

Karakteristik Menara Pendingin dengan Bahan Isian Ijuk

Susanto Johanes

Program Diploma Teknik Mesin, SV, UGM

Abstract

In this study the characteristic of a water cooling tower by using the palm fibre as the packing material have been investigated experimentally. The experiments were carried out in a rectangle glass tower of 81 cm² cross sectional area and 100 cm height. The packing used was constructed of 8 palm-fibre ropes (of about 0,6 cm diameter), zigzag vertically placed above the stainless steel support on the tower bottom. Its type has 28,3.10⁻⁴ kg weighs of rope every m³ volume of the packing.

The experimental results show that the increasing of the water inlet temperature and the packing height cause the increasing of the tower characteristic. Mean while, the increasing of the water/air mass flow rate ratio causes the decreasing of the tower characteristic. The tower characteristic is as a function of the investigated variables which expressed as:

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

with the relative error of 5,5%.

This equation is valid for the range of variables, as m_w/m_a which is ranged from 4,46 to 9,48, Z which is ranged from 30 to 90 cm, T_{wi} which is ranged from 50 to 60 °C. The mean effectiveness of the heat transfer were calculated to be 25,9%.

Keywords: *Cooling tower, characteristic, effectiveness, palm-fibre ropes.*

1. Pendahuluan

Menara pendingin banyak digunakan terutama di perusahaan-perusahaan, yang memanfaatkan air sebagai media pendingin, untuk peralatan yang memerlukannya. Biasanya menara pendingin berbentuk menara kosong, tanpa bahan isian. Butiran-butiran air dijatuhkan dari puncak menara, sedangkan udara dihembuskan dari bawah. 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 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 ke dua 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 pendistribusi aliran. Mulyono dan Baskoro (2000) meneliti tentang karakteristik menara pendingin dengan bahan isian plastik bergelombang.

Pada penelitian ini, bahan isian menara adalah tali ijuk, diameter 0,6 cm, yang disusun pada kerapatan 28,3.10⁻⁴ kg/m³. Peneliti sengaja menggunakan bahan alami yang ada disekitar, selain murah dan tahan air/cuaca, permukaan tali yang terbentuk, diharapkan menghasilkan luasan basah yang besar, dan waktu kontak antara air dan udara lebih lama.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari karakteristik menara pendingin dengan bahan isian tali ijuk. Sebagai variabelnya adalah rasio laju aliran massa air/udara, tinggi bahan isian, dan suhu air panas masuk menara.

2. Fundamental

Parameter yang sering digunakan oleh industri dan para perancang menara pendingin sesuai dengan Stoecker (1987), adalah karakteristik menara (K_o aV/m_w) atau NTU (*number of transfer unit*), yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut, Arora (1986).

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

Karakteristik menara ini tidak tergantung kondisi lingkungan, dan sering digunakan oleh industri untuk menentukan unjuk kerja termal menara pendingin, pada kisaran kondisi operasi yang luas.

Persamaan (1) dapat dihitung secara numerik dengan menggunakan *Simpson's rule*, sesuai Arora (1986). Nilai h_s pada persamaan (1) diperoleh langsung dari tabel psikrometrik, Ashrae Handbook (1993), atau menggunakan persamaan (2a) dan (2b).

$$h_s = 22810,643 - 152,789T + 0,257T^2 \quad (2a)$$

$$\text{dan } h_s = 39783,759 - 258,347T + 0,421T^2 \quad (2b)$$

berturut-turut berlaku untuk kisaran temperatur 313,15 – 321,15 K dan 321,15 – 329,15 K. Persamaan (2a) dan (2b), diperoleh dengan mengolah sifat-sifat udara dari Ashrae Handbook (1993). Sedangkan perubahan entalpi jenis udara dihitung dengan persamaan (3), sesuai Arora (1986).

$$\frac{d_h}{c_w dT_w} = - \frac{m_w}{m_a} \quad (3)$$

Unjuk kerja menara pendingin dapat juga dinyatakan sebagai efektivitas perpindahan kalor, yang dinyatakan dengan persamaan (4) dan (5), Prayitno (1993).

$$Eff = \frac{T_r}{T_r - T_{ap}} \quad (4)$$

atau,

$$Eff = \frac{\text{Range}}{\text{Range} + \text{Approach}} \quad (5)$$

Pada menara pendingin, perpindahan kalor berlangsung dari air panas ke udara tak jenuh, sesuai Stoecker (1987). Kontak langsung antara air panas dan udara akan menyebabkan terjadinya penguapan sebagian air tersebut, ini merupakan kombinasi perpindahan kalor dan massa, 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 konveksi, sehingga variabel yang menentukan adalah koefisien konveksi, 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. Beda tekanan ini hampir sebanding dengan rasio kelembabannya. Adanya perpindahan massa ini menyebabkan terjadinya perpindahan kalor laten, yang besarnya tergantung dari tetapan keseimbangan, luas permukaan kontak, beda antara rasio kelembaban udara jenuh dengan rasio kelembaban udara, dan kalor laten penguapan. Koefisien konveksi dan tetapan keseimbangan 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 menggunakan tali ijuk sebagai penghambat aliran air, maka semakin luas bidang kontak (permukaan basah) antara air dan udara, sehingga akan memperbesar laju perpindahan kalor. Sehingga ada korelasi antara laju aliran air dan udara serta luas permukaan basah. Faktor ketinggian bahan isian, jelas sekali sangat menentukan luas bidang kontak, dengan asumsi air terdistribusi dengan baik, sehingga berpengaruh terhadap laju perpindahan kalor.

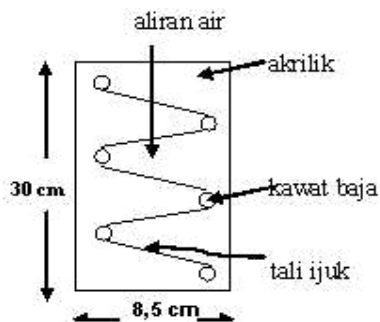
3. Metodologi

Bahan

Sebagai bahan isian menara pendingin, digunakan ijuk. Ijuk dipilin menjadi bentuk tali, dengan diameter rata-rata 0,6 cm, dan dipasang mengait batang baja yang terpasang pada akrilik, secara zig-zag searah aliran air, sebanyak 8 tali berjajar. Kemudian dipak dengan dimensi $8,5 \times 8,5 \times 30 \text{ cm}^3$, sebagaimana terlihat pada Gambar 1. Pada penelitian ini, dibuat *packing* ijuk dengan kerapatan $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Alat

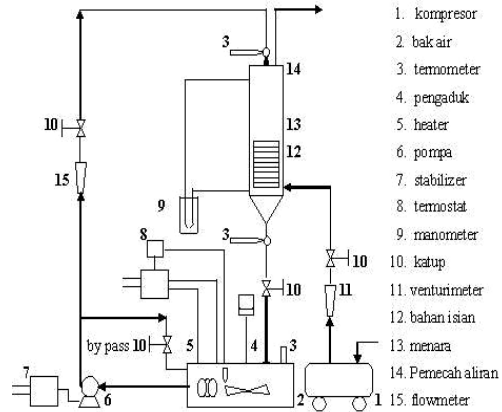
Menara pendingin yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari kaca, ukuran penampang $9 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$, tinggi 100 cm, dipasang diatas penyangga plat berlubang yang terpasang pada kerangka stainless steel. Rangkaian alat dan menara pendingin yang digunakan, masing-masing ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



Gambar 1. Pemasangan tali ijuk pada batang baja



Gambar 2. Tiga buah pak bahan isian menara



Gambar 3. Rangkaian Alat Percobaan

Percobaan

Percobaan dimulai dengan memanaskan air dalam bak sampai temperatur yang diinginkan (diatur oleh *temperature control*). Pompa air dihidupkan untuk mensuplai air panas ke puncak menara sehingga terjadi siklus air. Laju aliran air diatur dengan cara mengatur katup (*gate valve*) yang terpasang pada pipa 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, sebagaimana terlihat pada Gambar 5, terbuat dari pipa kapiler, sebanyak 64 batang, berdiameter dalam 1,1 mm, agar air masuk menara terdistribusi dengan baik.



Gambar 4. Menara Pendingin



Gambar 5. Pemecah aliran air

Setelah temperatur air masuk puncak menara terukur tetap, kemudian udara dihembuskan dari dasar masuk menara, sebelumnya didinginkan terlebih dahulu 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 (bola basah dan kering), laju aliran air dan udara.

Percobaan ini dilakukan dengan variasi temperatur air masuk menara (50°C , 55°C dan 60°C), rasio laju aliran massa air/udara (4,46, 7,25 dan 9,48), tinggi bahan isian (30 cm, 60 cm dan 90 cm).

4. Hasil dan Pembahasan

Contoh data hasil pengukuran yaitu pada Tabel 1.

Tabel 1. Data hasil pengukuran untuk tinggi bahan isian, $Z = 60$ cm

Temp. air msk, T_{wi} ($^{\circ}\text{C}$)	Laju aliran air, Q_w (l/mnt)	Temp ud masuk		Temp ud keluar		Temp air kel, T_{wo} ($^{\circ}\text{C}$)
		T_{db} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{wb} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{db} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{wb} ($^{\circ}\text{C}$)	
50	1,7	26	19	48	47	45,1
	1,3	26	19	47,5	46,5	44,3
	0,8	26	19	47,5	46	40,3
55	1,7	26	20	54	49	48,6
	1,3	26	20	54	51	46,9
	0,8	26	20	54,5	51	42,7
60	1,7	27	19	57,5	56	50,8
	1,3	27	19	58	56,5	49,4
	0,8	27	19	56,5	55,5	43,8

Laju aliran massa udara dihitung sesuai dengan Holman (1985), atas dasar hasil pengukuran pada venturimeter yang dijaga tetap, yaitu pada tekanan saluran masuk sebesar 10 psig, serta beda

tekanan saluran masuk dan leher venturi sebesar 32cm Hg.

Laju aliran massa air ditentukan berdasarkan harga temperatur rerata air masuk (T_{wi}) dan temperatur air keluar (T_{wo}), serta sifat-sifat air sesuai dengan Haar (1984).

Dari data yang diperoleh dan besaran-besaran yang telah 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 ΔT_w untuk menyelesaikan butir 1.

Harga efektivitas perpindahan kalor pada menara pendingin dihitung dengan persamaan (5). Hasil perhitungan NTU dan Eff disajikan pada Tabel 2.

Contoh cara membaca Tabel 2 adalah sebagai berikut. Untuk rasio laju aliran massa air/udara 7,25, temperatur air masuk menara 50°C , dan tinggi bahan isian 30 cm, maka nilai NTU adalah 0,232, sedangkan nilai Eff adalah 0,180.

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

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

Dari hasil percobaan ini, selanjutnya dicari persamaan korelasinya, menggunakan metode regresi linear ganda, Chapra (1996), kemudian dibandingkan dengan hasil penelitian lain.

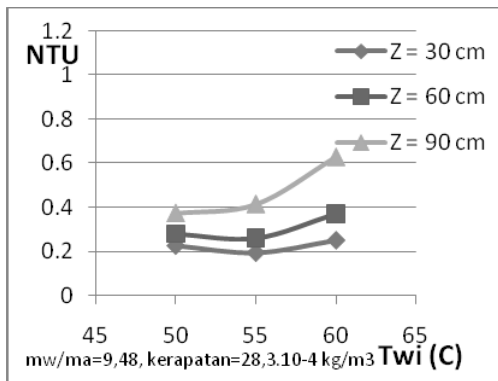
Gambar 6, menunjukkan hubungan antara karakteristik menara, NTU dan temperatur air masuk, T_{wi} . Pada Gambar 6, terlihat bahwa semakin tinggi temperatur air masuk menara (T_{wi}) mengakibatkan nilai NTU sedikit meningkat. Hal ini disebabkan, dengan naiknya temperatur air akan menyebabkan meningkatnya beda temperatur antara udara dan air, sehingga perpindahan kalor sensibel lebih besar. Akan tetapi kenaikan tempe-

Tabel 2. Nilai *Number of Transfer Unit* (NTU) dan Efektivitas (Eff) Menara Pendingin

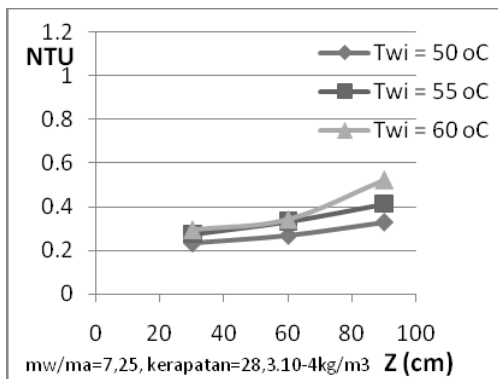
m_w/m_a	9,48			7,25			4,46		
	T _{wi} (°C)			T _{wi} (°C)			T _{wi} (°C)		
Z (cm)	50	55	60	50	55	60	50	55	60
30	0,224 0,153	0,192 0,171	0,248 0,202	0,232 0,180	0,274 0,224	0,294 0,246	0,495 0,297	0,458 0,338	0,520 0,371
60	0,278 0,158	0,258 0,183	0,370 0,224	0,267 0,184	0,332 0,231	0,341 0,259	0,606 0,313	0,561 0,351	0,644 0,395
90	0,372 0,168	0,413 0,203	0,627 0,248	0,328 0,197	0,412 0,246	0,521 0,295	0,929 0,345	0,771 0,383	0,886 0,438

ratur air menyebabkan penurunan kalor laten, sehingga kenaikan perpindahan kalor total (sensibel dan laten) tidak signifikan.

Gambar 7. menunjukkan hubungan antara karakteristik menara dan tinggi bahan isian menara, untuk rasio laju aliran massa air/udara = 7,25, dengan variasi temperatur air masuk menara.



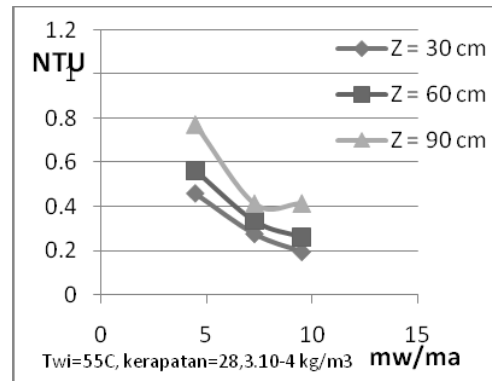
Gambar 6. Pengaruh temperatur air masuk (T_{wi}), terhadap karakteristik menara (NTU)



Gambar 7. Pengaruh tinggi bahan isian (Z), terhadap karakteristik menara (NTU)

Pada Gambar 7, terlihat bahwa semakin tinggi bahan isian, maka nilai NTU semakin besar, ini terjadi pada berbagai harga temperatur air masuk menara. Hal ini disebabkan karena waktu kontak air dengan udara semakin lama, disamping itu bidang kontak antara air dan udara yang terbentuk semakin besar.

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara karakteristik menara (NTU) dengan rasio laju aliran massa air/udara (m_w/m_a), untuk temperatur air masuk menara, T_{wi} = 55°C, dengan variasi tinggi bahan isian menara. 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. 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.



Gambar 8. Pengaruh rasio laju aliran massa air/udara (m_w/m_a), terhadap karakteristik menara, (NTU)

Pada penelitian ini dihasilkan nilai rata-rata karakteristik menara, $NTU = 0,652 - 0,331$, dan efektivitas perpindahan kalor, $Eff=(35,9-19,0)\%$, ini berlaku untuk kisaran rasio laju aliran massa air/udara, $m_w/m_a=4,46-9,48$.

Perbandingan dengan Penelitian Lain

Persamaan korelasi dari hasil penelitian ini, yang merupakan hubungan antara karakteristik menara dengan faktor-faktor yang mempengaruhinya, untuk selanjutnya dibandingkan dengan hasil penelitian lain, seperti terlihat pada Gambar 9.

Dari penelitian ini, dihasilkan rumusan karakteristik menara, sebagai persamaan (6).

$$NTU=3,35.10^{-3}(m_w/m_a)^{-0,995}(Z)^{0,5050}(T_{wi})^{1,1643} \quad (6)$$

yang berlaku untuk kisaran m_w/m_a 4,46-9,48, Z 30-90 cm, dan T_{wi} 50-60°C, dengan kesalahan relatif rata-rata 5,5%. Kurva hasil penelitian ini pada Gambar 9, adalah untuk nilai $Z = 60$ cm dan $T_{wi} = 50$ °C.

El Dessouky (1993) melakukan penelitian tentang karakteristik menara pendingin dengan bahan isian terfluidisasi, dan menghasilkan rumusan karakteristik menara sebagai persamaan (7).

$$(KaV)/L = -2,297-0,152(L/G)+0,00147(Z) +0,0086(T_{wi}) \quad (7)$$

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

Jamilah (1999) mengadakan penelitian tentang menara pendingin, dengan plat aluminium sebagai pendistribusi cairan, dan menghasilkan rumusan karakteristik menara sebagai persamaan (8).

$$(KaV)/L=7,2034.10^{-12}(L/G)^{-0,8184}(Z)^{0,5982}(T_{wi})^{3,941} \quad \dots(8)$$

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

Mulyono dan Baskoro (2000) melakukan penelitian tentang karakteristik menara pendingin, dengan bahan isian plastik bergelombang, dan menghasilkan rumusan karakteristik menara sebagai persamaan (9).

$$(KaV)/L=4,1849.10^{-5}(L/G)^{-0,3047}(Z)^{0,141}(T_{wi})^{1,9074} \quad \dots(9)$$

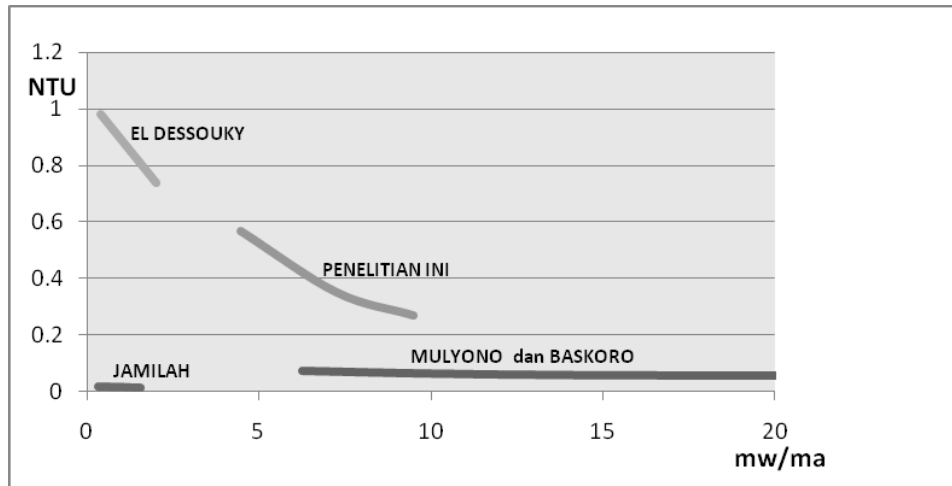
berlaku untuk kisaran $L/G = 6,25-27,34$, $Z = 30 - 90$ (cm), dan $T_{wi} = 40-55$ (°C), dengan kesalahan relatif rata-rata sebesar 4,09% terhadap hasil percobaan. Efektivitas rata-rata menara sebesar 30,3%. Kurva pada Gambar 9, adalah untuk nilai $Z = 40$ cm dan $T_{wi} = 50$ °C

Pemecah aliran air memegang peranan penting pada penelitian menara pendingin, agar distribusi air pada bahan isian merata. Seluruh permukaan bahan pengisi diharapkan terbasahi oleh air, sehingga perpindahan kalor yang terjadi optimal. Untuk itu peneliti berusaha mencari alternatif lain untuk memperoleh pemecah aliran terbaik.

Jamilah (1999) dalam penelitiannya, menggunakan pemecah aliran air dengan bahan pipa PVC berdiameter 8 cm, yang dilubangi dengan ukuran 2 mm. Sedangkan Mulyono dan Baskoro (2000), dalam penelitiannya, menggunakan pemecah aliran air/distributor dengan diameter lubang 2 mm.

Peneliti telah mencoba berbagai macam model pemecah aliran air, diantaranya plat datar berlubang, pipa PVC ¾ inci yang dilubangi dengan ukuran 1,5 mm, permukaan cembung yang dilubangi, namun semua model yang telah dicoba hasilnya tak memuaskan. Untuk selanjutnya peneliti menggunakan model terakhir dan hasilnya cukup memuaskan, yaitu pemecah aliran yang terbuat dari 64 batang kapiler berdiameter 1,1 mm. Alat ini dapat menghasilkan distribusi aliran air yang cukup merata di seluruh permukaan atas bahan isian menara.

Selain itu, pada penelitian ini, jarak antara pemecah aliran dan permukaan atas bahan isian dijaga tetap (dengan menambah pipa pada pemecah aliran yang disesuaikan dengan tinggi bahan isian). Hal ini untuk menjaga agar karakter/pola aliran air dan perpindahan kalor tidak berubah, apabila dilakukan variasi tinggi



Gambar 9. Karakteristik menara NTU, dari beberapa hasil penelitian

bahan isian (Z). Seperti dikatakan Mulyono dan Baskoro (2000) dalam penelitiannya, akibat jarak jatuh yang panjang dari puncak menara ke bahan isian (untuk $Z=30$ cm dibandingkan dengan $Z = 60$ cm dan $Z=90$ cm), maka saat air jatuh di permukaan bahan isian, terjadi percikan air yang memperbesar luas perpindahan kalor.

Peneliti tidak bisa membandingkan penelitian yang dilakukan, dengan penelitian lain dalam hal luas permukaan bahan isian, namun peneliti punya keyakinan bahwa terdapat perbedaan luas permukaan basah yang dihasilkan untuk setiap penelitian, yang memberikan kontribusi pada perpindahan kalor, sehingga pada akhirnya mengakibatkan nilai karakteristik menara yang berbeda.

5. Kesimpulan

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

1. Karakteristik menara (NTU) hanya sedikit mengalami kenaikan dengan naiknya temperatur air masuk menara (T_{wi}).
2. Karakteristik menara (NTU) mengalami kenaikan dengan bertambahnya tinggi bahan isian (Z).
3. Karakteristik menara (NTU) dan efektivitas perpindahan kalor (Eff) mengalami penurunan dengan naiknya rasio laju aliran massa air/udara (m_w/m_a).

4. Persamaan empiris yang menghubungkan antara karakteristik menara dengan peubah-peubah yang mempengaruhinya adalah: $NTU=3,35 \cdot 10^{-3} (m_w/m_a)^{-0,995} (Z)^{0,5050} (T_{wi})^{1,1643}$, berlaku untuk m_w/m_a 4,46-9,48, Z 30-90 cm, dan T_{wi} 50-60°C, dengan kesalahan relatif rata-rata 5,5%

5. Rentang nilai rata-rata karakteristik menara, NTU adalah 0,652-0,331, dan efektivitas perpindahan kalor, Eff adalah (35,9-19,0)%, ini berlaku untuk kisaran rasio laju aliran massa air/udara, $m_w/m_a = 4,46-9,48$.

Daftar Notasi

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 sebagai berikut.

NTU = Number of transfer unit

$$= k_o aV/m_w = KaV/L$$

= karakteristik menara

L/G = perbandingan fluks massa air/udara

$$= m_w/m_a$$

= rasio laju aliran massa air/udara

k_o = koefisien difusi uap air ke dalam udara, $kg/(m^2 \text{ det})$

a = luas permukaan air tiap satuan volume, m^2/m^3

V = Volume pendinginan (air), m^3

m_a = laju aliran massa udara, kg/det

m_w = laju aliran massa air, kg/det