

TINJAUAN KESELAMATAN OPERASI REAKTOR SERBA GUNA G. A. SIWABESSY SETELAH PENGGANTIAN MENARA PENDINGIN

Abdul Aziz Rohman Hakim¹, Sutrisno¹

¹PRSG – BATAN Kawasan Puspiptek Gd. 31 Serpong, 15310
email: hakim@batan.go.id

Diterima: 23 Maret 2020, diperbaiki : 1 April 2020, disetujui : 13 April 2020

ABSTRAK

TINJAUAN KESELAMATAN OPERASI REAKTOR SERBA GUNA G. A. SIWABESSY SETELAH PENGGANTIAN MENARA PENDINGIN. Operasi reaktor pada daya 30 MW yang dilakukan pada 15 Mei 2018 menunjukkan bahwa menara pendingin yang telah dioperasikan selama 30 tahun tidak mampu lagi memindahkan panas ke lingkungan sesuai dengan desain awal. Pada keadaan belum tunak, temperatur pendingin primer masuk teras mencapai 41,96 °C dan bila diteruskan dapat terjadi SCRAM karena telah melewati ketentuan batasan dan kondisi operasi (BKO) yaitu temperatur pendingin primer masuk teras lebih kecil dari 42 °C. Untuk memenuhi BKO maka dilakukan penggantian menara pendingin Reaktor RSG-GAS. Makalah ini menguraikan tentang pemenuhan aspek keselamatan operasi reaktor setelah penggantian menara pendingin dan pengukuran kinerja menara pendingin. Pada operasi daya 30 MW yang dilakukan pada 20 Desember 2018, dilakukan pengambilan data meliputi temperatur pendingin primer masuk dan keluar teras, temperatur pendingin sekunder masuk dan keluar menara pendingin, temperatur wet bulb dan temperatur dry bulb lingkungan, serta temperatur udara masuk dan keluar menara pendingin. Data tersebut digunakan untuk kajian keselamatan operasi reaktor dan perhitungan kinerja menara pendingin. Kinerja menara pendingin ditunjukkan dengan parameter range, approach, dan effectiveness. Nilai ketiga parameter tersebut secara berurutan untuk menara pendingin sebelum penggantian adalah 6,70 °C, 9,30 °C, dan 41,84 %. Nilai ketiga parameter tersebut secara berurutan untuk menara pendingin setelah penggantian adalah 7,02 °C, 4,93 °C, dan 59,15 %. Temperatur pendingin primer masuk teras pada kondisi belum tunak sebelum penggantian menara pendingin sebesar 41,96 °C dan nilai ini terus naik. Setelah penggantian menara pendingin, temperatur pendingin primer masuk teras pada kondisi tunak adalah 36 °C. Temperatur pendingin masuk teras setelah penggantian menara pendingin jauh di bawah nilai batas 42 °C. Dapat disimpulkan bahwa dengan penggantian menara pendingin, aspek keselamatan reaktor dapat terpenuhi dan menara pendingin mampu memindahkan panas ke lingkungan sesuai dengan desain awal.

Kata kunci : menara pendingin, range, approach, effectiveness, nilai batas

ABSTRACT

REVIEW OF SAFETY OPERATION AFTER REPLACEMENT OF RSG-GAS COOLING TOWER. The RSG-GAS cooling tower has been operating for 30 years. The reactor operation at 30 MW conducted on 15 May 2018 shows that the cooling tower is no longer able to transfer the heat to the environment in accordance with the initial design. In unsteady state, the temperature of the primary coolant entering the core reaches 41,96 °C. If operation continues, SCRAM can occur because it has passed the limit and condition of operation (LCO). The temperature of the primary coolant entering the core is must less than 42 °C. To meet the LCO, the RSG-GAS cooling tower was replaced. This paper describes the fulfillment the safety operation aspects after replacing the cooling tower and its performance. In the operation of 30 MW carried out on December 20 2018, data operation was collected. They were temperature of the primary coolant entering and exiting the core, temperature of the secondary centering and exiting the cooling

tower, the ambient wet bulb and dry bulb temperature and the temperature of the air entering and exiting the cooling tower. The data is used to study the safety operation of the reactor and calculation of the cooling tower performance. The cooling tower performance is indicated by the range, approach, and effectiveness. The three parameters values for the cooling tower before replacement are 6.70 °C, 9.30 °C and 41.84 %, respectively. The three parameters values for the cooling tower after replacement are 7.02 °C, 4.93 °C, and 59.15%, respectively. Before replacing the cooling tower, the temperature of the primary coolant entering the core in unsteady state is 41.96 °C and this value continues to rise. After replacing the cooling tower, the temperature of the primary coolant entering the core in steady state is 36.00 °C. It is far below the limit value of 42.00 °C. It can be concluded that by replacing the cooling tower, the safety aspect of the reactor can be met and the cooling tower is able to transfer the heat to the environment in accordance with the initial design.

Keywords: cooling tower, range, approach, effectiveness, limit value.

PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna G. A. Siwabessy (RSG-GAS) merupakan reaktor riset yang digunakan untuk penelitian, melayani kegiatan iradiasi, pendidikan dan pelatihan. Instalasi reaktor RSG-GAS dibangun dengan konsep reaktor kolam terbuka yang menggunakan air sebagai pendingin dan moderator serta menggunakan berilium sebagai reflektor. Instalasi reaktor RSG-GAS didesain dengan daya nominal 30 MW dan fluks neutron maksimum di *Central Irradiation Position* (CIP) sebesar $5,38 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}^{[1]}$.

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, sistem 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 dibuktikan dengan terjadinya kekurangan pendinginan ketika RSG-GAS dioperasikan pada daya nominal 30 MW. Data desain menara pendingin lama ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Desain Menara Pendingin Lama

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
Approach	4 °C
Temperatur <i>Wet Bulb</i>	28 °C
Temperatur <i>Dry Bulb</i>	32 °C
Efektifitas (perhitungan)	64,29 %

Pengujian kemampuan menara pendingin pada operasi reaktor daya 30 MW dilaksanakan pada 15 Mei 2018. Reaktor mencapai daya operasi 30 MW pada jam 14.45 WIB. Tabel 2. menunjukkan hasil pengukuran temperatur pendingin primer yang masuk dan keluar teras serta pendingin sekunder

yang masuk dan keluar menara pendingin.

Tabel 2. Hasil Pengujian Menara Pendingin Lama

Jam	Teras (°C)		Menara Pendingin (°C)	
	Tkeluar	Tmasuk	Tkeluar	Tmasuk
04:45	48.55	40.38	34.55	40.84
15:00	49.17	41.02	35.19	41.50
15:15	50.10	41.77	35.73	42.41
15:16	50.08	41.79	35.75	42.44
15:17	50.12	41.82	35.80	42.42
15:18	50.19	41.87	35.81	42.44
15:19	50.27	41.89	35.84	42.50
15:20	50.24	41.96	35.86	42.55

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 menurut pengalaman, 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^[2].

Dari hasil pengujian tersebut maka diputuskan dilakukan penggantian

terhadap tujuh *cell* menara pendingin RSG-GAS secara keseluruhan. Setelah dilakukan penggantian menara pendingin kemudian dilakukan uji kinerja menara pendingin pada operasi reaktor daya 30 MW. Pengujian dilakukan pada 20 Desember 2018 selama kurang lebih 5 jam. Makalah ini akan memaparkan hasil pengujian kinerja menara pendingin dan tinjauan terhadap pemenuhan aspek keselamatan operasi RSG-GAS.

TEORI

Prinsip kerja menara pendingin adalah menurunkan temperatur air pendingin dengan memindahkan panas dari media air ke media udara lingkungan.^[3] Perpindahan panas terjadi karena kontak langsung antara air dengan udara lingkungan. Proses perpindahan panas terjadi dengan cara perpindahan panas dari air ke udara (sensibel) dan penguapan sejumlah kecil volume air (laten)^[4]. Diperkirakan 80 persen perpindahan panas terjadi melalui penguapan (laten) dan 20 persen perpindahan panas sisanya terjadi melalui perpindahan panas sensibel^[5]. 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^[5]. Semakin kecil

perbedaan antara WBT dan CWT maka kinerja menara pendingin semakin bagus.

Berikut ini beberapa parameter terukur yang dapat digunakan untuk menentukan kinerja menara pendingin^[6]:

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^[6]. Berikut rumusnya:

$$Range(^{\circ}C) = T_2 (^{\circ}C) - T_1 (^{\circ}C) \quad (1)$$

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^[6]. Berikut rumusnya:

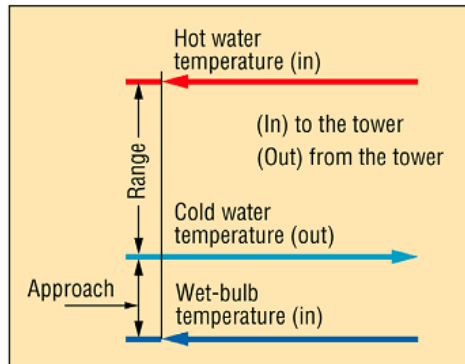
$$Approach (^{\circ}C) = T_1 (^{\circ}C) - T_{wb} (^{\circ}C) \quad (2)$$

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^[6].

$$Eff(\%) = \frac{Range}{(Range+Approach)} \times 100\% \dots (3)$$

Skematik nilai *range*, dan *approach* menara pendingin ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. *Range* dan *Approach* Menara Pendingin^[6]

Menara pendingin 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^[7]. Air hangat disemprotkan di bagian atas menara melalui nosel distribusi dan mengalir ke bawah sepanjang *fill* (sarang 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*)^[8]. Data desain menara pendingin ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Data Desain Menara Pendingin^[9]

Kapasitas per modul	5.500 kW
Laju alir nominal/modul	650 m ³ /jam
Temperatur air panas	39,2 °C
Temperatur air dingin	32 °C
Temperatur <i>dry bulb</i>	30,96 °C
Temperatur <i>wet bulb</i>	28 °C
<i>Range</i> pendinginan	7,2 °C

METODE

1. Pengamatan parameter pada operasi daya 30 MW^[10] :
 - a. Daya reaktor
 - b. Temperatur pendingin primer keluar teras
 - c. Temperatur pendingin primer masuk teras
 - d. Temperatur pendingin sekunder keluar menara pendingin
 - e. Temperatur pendingin sekunder masuk menara pendingin
 - f. Temperatur *dry bulb* dan *wet bulb*
 - g. Temperatur udara masuk ke menara pendingin
 - h. Temperatur udara keluar dari menara pendingin.
2. Perhitungan kinerja menara pendingin setelah revitalisasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Operasi reaktor RSG-GAS pada daya 30 MW yang dilaksanakan pada tanggal 20 Desember 2018 bertujuan untuk mengetahui kinerja menara pendingin baru dalam membuang panas ke lingkungan. Data pengukuran ditunjukkan pada Lampiran 1. Gambar 2. menunjukkan hubungan antara daya dengan temperatur pendingin primer dan temperatur pendingin sekunder setelah penggantian menara pendingin. Terdapat hubungan yang linier antara daya dengan temperatur pendingin primer dan temperatur pendingin sekunder. Pada jam 09.56 WIB operasi reaktor telah mencapai daya 30 MW^[11]. Meskipun daya dipertahankan pada nominal 30 MW, temperatur sistem pendingin primer yang masuk ke teras maupun yang keluar dari teras masih terus mengalami kenaikan, demikian juga temperatur sistem pendingin sekunder baik yang masuk ke menara pendingin maupun yang keluar dari menara pendingin juga masih mengalami kenaikan, hal ini menunjukkan

bahwa kondisi tunak belum tercapai. Kondisi tunak sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder pada daya 30 MW dicapai sekitar jam 11.30 WIB^[12]. Pada keadaan tunak 30 MW, temperatur pendingin primer yang keluar teras adalah 44 °C, temperatur pendingin primer yang masuk teras adalah 36 °C, sedangkan temperatur pendingin sekunder yang masuk ke menara pendingin sekitar 36,94 °C dan temperatur sistem pendingin sekunder yang keluar dari menara pendingin sekitar 29,86 °C. Hasil pengujian menara baru ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Menara Pendingin Baru

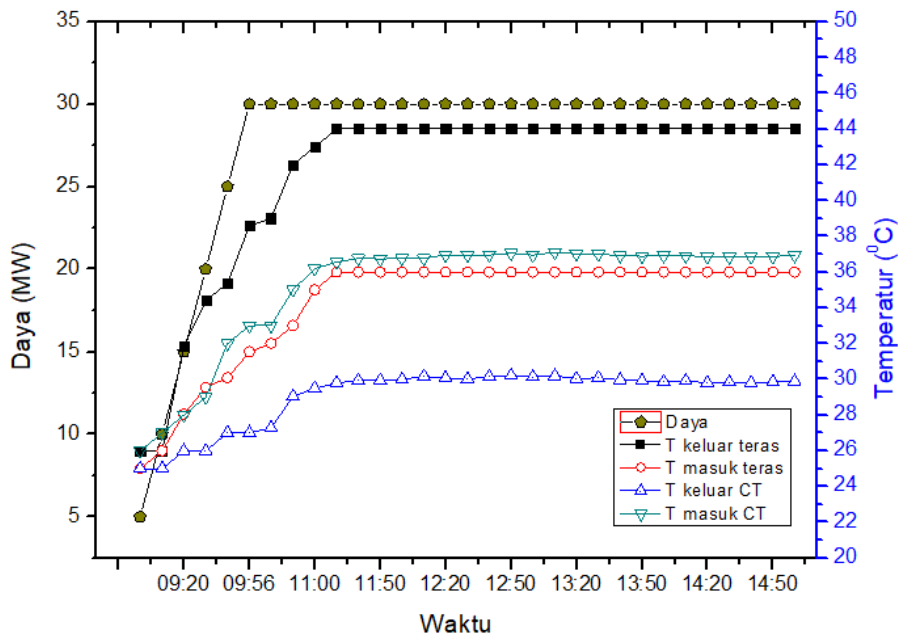
Jam	Teras (°C)		Menara Pendingin (°C)	
	Tkeluar	Tmasuk	Tkeluar	Tmasuk
11.30	44,00	36,00	29,79	36,56
12.00	44,00	36,00	29,99	36,76
12.30	44,00	36,00	30,01	36,99
13.00	44,00	36,00	30,14	36,95
13.30	44,00	36,00	30,09	37,01
14.00	44,00	36,00	29,86	36,94
14.30	44,00	36,00	29,83	36,85
15.00	44,00	36,00	29,89	36,93

Parameter lingkungan saat operasi daya 30 MW yaitu: temperatur bola basah (*wet bulb temperature*) adalah 24,97 °C dan temperatur bola kering (*dry bulb temperature*) adalah 31,95 °C^[9].

Dari Gambar 2. dapat diketahui bahwa pada operasi daya nominal 30 MW dalam keadaan tunak, enam buah menara pendingin yang beroperasi mampu membuang panas ke lingkungan sehingga temperatur pendingin primer yang masuk ke teras tidak melampaui batas pengaktifan sistem proteksi reaktor, yaitu 42 °C^[1]. Beda temperatur antara

temperatur air panas yang masuk ke menara pendingin dengan temperatur air dingin yang keluar dari menara pendingin (*Range*) adalah 7,02 °C. Sedangkan beda temperatur antara temperatur air dingin yang keluar dari menara pendingin dengan temperatur bola basah (*Approach*) adalah 4,93 °C. Pergantian operasi dari PA01 AH03 (salah satu menara pendingin utama) ke PD01 AH01

(menara pendingin cadangan) pada jam 12.03 WIB tidak menyebabkan perubahan parameter temperatur air panas yang masuk ke menara pendingin dan air dingin yang keluar dari menara pendingin. Hal ini menunjukkan bahwa PD01 AH01 yang didesain sama dengan sel menara pendingin yang lain memiliki kinerja yang sama dengan sel menara pendingin yang lain.



Gambar 2. Hubungan antara daya dengan temperatur pendingin

Perhitungan efektifitas menara pendingin setelah revitalisasi dapat dilihat pada Lampiran 1. Dari data operasi reaktor pada daya 30 MW untuk pengujian menara pendingin, hasil perhitungan menunjukkan bahwa efektifitas menara pendingin sebesar 59,15 %. Dari hasil perhitungan tersebut dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan efisiensi kinerja menara pendingin hasil pengujian ditinjau dari nilai desain 64,29%.

RSG-GAS didesain mampu beroperasi pada daya nominal 30 MW termal. Untuk menjamin keselamatan operasi pada daya nominal maka

ditetapkan Batasan dan Kondisi Operasi 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.

Pada makalah ini, BKO yang menjadi fokus dan terkait langsung dengan penilaian kinerja menara pendingin adalah temperatur air primer yang masuk teras. Dari hasil pengujian menara pendingin diketahui bahwa nilai temperatur pendingin primer masuk teras pada kondisi tunak sebesar 36 °C. Nilai tersebut masih jauh dari batas pengaktifan sistem proteksi reaktor yaitu 42 °C. Sehingga dapat dinyatakan bahwa kinerja menara pendingin mampu memenuhi aspek keselamatan operasi RSG-GAS.

KESIMPULAN

Nilai *range*, *aproach* dan *effectiveness* menara pendingin baru secara berurutan untuk menara pendingin setelah penggantian adalah 7,02 °C, 4,93 °C, dan 59,15 %. Setelah penggantian menara pendingin, temperatur pendingin primer masuk teras pada kondisi tunak adalah 36 °C. Nilai tersebut jauh di bawah nilai batas pengaktifan sistem proteksi reaktor yaitu 42 °C. Dapat disimpulkan bahwa dengan penggantian menara pendingin, aspek keselamatan reaktor dapat terpenuhi dan menara pendingin mampu memindahkan panas ke lingkungan sesuai dengan desain awal.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Kepala Pusat Reaktor Serba Guna, kepala BK2O, dan semua yang terlibat dalam pengujian menara pendingin setelah revitalisasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] *Laporan Analisis Keselamatan* Rev. 11, PRSG-BATAN, 2018..
- [2] Buletin Reaktor, "Tinjauan Keselamatan Operasi Reaktor Terhadap Kinerja Menara Pendingin Setelah 30 Tahun Beroperasi", PRSG-BATAN, 2019. XVI No. 1.
- [3] International Journal of Heat and Mass Transfer, "Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower", Fisenko, et.al., 2004. 47(1): p. 165-177.
- [4] International Journal of Heat and Mass Transfer, "Simulation of a cross-flow cooling tower performance", Fisenko, S. and A. Brin, 2007. 50(15): p. 3216-3223.
- [5] International Communications in Heat and Mass Transfer, "Solution of heat and mass transfer in counterflow wet-cooling tower fills", Klimanek, A. and R. Białecki, 2009. 36(6): p. 547-553.
- [6] Efficiency, B.o.E., *Cooling Tower*. Ministry of Power, Government of India, 2007.
- [7] Marley Cooling Tower Company, "Cooling tower fundamentals", Hensley, J.C., 1983
- [8] *Laporan Analisis Keselamatan*. 2011. Rev. 10.1. PRSG-BATAN,
- [9] *Dokumen Serah Terima Cooling Tower BATAN (PRSG)*. HAMON, 2018.
- [10] *Cooling Tower Performance Test Procedure*. HAMON, 2018.
- [11] PRSG-BATAN, *Logbook Operasi Reaktor*. 2018.
- [12] *Lembar Data Operasi Reaktor*, PRSG-BATAN, 2018.

Lampiran 1. Perhitungan Kinerja Menara Pendingin pada Operasi Daya 30 MW Setelah Revitalisasi

Tabel 5. Data Pengukuran Temperatur Air Masuk dan Keluar Menara Pendingin

Waktu	Daya (MW)	Teras		Menara Pendingin	
		T Keluar (°C)	T Masuk (°C)	T Keluar (°C)	T Masuk (°C)
08.52	5	26,00	25,00	25,00	26,00
09.06	10	26,00	26,00	25,00	27,00
09.20	15	31,86	28,04	26,00	28,00
09.32	20	34,40	29,54	26,00	29,00
09.45	25	35,37	30,09	27,00	32,00
09.56	30	38,60	31,54	27,00	33,00
10.00	30	39,00	32,00	27,27	33,02
10.30	30	42,00	33,00	29,04	35,02
11.00	30	43,00	35,00	29,49	36,20
11.30	30	44,00	36,00	29,79	36,56
11.40	30	44,00	36,00	29,93	36,76
11.50	30	44,00	36,00	29,94	36,73
12.00	30	44,00	36,00	29,99	36,76
12.10	30	44,00	36,00	30,16	36,76
12.20	30	44,00	36,00	30,07	36,95
12.30	30	44,00	36,00	30,01	36,99
12.40	30	44,00	36,00	30,15	37,01
12.50	30	44,00	36,00	30,20	37,05
13.00	30	44,00	36,00	30,14	36,95
13.10	30	44,00	36,00	30,19	37,11
13.20	30	44,00	36,00	30,03	37,02
13.30	30	44,00	36,00	30,09	37,01
13.40	30	44,00	36,00	29,96	36,92
13.50	30	44,00	36,00	29,92	36,88
14.00	30	44,00	36,00	29,86	36,94
14.10	30	44,00	36,00	29,92	36,91
14.20	30	44,00	36,00	29,80	36,87
14.30	30	44,00	36,00	29,83	36,85
14.40	30	44,00	36,00	29,79	36,85
14.50	30	44,00	36,00	29,85	36,87
15.00	30	44,00	36,00	29,89	36,93

Tabel 6. Data Parameter Lingkungan

Data	Nilai	Satuan
Temperatur <i>Dry Bulb</i>	31,95	°C
Temperatur <i>Wet Bulb</i>	24,87	°C
Tb1(udara masuk)	32	°C
Tb2(udara keluar)	38	°C

Tabel 7. Perhitungan *Range*, *Approach* dan Keseimbangan Energi

Data	Nilai	Satuan
Air masuk CT	36,94	°C
Air keluar CT	29,86	°C
<i>Range</i>	7,08	°C
<i>Approach</i>	4,89	°C
T rata-rata air	33,40	°C
ρ air pada T rata-rata	994,620	kg/m ³
Laju air (Desain)	650	m ³ /jam
L (laju air x ρ air)	646502,892	kg/jam
L	179,584	kg/detik
T rata-rata udara	35	°C
ρ udara pada T rata-rata	1,1	kg/m ³
Laju udara (Pengukuran)	5880,8196	m ³ /menit
G (laju alir x ρ udara)	6916,8	kg/menit
G	115,28	kg/detik
L/G	1,56	
Menara Pendingin dibagi 5, dT/n	1,416	°C
Keseimbangan energi bagian terbawah, $d(h_{a,n} - h_{a,n-1}) = h_{a,1} - h_{a,0}$ $h_{a,1} - h_{a,0} = L/G \times 4,19 \times dT/n$	9,24	kJ/kg

Tabel 8. Perhitungan Enthalpi Udara Rata-Rata

Enthalpi Udara, $ha,n=ha,n-1+L/G \times 4,19 \times dT/n$	Nilai	Satuan	$ha,$ rata-rata
$ha,0= ha(TWB, TDB)=h$ udara masuk	75,75	kJ/kg	
$ha,1=ha,0+L/G \times 4,19 \times dT/n$	84,99	kJ/kg	80,37
$ha,2=ha,1+L/G \times 4,19 \times dT/n$	94,24	kJ/kg	89,61
$ha,3=ha,2+L/G \times 4,19 \times dT/n$	103,48	kJ/kg	98,86
$ha,4=ha,3+L/G \times 4,19 \times dT/n$	112,72	kJ/kg	108,10
$ha,5=ha,4+L/G \times 4,19 \times dT/n$	121,96	kJ/kg	117,34

Tabel 9. Perhitungan Enthalpi Udara Jenuh

T air (°C)	T rata-rata (°C)	In Pws	Pws	Ws	$hi,$ rata-rata	
T0	29,86					
T1	31,28	30,57	8,43	4567,13	0,02936	105,83
T2	32,69	31,98	8,51	4947,95	0,03193	113,92
T3	34,11	33,40	8,59	5356,04	0,03471	122,56
T4	35,52	34,82	8,66	5792,98	0,03772	131,78
T5	36,94	36,23	8,74	6260,48	0,04096	141,63

Tabel 10. Perhitungan $1/(hi-ha)$

$hi-ha$	(kJ/kg)	$1/(hi-ha)$
$h1-ha,1$	25,46	0,0393
$h2-ha,2$	24,31	0,0411
$h3-ha,3$	23,70	0,0422
$h4-ha,4$	23,68	0,0422
$h5-ha,5$	24,29	0,0412
Total		0,2060
$hc.A/Cpm = L \times 4,19 \times dT \times \Sigma 1/(hi-ha)$		
$hc.A/Cpm$ (kg.d.a/kJ)		219,489212

Tabel 11. Perhitungan Kemampuan Menerima Panas

$Q=hc.A/Cpm.(hi,n-ha,n)$	Nilai	Satuan
$Q1= hc.A/Cpm.(hi,1-ha,1)$	5588,520	kW
$Q2= hc.A/Cpm.(hi,2-ha,2)$	5335,703	kW
$Q3= hc.A/Cpm.(hi,3-ha,3)$	5202,193	kW
$Q4= hc.A/Cpm.(hi,4-ha,4)$	5197,421	kW
$Q5= hc.A/Cpm.(hi,5-ha,5)$	5331,641	kW

Tabel 12. Perhitungan Efektivitas

Efektifitas (ASHRAE)	Nilai	Satuan
<i>Range</i>	7,08	°C
<i>Approach</i>	4,89	°C
$Efektifitas = range/(range+approach)$	59,15	%