

Komparasi Karakteristik Menara Pendingin Menggunakan Beberapa Tipe Susunan Pipa-pipa sebagai Pendistribusi Cairan

Pinansius Simangunsong^{1*}

¹Program Dipoma Teknik Mesin, Politeknik Teknologi Kimia Industri, Medan, Indonesia

*Penulis Korespondensi: pinansiussimangunsong10@gmail.com

Article info: Diterima 23/02/2024, Direvisi 28/02/2024, Diterima 05/03/2024

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Abstrak

Tujuan dari percobaan ini adalah untuk mengkarakterisasi menara pendingin dengan menggunakan tepi pipa sebagai distributor fluida. Menara pendingin ini dibangun dengan kaca mata persegi panjang yang memiliki penampang 9 cm x 9 cm dan tinggi 100 cm. Distributor cairan dibangun oleh pipa dengan diameter nominal 5/8 inci. Ada lima jenis pengepakan yaitu distributor fluida tanpa penyekat, distributor fluida dengan satu penyekat, distributor fluida dengan dua penyekat, distributor fluida dengan penyekat di sana dan distributor fluida dengan empat penyekat. Percobaan telah dilakukan dengan mengalirkan air panas dari puncak menara pendingin melalui distributor fluida, di sisi lain, pendingin udara dialirkan ke atas melalui distributor fluida yang berlawanan dengan arah aliran air. Proses ini membuat pertukaran panas antara udara dan air pada distributor fluida. Variabel yang bervariasi dalam percobaan ini adalah suhu air masuk, T_{wi} (45, 50, 55 dan 60 °C), tinggi distributor fluida, Z (30,5, 61 dan 91,5 mm), rasio aliran massa air / udara, m_w / m_a (3.624, 5.888 dan 7.700) dan jumlah baffle (tanpa baffle, satu baffle, dua baffle, tiga baffle, dan empat baffle). Hasil percobaan menunjukkan bahwa pada rasio laju aliran massa air / udara yang lebih rendah, peningkatan angka penyekat menyebabkan penurunan karakteristik. Sementara itu, dalam rasio laju aliran massa air / udara yang lebih tinggi, peningkatan jumlah penyekat menyebabkan peningkatan karakteristik. Menara pendingin tanpa distributor fluida memiliki karakteristik rata-rata 13,4% dan efektivitas rata-rata 16,2%. Untuk menara pendingin dengan distributor fluida memiliki karakteristik rata-rata 31,5% dan efektivitas rata-rata 25,0%.

Kata kunci : *Cooling tower, characteristic, fluid distributor.*

1. Pendahuluan

Pada awalnya menara pendingin berbentuk menara kosong tanpa bahan isian. Butiran-butiran air panas dijatuhkan dari puncak menara, sedang-kan udara dihembuskan dari bawah, sehingga terjadi pertukaran kalor antara air dan udara. Supaya perpindahan kalor tersebut di atas lebih baik maka diperlukan media pengisi. Dengan konfigurasi sedemikian sehingga terjadi kontak yang baik antara air panas dengan udara sebagai media pendingin. Mekanisme perpindahan kalor utamanya adalah kalor sensibel dan kalor laten penguapan, kerugian kalor radiasi diabaikan serta prosesnya dianggap adiabatik.

Dua faktor yang sangat menentukan laju perpindahan kalor dari air panas ke udara pendingin adalah waktu kontak dan luas permukaan antar fase (air dan udara). Dengan memberikan bahan isian pada menara, maka ke dua faktor di atas diperbesar.

Penelitian yang berkaitan dengan kedua faktor penentu laju perpindahan kalor tersebut di atas telah banyak dilakukan. Prayitno (1993) meneliti tentang karakteristik susunan bilah pengisi menggunakan permukaan bergelombang pada menara pendingin dengan aliran lawan arah. Ramli (1998) meneliti tentang karakteristik menara pendingin dengan plat sebagai pendistribusi cairan. Jamilah (1999) meneliti tentang unjuk kerja menara pendingin dengan plat aluminium sebagai pen-distribusi aliran. Mulyono dan Baskoro (2000), meneliti tentang karakteristik menara pendingin dengan bahan isian plastik bergelombang. Susanto dan Fathurahman meneliti tentang karakteristik menara pendingin air dengan bahan isian tali ijuk.

Hal yang begitu menarik dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan adalah sangat variatifnya nilai karakteristik menara. Oleh karena itu, penelitian ini merupakan upaya untuk memperbaiki nilai karakteristik menara, disamping juga merupakan pengembangan penelitian yang telah penulis lakukan sebelumnya. Kali ini menara pendingin air menggunakan susunan pipa-pipa *polyvinyl chloride* (PVC), yang disusun *staggered* sebagai pendistribusi cairan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari karakteristik perpindahan kalor menara pendingin air menggunakan susunan pipa-pipa bersekat (bersirip) sebagai pendistribusi cairan. Bahan pipa adalah PVC berdiameter nominal 5/8 inci (diameter luar = 17 mm), yang disusun *staggered*. Sebagai variabelnya adalah jumlah sekat (0, 1, 2, 3 dan 4), rasio laju aliran massa air/udara (3,624, 5,888 dan 7,700), tinggi pendistribusi cairan (30,5; 61 dan 91,5 cm), dan temperature air masuk menara pendingin (45, 50, 55 dan 60°C). Kemudian dibandingkan dengan menara pendingin tanpa pendistribusi cairan.

Manfaat yang bersifat apikatif dari penelitian ini adalah masih sebatas dapat digunakan sebagai sarana pembelajaran bagi mahasiswa tentang dasar-dasar perencanaan menara pendingin, karena alat yang digunakan adalah skala laboratorium. Untuk dapat bermanfaat pada skala yang bersifat umum, masih harus dilakukan analisa dimensional terhadap persamaan korelasi yang diperoleh dari penelitian ini.

2. Fundamental

Parameter yang sering digunakan oleh industri dan para perancang menara pendingin (Stoecker) adalah karakteristik menara ($k\omega aV/mw$) atau *NTU* (*number of transfer unit*), dan sering digunakan oleh industri untuk menentukan unjuk kerja termal menara pendingin pada kisaran kondisi perasi yang luas, sesuai Arora (1986) dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$NTU = \frac{k\omega aV}{m_w} = \int_{T_{wo}}^{T_{wi}} \frac{c_w dT_w}{(h_s - h)} \quad (1)$$

dengan

$k\omega$ = koefisien difusi uap air ke dalam udara, kg/ (m² det)

a = luas permukaan air tiap satuan volume, m²/m³

v = volume pendinginan (air), m³

m_w = laju aliran massa air, kg/det

c_w = panas jenis air pada tekanan tetap, kJ/(kg °C)

h_s = entalpi jenis udara jenuh pada suhu aliran air, kJ/kg

h = entalpi jenis udara pada suhu aliran air, kJ/kg

T_w = temperatur air, °C

T_{wi} = temperatur air, °C

T_{wo} = temperatur air, °C

Karakteristik menara ini sangat tergantung kondisi lingkungan.

Nilai h_s pada persamaan (1) diperoleh dari tabel psikrometrik, sesuai ASHRAE Handbook (1993), sedang-kan perubahan entalpi jenis udara dihitung dengan persamaan (2), sesuai Arra

(1986) adalah :

$$\frac{dh}{c_w dT_w} = - \frac{m_w}{m_a} \quad (2)$$

dengan : m_a = laju aliran massa udara, kg/det Unjuk kerja menara pendingin dapat juga dinyatakan sebagai efektivitas perpindahan kalor, yang dinyatakan dengan persamaan (3), menurut Prayitno (1993)

$$Eff = \frac{Range}{Range + Approach} \quad (3)$$

dengan :

Range adalah kisaran pendinginan, yaitu perbedaan antara suhu air masuk (T_{wi}) dan suhu air keluar (T_{wo}). Approach adalah pendekatan suhu bola basah, didefinisikan sebagai selisih antara suhu air keluar menara (T_{wo}) dan suhu bola basah udara masuk menara (T_{si})

Pada menara pendingin, perpindahan kalor berlangsung dari air panas ke udara tak jenuh. Kontak langsung antara air panas dan udara akan menyebabkan terjadinya penguapan sebagian air tersebut, ini merupakan kombinasi perpindahan kalor dan masa, sehingga perpindahan kalor yang terjadi adalah kalor sensibel dan kalor laten. Ada dua sebab terjadinya perpindahan kalor yaitu perbedaan temperatur bola kering dan perbedaan tekanan parsial antara permukaan air dan udara. Ke dua penyebab ini berkombinasi membentuk potensial entalpi.

Laju perpindahan kalor sensibel dari permukaan air panas ke udara merupakan perpindahan kalor konvensi, sehingga variabel yang menentukan adalah koefisien konvensi, luas bidang kontak (permukaan basah) dan beda temperatur air dan udara.

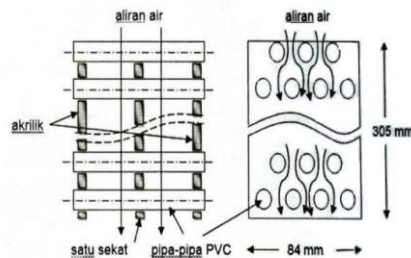
Laju perpindahan massa dari permukaan air ke udara sebanding dengan beda tekanan permukaan air dan tekanan parsial uap di udara. Dan beda tekanan ini hampir sebanding dengan rasio kelembaban. Adanya perpindahan massa ini menyebabkan terjadinya perpindahan kalor laten, yang besarnya tergantung dari tetapan keseimbangan (konstan), luas permukaan kontak, beda antara rasio kelembaban udara jenuh dengan rasio kelembaban udara panas laten. Koefisien konveksi dan tetapan keseimbangan (koefisien kesebandingan perpindahan massa) adalah sebanding, rasionya sama dengan nilai kalor spesifik udara basah.

Perpindahan kalor total adalah gabungan dari ke dua perpindahan kalor di atas, dan menghasilkan potensial entalpi yang menentukan karakteristik menara pendingin.

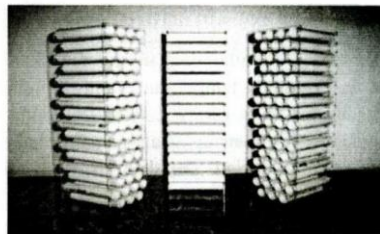
Dengan memperbanyak jumlah sekat, maka semakin luas bidang kontak antara air dan udara (dengan asumsi air terdistribusi merata). Tetapi dengan banyaknya sekat akan memperbanyak bidang-bidang vertikal yang menyebabkan air langsung menuju ke dasar sehingga waktu kontak antara air dan udara menjadi sedikit. Disamping itu pola aliran juga dipengaruhi oleh jumlah sekat dan derajat horizontal pipa-pipa. Merata tidaknya distribusi air juga berperan terhadap proses perpindahan kalor. Laju perpindahan kalor tergantung korelasi berbagai hal di atas.

3. Metode

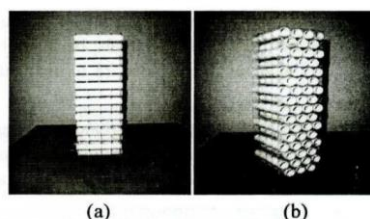
Setiap paket pendistribusi cairan terbuat dari 56 pipa PVC dengan panjang 84 mm, diameter 17 mm, dan dipasang pada dua buah akrilik dengan ketebalan 1,5 mm sebagai pembatas luar (Gambar 1). Pipa-pipa dipasang secara zig-zag searah aliran air, dan diantara akrilik pembatas luar dapat dipasang sekat (tanpa sekat, 1, 2, 3, dan 4) terbuat dari akrilik dengan ketebalan 1,5 mm. Kemudian dipak dengan dimensi 84 x 84 x 305 mm³ (Gambar 2 dan Gambar 3).



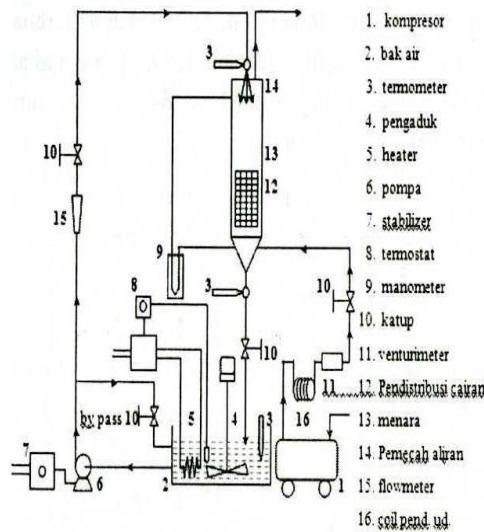
Gambar 1. Sketsa Pendistribusi Cairan



Gambar 2. Foto Tiga (3) Paket Pendistribusi Cairan Tanpa Sekat



Gambar 3. Foto Pendistribusi Cairan Tiga Sekat, (a). Pandangan depan, (b). Pandangan sudut



Gambar 4. Rangkaian Alat Percobaan

Percobaan

Percobaan dimulai dengan memanaskan air dalam bak sampai temperatur yang diinginkan (menggunakan *temperature control*). Pompa air dihidupkan untuk mensuplai air panas ke puncak menara sehingga terjadi sirkulasi air. Laju aliran massa air diatur dengan cara mengatur katup (*gate valve*) yang terpasang pada pipa yang menuju menara dan katup yang terpasang pada pipa *bypass*. Ada tiga buah *setting* bukaan katup yaitu untuk laju kapasitas 0,8; 1,3 dan 1,7 liter/menit. Di atas menara dipasang pemecah aliran air, terbuat dari pipa kapiler, sebanyak 64 buah, berdiameter dalam 1 mm, agar air masuk menara terdistribusi merata.

Setelah temperatur air masuk puncak menara terukur tetap, kemudian udara dihembuskan dari dasar masuk menara, sebelumnya didinginkan dulu melalui koil berpendingin air. Laju aliran massa udara diukur dengan venturi. Udara dihasilkan oleh kompresor, besaran besaran yang diamati pada percobaan ini adalah temperatur air masuk dan keluar menara, temperatur udara masuk, keluar dan lingkungan (bola basah dan kering), laju aliran air dan udara.

Percobaan ini dilakukan dengan variasi temperatur air masuk menara (45; 50; 55; dan 60) °C, rasio laju aliran massa air/udara (3,624; 5,888 dan 7,700), tinggi bahan isian (30,5; 61 dan 91,5) cm dan jumlah sekat (0 (tanpa sekat), 1, 2, 3 dan 4), serta sebagai pembanding yaitu menara pendingin tanpa menggunakan pendistribusi cairan.

4. Hasil dan Pembahasan

Contoh data hasil pengukuran yaitu Tabel 1, untuk menara pendingin tanpa menggunakan pen-distribusi cairan, sedangkan 17 tabel data serupa lainnya tak dicantumkan.

Laju aliran massa udara dihitung atas dasar hasil pengukuran pada venturimeter yang dijaga tetap, yaitu tekanan saluran masuk sebesar 10 psig, serta beda tekanan saluran masuk dan leher venturi sebesar 32 cm Hg.

Laju aliran air ditentukan berdasarkan harga temperatur air masuk (T_{wi}) dan temperatur air keluar (T_{wo}). Dari data yang diperoleh, digunakan untuk menghitung karakteristik menara pendingin (NTU), sebagai berikut :

1. Nilai karakteristik menara pendingin (NTU), dihitung menggunakan *Simpson's rule*, sesuai Arora (1986).
2. Pada penelitian ini kisaran temperatur antara air masuk dan keluar menara, dibagi menjadi $n = 6$ buah interval kenaikan temperatur air T_w untuk menyelesaikan butir 1.

Harga efektivitas perpindahan kaor pada menara pendingin dihitung dengan persamaan (3). Contoh (satu dari enam tabel) hasil perhitungan NTU dan Eff disajikan pada Tabel 2.

Contoh cara membaca Tabel 2 adalah sebagai berikut. Untuk rasio laju aliran massa air/udara 7,700, temperatur air masuk menara 50 °C, dan tinggi pendistribusi cairan 30,5 cm, maka nilai NTU adalah 0,153, sedangkan nilai Eff adalah 0,147.

Contoh grafik dari ke dua butir pertama di atas disajikan pada Gambar dan Gambar

Dari hasil perhitungan yang didapat, selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik, yaitu :

Tabel 1. Data hasil pengukuran menara pendingin tanpa pendistribusi cairan (kosongan), $Z = 30,5 \text{ cm}$, $T_{db} = 27^\circ\text{C}$ & $T_{wb} = 22^\circ\text{C}$

Temp. air masuk Rata-rata T_w ($^\circ\text{C}$)	Laju aliran air, Q_w (l/menit)	Temp. air masuk T_{wi} ($^\circ\text{C}$)	Temp. air keluar T_{wa} ($^\circ\text{C}$)	Temp. ud. keluar	
				T_{db} ($^\circ\text{C}$)	T_{wb} ($^\circ\text{C}$)
45	0,8	44,8	41,1	36	34
	1,3	45,0	41,8	39	38
	1,7	45,0	42,3	39	38
50	0,8	50,1	44,9	39	37
	1,3	50,0	46,2	41	40
	1,7	50,1	46,7	41	39
55	0,8	55,0	48,6	43	41
	1,3	55,0	50,1	45	43
	1,7	55,0	50,7	46	44
60	0,8	60,1	52,1	47	44
	1,3	59,9	54,1	49	47
	1,7	60,0	54,6	53	48

Tabel 2. Nilai *Number of Transfer Unit (NTU)* dan Efektivitas (*Eff*) Menara Pendingin dengan Pendistribusi Cairan Dua Sekat.

m_w/m_a	7,700				5,888				3,624			
	T_{ss} ($^\circ\text{C}$)				T_{ss} ($^\circ\text{C}$)				T_{ss} ($^\circ\text{C}$)			
	45	50	55	60	45	50	55	60	45	50	55	60
30,5	0,200	0,153	0,153	0,149	0,233	0,225	0,229	0,230	0,353	0,377	0,328	0,296
	0,135	0,147	0,167	0,188	0,179	0,196	0,227	0,255	0,265	0,304	0,315	0,332
61	0,214	0,189	0,172	0,163	0,153	0,266	0,268	0,225	0,427	0,471	0,477	0,436
	0,152	0,164	0,178	0,197	0,143	0,214	0,242	0,251	0,290	0,335	0,369	0,394
91,5	0,200	0,222	0,217	0,188	0,295	0,376	0,332	0,264	0,604	0,640	0,603	0,553
	0,148	0,175	0,197	0,210	0,199	0,244	0,264	0,270	0,332	0,374	0,403	0,429

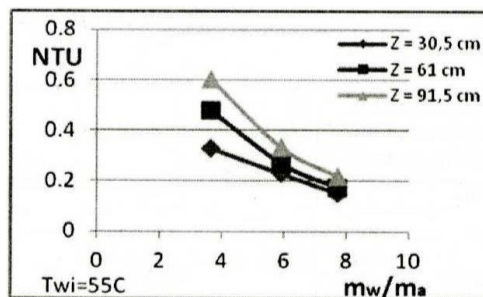
1. *NTU* versus m_w/m_a , dengan variasi nilai Z , T_{wi} dan jumlah sekat,
2. *NTU* versus Z , dengan variasi nilai m_w/m_a , T_{wi} dan jumlah sekat,
3. *Eff* versus *NTU*, dengan variasi nilai Z , m_w/m_a , T_{wi} dan jumlah sekat,

sedangkan contoh grafik butir ke tiga adalah Gambar 8.

Dari hasil percobaan ini, selanjutnya dicari persamaan korelasinya (Gambar 7), kemudian dibandingkan dengan penelitian lain.

Secara umum dapat disimpulkan bahwa nilai *NTU* tak banyak berubah dengan naiknya temperatur air masuk menara pendingin. Hal ini disebabkan dengan naiknya temperatur air masuk menara pendingin, akan menyebabkan meningkatnya beda temperatur antara udara dan air, sehingga perpindahan kalor sensibel lebih besar. Akan tetapi kenaikan temperatur air menyebabkan penurunan kalor laten, sehingga perubahan kalor total (sensibel dan laten) tidak cukup besar.

Gambar 5. menunjukkan hubungan antara karakteristik menara (*NTU*) dengan rasio laju aliran massa air/udara (m_w/m_a), untuk temperatur air masuk menara (T_{wi}) sebesar 55°C , dan pendistribusi cairan dua sekat serta dengan variasi tinggi bahan isian menara (Z). Pada gambar tersebut terlihat bahwa semakin besar rasio laju aliran massa air/udara, nilai karakteristik menara semakin turun, hal ini terjadi pada berbagai harga Z .

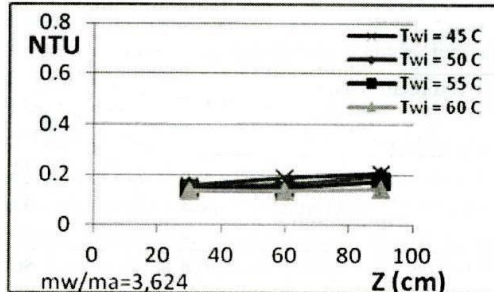


Gambar 5. Pengaruh rasio aliran air/udara (m_w/m_a), terhadap karakteristik menara, (*NTU*) untuk berbagai harga tinggi pendistribusi cairan (Z)

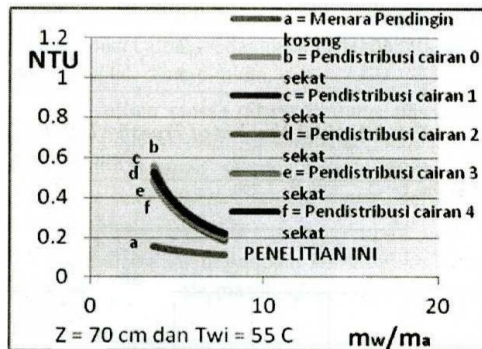
Pada nilai rasio laju aliran massa air/udara yang rendah penurunan harga *NTU* sangat tajam, tetapi untuk selanjutnya penurunan harga *NTU* semakin mengecil seiring penambahan rasio laju aliran massa air/udara, hal ini

disebabkan semakin kecilnya prosentase penguapan air yang terjadi setiap satuan aliran massa air masuk menara pendingin. Untuk menara pendingin tanpa pendistribusi cairan, perubahan harga *NTU* kecil karena permukaan kontak dan waktu kontak kecil/ sebentar.

Pada gambar 6 terlihat bahwa semakin tinggi pendistribusi cairan, maka nilai *NTU* semakin besar, ini terjadi pada berbagai harga temperatur air masuk menara. Hal ini disebabkan waktu kontak air dengan udara semakin lama, disamping itu bidang kontak antara air dan udara yang terbentuk semakin besar. dahan kalor sensibel lebih besar. Akan tetapi kenaikan temperatur air menyebabkan penurunan kalor laten, sehingga perubahan kalor total (sensibel dan laten) tidak cukup besar.



Gambar 6. Karakteristik (*NTU*) menara pendingin tanpa pendistribusi cairan, sebagai fungsi tinggi jatuh air (*Z*), untuk temperatur air masuk menara pendingin (*T_{wi}*) yang berbeda.



Gambar 7. Pengaruh rasio laju aliran massa air/ udara (*mw/ma*), terhadap karakteristik (*NTU*), untuk menara pendingin tanpa dan dengan pendistribusi cairan berbagai jumlah sekat.

Dari persamaan korelasi yang dihasilkan dapat terlihat bahwa pada nilai rasio laju aliran massa air/ udara yang rendah, semakin rendah nilai rasionya, dan semakin sedikit jumlah sekat pendistribusi cairan, maka nilai karakteristik menara pendingin (*NTU*) akan naik. Hal ini disebabkan penambahan jumlah sekat justru sebagai media air untuk meluncur ke dasar menara, sehingga waktu kontak menjadi sedikit.

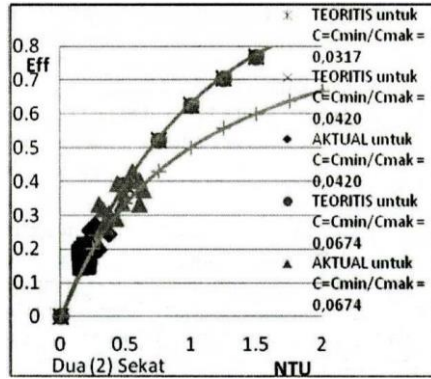
Pada Gambar 7 terlihat bahwa untuk pendistribusi cairan tanpa sekat (0-sekat) nilai karakteristik menara tinggi. Air akan lebih merata mem-basahi permukaan-permukaan pipa-pipa, kemudian air jatuh membasahi pipa-pipa di bawahnya serta waktu kontak antara air dengan udara lebih lama. Sebaliknya, semakin besar rasio laju aliran massa air/udara, dan untuk pendistribusi cairan dengan jumlah sekat semakin banyak memiliki nilai karakteristik menara yang semakin tinggi. Hal ini disebabkan bidang kontak (permukaan basah) lebih luas dan merata karena laju aliran massa air lebih besar.

Fungsi pendistribusi cairan sangatlah penting pada menara pendingin untuk menaikkan nilai karakteristiknya. Hal ini nampak jelas dari grafik persamaan korelasi yang diperoleh dari penelitian ini. Menara pendingin tanpa pendistribusi cairan memiliki nilai karakteristik yang lebih rendah bila dibandingkan menara pendingin dengan pendistribusi cairan. Untuk rasio laju aliran massa air/ udara yang rendah, nilai karakteristik menara pendingin dengan pendistribusi cairan bisa mencapai dua kali lebih besar (bahkan lebih dari tiga kali) nilai karakteristik menara pendingin tanpa pendistribusi cairan.

Dengan mengabaikan proses evaporasi yang terjadi pada menara pendingin jenis *couterflow*, maka efektivitas teoritis dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-N(1-C)]}{1 - C \exp [-N(1-C)]} \quad (4)$$

dengan ϵ = efektivitas perpindahan kalor, $N = NTU$, C (laju kapasitas) = C_{min}/C_{max} . Dalam hal ini $C_{min} = m_a.c_a$, sedangkan $C_{max} = m_w.c_w$.



Gambar 8. Hubungan Efektivitas (*Eff*) dan Karakteristik (*NTU*) menara pendingin dengan pendistribusi cairan dua sekat (perbandingan antara teoritis dan aktual).

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara karakteristik (*NTU*) dan efektivitas (*Eff*) menara pendingin dengan pendistribusi dua sekat, diban-dingkan antara nilai aktual dan teoritis. Walaupun titik-titik pengamatan masih cukup menyebar, tetapi polanya sudah jelas (mengikuti pola teoritis). Penyebaran disebabkan kemungkinan kemampuan baca alat dan faktor stabilitas.

Perbandingan dengan Penelitian Lain

Perbandingan antara hasil penelitian ini dengan penelitian lain disajikan pada Gambar 9. Notasi yang digunakan pada penelitian ini ada yang berbeda dengan notasi yang digunakan pada penelitian lain. Agar terdapat kesesuaian, maka notasi-notasi yang berbeda perlu dijelaskan terlebih hulu sebagai berikut :

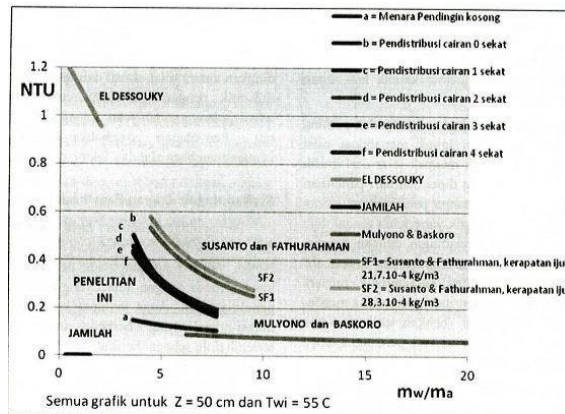
$$NTU = k_w a V / m_w = K a V / L$$

= Number of transfer unit
 = karakteristik menara $L/G = m_w / m_a$
 = perbandingan fluks massa air/udara
 = rasio laju aliran massa air/udara

Dari penelitian ini, dihasilkan rumusan karakteristik menara sebagai peubah- peubah yang mempengaruhinya, sebagai persamaan (5) berikut :

$$NTU = K \left(\frac{m_w}{m_a} \right)^b (Z)^c (T_{wi})^d \tag{5}$$

Untuk menara pendingin tanpa pendistribusi cairan (kosongan), nilai $K=8,2505$, $b = -0,4456$, $c=0,1444$, $d = -1,0014$, kesalahan relatif 4,84%. Untuk menara pendingin dengan pendistribusi cairan tanpa sekat, nilai $K=0,7372$, $b=-1,4746$, $c=0,2786$, $d=0,1066$, kesalahan relatif 14,82%. Untuk menara pendingin dengan pendistribusi cairan satu sekat, nilai $K=1,1763$, $b=-1,2412$, $c=0,3163$, $d=0,1565$, kesalahan relatif 12,79%. Untuk menara pendingin dengan pendistribusi cairan dua sekat, nilai $K=1,4476$, $b = -1,1947$, $c=0,3253$, $d=0,2414$, kesalahan relatif 9,61%. Untuk menara pendingin dengan pendistribusi cairan tiga sekat, nilai $K=3,7834$, $b = -1,1622$, $c=0,3823$, $d=0,5435$, kesalahan relatif 8,16%. Untuk menara pendingin dengan pendistribusi cairan empat sekat, nilai $K=9,4819$, $b=-1,1523$, $c=0,3883$, $d=0,7658$, kesalahan relatif 11,66%. Persamaan di atas berlaku untuk m_w/m_a 3,624-7,700; Z30,5-91,5 cm, T_{wi} 45-60°C.



Gambar 9. Pengaruh rasio laju aliran massa air/udara (m_w/m_a), terhadap karakteristik menara pendingin (*NTU*), dari berbagai hasil penelitian

El Dessouky (1993), melakukan penelitian tentang karakteristik menara pendingin dengan bahan isian terfluidisasi, dan menghasilkan rumusan karakteristik menara sebagai persamaan (6) berikut,

$$(KaV)/L = -2,297 - 0,152(L/G) + 0,00147(Z) + 0,0086(Twi) \quad (6)$$

yang berlaku untuk kisaran $L/G = 0,4-2$, $Z=300-500$ (mm), dan $Twi = 301-334$ (K), dengan deviasi standar sebesar 23% terhadap hasil percobaan.

Jamilah (1999), mengadakan penelitian ten-tang menara pendingin dengan plat aluminium sebagai pendistribusi cairan, dan menghasilkan

rumusan karakteristik menara sebagai persamaan (7).

$$(KaV)/L = 7,2034 \cdot 10^{-12} (L/G)^{-0,8184} (Z)^{0,5982} (Twi)^{3,941} \quad (7)$$

berlaku untuk kisaran $L/G=0,34 - 1,54$, $Z=30 - 90$ (cm), dan $Twi=38 - 58$ ($^{\circ}C$), dengan kesalahan relatif rata-rata sebesar 4,2% terhadap hasil per-cobaan. Efektivitas perpindahan panas menara rata-rata 6,64%.

Muyono (2000), melakukan penelitian tentang karakteristik menara pendingin dengan bahan isian pastik bergelombang, dan menghasilkan rumusan karakteristik menara sebagai persamaan (8).

$$(KaV)/L = 4,1849 \cdot 10^{-5} (L/G)^{-0,3047} (Z)^{0,141} (Twi)^{1,9074} \quad (8)$$

berlaku untuk kisaran $L/G = 6,25-27,34$, $Z = 30-90$ (cm), dan $Twi = 40-55$ ($^{\circ}C$), dengan kesalahan relatif rata-rata sebesar 4,09% terhadap hasil per-cobaan. Efektivitas rata-rata menara sebesar 30,3%.

Susanto dan Fathurahman (2010), meneliti tentang karakteristik menara pendingin air dengan bahan isian tali ijuk dan menghasilkan rumusan karakteristik menara sebagai fungsi peubah-peubah yang mempengaruhinya, sebagai persamaan (9a & 9b) berikut.

$$NTU = 165,24 \cdot 10^{-3} (m_w/m_a)^{-0,999} (Z)^{0,5343} (Twi)^{0,1429} \quad (9a)$$

untuk menara pendingin dengan kerapatan ijuk $21,7 \cdot 10^{-4}$ kg/m³, $m_w/m_a = 4,46 - 9,48$, $Z=30 - 90$ cm dan $Twi = 50 - 60$ $^{\circ}C$, dengan kesalahan relatif rata-rata 6,1%, dan

$$NTU = 3,35 \cdot 10^{-3} (m_w/m_a)^{-0,995} (Z)^{0,5050} (Twi)^{1,1643} \quad (9b)$$

untuk menara pendingin dengan kerapatan ijuk

$28,3 \cdot 10^{-4}$ kg/m³, $m_w/m_a = 4,46 - 9,48$, $Z = 30 - 90$

cm dan $Twi = 50 - 60$ $^{\circ}C$, dengan kesalahan relatif rata-rata 5,5%

5. Kesimpulan

Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari hasil penelitian ini, adalah sebagai berikut:

1. Karakteristik menara (NTU) mengalami ke-naikan dengan bertambahnya tinggi pendistribusi cairan (Z).
2. Untuk nilai rasio laju aliran massa air/udara rendah, karakteristik menara (NTU) mengalami penurunan dengan bertambahnya jumlah sekat, sedangkan untuk rasio laju aliran massa air/udara tinggi, sebaliknya.
3. Karakteristik menara (NTU) dan efektivitas perpindahan kalor (Eff) mengalami penurunan dengan naiknya rasio laju aliran air/udara (m_w/m_a).
4. Untuk rasio laju aliran air/udara yang rendah, nilai karakteristik menara pendingin dengan pendistribusi cairan bisa mencapai dua kali lebih besar (bahkan lebih dari tiga kali) nilai karakteristik menara pendingin tanpa pendis-tribusi cairan.
5. Menara pendingin tanpa pendistribusi cairan nilai NTU rerata dengan pendistribusi cairan, nilai NTU rerata 31,5% dan Eff rerata 25,0%.

Persamaan empiris yang menghubungkan an-tara karakteristik menara dengan peubah-peubah yang mempengaruhinya adalah untuk menara pendingin tanpa pendistribusi cairan (kosong), nilai $K=8,2505$, $b= -0,4456$, $c=0,1444$, $d=-1,0014$, kesalahan relatif 4,84%. Untuk menara pendingin dengan pendistribusi cairan tanpa sekat, nilai $K=0,7372$, $b= -1,4746$, $c=0,1444$, $d=-1,0014$, kesalahan relatif 14,82%. Untuk menara pendingin dengan pendistribusi cairan satu sekat, nilai $K=1,1763$, $b= -1,2412$, $c=0,3163$, $d=-0,1565$, kesalahan relatif 12,79%. Untuk menara pendingin dengan pendistribusi cairan dua sekat, nilai

$K=1,4766$, $b= -1,947$, $c=0,3253$, $d=-0,2414$, kesalahan relatif 9,61%. Untuk menara pendingin dengan pendistribusi cairan tiga sekat, nilai $K=3,7834$, $b= - 1,1622$, $c=0,3823$, $d=-0,5435$, kesalahan relatif 8,16%. Untuk menara pendingin dengan pendistribusi cairan empat sekat, nilai $K=9,4819$, $b= -1,1523$, $c=0,3883$, $d= -0,7658$, kesalahan relatif 11,66%. Persamaan di atas berlaku untuk $mw/ma= 3,624 - 7,700$, $Z = 30,5 - 91,5$ cm dan $T_{wi} = 45 - 60$ °C

REFERENSI

- [1] -----, 1993, *ASHRAE Handbook, Fundamentals*, Atlanta.
- [2] Arora, CP., 1986, *Refrigeration and Air Conditioning*, 3th ed. Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- [3] Chapra, 1996, *Metode Numerik*, Erlangga, Jakarta.
- [4] El-Dessouky, H., 1993, *Thermal and Hydraulic Performance of a Three-Phase Fuidized Cooling Tower*, *Thermal Experimental and Fluid Science*, 6, 417-426.
- [5] Haar, L., Gallagher, J.S., dan Kell, G.S., 1984, *NBS/ NRC Steam Tables*. The United States Secretary of Commerce.
- [6] Jamilah, S., 1999, *Unjuk Kerja Menara Pendingin dengan Plat Aluminium sebagai Pendistribusi Aliran*, Laporan Penelitian Laboratorium Teknologi Kimia Umum, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta.
- [7] Prayitno, 1993, *Karakteristik Susunan Bilah Pengisi yang Menggunakan Permukaan Bergelombang pada Menara Pendingin dengan Aliran Lawan Arah*, Laporan Penelitian Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta.
- [8] Mulyono dan Baskoro, 2000, *Karakteristik Pendingin dengan Bahan Isian Plastik Bergelombang*, Media Teknik, No. 1 Tahun XXII, Edisi Februari.