

## KARAKTERISTIK DAN EFEKTIFITAS MENARA PENDINGIN REAKTOR TRIGA 2000

Reinaldy Nazar, Dudung A.R, Masri Z.  
Puslitbang Teknik Nuklir - BATAN, Bandung

### ABSTRAK

*KARAKTERISTIK DAN EFEKTIFITAS MENARA PENDINGIN REAKTOR TRIGA 2000. Menara pendingin sebagai bagian dari sistem pendingin sekunder reaktor TRIGA 2000 berfungsi untuk menurunkan temperatur air pendingin sekunder yang berasal dari alat penukar kalor, selanjutnya kalor yang terjadi dibuang ke lingkungan. Untuk mengetahui kemampuan menara pendingin di dalam menurunkan temperatur air pendingin sekunder perlu dilakukan analisis karakteristiknya secara berkala. Efektivitas menara pendingin dihitung berdasarkan laju perpindahan kalor nyata dibagi dengan laju perpindahan kalor maksimum yang mungkin dicapai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efektivitas menara pendingin utara dan menara pendingin selatan pada daya 250 kW berturut-turut = 8 % dan 7 %, pada daya 500 kW = 7 % dan 11 %, pada daya 750 kW = 14 % dan 20 %, pada daya 1000 kW = 20 % dan 17 %, pada daya 1250 kW = 21 % dan 17 %, pada daya 1500 kW = 24 % dan 24 %, pada daya 1750 kW = 22 % dan 26 %, serta pada daya 2000 kW = 19 % dan 23 %.*

**Kata Kunci :** Karakteristik, efektivitas, menara pendingin

### ABSTRACT

*THE CHARACTERISTIC AND EFFECTIVITY OF THE TRIGA 2000 REACTOR COOLING TOWER. Cooling tower as part of secondary cooling system of the TRIGA 2000 reactor, has a function to reduce water temperature come from heat exchanger, furthermore the heat energy would be exhausted to environment. To know the capability of the cooling tower in reducing temperature of secondary water, it is required an analyses the characteristic of the system periodically. On this analyse, the effectivity of cooling tower was calculated based on the real heat transfer rate per possible reached maximum heat transfer rate. It was found that north cooling tower effectivity and south cooling tower at power 250 kW respectively = 8 % and 7 %, at power 500 kW = 7 % and 11 %, at power 750 kW = 14 % and 20 %, at power 1000 kW = 20 % and 17 %, at power 1250 kW = 21 % and 17 %, at power 1500 kW = 24 % and 24 %, at power 1750 kW = 22 % and 26 %, at power 2000 kW = 19 % and 23 %.*

**Key Word :** Characteristic, effectivity, cooling tower.

### PENDAHULUAN

Menara pendingin merupakan salah satu peralatan penting dalam sistem pendingin sekunder reaktor TRIGA 2000 yang berfungsi untuk mendinginkan air pendingin sekunder yang berasal dari alat penukar kalor hingga memenuhi persyaratan untuk disirkulasikan kembali sebagai media sistem pendingin sekunder. Sebagai komponen penting dalam sistem pendingin sekunder, menara pendingin harus beroperasi dengan karakteristik dan unjuk kerja sesuai dengan persyaratan yang ditentukan. Perubahan karakteristik menara pendingin selain berpengaruh pada perubahan efektivitas operasi menara pendingin, juga pada keselamatan sistem reaktor secara keseluruhan.

Sistem menara pendingin reaktor TRIGA 2000 terdiri dari dua buah menara dan merupakan peralatan yang terpasang dalam kondisi baru

produksi Liang Hoo Cooling Tower model LCT-350.<sup>(1)</sup> Mengingat karakteristik menara pendingin akan mengalami perubahan karena penurunan kemampuan komponennya setelah beroperasi dalam jangka waktu tertentu, maka perlu dilakukan penelitian karakteristiknya secara berkala. Dengan melakukan penelitian ini akan dapat diketahui efektivitas operasi menara pendingin serta pencegahan kerusakan menara pendingin lebih dini.

### PEMBATASAN MASALAH

Pada penelitian ini dibahas karakteristik dan efektivitas menara pendingin reaktor TRIGA 2000, dimana karakteristik menara pendingin merupakan respon menara pendingin terhadap variabel operasi yang akan menentukan kondisi air keluar menara pendingin.

**DASAR TEORI**

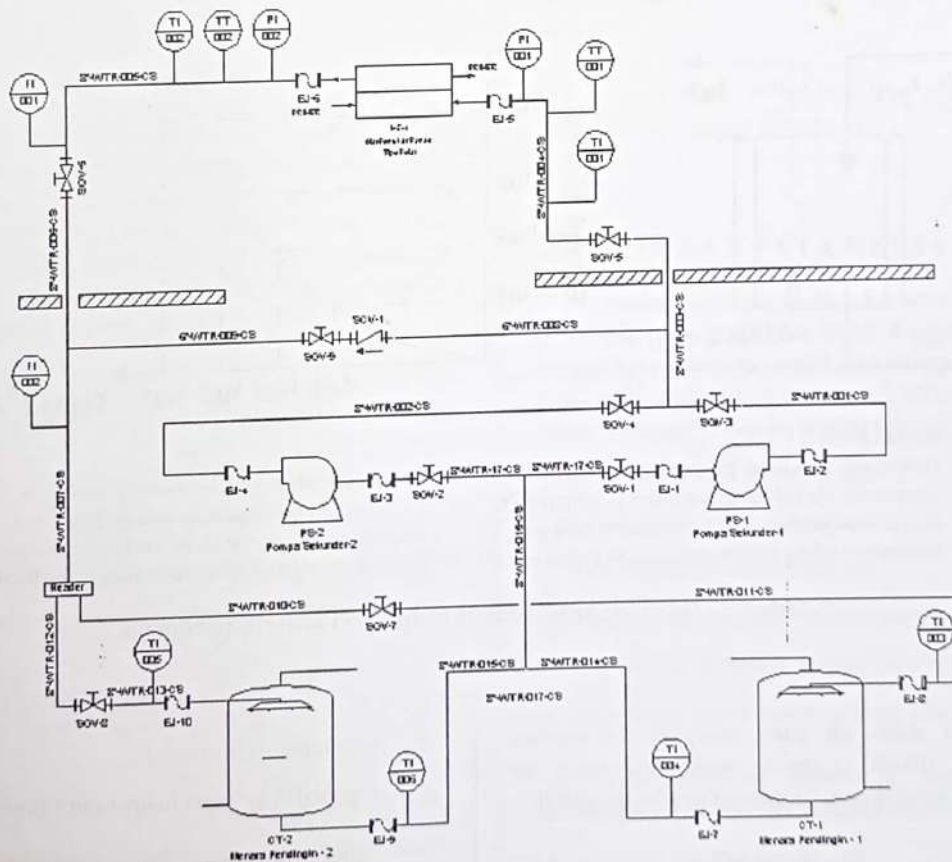
Menara pendingin reaktor TRIGA 2000 berfungsi untuk memindahkan kalor dari air pendingin sekunder ke udara lingkungan. Proses kerja menara pendingin dimulai dengan perpindahan kalor dari pendingin primer ke pendingin sekunder di dalam alat penukar kalor. Pendingin sekunder yang telah menerima kalor dari pendingin primer mengalami kenaikan temperatur dan dialirkan ke menara pendingin (Gambar 1).

Air panas tersebut masuk ke menara pendingin lewat saluran masukan (*inlet*) dan menuju ke pipa-pipa penghambur (*sprinkler pipes*) melalui pipa tegak (*stand pipe*). Pipa-pipa penghambur berputar menghamburkan air sehingga ukuran air menjadi lebih kecil, sehingga luas permukaan persinggungan air dengan udara menjadi lebih besar dan kalor yang dipindahkan juga akan lebih besar. Butiran-butiran air turun melalui isian menara (*filler*). Udara lingkungan yang masuk ke menara melalui sisi samping bagian bawah menara, tertarik ke bagian atas menara melalui isian menara (*filler*) oleh gerakan *fan*, sehingga butiran-butiran air yang

turun melalui isian menara (*filler*) akan bersinggungan dengan udara yang bergerak ke atas. Dengan demikian terjadi perpindahan kalor dari air ke udara.

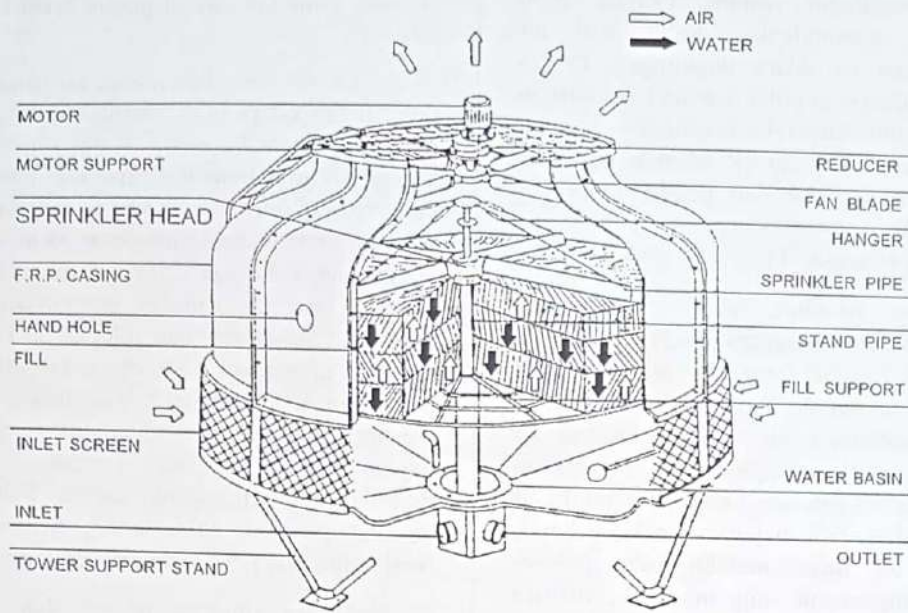
Kontak langsung antara air pendingin sekunder dengan udara akan memberikan kalor sensibel dan kalor latent ke udara. Kalor sensibel diberikan karena air mempunyai temperatur lebih besar dari pada temperatur bola basah udara yang masuk ke menara, sedangkan kalor laten akan menyebabkan penguapan, sehingga sebagian air akan terbawa ke atmosfer. Dengan bantuan gerakan *fan*, uap basah panas ditarik ke atas dan dilepaskan ke lingkungan. Setelah mengalami proses penurunan suhu, air pendingin sekunder jatuh dan ditampung oleh bak penampungan air (*water basin*) yang terdapat di bagian bawah menara, kemudian air tersebut dialirkan kembali melalui saluran keluaran (*outlet*) ke alat penukar kalor untuk pengambilan kalor berikutnya dari pendingin primer (Gambar 2).<sup>(2)</sup>

Secara ringkas, proses dan prinsip kerja menara pendingin dapat dilihat pada Gambar 3.<sup>(3)</sup>

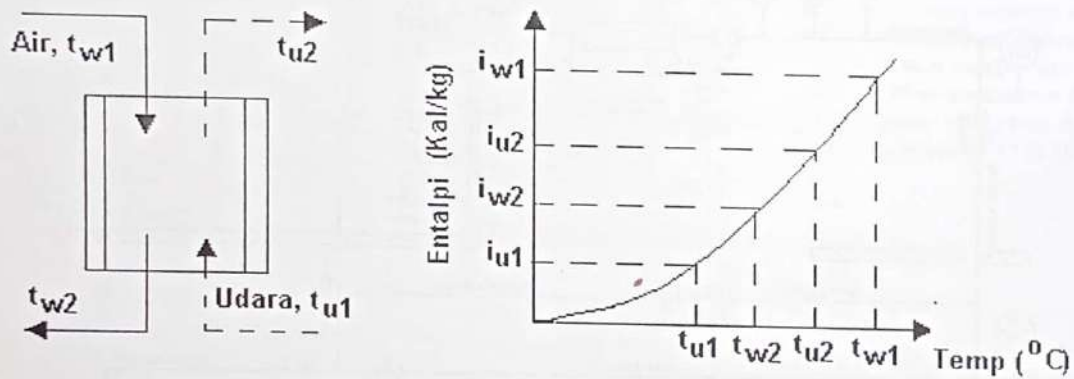


Gambar 1. Diagram sistem pendingin sekunder.





Gambar 2. Menara pendingin produksi Liang Hoo Cooling Tower model LCT-350.



Keterangan gambar :

$t_{w1}$  : temperatur air masuk ke menara pendingin,  $^{\circ}\text{C}$

$t_{w2}$  : temperatur air keluar dari menara pendingin,  $^{\circ}\text{C}$

$t_{u1}$  : temperatur udara masuk ke menara pendingin,  $^{\circ}\text{C}$

$t_{u2}$  : temperatur udara keluar dari menara pendingin,  $^{\circ}\text{C}$

$i_{w1}$  : entalpi air masuk ke menara pendingin,  $^{\circ}\text{C}$

$i_{w2}$  : entalpi air keluar dari menara pendingin,  $^{\circ}\text{C}$

$i_{u1}$  : entalpi udara masuk ke menara pendingin,  $^{\circ}\text{C}$

$i_{u2}$  : entalpi udara keluar dari menara pendingin,  $^{\circ}\text{C}$

Gambar 3. Diagram proses dan prinsip kerja menara pendingin.

Jika debit air yang mengalir ke menara pendingin adalah  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), maka laju masa air pendingin yang masuk ke menara pendingin adalah :

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} \cdot Q \quad (1)$$

dengan :

$\dot{m}_{air}$  = laju massa air ( $\text{kg}/\text{s}$ )

$\rho_{air}$  = densitas air pada temperatur  $t$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Jika kecepatan udara masuk ke menara pendingin adalah  $v$  ( $\text{m}/\text{s}$ ), maka laju massa udara masuk ke menara pendingin :

$$m_{udara} = \rho_{udara} \cdot A \cdot v \quad (2)$$

dengan :

$m_{udara}$  = laju massa udara (kg/s)

$\rho_{udara}$  = densitas udara pada temperatur  $t$  (kg/m<sup>3</sup>)

$A$  = luas penampang bidang pendingin (m<sup>2</sup>)

Kapasitas kalor air pendingin adalah :

$$C_{air} = m_{air} \cdot c_{p,air} \quad (3)$$

Kapasitas kalor udara adalah

$$C_{udara} = m_{udara} \cdot c_{p,udara} \quad (4)$$

dengan :

$c_{p,udara}$  = kalor spesifik udara (J/kg °C)

$c_{p,air}$  = kalor spesifik air (J/kg °C)

Rasio kapasitas kalor antara udara dan air adalah :

$$C = \frac{C_{udara}}{C_{air}} \quad (5)$$

Untuk menentukan karakteristik menara pendingin digunakan metode pendekatan integrasi *Stepwise*. Dalam metode ini menara pendingin dibagi menjadi ruas-ruas volume yang dibatasi bidang-bidang datar arah vertikal. Keseimbangan energi pada setiap ruas-ruas volume menara pendingin dinyatakan sebagai :

$$h_{\alpha+1} - h_{\alpha} = \left( \frac{m_{air}}{m_{udara}} \right) (4,19) (\Delta T) \quad (6)$$

dengan  $\alpha$  = nomor ruas volume = 0, 1, 2, ...

Harga karakteristik menara pendingin ditentukan berdasarkan persamaan berikut :

$$\frac{h_c \cdot A}{C_{pm}} = m_{air} (4,19) \cdot (\Delta T) \cdot \left( \sum \frac{1}{h_s - h_a} \right) \quad (7)$$

dimana :

$h_c$  = koefisien perpindahan kalor konveksi (watt/m<sup>2</sup>.K)

$\Delta T$  = selisih temperatur antar bidang

$C_{pm}$  = kalor jenis udara lembab (kJ/kg.K)

$h_s$  = entalpi udara jenuh (kJ/kg)

$h_a$  = entalpi udara rata-rata (kJ/kg)

Bilangan perpindahan NTU (*number of transfer unit*) merupakan hasil pembagian karakteristik menara pendingin dengan laju massa udara kering dan secara matematika dinyatakan sebagai :

$$NTU = \frac{h_c \cdot A / C_{pm}}{m_{udara}} \quad (8)$$

Harga efektivitas menara pendingin ditentukan berdasarkan laju perpindahan kalor yang nyata dibagi dengan laju perpindahan kalor maksimum yang mungkin dicapai. Penentuan harga efektivitas bergantung kepada perbandingan kapasitas minimum udara dengan kapasitas maksimum air pendingin. Harga kapasitas maksimum air pendingin dan kapasitas minimum udara bergantung pada laju aliran udara, laju aliran air dan temperatur udara kering yang masuk ke dalam sistem menara pendingin. Harga efektivitas juga bergantung kepada bilangan perpindahan NTU (*number of transfer unit*). Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut :<sup>(4)</sup>

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\{-NTU(1-C)\}}{1 - C \exp\{-NTU(1-C)\}} \times 100\% \quad (9)$$

## METODE DAN TATA KERJA

Perhitungan dan analisis karakteristik menara pendingin reaktor TRIGA 2000 dilakukan dengan menggunakan metoda pendekatan integrasi *Stepwise*. Adapun data-data operasi reaktor TRIGA 2000 yang diukur pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Temperatur bola kering udara
2. Temperatur bola basah udara
3. Temperatur air masuk menara
4. Temperatur air keluar menara pendingin
5. Laju massa air masuk menara pendingin
6. Laju massa udara masuk menara pendingin

Disamping itu diperlukan juga data-data spesifikasi desain menara pendingin yaitu :

1. Diameter menara pendingin
2. Tinggi isian menara pendingin



Secara garis besar alur kerja analisis karakteristik ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan sifat-sifat fisika udara dan sifat-sifat fisika pendingin dari tabel sifat-sifat fisika yang tersedia.
2. Mengukur data operasi menara pendingin reaktor TRIGA 2000 yang dioperasikan pada daya 250 kW, 500 kW, 750 kW, 1000 kW, 1250 kW, 1500 kW, 1750 kW, 2000 kW. Data ini meliputi temperatur air masuk menara pendingin, temperatur air keluar menara pendingin dan temperatur udara luar.
3. Menentukan karakteristik dan efektifitas menara pendingin menggunakan Persamaan (1) sampai dengan Persamaan (9).

Pelaksanaan pengujian di lapangan dilakukan dengan tata kerja berikut :

1. Merancang dan membuat alat ukur temperatur air pendingin sekunder.
2. Melakukan kalibrasi terhadap alat ukur temperatur yang dibuat
3. Menentukan dan mencatat kondisi operasi dan daya reaktor saat pengujian
4. Menentukan dan mencatat data operasi menara pendingin : temperatur air masuk pada sisi masuk kedua menara, temperatur air keluar pada sisi keluar kedua menara, temperatur bola kering

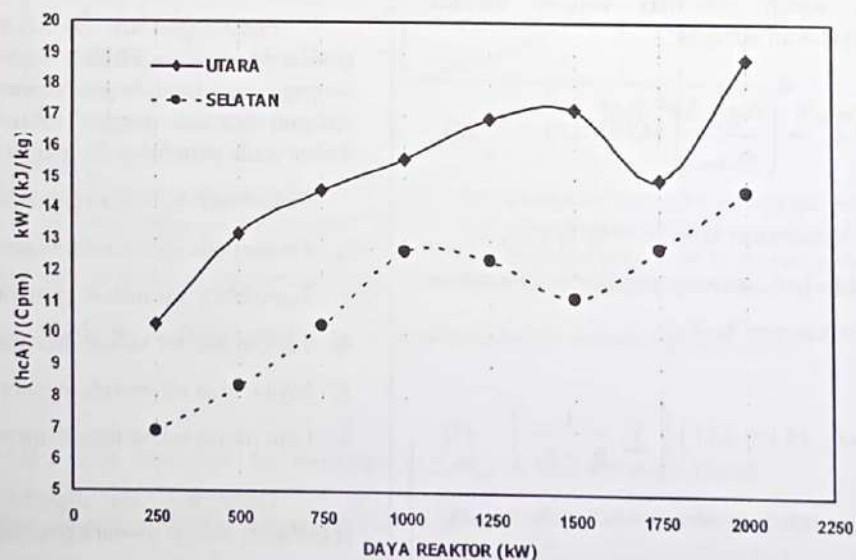
udara, dan temperatur bola basah udara pada sisi masuk udara ke menara pendingin.

5. Menentukan dan mencatat kapasitas air pendingin berdasarkan data pengukuran dengan alat ukur (*flowmeter*) yang terpasang di pipa sekunder.
6. Menentukan dan mencatat kapasitas udara dengan mengukur kecepatan udara masuk menara pendingin dengan menggunakan alat ukur *portable (anemometer)*.

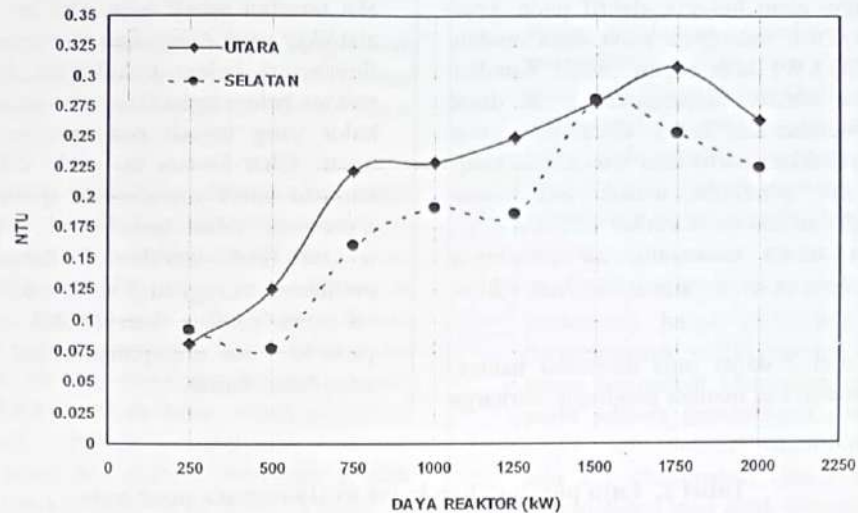
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil eksperimen telah diperoleh karakteristik dan efektifitas menara pendingin reaktor TRIGA 2000 pada berbagai daya operasi seperti yang ditampilkan pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 6.

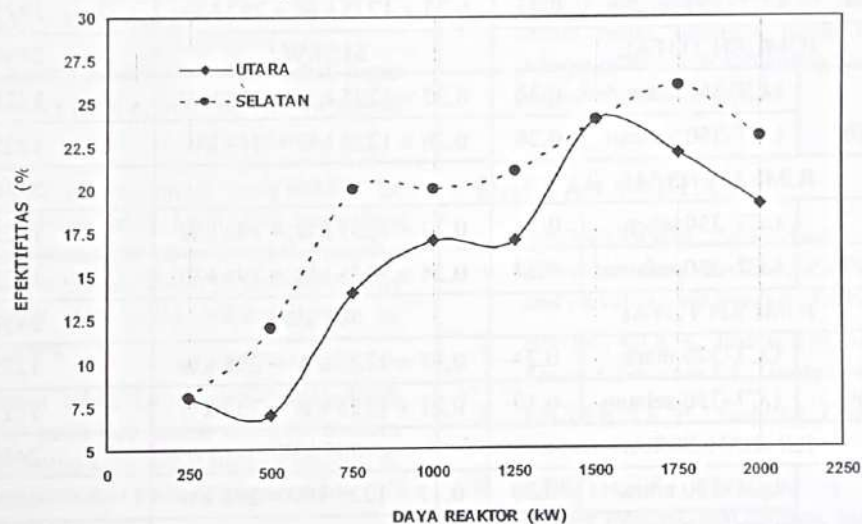
Berdasarkan Gambar 4 sampai dengan Gambar 6 dapat diketahui bahwa, secara umum efektifitas menara pendingin selatan lebih besar dari pada efektifitas menara pendingin utara. Hal ini terjadi karena laju massa air pendingin yang masuk ke menara selatan lebih kecil dari pada laju massa air pendingin yang masuk ke menara utara, keadaan ini diakibatkan oleh bukaan katub ke menara selatan lebih kecil dari pada bukaan katub ke menara utara, sehingga temperatur air keluar menara selatan lebih kecil dari pada temperatur air dari menara utara.



Gambar 4. Karakteristik menara utara dan menara selatan terhadap daya reaktor



Gambar 5. NTU menara utara dan menara selatan terhadap daya reaktor.



Gambar 6. Efektifitas menara utara dan menara selatan terhadap daya reaktor.

Perbedaan efektivitas antara kedua menara juga terjadi karena laju massa udara di kedua menara pendingin tidak sama. Hal ini terlihat dari data pengukuran, dimana laju massa udara di menara selatan lebih besar dari pada laju massa udara di menara utara, sehingga kalor lebih banyak diambil di menara selatan dari pada di menara utara.

Perbedaan efektivitas kedua menara dapat juga disebabkan adanya perbedaan temperatur air pendingin yang masuk ke kedua menara, yaitu temperatur air pendingin yang masuk ke menara

selatan lebih rendah dari pada temperatur air pendingin yang masuk ke menara utara. Padahal seharusnya sama, karena air pendingin yang masuk kedua menara berasal dari tempat yang sama. Perbedaan temperatur air ini terjadi karena bukaan katub ke menara selatan lebih kecil dari pada bukaan katub ke menara utara, sehingga temperatur air masuk ke menara selatan menjadi lebih rendah dari pada temperatur air masuk ke menara utara.

Berdasarkan hasil perhitungan laju perpindahan kalor nyata menara pendingin seperti yang



ditampilkan pada Tabel 2, diketahui secara umum menara pendingin akan bekerja efektif pada daya tinggi ( $> 1000$  kW), sedangkan pada daya rendah (250 kW s/d 750 kW) tidak begitu efektif. Kondisi ini terlihat jika reaktor dioperasikan pada daya rendah akan memberikan harga efektivitas yang rendah. Hal disebabkan perbedaan temperatur yang terjadi antara air pendingin masuk dan keluar menara pendingin adalah kecil sekitar  $1^{\circ}\text{C}$  s/d  $2^{\circ}\text{C}$ , dan perbedaan antara temperatur air pendingin masuk menara dengan temperatur udara luar sekitar  $0^{\circ}\text{C}$  s/d  $3^{\circ}\text{C}$ .

Pada Tabel 2 dapat juga diketahui bahwa, secara umum efektivitas menara pendingin berharga

sangat rendah dari harga disainnya, meskipun kedua alat tersebut relatif baru. Hal ini dapat disebabkan alat ukur yang digunakan (termometer, anemometer, flowmeter) belum terkalibrasi dengan baik, daya reaktor belum terkalibrasi dengan baik dan rugi-rugi kalor yang terjadi pada sistem pemipaan cukup besar. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk memastikan apakah alat ukur yang digunakan telah terkalibrasi dengan baik, daya reaktor telah terkalibrasi dengan baik dan diperhitungkan rugi-rugi kalor pada sistem pemipaan, sehingga analisis karakteristik menara pendingin pada kegiatan selanjutnya dapat memberikan hasil yang lebih akurat.

Tabel 2. Laju perpindahan kalor nyata menara pendingin.

DAYA (kW)	MENARA	$\epsilon$	LAJU PERPINDAHAN KALOR NYATA	LAJU PERPINDAHAN KALOR MAKSIMUM
2000	LCT-350 utara	0,19	$0,19 \times 1225 \text{ kW} = 233 \text{ kW}$	1225 kW
	LCT-350 selatan	0,23	$0,23 \times 1225 \text{ kW} = 282 \text{ kW}$	1225 kW
JUMLAH TOTAL			515 kW	2450 kW
1750	LCT-350 utara	0,22	$0,22 \times 1225 \text{ kW} = 270 \text{ kW}$	1225 kW
	LCT-350 selatan	0,26	$0,26 \times 1225 \text{ kW} = 319 \text{ kW}$	1225 kW
JUMLAH TOTAL			589 kW	2450 kW
1500	LCT-350 utara	0,24	$0,24 \times 1225 \text{ kW} = 294 \text{ kW}$	1225 kW
	LCT-350 selatan	0,24	$0,24 \times 1225 \text{ kW} = 294 \text{ kW}$	1225 kW
JUMLAH TOTAL			588 kW	2450 kW
1250	LCT-350 utara	0,21	$0,17 \times 1225 \text{ kW} = 208 \text{ kW}$	1225 kW
	LCT-350 selatan	0,17	$0,21 \times 1225 \text{ kW} = 257 \text{ kW}$	1225 kW
JUMLAH TOTAL			465 kW	2450 kW
1000	LCT-350 utara	0,20	$0,17 \times 1225 \text{ kW} = 208 \text{ kW}$	1225 kW
	LCT-350 selatan	0,17	$0,20 \times 1225 \text{ kW} = 245 \text{ kW}$	1225 kW
JUMLAH TOTAL			453 kW	2450 kW
750	LCT-350 utara	0,14	$0,14 \times 1225 \text{ kW} = 172 \text{ kW}$	1225 kW
	LCT-350 selatan	0,20	$0,20 \times 1225 \text{ kW} = 245 \text{ kW}$	1225 kW
JUMLAH TOTAL			417 kW	2450 kW
500	LCT-350 utara	0,07	$0,07 \times 1225 \text{ kW} = 86 \text{ kW}$	1225 kW
	LCT-350 selatan	0,11	$0,11 \times 1225 \text{ kW} = 135 \text{ kW}$	1225 kW
JUMLAH TOTAL			221 kW	2450 kW
250	LCT-350 utara	0,08	$0,08 \times 1225 \text{ kW} = 98 \text{ kW}$	1225 kW
	LCT-350 selatan	0,07	$0,07 \times 1225 \text{ kW} = 86 \text{ kW}$	1225 kW
JUMLAH TOTAL			184 kW	2450 kW



## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan tentang karakteristik dan efektivitas menara pendingin reaktor TRIGA 2000, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Secara umum efektivitas menara pendingin berharga sangat rendah dari harga disainnya, meskipun kedua alat tersebut relatif baru. Hal ini dapat disebabkan alat ukur yang digunakan (termometer, anemometer, flowmeter) belum terkalibrasi baik, daya reaktor belum terkalibrasi dengan baik dan rugi-rugi kalor yang terjadi pada sistem pemipaan cukup besar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efektivitas menara pendingin utara dan menara pendingin selatan pada daya 250 kW berturut-turut = 8 % dan 7 %, pada daya 500 kW = 7 % dan 11 %, pada daya 750 kW = 14 % dan 20 %, pada daya 1000 kW = 20 % dan 17 %, pada daya 1250 kW = 21 % dan 17 %, pada daya 1500 kW = 24 % dan 24 %, pada daya 1750 kW = 22 % dan 26 %, serta pada daya 2000 kW = 19 % dan 23 %.
2. Efektivitas menara pendingin selatan lebih besar dari pada menara pendingin utara. Hal ini terjadi karena :
  - Laju massa air pendingin yang masuk ke menara selatan lebih kecil dari pada laju massa air pendingin yang masuk ke menara utara, akibat bukaan katub ke menara selatan lebih kecil dari pada bukaan katub ke menara utara.
  - Laju massa udara ke menara selatan lebih besar dari pada laju massa udara ke menara utara, sehingga kalor lebih banyak diambil di menara selatan dari pada di menara utara.
  - Temperatur air pendingin yang masuk ke menara utara lebih tinggi dari pada temperatur air pendingin yang masuk menara selatan, karena bukaan katub ke menara selatan lebih kecil dari pada bukaan katub ke menara utara.
3. Secara umum menara pendingin bekerja efektif pada daya tinggi ( $> 1000$  kW), sedangkan pada daya rendah (250 kW s/d 750 kW) tidak begitu efektif. Hal disebabkan perbedaan temperatur yang terjadi antara air pendingin masuk dan keluar menara pendingin pada daya rendah adalah sekitar  $1$  °C s/d  $2$  °C, dan perbedaan antara temperatur air pendingin masuk menara dengan temperatur udara luar  $0$  °C s/d  $3$  °C.

## SARAN-SARAN

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk memastikan apakah alat ukur yang digunakan telah terkalibrasi dengan baik, daya reaktor telah terkalibrasi dengan baik dan penelitian rugi-rugi kalor pada sistem pemipaan, sehingga analisis karakteristik menara pendingin pada kegiatan selanjutnya dapat memberikan hasil yang lebih akurat.
2. Menara pendingin pada umumnya mengalami penurunan harga efektivitas sejalan dengan bertambahnya waktu operasi. Oleh karena itu untuk memantau efektivitas menara pendingin, perlu adanya pemasangan pengukur kecepatan angin (anemometer) disamping alat pengukur laju alir (flowmeter) dan alat pengukur suhu (termometer) yang telah terpasang.
3. Agar menara pendingin berdaya guna, tahan lama dan penurunan efektifitasnya tidak tajam, sebaiknya air pendingin sekunder yang dipergunakan selalu diupayakan bersih dari zat-zat organik dan membersihkan menara pendingin secara rutin, sehingga dapat mengurangi terjadinya endapan di sepanjang saluran permukaan perpindahan kalor (*filler*).

## DAFTAR PUSTAKA

1. ANONYMOUS, *Safety Analysis Report TRIGA 2000 Bandung Reactor*, Centre for Research and Development Nuclear Techniques, 2001.
2. ANONYMOUS, *Instruction for LCT Cooling Tower Operation* PT. Golden Muliono Pratama.
3. NICHOLAS, P., *Cooling Towers*, Ann Arbor Science Publisher, 1983.
4. KREITH, F., *Principle of Heat Transfer*, Harper International Edition, New York, 1973.

## TANYA JAWAB

Utaja :

- Apakah flow udaranya sama?
- Apakah dicoba dengan standar CII.

Reinaldy N.

- Tidak sama antara I dan II karena input pada C I selatan lebih kecil.
- Sudah dicoba dengan standar dari tabel yang ada di tiang H100.