

TINJAUAN KESELAMATAN OPERASI REAKTOR TERHADAP KINERJA MENARA PENDINGIN SETELAH 30 TAHUN BEROPERASI

REVIEW OF REACTOR OPERATION SAFETY ON PERFORMANCE OF COOLING TOWER AFTER 30 YEARS OPERATION

Abdul Aziz Rohman Hakim¹, Sutrisno², Dicky Tri Jatmiko³
^{1,2,3}PRSG-BATAN, Kawasan Puspiptek Gd.30, Serpong, 15310
E-mail : hakim@batan.go.id

Diterima: 22 April 2019, diperbaiki : 9 Mei 2019, disetujui : 9 Mei 2019

ABSTRAK

TINJAUAN KESELAMATAN OPERASI REAKTOR TERHADAP KINERJA MENARA PENDINGIN SETELAH 30 TAHUN BEROPERASI. Salah satu komponen penting dari sistem pendingin reaktor adalah menara pendingin. Menara pendingin RSG-GAS telah dioperasikan selama lebih dari 30 tahun. Telah dilakukan kajian kinerja menara pendingin pada operasi daya nominal 30 MW ditinjau dari keselamatan operasi reaktor. Kajian dilakukan untuk mengetahui kinerja menara pendingin dalam membuang panas ke lingkungan. Parameter penilaian kinerja menara pendingin yang dipakai meliputi range, approach, efektifitas, dan temperatur pendingin masuk teras reaktor. Dari kajian data operasi tahun 1992, diperoleh nilai range sebesar 7,2 °C, nilai approach sebesar 8,0 °C, nilai efektifitas sebesar 47,37%, dan nilai temperatur pendingin masuk teras sebesar 40,0 °C. Dari kajian data tahun 2018, diperoleh nilai range sebesar 6,7 °C, nilai approach sebesar 9,3 °C, nilai efektifitas sebesar 41,84%, dan nilai temperatur pendingin masuk teras sebesar 41,96 °C. Nilai temperatur pendingin masuk teras data tahun 1992 masih di bawah batas pengaktifan sistem proteksi reaktor, sedangkan nilai temperatur pendingin masuk teras data tahun 2018 mendekati batas pengaktifan sistem proteksi reaktor yaitu 42 °C. Dapat disimpulkan bahwa kinerja menara pendingin setelah 30 tahun dioperasikan sudah tidak dapat memenuhi kriteria keselamatan operasi reaktor.

Kata kunci: kinerja, menara pendingin, temperatur, keselamatan operasi.

ABSTRACT

REVIEW OF REACTOR OPERATION SAFETY ON PERFORMANCE OF COOLING TOWER AFTER 30 YEARS OPERATION. One important component of the reactor coolant system is the cooling tower. The RSG-GAS cooling tower has been operated for more than 30 years. The study of the performance of cooling towers has been carried out at a nominal power operation of 30 MW in terms of the safety of reactor operations. The study was conducted to determine the performance of cooling towers in removing heat into the environment. Parameters for evaluating the performance of cooling towers used include the range, approach, effectiveness, efficiency and coolant temperature entering the reactor core. From a 1992 operational data study, a range value of 7,2 °C was obtained, the approach value of 8,0 °C, the effectiveness value of 47.37%, and the temperature of the cooling inlet temperature was 40.0 °C. From a 2018 operational data study, the range value of 6.7 °C was obtained, the approach value of 9.3 °C, the effectiveness value of 41.84%, and the cooling inlet temperature value was 41.96 °C. The value of the cooling temperature

entering the core in 1992 was below the reactor protection system activation limit, while the value of the cooling temperature entering the core in 2018 approached the reactor protection system activation limit. It can be concluded that the performance of cooling towers after 30 years operation cannot meet the safety criteria of reactor operations.

Keywords: performance, cooling tower, temperature, operation safety

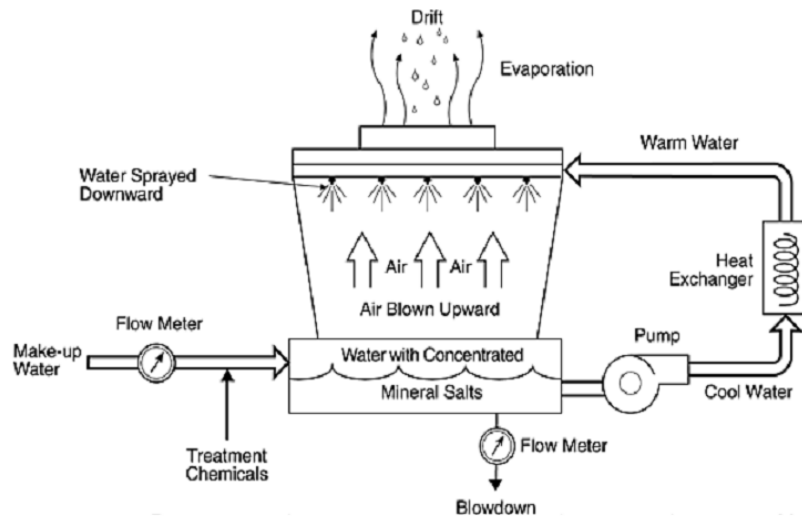
PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy RSG-GAS) adalah salah satu reaktor riset yang ada di Indonesia. RSG-GAS diresmikan pada tahun 1987. RSG-GAS merupakan reaktor non daya yang digunakan untuk penelitian, pelayanan iradiasi, pendidikan dan pelatihan. RSG-GAS memiliki daya nominal 30 MW termal. Instalasi RSG-GAS dilengkapi dengan sistem-sistem yang terdiri dari beberapa komponen penting pendukung operasi reaktor. Sistem-sistem tersebut meliputi sistem ventilasi, sistem proses 1 (sistem pendingin primer), sistem penampung limbah cair, sistem proses 2 (sistem pendingin sekunder), sistem kelistrikan, proteksi radiasi, sistem monitor gempa, sistem penggerak batang kendali, dan sistem proteksi reaktor. Salah satu komponen yang merupakan bagian dari sistem pendingin sekunder reaktor adalah menara pendingin (*Cooling Tower*) [1]. Menara pendingin RSG-GAS telah dioperasikan selama 30 tahun. Setelah beroperasi dalam waktu yang cukup lama tersebut, telah terjadi penurunan kemampuan pemindahan panas ke lingkungan oleh menara pendingin. Hal ini menyebabkan terjadi kekurangan pendinginan ketika RSG-GAS dioperasikan pada daya nominal 30 MW. Permasalahan yang terjadi pada menara pendingin RSG-GAS antara lain: kondisi fisik menara pendingin yang telah mengalami penuaan dan tuntutan ketersediaan kinerja menara pendingin yang dapat memindahkan panas pada

operasi daya nominal 30 MW. Dalam makalah ini diuraikan hasil kajian kinerja menara pendingin setelah 30 tahun dioperasikan. Kinerja menara pendingin dikaji dari data parameter temperatur pendingin yang masuk dan keluar dari teras, temperatur pendingin yang masuk dan keluar dari menara pendingin, serta kelembaban dan temperatur udara lingkungan. Data yang digunakan merupakan rekaman operasi 30 MW teras 6 pada tanggal 25 Maret 1992 dan teras 96 pada tanggal 15 Mei 2018. Dari data tersebut kemudian dihitung parameter kinerja menara pendingin dan dilakukan komparasi terhadap nilai desain menara pendingin. Kajian yang dilakukan bertujuan untuk memberikan informasi tentang kondisi terkini dari nilai parameter kinerja menara pendingin dan perubahannya terhadap nilai desain.

DASAR TEORI

Menara pendingin (*Cooling Tower*) adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk menurunkan temperatur air pendingin dengan memindahkan panas dari air pendingin ke udara lingkungan [2]. Fungsi dasar menara pendingin adalah mendinginkan air dengan cara kontak langsung antara air dengan udara. Proses pendinginan terjadi dengan cara kombinasi perpindahan panas sensibel antara air dan udara dan perpindahan panas laten yang terjadi melalui penguapan sejumlah kecil air [3]. Diagram skematik menara pendingin ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Skematik Sistem Menara Pendingin[2]

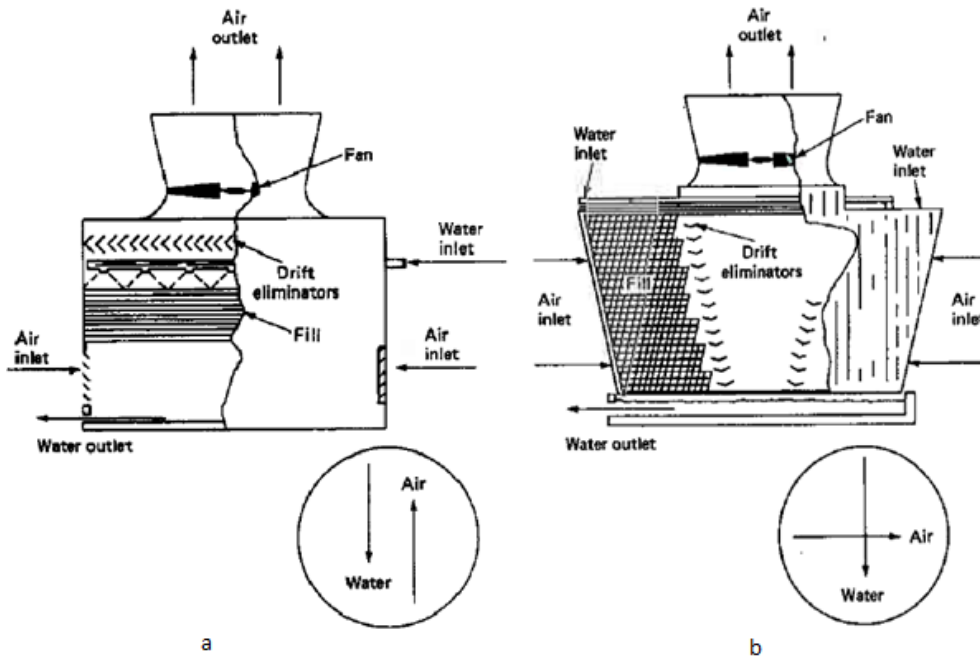
Terdapat dua tipe utama menara pendingin, yaitu *natural draft-atmospheric* dan *mechanical draft*. Menara pendingin tipe *natural draft* menggunakan cerobong beton yang sangat besar untuk mengalirkan udara. Tinggi menara pendingin tipe *natural draft* adalah 155 m dan diameter 122 m[4]. Karena ukurannya sangat besar, menara tipe ini umumnya digunakan pada laju aliran air lebih dari 45.000 m³/jam. Tipe ini hanya digunakan pada pembangkit listrik[5]. Aliran udara dalam menara disebabkan oleh perbedaan kerapatan yang terjadi antara udara yang dipanaskan (kerapatan rendah) pada sisi dalam cerobong dan udara lingkungan yang relatif dingin (kerapatan lebih tinggi) pada sisi luar menara. Menara tipe ini juga dikenal dengan *hyperbolic natural draft* [6].

Menara pendingin tipe *Mechanical draft* menggunakan kipas yang besar untuk mendorong atau menghisap udara melewati air yang disirkulasikan. Tinggi menara pendingin tipe *mechanical draft* bervariasi dari 2 meter sampai 12 meter. Komponen utamanya meliputi *shell*,

sistem distribusi air, kolam penampung air dan kipas untuk menciptakan artifisial draft [7]. Air jatuh sepanjang permukaan pengisi (*fill*), sehingga menambah waktu kontak antara air dan udara. Bertambahnya waktu kontak antara air dan udara dapat meningkatkan besaran perpindahan panas. Laju pendinginan tipe *mechanical draft* tergantung pada diameter kipas dan kecepatan operasinya. Karena ukurannya relatif kecil, maka menara tipe ini banyak digunakan pada pendinginan skala kecil atau industri non pembangkit listrik[5]. Menara tipe ini dapat menggunakan kipas tunggal maupun banyak untuk menyediakan aliran udara dengan jumlah volum yang diketahui melalui menara. Hal ini menjadikan menara tipe ini memiliki kinerja termal yang lebih stabil dan hanya dipengaruhi oleh sedikit variabel *psychrometric* dibanding menara tipe *atmospheric*. Keberadaan kipas juga menyediakan alat untuk mengendalikan aliran udara untuk mengkompensasi perubahan atmosfer dan kondisi beban dengan memanipulasi kapasitas kipas[6]. Menara tipe ini diklasifikasikan menjadi

dua yaitu: *force draft* (kipas dipasang di sisi masuk udara lingkungan) dan *induced draft* (kipas dipasang di sisi keluar udara lingkungan). Berdasarkan arah aliran air dan udara, menara pendingin dapat diklasifikasikan menjadi

counterflow cooling tower (berlawanan arah) dan *crossflow cooling tower* (bersilangan arah). Gambar menara pendingin *counterflow* dan *crossflow* ditunjukkan pada Gambar 2.

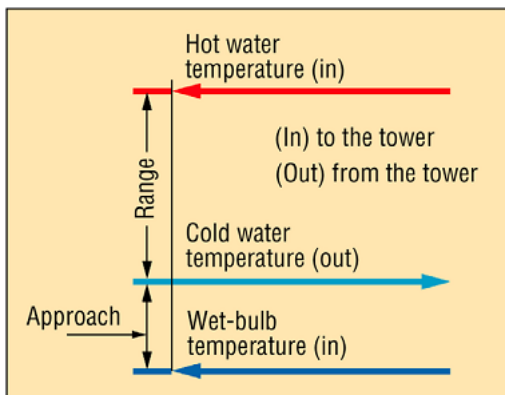


Gambar 2. Mechanical Draft Counterflow (a) and Crossflow Cooling Tower (b)[4]

Pengambilan panas oleh udara dalam menara pendingin tergantung pada temperatur dan kadar uap air di udara. Indikasi kadar air dalam udara adalah temperatur bola basah (*wet bulb temperature-WBT*). Idealnya, WBT adalah temperatur paling rendah dimana air dapat didinginkan. Kenyataannya, pendekatan temperatur air dingin (*cold water temperatur-CWT*) tidak sama dengan WBT udara karena tidak mungkin terjadi kontak antara air dan udara secara keseluruhan saat air jatuh melalui *fill* ke kolam penampung. Besarnya nilai pendekatan WBT tergantung pada desain menara pendingin. Faktor pentingnya adalah

lama waktu kontak udara dan air, jumlah luasan permukaan *fill* dan jumlah air yang menjadi tetesan[8]. Semakin kecil perbedaan antara WBT dan CWT maka kinerja menara pendingin semakin bagus.

Kinerja menara pendingin dievaluasi untuk menilai keadaan terakhir dari *range*, *approach*, dan *effectiveness* menara pendingin terhadap nilai desain. Skematik nilai *range* dan *approach* menara pendingin ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3. Range dan Approach Menara Pendingin[5]

Berikut ini beberapa parameter terukur yang dapat digunakan untuk menentukan kinerja menara pendingin[2]:

a. *Range*

Range adalah selisih antara temperatur air masuk menara pendingin dan temperatur air keluar menara pendingin. Nilai *range* yang tinggi menunjukkan bahwa menara pendingin dapat mengurangi temperatur air secara signifikan dan kinerjanya baik. Berikut rumusnya[9]:
 $Range(^{\circ}C) = T_2 (^{\circ}C) - T_1 (^{\circ}C)$

b. *Approach*

Approach adalah selisih antara temperatur air keluar dan temperatur bola basah udara luar (*wet bulb temperature-WBT*). Nilai *approach* yang lebih rendah menunjukkan kinerja menara pendingin yang lebih baik. Meskipun nilai *range* dan *approach* harus dipantau, nilai *approach* merupakan indikator yang

lebih baik untuk menunjukkan kinerja menara pendingin. Berikut rumusnya[9]:

$$Approach (^{\circ}C) = T_1 (^{\circ}C) - T_{wb} (^{\circ}C)$$

c. *Effectiveness*

Effectiveness adalah perbandingan antara *range* dan *range* ideal (dalam persen). *Range* ideal adalah selisih antara temperatur air masuk dan temperatur bola basah udara (WBT), Semakin tinggi perbandingan ini maka semakin tinggi *effectiveness* menara pendingin[10].

$$Effectiveness (\%) = \frac{Range}{(Range + Approach)} \times 100\%$$

METODOLOGI

Menara RSG-GAS merupakan menara pendingin *evaporatif* (penguapan) tipe *mechanical draft* (menggunakan kipas) jenis *induced draft* (tarikan paksa) dengan bahan pengisi jenis film yang didesain untuk daerah tropis. Air hangat disemprotkan di bagian atas menara melalui nosel distribusi dan mengalir ke bawah sepanjang *packing* (sarang (1) tawon), memindahkan panas ke udara yang melewatinya melalui penguapan sebagian air yang mengalir. Kehilangan air pendingin sekunder melalui proses penguapan dan pancaran digantikan dengan melakukan penambahan air pendingin (*make up water*)[1]. Data desain menara pendingin ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data Desain Menara Pendingin[1]

Kapasitas desain (diluar eksperimen)	33.000 kW
Jumlah unit paralel	2 × 50 %
Kapasitas per unit	16.500 kW
Jumlah modul paralel	3
Jumlah modul total (di luar modul eksperimen)	6
Kapasitas per modul	5.500 kW

Laju alir nominal per modul	650 m ³ /jam
Suhu air masuk	39,2 °C
Suhu air keluar	32 °C
Range	7,2 °C
Suhu Approach di bagian bawah menara	4 °C
Temperatur udara basah (<i>Wet Bulb</i>)	28 °C
Temperatur udara kering (<i>Dry Bulb</i>)	32 °C
Efektifitas (%) (hasil perhitungan)	64,29

Metode Kajian

1. Penelusuran dan pengamatan parameter temperatur pendingin yang masuk dan keluar dari teras, temperatur pendingin yang masuk dan keluar dari menara pendingin, serta kelembaban dan temperatur udara lingkungan. Data tersebut merupakan rekaman operasi 30 MW teras 6 pada tanggal 25 Maret 1992 dan teras 96 pada tanggal 15 Mei 2018.
2. Studi pustaka terhadap kajian menara pendingin yang pernah dilakukan
3. Perhitungan kinerja menara pendingin
4. Analisis hasil pengamatan, pengukuran dan hasil perhitungan
5. Mengambil kesimpulan

PEMBAHASAN

Pembelahan inti uranium pada bahan bakar di teras reaktor RSG-GAS menghasilkan neutron dan panas. Pada reaktor riset, panas yang dihasilkan dibuang ke lingkungan, sedangkan neutron digunakan untuk proses pembelahan berantai dan penelitian. Pembuangan panas dilakukan oleh sistem pemindah panas yang terdiri dari dua buah *loop*, yaitu sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Pemindahan panas dari sistem pendingin primer ke sistem pendingin sekunder terjadi di dalam penukar panas (*heat exchanger*). Pada sistem pendingin

sekunder, panas selanjutnya dibuang ke lingkungan melalui menara pendingin *evaporatif*. Menara pendingin merupakan bagian ujung dari sistem pemindah panas RSG-GAS yang membuang panas ke lingkungan. Diagram sistem pendingin RSG-GAS ditunjukkan pada Lampiran 1.

1. Kinerja menara pendingin

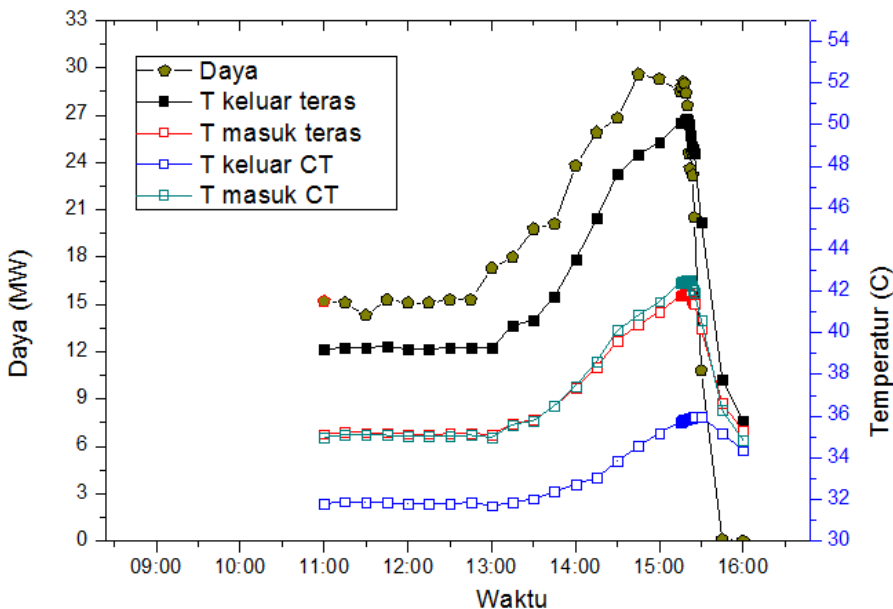
Operasi reaktor RSG-GAS pada daya 30 MW ditujukan untuk mengetahui kemampuan menara pendingin dalam membuang panas ke lingkungan. Operasi ini didahului dengan operasi rutin pada daya 15 MW dengan menggunakan empat buah menara pendingin selama lima hari. Setelah operasi rutin selama lima hari, kemudian dua blower menara pendingin lainnya dihidupkan sehingga enam blower menara pendingin beroperasi. Data operasi pada daya 15 MW dapat dilihat pada Tabel 2. Dari Tabel 2. dapat diketahui bahwa pada operasi daya yang sama, penambahan jumlah menara pendingin yang beroperasi pada sistem pendingin sekunder berpengaruh pada penurunan parameter temperatur baik pada sistem pendingin sekunder maupun pada sistem pendingin primer. Nilai selisih antara temperatur masuk dan temperatur keluar teras maupun menara pendingin tetap yaitu 4 °C. Hal ini terjadi karena besaran panas yang dipindahkan dari teras tetap 15 MW.

Tabel 2. Data operasi pada daya 15 MW

No	Menara Pendingin Beroperasi	Teras Reaktor			Menara Pendingin		
		T keluar °C	T masuk °C	Delta T °C	T keluar °C	T masuk °C	Delta T °C
1.	4	42	38	4	36	40	4
2.	6	39	35	4	32	36	4

Gambar 4. Menunjukkan hubungan antara daya dengan temperatur pendingin primer dan temperatur pendingin sekunder. Terdapat hubungan yang linier antara daya dengan temperatur pendingin primer dan temperatur pendingin sekunder. Pada rentang waktu jam 11.00 sampai jam 12.45, daya reaktor sekitar 15 MW, terlihat pada Gambar 4. bahwa

parameter-parameter tersebut berada pada rentang nilai yang tetap, yaitu: temperatur pendingin primer keluar teras sekitar 39,2 °C, temperatur pendingin primer masuk teras sekitar 35,2 °C, temperatur pendingin sekunder keluar menara pendingin sekitar 31,8 °C, temperatur pendingin sekunder masuk menara pendingin sekitar 35,02 °C



Gambar 4. Hubungan antara daya dengan temperatur pendingin

Pada jam 13.00 daya mulai dinaikkan menuju 30 MW, terlihat dari Gambar 4. bahwa ketika daya dinaikkan, temperatur pendingin primer dan sekunder tidak langsung naik seketika tetapi terdapat

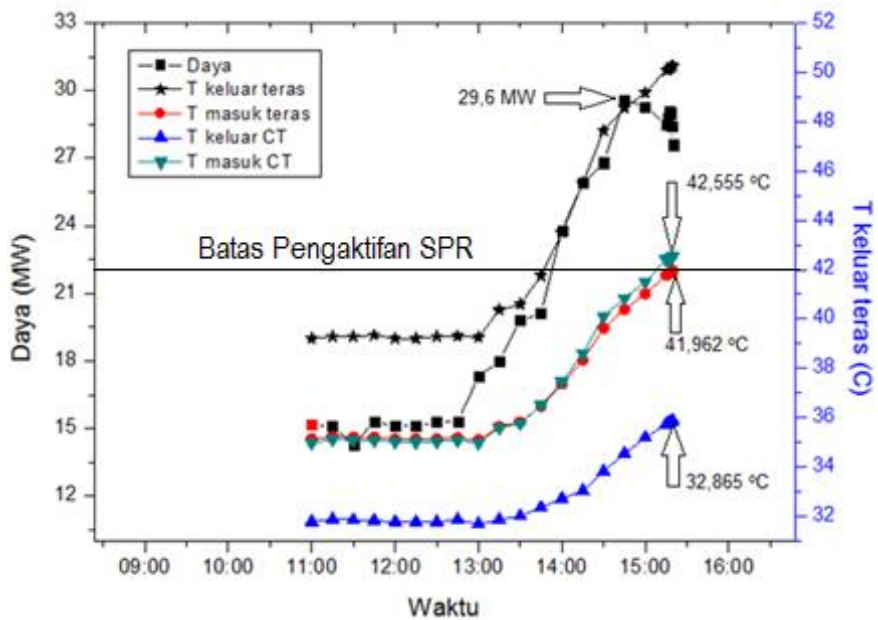
waktu respon kenaikan temperatur sekitar 15 menit. Demikian juga ketika daya diturunkan juga terdapat waktu respon penurunan temperatur sekitar 15 menit. Sehingga dapat dinyatakan

bahwa antara daya dengan temperatur pendingin primer dan temperatur pendingin sekunder memiliki hubungan yang linier.

Kinerja menara pendingin pada operasi daya 30 MW ditunjukkan oleh Gambar 5. Reaktor mencapai daya operasi 30 MW pada jam 14.45 dan dipertahankan pada daya tersebut selama 30 menit. Dalam rentang daya sekitar 30 MW, temperatur pendingin primer yang keluar dari teras naik dari 48,555 °C menjadi 50,245 °C pada menit ke 44 sebagai temperatur tertinggi. Sedangkan temperatur pendingin primer yang masuk ke teras naik dari 40,386 °C menjadi 41,962 °C pada menit ke 45 sebagai temperatur tertinggi. Temperatur pendingin sekunder yang masuk ke menara pendingin naik dari 40,845 °C menjadi 42,555 °C pada menit ke 45 sebagai temperatur tertinggi. Sedangkan temperatur pendingin sekunder yang keluar dari menara pendingin naik dari 34,555 °C menjadi 35,865 °C pada menit ke 45. Tren kenaikan temperatur tersebut masih akan berlangsung karena kondisi tunak pada pendingin primer dan sekunder belum tercapai. Bila reaktor terus dioperasikan pada daya nominal 30 MW dalam waktu yang lebih lama lagi untuk mencapai kondisi tunak, sedangkan kondisi tunak pada sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder akan tercapai setelah 4 sampai 5 jam operasi pada

daya yang konstan, maka temperatur pendingin yang masuk teras akan melebihi 42 °C. Hal ini berarti bahwa temperatur pendingin primer yang masuk ke teras telah melampaui batas pengaktifan sistem proteksi reaktor sehingga memerintahkan SCRAM (*safety control rod axe man*) reaktor. Kondisi ini menunjukkan bahwa kinerja menara pendingin telah mengalami penurunan bila dibandingkan dengan kondisi awal komisioning. Operasi enam buah menara pendingin sudah tidak mampu memindahkan panas ke lingkungan sampai kondisi tunak sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder tercapai. Variabel untuk tindakan proteksi otomatis sistem proteksi reaktor ditunjukkan pada Lampiran 4.

Parameter lingkungan saat operasi daya 30 MW yaitu: temperatur bola basah (*wet bulb temperature*) adalah 26,56 °C dan temperatur bola kering (*dry bulb temperature*) adalah 30,44 °C. Pada operasi daya nominal 30 MW, dalam keadaan belum tercapai keadaan tunak, beda temperatur antara temperatur air panas yang masuk ke menara pendingin dengan temperatur air dingin yang keluar dari menara pendingin (*Range*) adalah 6,69 °C. Sedangkan beda temperatur antara temperatur air dingin yang keluar dari menara pendingin dengan temperatur bola basah (*Approach*) adalah 9,3 °C.



Gambar 5. Kinerja menara pendingin pada operasi daya 30 MW

Nilai *range* menara pendingin mendekati nilai desain yaitu 7,2 °C. Hal ini terjadi karena penumpukan panas pada pendingin primer yang keluar dari teras. Temperatur pendingin primer yang keluar dari teras mencapai 50,245 °C sehingga perpindahan panas dari pendingin primer ke pendingin sekunder menyebabkan temperatur pendingin sekunder juga tinggi dan melampaui nilai desain. Meskipun nilai *range* menara pendingin mendekati nilai desain, tetapi nilai *approach*-nya sangat besar yaitu 9,3°C. Kinerja sebuah menara pendingin yang ideal dapat terjadi apabila temperatur pendingin yang keluar dari menara pendingin sama dengan temperatur *wet bulb*, atau sudah terjadi kesetimbangan panas antara air dan udara sehingga tidak terjadi perpindahan panas lagi. Keadaan ini merupakan keadaan ideal yang tidak akan pernah tercapai. Sehingga parameter *approach* lebih baik untuk dijadikan indikator kinerja menara pendingin daripada nilai *range*. Semakin

kecil nilai *approach* maka kinerja menara pendingin semakin baik, sebaliknya semakin besar nilai *approach* maka kinerja menara pendingin semakin jelek meskipun nilai *range*-nya besar. Kondisi ini terjadi saat operasi daya 30 MW dengan menara pendingin akibat beban pemindahan panas yang besar pada sistem pendingin primer.

1.2. Perhitungan kinerja menara pendingin

Menara pendingin RSG-GAS telah beroperasi selama 30 tahun lebih. Umur operasi yang sudah cukup lama ini menyebabkan kinerja yang semakin menurun. Penilaian kinerja menara pendingin dapat dinyatakan dalam beberapa parameter lain selain *range* dan *approach*, yaitu efektifitas. Perhitungan efektifitas menara pendingin dapat dilihat pada Lampiran 2 dan Lampiran 3.

Dari data operasi reaktor pada daya 30 MW pada tahun 1992, hasil perhitungan

menunjukkan bahwa efektifitas menara pendingin sebesar 47,37 %[11]. Dari data operasi reaktor pada daya 30 MW yang dilaksanakan pada 15 Mei 2018, hasil perhitungan menunjukkan bahwa efektifitas menara pendingin sebesar 41,84 %. Dari kedua hasil perhitungan tersebut dapat disimpulkan bahwa telah terjadi penurunan kinerja menara pendingin, ditinjau dari nilai efektifitas desain 64,29%. Perbandingan nilai parameter kinerja menara pendingin ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Nilai Parameter *Range, Approach* dan *Effectiveness*

Parameter	Desain	Tahun 1992	Tahun 2018
<i>Range</i>	7,2 °C	7,2 °C	6,7 °C
<i>Approach</i>	4,0 °C	8,0 °C	9,3 °C
<i>Effectiveness</i>	64,29%	47,37 %	41,84 %

1.3. valuasi Keselamatan

RSG-GAS didesain mampu beroperasi pada daya nominal 30 MW termal. Untuk menjamin keselamatan operasi pada daya nominal maka ditetapkan Batasan dan Kondisi Operasi (BKO) yang telah disetujui oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir. Secara prinsip batasan dan kondisi operasi merupakan dasar bagi pengoperasian reaktor yang selamat, sehingga yang diuraikan dalam BKO merupakan parameter operasi dan kondisi peralatan yang sangat berkaitan dengan usaha mempertahankan dasar keselamatan. Batasan dan Kondisi Operasi Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy hanya berlaku selama tahap operasi reaktor saja. Pemegang Izin akan melaksanakan operasi reaktor sesuai dengan BKO pada semua mode operasi reaktor[1].

Pada kajian ini, BKO yang menjadi fokus dan terkait langsung dengan penilaian kinerja menara pendingin adalah temperatur air primer yang masuk teras.

Pada operasi daya 30 MW tahun 1992, nilai terbesar temperatur pendingin primer yang masuk teras sebesar 40,00 °C, nilai tersebut masih di bawah batas pengaktifan sistem proteksi reaktor yaitu 42 °C. Pada operasi daya 30 MW yang dilaksanakan pada 15 Mei 2018, pada jam 15.20 WIB temperatur pendingin primer masuk teras sudah mencapai 41,96 °C, dan kondisi tunak belum tercapai. Nilai temperatur pendingin masuk teras sudah mendekati batas pengaktifan sistem proteksi reaktor yaitu 42 °C dan bahkan bisa lebih besar apabila reaktor terus dioperasikan pada daya 30 MW. Tetapi, sebelum batas pengaktifan sistem proteksi reaktor terlampaui, daya reaktor diturunkan menuju 0 MW dan reaktor di-shutdown. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengambilan panas oleh sistem pendingin sekunder tidak mampu lagi menjaga temperatur air sistem pendingin primer pada kondisi tunak tetap di bawah nilai BKO dan berpotensi melampaui batas pengaktifan sistem proteksi reaktor. Sehingga dapat dinyatakan bahwa kinerja menara pendingin tidak mampu lagi memenuhi kriteria keselamatan operasi RSG-GAS. Nilai temperatur pendingin masuk teras dalam hal kesesuaian dengan BKO dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Temperatur Pendingin Primer

Parameter	BKO	Tahun 1992	Tahun 2018
Temperatur Masuk Teras	42,00 °C	40,00 °C	41,96 °C

KESIMPULAN

Setelah dioperasikan lebih dari 30 tahun, kinerja menara pendingin sudah mengalami penurunan. Kinerja menara pendingin tidak mampu lagi memenuhi kriteria keselamatan operasi reaktor.

Pada operasi daya 30 MW termal, nilai *range* menara pendingin sebesar 6,7 °C mendekati nilai desain 7,2 °C tetapi parameter ini terpengaruh oleh beban pemindahan panas pada sistem pendingin primer sehingga tidak bisa dijadikan parameter kinerja menara pendingin. Nilai *approach* berubah dari nilai desain 4,0 °C menjadi 9,3 °C. Nilai *approach* yang berubah menjadi besar menunjukkan kinerja pemindahan panas yang semakin menurun. Nilai efektifitas pemindahan panas dari menara pendingin ke lingkungan menurun dari nilai desain 64,29% menjadi 41,84 %.

SARAN

Kinerja pemindahan panas menara pendingin harus dikembalikan seperti semula agar dapat memenuhi kriteria keselamatan operasi pada daya nominal 30 MW termal. Perlu dilakukan penggantian *fill* (sarang tawon) sebagai komponen utama terjadinya perpindahan panas dan mengganti motor blower sesuai dengan spesifikasi awal agar dapat memindahkan panas seperti semula. Struktur menara pendingin dan dudukan motor blower perlu dimodifikasi menyesuaikan dengan teknologi struktur terbaru.

DAFTAR LAMPIRAN

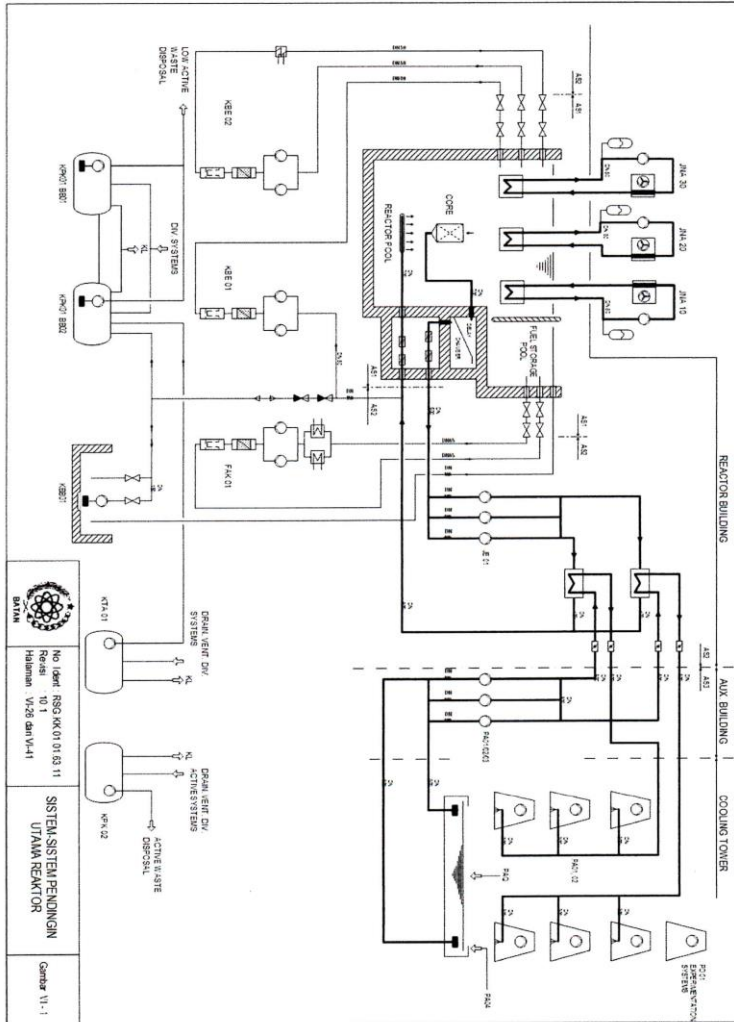
- Lampiran 1. Sistem Pendingin Reaktor Serba Guna G. A. Siwabessy
- Lampiran 2. Perhitungan Kinerja Menara Pendingin pada Operasi Daya 30 MW Tahun 1992
- Lampiran 3. Perhitungan Kinerja Menara Pendingin pada Operasi Daya 30 MW Sebelum Revitalisasi
- Lampiran 4. Variabel Untuk Tindakan Proteksi Otomatis Sistem Proteksi Reaktor

DAFTAR PUSTAKA

1. BATAN-PRSG, *Laporan Analisis Keselamatan (LAK)*. Safety Document, 2011. 10.1(2011): p. I-2,VI-11,XVII-1.
2. Fisenko, S., A. Brin, and A. Petruchik, *Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004. 47(1): p. 165-177.
3. Fisenko, S. and A. Brin, *Simulation of a cross-flow cooling tower performance*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007. 50(15): p. 3216-3223.
4. Fisenko, S. and A. Petruchik, *Toward to the control system of mechanical draft cooling tower of film type*. International journal of heat and mass transfer, 2005. 48(1): p. 31-35.
5. Milosavljevic, N. and P. Heikkilä, *A comprehensive approach to cooling tower design*. Applied Thermal Engineering, 2001. 21(9): p. 899-915.
6. Kloppers, J.C. and D.G. Kröger, *A critical investigation into the heat and mass transfer analysis of counterflow wet-cooling towers*. International journal of heat and mass transfer, 2005. 48(3): p. 765-777.
7. Dreyer, A.A. and P. Erens, *Modelling of cooling tower splash pack*. International journal of heat and mass transfer, 1996. 39(1): p. 109-123.
8. Klimanek, A. and R. Białecki, *Solution of heat and mass transfer in counterflow wet-cooling tower fills*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009. 36(6): p. 547-553.
9. Naphon, P., *Study on the heat transfer characteristics of an evaporative cooling tower*. International communications in heat

- and mass transfer, 2005. 32(8): p. 1066-1074.
- 10.Code, E.C.B., *Bureau of Energy Efficiency*. Ministry of Power, Government of India, 2007.
- 11.PRSG-BATAN, *Lembar Operasi Reaktor G. A. Siwabessy in Rekaman*, 1992.

Lampiran 1. Sistem Pendingin Reaktor Sarba Guna G. A. Sivabessy



Lampiran 2. Perhitungan Kinerja Menara Pendingin pada Operasi Daya 30 MW Tahun 1992

Tabel 1. Data Pengukuran Temperatur Pendingin Masuk dan Keluar teras dan Temperatur pendingin Masuk dan Keluar Menara Pendingin

Waktu	Daya Reaktor (MW)	Teras		Menara Pendingin	
		T keluar (°C)	T masuk (°C)	T air masuk (°C)	T air keluar (°C)
0:00	30	45	39	43	34
1:00	30	45	39	42	35
2:00	30	46	39	43	36
3:00	30	46	39	43	34
4:00	30	46	39	42	35
5:00	30	46	39	42	35
6:00	30	46	39	43	37
7:00	30	46	39	43	35
8:00	30	46	39	43	36
9:00	30	47	40	44	36
10:00	30	46	40	44	37
11:00	30	46	40	44	37
12:00	30	46	40	44	37
13:00	30	46	40	44	38
14:00	30	46	40	44	38
15:00	30	45	40	43	37
16:00	30	39	40	44	37
17:00	30	46	40	44	37
18:00	30	47	40	44	36
19:00	30	47	39,5	44	36
Rata-rata		45,6	39,6	43,4	36,2

Tabel 2. Data Parameter Lingkungan

No	Data	Nilai	Satuan
1	Temperatur <i>Dry Bulb</i>	36	°C
2	Temperatur <i>Wet Bulb</i>	28	°C
3	Tb1(udara masuk)	27,3	°C
4	Tb2(udara keluar)	40,5	°C

Tabel 3. Perhitungan Efisiensi Menara Pendingin

No	Data	Nilai	Satuan
1	Range	7,2	°C
2	Approach	8	°C
3	T rata-rata air	40	°C
	ρ air pada T rata-rata	993,6906	kg/m ³
	Laju air (Desain)	650	m ³ /jam
	L (laju air x ρ air)	645898,89	kg/jam
	L	179,42	kg/detik
4	T rata-rata udara	33,9	°C
	ρ udara pada T rata-rata	1,155	kg/m ³
	Laju udara (Pengukuran)	4925,6	m ³ /menit
	G (laju alir x ρ udara)	5689,068	kg/menit
	G	94,82	kg/detik
5	L/G	1,89	
6	Menara Pendingin dibagi menjadi 5 bagian		
	dT/n	1,6	°C
7	Keseimbangan energi pada bagian paling bawah		
	$d(h_{a,n} - h_{a,n-1}) = h_{a,1} - h_{a,0} = L/G \times 4,19 \times dT/n$		
	$h_{a,1} - h_{a,0} =$	12,69	kJ/kg

8	$h_{a,0} = h_a(TWB, TDB) =$ enthalpi udara masuk $h_{a,n} = h_{a,n-1} + L/G \times 4,19 \times dT/n$		$h_{a,rata-rata}$
	$h_{a,0} =$	89,19	kJ/kg
	$h_{a,1} = h_{a,0} + L/G \times 4,19 \times dT/n$	101,88	kJ/kg
	$h_{a,2} = h_{a,1} + L/G \times 4,19 \times dT/n$	114,56	kJ/kg
	$h_{a,3} = h_{a,2} + L/G \times 4,19 \times dT/n$	127,25	kJ/kg
	$h_{a,4} = h_{a,3} + L/G \times 4,19 \times dT/n$	139,93	kJ/kg
	$h_{a,5} = h_{a,4} + L/G \times 4,19 \times dT/n$	152,62	kJ/kg
			95,53272925
			108,2181877
			120,9036462
			133,5891047
			146,2745632

9		Enthalpi Udara Jenuh (hi,rata-rata)				
T air (°C)	T rata-rata (°C)	In Pws	Pws	Ws	hi,rata-rata	
T0	36,00					
T1	37,60	36,80	8,78	6489,30	0,04256	146,36
T2	39,20	38,40	8,86	7074,27	0,04668	158,70
T3	40,80	40,00	8,95	7704,25	0,05118	172,03
T4	42,40	41,60	9,03	8382,06	0,05609	186,45
T5	44,00	43,20	9,12	9110,67	0,06145	202,05

10	hi-ha	1/(hi-ha)
	(kJ/kg)	
	50,82	0,0197
	50,48	0,0198
	51,13	0,0196
	52,86	0,0189
	55,78	0,0179
Total		0,0959
$hc.A/Cpm = L \times 4,19 \times dT \times \sum 1/(hi-ha)$		
hc.A/Cpm (kg.d.a/kJ)		115,34

11	Kemampian menerima panas		
	$Q=hc.A/Cpm.(hi,n-ha,n)$	Nilai	Satuan
	Q1	5861,90	kW
	Q2	5822,43	kW
	Q3	5897,12	kW
	Q4	6096,68	kW
	Q5	6433,03	kW

12	Efektifitas (ASHRAE)	Nilai	Satuan
	$Efektifitas=range/(range+approach)$	47,37	%

Lampiran 3. Perhitungan Kinerja Menara Pendingin pada Operasi Daya 30 MW pada Tahun 2018

Tabel 1. Data Pengukuran Temperatur Pendingin Masuk dan Keluar teras dan Temperatur pendingin Masuk dan Keluar Menara Pendingin

Waktu	Daya Reaktor (MW)	Teras		Menara Pendingin	
		T Keluar (°C)	T Masuk (°C)	T Keluar (°C)	T Masuk (°C)
11.00	15,2	39,201	35,135	31,790	34,980
11.15	15,1	39,299	35,232	31,890	35,115
11.30	14,3	39,293	35,208	31,860	35,090
11.45	15,3	39,353	35,206	31,840	35,075
12.00	15,1	39,212	35,135	31,780	35,020
12.15	15,1	39,212	35,135	31,765	35,010
12.30	15,3	39,297	35,152	31,775	35,035
12.45	15,3	39,308	35,187	31,870	35,085
13.00	17,3	39,258	35,100	31,690	34,985
13.15	18,0	40,362	35,638	31,870	35,600
13.30	19,8	40,599	35,822	32,020	35,775
13.45	20,1	41,753	36,478	32,365	36,505
14.00	23,8	43,503	37,368	32,720	37,455
14.15	25,9	45,495	38,336	33,035	38,605
14.30	26,8	47,637	39,638	33,825	40,120
14.45	29,6	48,555	40,386	34,550	40,845
15.00	29,3	49,173	41,020	35,195	41,505
15.15	28,5	50,100	41,773	35,730	42,410
15.16	28,8	50,082	41,793	35,750	42,440
15.17	29,1	50,119	41,821	35,805	42,425
15.18	29,0	50,197	41,877	35,810	42,445
15.19	28,4	50,271	41,897	35,845	42,505
15.20	27,6	50,245	41,962	35,865	42,555
15.21	24,6	50,043	41,899	35,890	42,560
15.22	23,6	49,518	41,816	35,920	42,510
15.23	24,7	48,982	41,567	35,930	42,290
15.24	23,2	48,830	41,458	35,970	42,050
15.25	20,5	48,652	41,402	35,970	41,920

15.30	10,8	45,328	40,178	35,950	40,615
15.45	0,1	37,767	36,615	35,175	36,275
16.00	0,0	35,766	35,286	34,340	34,835

Tabel 2. Data Parameter Lingkungan

No	Data	Nilai	Satuan
1	Temperatur <i>Dry Bulb</i>	30,44	°C
2	Temperatur <i>Wet Bulb</i>	26,56	°C
3	Tb1(udara masuk)	30	°C
4	Tb2(udara keluar)	38	°C
6	Air masuk CT	42,55	°C
7	Air keluar CT	35,86	°C

Tabel 3. Perhitungan Efisiensi Menara Pendingin

No	Data	Nilai	Satuan
1	<i>Range</i>	6,69	°C
2	<i>Approach</i>	9,30	°C
3	T rata-rata air	39,21	°C
	ρ air pada T rata-rata	992,667	kg/m ³
	Laju air (Desain)	650	m ³ /jam
	L (laju air x ρ air)	645233,61	kg/jam
	L	179,23156	kg/detik
4	T rata-rata udara	34	°C
	ρ udara pada T rata-rata	1,15	kg/m ³
	Laju udara (Pengukuran)	5880,8196	m ³ /menit
	G (laju alir x ρ udara)	6759,9327	kg/menit
	G	98,0136	kg/detik
5	L/G	1,83	
6	Menara Pendingin dibagi menjadi 5 bagian		
	dT/n	1,338	°C
7	Keseimbangan energi pada bagian paling bawah		
	$d(h_{a,n} - h_{a,n-1}) = h_{a,1} - h_{a0} = L/G \times 4,19 \times dT/n$		
	$h_{a,1} - h_{a0} =$	10,25	kJ/kg

8	$ha,0=ha(TWB,TDB)=\text{enthalpi udara masuk}$ $ha,n=ha,n-1+L/G \times 4,19 \times dT/n$	Satuan	ha,rata-rata
	$ha,0=$	82,75	
	$ha,1=ha,0+L/G \times 4,19 \times dT/n$	93,00	87,88
	$ha,2=ha,1+L/G \times 4,19 \times dT/n$	103,25	98,13
	$ha,3=ha,2+L/G \times 4,19 \times dT/n$	113,51	108,38
	$ha,4=ha,3+L/G \times 4,19 \times dT/n$	123,76	118,63
	$ha,5=ha,4+L/G \times 4,19 \times dT/n$	134,01	128,88

9	Enthalpi Udara Jenuh ($hi,rata-rata$)						
	T air (°C)	T rata-rata (°C)	In Pws	Pws	Ws	$hi,rata-rata$	
	T0	35,86					
	T1	37,20	36,53	10,25	6349,08	0,04158	143,54
	T2	38,54	37,87	10,25	6826,20	0,04493	153,60
	T3	39,87	39,21	10,25	7334,00	0,04853	164,33
	T4	41,21	40,54	10,25	7874,10	0,05241	175,78
	T5	42,55	41,88	10,25	8448,17	0,05658	188,00

10	$hi-ha$	$1/(hi-ha)$
	(kJ/kg)	
	55,67	0,0180
	55,48	0,0180
	55,95	0,0179
	57,15	0,0175
	59,12	0,0169
	Total	0,0883
	$hc.A/Cpm = L \times 4,19 \times dT \times \Sigma 1/(hi-ha)$	
	$hc.A/Cpm$ (kg.d.a/kJ)	88,698

11	Kemampuan menerima panas		
	$Q=hc.A/Cpm.(h_i,n-h_a,n)$	Nilai	Satuan
	Q1	4937,510	kW
	Q2	4920,699	kW
	Q3	4963,048	kW
	Q4	5069,136	kW
	Q5	5243,956	kW

12	Efektifitas (ASHRAE)	Nilai	Satuan
	$Efektifitas=range/(range+approach)$	41,84	%

Lampiran 4. Variabel Untuk Tindakan Proteksi Omatis Sistem Proteksi Reaktor

Variabel Proses	Harga Batas	Waktu Tunda ¹	Gerbang Logika
Rapat fluks neutron rentang awal (batas bawah JK101)	$n\text{-Fluks} < 2 \text{ cps}^1)$	(tidak diperlukan)	Jumlah minimal kanal untuk mengaktifkan SPR
Rapat fluks neutron rentang awal (batas atas JK101)	$n\text{-Fluks} \geq 1 \times 10^5 \text{ cps}$	(tidak diperlukan)	1 dari 2
Rapat fluks neutron menengah pada koneksi alam (JK102)	$\text{Daya} \geq 1\%, 1 \times 10^4 \text{ A}$	(tidak diperlukan)	1 dari 2
Rapat fluks neutron menengah pada koneksi paksa (JK102, mulai merespon)	$\text{Daya} \leq 1 \times 10^7 \text{ A}$	(tidak diperlukan)	1 dari 2
Rapat fluks neutron menengah (JK102, merespon periode dari rentang menengah sampai rentang daya)	$T_{\text{periode}} \leq 15 \text{ detik}$	2435 milidetik ⁴⁾	1 dari 2
Rapat fluks neutron menengah pada koneksi paksa (JK102)	$\text{Daya} > 5\%, 5 \times 10^4 \text{ A}$	235 milidetik ⁴⁾	1 dari 2
Rapat fluks neutron rentang daya (JK103, take over on)	$P_N = 3\%$	(tidak diperlukan)	2 dari 3
Rapat fluks neutron rentang daya - $\Delta W/\Delta t$ (Negative Floating Limit Value)	$F_{\text{lim}} \text{ val.} = 0$	235 milidetik ⁴⁾	2 dari 3
Rapat fluks neutron rentang daya ***)	$S_{\text{az}} \geq 0,16$	235 milidetik ⁴⁾	2 dari 3 / 1 dari 4**)
N_{15} -koreksi kerapatan fluks neutron + $\Delta W/\Delta t$ (Positive Floating Limit Value)	$F_{\text{lim}} \text{ val.} = 0$	235 milidetik ⁴⁾	2 dari 3
N_{16} -koreksi kerapatan fluks neutron	$P_N \text{ corr.} \geq 109\%$	235 milidetik ⁴⁾	2 dari 3
Laju dosis γ pada sistem pendingin primer	$D_{\gamma} \geq 0,36 \text{ rad/jam}$	235 milidetik ⁴⁾	2 dari 3
Aliran massa di sistem primer	$M_{\text{np}} \leq 90\%$	330 milidetik ⁴⁾	2 dari 3
Suhu pada outlet pemindah panas	$T \geq 42 \text{ }^\circ\text{C}$	3310 milidetik ⁴⁾	2 dari 3
Tinggi air di kolam reaktor	$h < 12,25 \text{ m}$	497 milidetik ⁴⁾	2 dari 3
Tegangan di panel daya darurat	$U \leq 0,8 U_N$	3875 milidetik ⁴⁾	3 x 2 dari 3
Bukaan katup isolasi primer	$\theta \leq 86,5^\circ$	265 milidetik ⁴⁾	4 x 2 dari 3
Laju dosis γ pada sistem ventilasi kolam	$D_{\gamma} > 125 \text{ mR/jam}$	235 milidetik ⁴⁾	2 dari 3
Katup sirkulasi alam	$\Delta p \geq 0,60 \text{ bar}^*)$	(tidak diperlukan)	2 dari 3

- 1) berlaku untuk $K_{\text{eff}} = 0,99$.
- 2) *diff rate* dari generator ramp
- 3) perbedaan antara harga sebenarnya dan harga setting
- 4) ditunjukkan dengan penambahan 763-delay time dari masing-masing modul
- 5) Waktu dari membaca harga *trip* variabel proses ke waktu tindakan koreksi dimulai misal: reaktor scram, isolasi gedung

^{*)} harga batas ini telah disesuaikan dengan aliran massa sebenarnya

^{**)} 1 dari 4 berlaku hanya untuk detektor

^{***)} distribusi daya non-symmetric (S_{az})