhu udara 25 °C (77 °F = 537 °R).

Pada saat t = 0 tersebut, transfer panas dari air ke udara berlangsung secara radiasi. Volume udara sama dengan volume ruangan seluas 2.640 m³ atau 93.244,8 ft³

Berdasarkan referensi *Table. Densities of Gasses at Standard Conditions*^[5] diperoleh data: ρ udara 0,074 lb/ft³ dan C_p udara 0,25 Btu/lb.°F

11. Kenaikan suhu air kolam pada saat sistem pendingin dan VAC tidak beroperasi.

Dalam hal ini tidak ada perpindahan panas ke udara secara radiasi. Pada kondisi sistem pendingin air dan VAC tidak berfungsi, panas dari bahan bakar dalam air akan menaikkan suhu air. Dianggap panas total yang diterima air berharga konstan sebesar 6 kW atau 20.472 Btu/jam.

Setelah 2 jam sistem pendingin dan VAC tidak berfungsi, suhu air menjadi 35,023 °C.

Setelah 1 hari sistem pendingin dan VAC tidak berfungsi, suhu air menjadi 35,272 °C

Sehingga, Kenaikan suhu air kolam sebesar 0,25 °C per hari.

Dengan kenaikan suhu 0,25 °C per hari, Suhu abnormal 67 °C dicapai dari saat sistem pendingin dan VAC tidak beroperasi selama 128 hari.

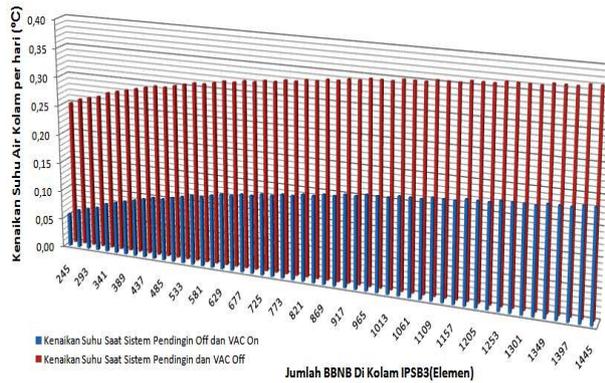
3.3. Keselamatan Operasi IPSB3

3.3.1. Keselamatan Panas Peluruhan BBNB

BBNB yang disimpan di dalam kolam akan mengalami panas peluruhan. Sesuai dengan penelitian Salimin (1995)^[6], panas peluruhan apabila tidak diatur atau dibiarkan akan menimbulkan:

1. Kenaikan suhu air kolam yang dapat menyebabkan kerusakan kelongsong atau plat bahan bakar bekas dan menyebabkan terlepasnya unsur radioaktif serta bahan bakar sehingga timbul resiko penyebaran kontaminasi.
2. Penguapan air kolam sehingga menyebabkan volume air berkurang.
3. Kenaikan suhu udara, sehingga kelembaban udara dalam ruangan mencapai kondisi kelembaban jenuh dan dapat menimbulkan kenaikan korosivitas terhadap bahan elektrik dan mekanik.

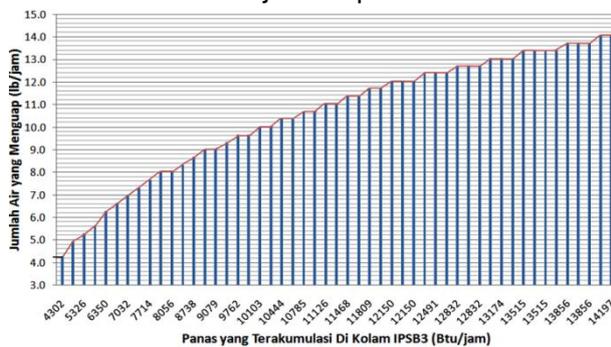
Pada kondisi 245 BBNB terdapat kondisi dimana terjadi kenaikan suhu air kolam pada saat sistem pendingin air tidak beroperasi dan VAC beroperasi menjadi 0,057 °C per hari, dan kondisi pada saat sistem pendingin dan VAC tidak beroperasi menjadi 0,25 °C per hari. Hasil analisis hubungan kenaikan suhu air kolam dengan perbedaan kondisi sistem pendingin dan VAC terhadap jumlah BBNB di IPSB3 ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram Hubungan Kenaikan Suhu Air Dengan Perbedaan Kondisi Sistem Pendingin dan VAC Terhadap Jumlah BBNB Di IPSB3

Berdasarkan diagram di atas, menunjukkan bahwa tingginya kenaikan suhu air kolam akibat panas peluruhan dan panas yang diterima air kolam dipengaruhi oleh banyaknya jumlah BBNB yang terdapat di kolam IPSB3 dan kondisi operasi sistem pendingin dan VAC.

Untuk menghindari adanya kenaikan suhu air agar jumlah air dalam kolam tetap, maka diperlukan penambahan sejumlah air seperti jumlah yang menguap 4,3 lb/jam. Hasil analisis hubungan sejumlah air yang menguap terhadap panas yang terakumulasi ditunjukkan pada Gambar 7.



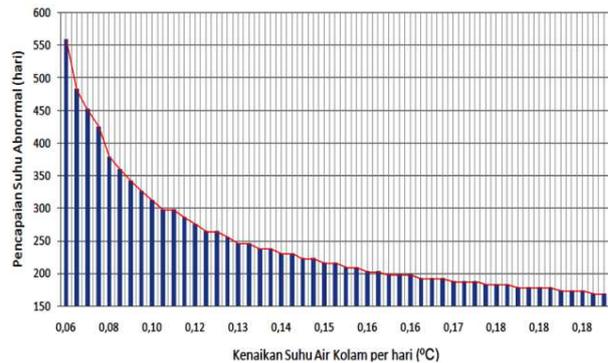
Gambar 7. Diagram Hubungan Sejumlah Air yang Menguap Terhadap Panas yang Terakumulasi Di Kolam IPSB3

Kenaikan suhu akan berhenti pada saat panas yang diterima air dari bahan bakar hanya untuk menguapkan sejumlah air. Berdasarkan diagram di atas, menunjukkan bahwa banyaknya jumlah air yang menguap dipengaruhi oleh panas yang terakumulasi di kolam IPSB3.

Kerusakan kelongsong aman dari kenaikan suhu apabila pencapaian suhu abnormal dapat dihindari atau dipenuhi. Hasil analisis hubungan pencapaian suhu abnormal terhadap kenaikan suhu pada

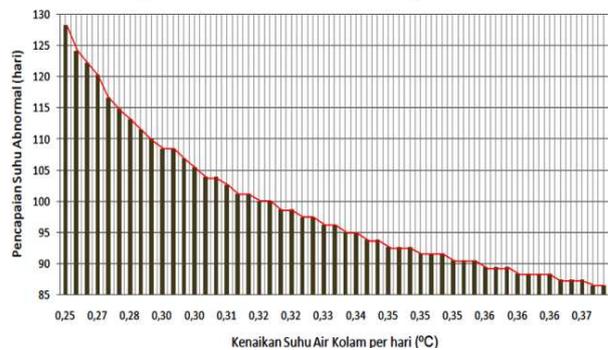
kondisi operasi yang berbeda ditunjukkan pada gambar 8 dan 9.

Pencapaian Suhu Abnormal Saat Kondisi Pendingin Off dan VAC On



Gambar 8. Diagram Hubungan Pencapaian Suhu Abnormal Terhadap Kenaikan Suhu Air Saat Sistem Pendingin Off dan VAC On

Pencapaian Suhu Abnormal Saat Kondisi Pendingin dan VAC Off



Gambar 9. Diagram Hubungan Pencapaian Suhu Abnormal Terhadap Kenaikan Suhu Air Saat Sistem Pendingin dan VAC Off

Berdasarkan diagram di atas, menunjukkan bahwa kenaikan suhu yang semakin tinggi dapat mempengaruhi cepatnya waktu pencapaian batas suhu abnormal 67 °C. Kenaikan suhu tersebut dipengaruhi oleh kondisi operasi sistem pendingin dan VAC.

3.3.2. Keselamatan Papan Radiasi di Lingkungan Kerja

Menurut *International Commission on Radiological Protection (ICRP) publication 60 (1990)*^[7], Nilai Batas Dosis (NBD) melakukan pekerjaan secara terus menerus dengan dosis 10 μ Sv/jam (bekerja 2000 jam/tahun), batas dosis radiasi adalah 20 mSv/tahun.

Menurut Perka BAPETEN No. 6 tahun 2009^[8], hasil pengukuran aktivitas paparan radiasi yang ditimbulkan oleh BBNB di lokasi KH-IPSB3 masih dibawah ambang batas yang diizinkan. Nilai paparan radiasi di lokasi KH-IPSB3 pada bulan Juli 2012 ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Paparan Radiasi KH-IPSB3

| No | Zona | Daerah Pengukuran | Paparan Radiasi ($\mu\text{Sv/jam}$) |
|----|------|---------------------|--|
| 1 | I | Lobi | 0,14 |
| 2 | II | Ruang Kendali Utama | 0,18 |
| 3 | III | Koridor Depan Pintu | 0,20 |
| 4 | III | Koridor Kiri Kolam | 0,22 |
| 5 | III | Koridor Kanan Kolam | 0,19 |
| 6 | III | Ruang Purifikasi | 0,47 |
| 7 | III | Kanal ke Kolam | 0,20 |
| 8 | III | Kanal ke RSG | 0,77 |
| 9 | III | Kanal ke IRP | 0,22 |
| 10 | III | Kanal ke IRM | 0,25 |

Sehingga, dapat dipastikan aspek keselamatan operasi yang ditinjau dari batas paparan radiasi di daerah kerja KH-IPSB3 masih cukup aman untuk para pekerja dan lingkungan sekitarnya.

3.3.3. Keselamatan Kontaminasi Permukaan dan Udara

Nilai kontaminasi permukaan dan udara di dalam IPSB3 dalam keadaan abnormal (sistem pendingin dan VAC tidak beroperasi) dapat dikategorikan rendah dan secara langsung tidak berpengaruh pada keselamatan. Nilai kontaminasi permukaan dan udara pada bulan Juni 2012 ditampilkan pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 3. Nilai Kontaminasi Permukaan Di Lokasi KH-IPSB3

| No | Zona | Ruang | Kontaminasi Permukaan (Bq/cm^2) | |
|----|------|---------------------|--|----------------|
| | | | α | β/γ |
| 1 | I | Lobi | 0.00 | 0.01 |
| 2 | II | Ruang Ganti | 0.00 | 0.00 |
| 3 | II | Ruang Kendali Utama | 0.00 | 0.01 |
| 4 | III | Koridor Depan Kolam | 0.00 | 0.02 |
| 5 | III | Koridor Kiri Kolam | 0.00 | 0.01 |
| 6 | III | Koridor Kanan Kolam | 0.00 | 0.01 |
| 7 | III | Kanal ke Kolam | 0.00 | 0.01 |
| 8 | III | Kanal ke PRR | 0.00 | 0.02 |
| 9 | III | Kanal ke RSG | 0.00 | 0.02 |
| 10 | III | Purifikasi | 0.00 | 0.01 |

Berdasarkan Perka BAPETEN No 1 tahun 1999^[9] nilai kontaminasi tersebut masih di bawah standar batas tingkat daerah kontaminasi rendah.

Tabel 4. Nilai Kontaminasi Udara Di Lokasi KH-IPSB3

| No | Zona | Ruang | Kontaminasi Udara (Bq/m^3) | |
|----|------|---------------------|---------------------------------------|----------------|
| | | | α | β/γ |
| 1 | I | Lobi | 0.00 | 0.14 |
| 2 | II | Laboratorium | 0.00 | 0.23 |
| 3 | II | Ruang Kendali Utama | 0.00 | 0.10 |
| 4 | III | Kolam IPSB3 | 0.00 | 0.09 |
| 5 | III | Kanal Hubung | 0.00 | 0.05 |
| 6 | III | Purifikasi | 0.00 | 0.00 |
| 7 | | Stack IPSB3 | 0.00 | 0.09 |

Batas tingkat kontaminasi udara, yaitu untuk nilai alpha sebesar $0,74 \text{ Bq/m}^3$ dan beta sebesar $7,4 \text{ Bq/m}^3$. Sehingga dapat dipastikan hasil pengukuran kontaminasi udara di daerah kerja KH-IPSB3 aman bagi pekerja dan lingkungan.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan hasil penelitian, yaitu:

- Persamaan model matematis untuk menghitung panas BBNB di IPSB3 adalah $Y = 78,0369 \cdot X^{-1,0462}$.
- Pengoperasian normal RSG-GAS dengan 4 siklus penggantian BBNB per tahun dan 6 elemen BBNB per siklus, IPSB3 dapat dioperasikan 60 tahun. Keadaan operasi IPSB3 dengan 245 BBNB adalah:
 - Diperlukan debit air pendingin $0,181 \text{ m}^3/\text{jam}$ untuk mempertahankan suhu air kolam $35 \text{ }^\circ\text{C}$.
 - Suhu udara mengalami kenaikan dari $25 \text{ }^\circ\text{C}$ menjadi $35 \text{ }^\circ\text{C}$ pada kondisi sistem pendingin beroperasi dan VAC tidak beroperasi. Sehingga diperlukan debit pendingin primer $1 \text{ m}^3/\text{jam}$ untuk mempertahankan suhu air kolam $35 \text{ }^\circ\text{C}$.
 - Suhu air kolam mengalami kenaikan $0,057 \text{ }^\circ\text{C}$ pada kondisi sistem pendingin tidak beroperasi dan VAC beroperasi.
 - Diperlukan penambahan air sesuai dengan jumlah air yang menguap sebanyak $4,3 \text{ lb/jam} \approx 2 \text{ liter/jam}$ pada kondisi *steady state* saat sistem

- pendingin tidak beroperasi selama 560 hari, suhu air kolam abnormal 67 °C sebagai suhu kesetimbangan.
- e. Suhu air kolam mengalami kenaikan 0,25 °C pada kondisi sistem pendingin dan VAC tidak beroperasi, dan mencapai suhu abnormal 67 °C selama 128 hari.
3. Aspek Keselamatan operasi IPSB3 adalah:
 - a. Panas peluruhan BBNB aman dari kerusakan kelongsong karena pengaruh suhu.
 - b. Batas paparan radiasi terhadap lingkungan kerja di daerah KH-IPSB3 aman untuk para pekerja dan lingkungan sekitarnya.
 - c. Batas kontaminasi permukaan dan udara di daerah KH-IPSB3 masih dibawah katagori daerah kontaminasi rendah.

06/KaBAPETEN/V-09 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Penggunaan Zat Radioaktif dan Pesawat Sinar-X Untuk Peralatan Gauging. Jakarta: BAPETEN.

9. BAPETEN. 1999. *Surat Keputusan Kepala BAPETEN Nomor 01/KaBAPETEN/V99 tentang Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi*. Jakarta: BAPETEN.

DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA Engineering Contract. 1992. *Transfer Channel and ISSF for BATAN, Preliminary Design Package*. November.
2. Rahayu, Dyah Sulistyani. 2010. *Laporan Repatriasi Bahan Bakar Nuklir Bekas RSG-GAS*. BATAN. Serpong.
3. Kern, Donald Q. 1988. *Process Heat Transfer*. McGraw-Hill. Singapore.
4. Zdenek, Dlouhy. 1976. *Handling of Irradiated Fuel from Research Reactor*. Czechoslovakia Nuclear Research Institute. Czechoslovakia.
5. Perry, Robert H. 1984. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill. Singapore.
6. Salimin, Zainus. 1995. *Transfer Panas Bahan Bakar Bekas Dalam Sistem Penyimpanan Sementara Tipe Basah PPTA-Serpong*. Prosiding Seminar III Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir. BATAN.
7. ICRP (*International Commission on Radiological Protection*). 1990. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60*. Oxford and Now York: Pergammon Press.
8. BAPETEN. 2009. *Surat Keputusan Kepala BAPETEN Nomor*