

KARAKTERISTIK MENARA PENDINGIN DENGAN BAHAN ISIAN TALI IJUK

Susanto Johannes¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

Masuk: 11 Mei 2011, revisi masuk : 19 Juli 2011, diterima: 29 Juli 2011

ABSTRACT

In this study the characteristics of a water cooling tower with 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 and cross of water flow, and then it placed above the stainless steel support on the tower bottom. There were two type of packing i.e. 21,7.10⁻⁴ and 28,3.10⁻⁴ kg weigh of rope every m³ volume of the packing. The experimental results show that the increasing of the water inlet temperature and packing height causes 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 characteristics is as a function of the investigated variables which expressed as: $NTU = 165,24.10^{-3} (m_w/m_a)^{-0,999} (Z)^{0,5343} (T_{wi})^{0,1429}$. It is for 21,7.10⁻⁴ kg/m³ of the specification of the packing material, with the relative error of 6,1 %, and $NTU = 3,35.10^{-3} (m_w/m_a)^{-0,995} (Z)^{0,5050} (T_{wi})^{1,1643}$. It is for 28,3.10⁻⁴ kg/m³ of the specification of the packing material, with the relative error of 5,5 %. These equations are valid for the range variables, they are m_w/m_a of 4,46 – 9,48, Z of 30 – 90 cm, T_{wi} of 50 – 60 °C. The mean effectiveness of the heat transfer were calculated to be 24,8 % and 25,9 %, respectively for 21,7.10⁻⁴ and 28,3.10⁻⁴ kg/m³ of the specifications of the packing material.

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

INTISARI

Telah dilakukan penelitian secara eksperimental tentang karakteristik menara pendingin air dengan bahan isian pak ijuk. Pelaksanaan percobaan dilakukan di dalam menara yang terbuat dari kaca, berpenampang segi empat, dengan luas penampang lintang 81 cm² dan tinggi 100 cm. Pak ijuk terbuat dari 8 utas tali ijuk (lebih kurang berdiameter 0,6 cm) yang dipasang secara zig-zag dalam arah memotong aliran air, kemudian diletakkan di atas penyangga terbuat dari plat baja tahan karat, yang berada di dasar menara. Ada dua macam pak ijuk yang dipakai dalam percobaan ini, yaitu tipe 21,7.10⁻⁴ and 28,3.10⁻⁴ kg berat ijuk setiap m³ volume pak ijuk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, dengan naiknya temperatur air masuk menara dan tinggi pak ijuk mengakibatkan naiknya nilai karakteristik menara pendingin. Akan tetapi dengan naiknya rasio laju aliran air/udara, menyebabkan turunnya nilai karakteristik menara pendingin. Karakteristik menara pendingin merupakan fungsi beberapa variabel yang mempengaruhinya, dan dinyatakan sebagai : $NTU = 165,24.10^{-3} (m_w/m_a)^{-0,999} (Z)^{0,5343} (T_{wi})^{0,1429}$. Persamaan ini berlaku untuk pak ijuk tipe 21,7.10⁻⁴ kg/m³, dengan kesalahan relatif sebesar 6,1 %, dan dinyatakan sebagai : $NTU = 3,35.10^{-3} (m_w/m_a)^{-0,995} (Z)^{0,5050} (T_{wi})^{1,1643}$. Persamaan ini berlaku untuk pak ijuk tipe 28,3.10⁻⁴ kg/m³, dengan kesalahan relatif sebesar 5,5 %. Ke dua persamaan di atas berlaku untuk rasio laju aliran air/udara, $m_w/m_a = 4,46 - 9,48$, tinggi bahan isian, $Z = 30 - 90$ cm, dan temperatur air masuk menara pendingin, $T_{wi} = 50 - 60$ °C. Efektivitas rerata perpindahan kalor yang diperoleh dari percobaan ini adalah sebesar 24,8 % dan 25,9 %, berturut-turut berlaku untuk pak ijuk tipe 21,7.10⁻⁴ kg/m³ dan 28,3.10⁻⁴ kg/m³.

Kata kunci: Menara pendingin, karakteristik, efektivitas, tali ijuk

PENDAHULUAN

Menara pendingin telah banyak digunakan terutama di perusahaan yang memanfaatkan air sebagai alat/media pendingin untuk banyak peralatan yang memerlukannya. Beberapa menara-menara pendingin kuno berbentuk menara kosong tanpa bahan isian. Butiran-butiran air dijatuhkan dari puncak menara pendingin, sedang udara dihembuskan dari bawah. Dengan konfigurasi seperti ini maka akan terjadi kontak yang baik antara air panas dengan udara sebagai media pendingin. Mekanisme dari proses 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 dari permukaan antar fase (air dan udara). Dengan memberikan bahan isian pada menara pendingin, maka ke dua faktor di atas diperbesar.

Penelitian yang pernah dilakukan berkaitan dengan ke dua faktor penentu laju perpindahan kalor tersebut di atas, telah banyak dilakukan. Penelitian yang telah dilakukan oleh Prayitno (1993), meneliti tentang karakteristik susunan bilah pengisi menggunakan permukaan bergelombang pada menara pendingin dengan aliran lawan arah. Penelitian yang dilakukan oleh Ramli (1998) meneliti tentang karakteristik dari 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.

METODE

Pada penelitian ini, bahan isian menara pendingin adalah tali ijuk, disusun pada kerapatan $21,7 \cdot 10^{-4}$ dan $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$. Semakin dirapatkan akan menghasilkan rongga yang sempit, sehingga aliran udara akan semakin terhambat, tetapi aliran air akan semakin merata/menyebar dan bidang kontak semakin luas. Tujuan pada penelitian ini

adalah untuk mempelajari karakteristik menara pendingin dengan bahan isian tali ijuk. Sebagai variabelnya adalah kerapatan ijuk $21,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ dan $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, rasio laju aliran massa air/udara, tinggi bahan isian, dan suhu air panas masuk menara pendingin. Bahan isian yang digunakan dalam penelitian ini memanfaatkan bahan alami, selain murah, ramah lingkungan, juga tahan terhadap air/cuaca.

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

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

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

Persamaan (1) dihitung secara numerik dengan menggunakan rumus *Simpson's rule*, menurut Arora (1986). Nilai h_s pada persamaan (1) diperoleh langsung dari tabel psikrometrik, atau menggunakan persamaan (2a) atau (2b) berikut :

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

$$h_s = 39783,759 - 258,347T + 0,421T^2 \dots (2b)$$

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), Arora (1986).

$$\frac{dh}{c_w dT_w} = \frac{m_w}{m_a} \dots\dots\dots (3)$$

Unjuk kerja menara pendingin dapat juga dinyatakan sebagai efektivitas perpindahan kalor, yang dinyatakan

dengan persamaan (4) dan (5), Prayitno (1993).

$$Eff = \frac{T_r}{(T_r + T_{ap})} \dots\dots\dots (4)$$

atau,

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

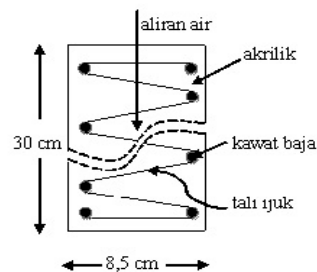
Pada menara pendingin, proses perpindahan kalor berlangsung dari air panas ke udara tak jenuh, Stoeker (1987). Kontak langsung antara air panas dan udara akan menyebabkan terjadinya penguapan sebagian air tersebut. Ini merupakan kombinasi perpindahan kalor dan massa, sehingga perpindahan kalor yang terjadi adalah kalor sensibel dan kalor laten. Ada dua hal yang menyebabkan terjadinya perpindahan kalor yaitu perbedaan temperatur bola kering dan perbedaan tekanan parsial antara permukaan air dan udara. Kedua penyebab ini berkombinasi membentuk potensial entalpi. Proses laju perpindahan kalor sensibel dari permukaan air panas ke udara merupakan proses 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. Dan beda tekanan ini hampir sebanding dengan rasio kelembaban. Adanya proses 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 lingkungan, dan kalor laten penguapan. Nilai 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 akan menghasilkan potensial entalpi yang menentukan karakteristik menara pendingin. Dengan tujuan memperbanyak jumlah ijuk (dalam kg/m³ volume ruang), maka semakin luas bidang kontak (permukaan basah) antara

air dan udara, sehingga akan memperbesar laju perpindahan kalor. Tetapi bila ijuk terlampau rapat, rongga aliran udara semakin sempit dan akan menghambat laju udara pendingin, sehingga ada korelasi antara laju aliran air dan udara serta luas permukaan basah. Faktor ketinggian bahan isian, jelas sekali sangat menentukan luas bidang kontak, sehingga berpengaruh terhadap laju perpindahan kalor.

Sebagai bahan isian menara pendingin digunakan ijuk. Ijuk dipilin menjadi bentuk tali dengan diameter 0,6 cm, dan setiap tali dipasang mengait kawat-kawat baja yang terpasang pada akrilik, secara zig-zag arah melintang aliran air (Gambar 1). Ada 8 utas tali dipasang seperti tersebut di atas, dan disusun berjajar (tegak lurus bidang gambar). Kemudian dipak dengan dimensi 8,5 x 8,5 x 30 cm³.



Gambar 1. Skema pemasangan tali ijuk pada kawat-kawat baja

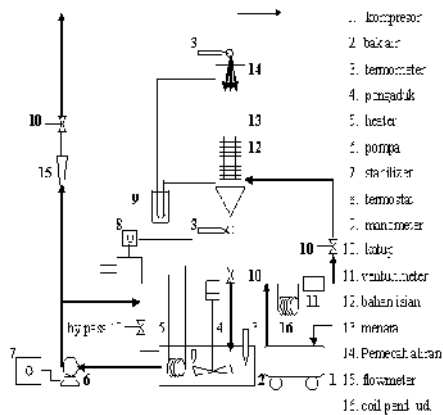
Packing ijuk dibuat dua macam, yaitu kerapatan 21,7.10⁴kg/m³, menggunakan 26 kawat baja dan dengan kerapatan 28,3.10⁴kg/m³, menggunakan 32 kawat baja (Gambar 2). Menara pendingin yang digunakan dalam penelitian ini, berukuran penampang 9cm x 9cm dan tinggi 100cm, terbuat dari kaca yang dipasang diatas penyangga plat berlubang yang terpasang pada kerangka *stainless steel*. Rangkaian alat dan menara pendingin yang digunakan, ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.

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 pendingin sehingga terjadi siklus 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*.



Gambar 2. Dua tipe Bahan Isian, kerapatan $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ (3 buah ditumpuk, bagian kiri) dan $21,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ (3 buah ditumpuk, bagian kanan)



Gambar 3. Rangkaian Alat Percobaan



Gambar 4. Menara Pendingin

Ada tiga pilihan *setting* bukaan katup yaitu untuk laju kapasitas 0,8, 1,3 dan 1,7 liter/menit. Di atas menara pendingin dipasang pemecah aliran air, terbuat dari pipa kapiler, sebanyak 64 buah, berdiameter dalam 1,1mm (Gambar 5), agar air masuk menara pendingin terdistribusi dengan baik.



Gambar 5. Pemecah aliran air

Setelah temperatur air masuk puncak menara pendingin terukur tetap, kemudian udara dihembuskan dari dasar masuk menara, sebelumnya didinginkan terlebih dahulu melalui koil berpendingin air. Laju aliran massa udara (dihasilkan oleh kompresor), diukur dengan venturi. 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 pendingin (50°C , 55°C dan 60°C), rasio laju aliran massa air/udara (4,46, 7,25 dan 9,48), tinggi bahan isian (30cm, 60 cm dan 90cm) serta kerapatan ijuk ($21,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ dan $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$).

PEMBAHASAN

Contoh data hasil pengukuran yaitu Tabel 1, untuk kerapatan ijuk $21,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ dan Tabel 2, untuk kerapatan ijuk $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$.

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

sebesar 32cmHg. Laju aliran air ditentukan berdasarkan harga temperatur rerata air masuk (T_{wi}) dan temperatur air keluar (T_{wo}), atas dasar nilai rapat massa yang diambil dari tabel air, sesuai Haar (1984).

Dari data yang diperoleh serta besaran-besaran yang telah didapat, digunakan untuk dapat menghitung karakteristik menara pendingin (NTU) yaitu nilai karakteristik menara pendingin (NTU), dihitung menggunakan *Simpson's rule*, Arora (1986). Selain itu pada penelitian ini, kisaran temperatur antara air masuk dan keluar menara pendingin, 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 3 dan 4. Contoh cara membaca Tabel 3 atau 4 adalah sebagai berikut. Untuk kerapatan ijuk $21,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, rasio laju aliran massa air/udara 7,25, temperatur air masuk menara 50°C dan tinggi bahan isian 30 cm, maka nilai NTU adalah 0,171, sedangkan nilai Eff adalah 0,152. Dari hasil perhitungan yang didapat, selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik, yaitu: 1. NTU versus T_{wi} , dengan variasi nilai Z, m_w/m_a dan kerapatan ijuk, 2. NTU versus m_w/m_a , dengan variasi nilai Z, T_{wi} dan kerapatan ijuk, 3. NTU

versus Z, dengan variasi nilai m_w/m_a , T_{wi} dan kerapatan ijuk. 4. Efektivitas (Eff) versus karakteristik menara pendingin (NTU). Hasil percobaan ini, selanjutnya dicari persamaan korelasinya dengan regresi linier ganda, Chapra (1996). Kemudian hasilnya dibandingkan dengan hasil penelitian lain.

Pada Gambar 6 menunjukkan hubungan antara karakteristik menara pendingin (NTU) dan temperatur air masuk (T_{wi}), untuk rasio laju aliran massa air/udara sebesar 9,48, kerapatan ijuk $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, serta untuk berbagai tinggi bahan isian (Z). Pada gambar tersebut 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 temperatur air menyebabkan penurunan kalor laten, sehingga kenaikan perpindahan kalor total (sensibel dan laten) tidak begitu besar.

Pada Gambar 7 menunjukkan hubungan antara karakteristik menara pendingin dan tinggi bahan isian, untuk rasio laju aliran massa air/udara = 9,48 dan kerapatan ijuk $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, dengan variasi temperatur air masuk ke menara pendingin.

Tabel 1. hasil pengukuran kerapatan ijuk = $21,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, tinggi, Z = 30cm

Temp. air masuk, T_{wi} ($^\circ\text{C}$)	Laju aliran air, Q_w (l/mnt)	Temp ud masuk		Temp ud keluar		Temp air keluar, T_{wo} ($^\circ\text{C}$)
		T_{db} ($^\circ\text{C}$)	T_{wb} ($^\circ\text{C}$)	T_{db} ($^\circ\text{C}$)	T_{wb} ($^\circ\text{C}$)	
27 / 54 %	1,7	25	19	44	42	45,8
		1,3	25	19	46	44
	0,8	25	19	46	43	41,1
26,6 / 53 %	1,7	25	19	51	45	48,9
		1,3	25	19	51	45
	0,8	25	19	51	45	43,5
26,9 / 53 %	1,7	25,5	19	55	54	52,3
		1,3	25,5	19	55	54
	0,8	25,5	19	54	52	45,8

Data hasil pengukuran untuk kerapatan ijuk = $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, tinggi, Z = 60 cm

Temp. air masuk, T_{wi} ($^{\circ}\text{C}$) T_{db}/RH Ruang	Laju aliran air, Q_w (l/mnt)	Temp ud masuk		Temp ud keluar		Temp air keluar, T_{wo} ($^{\circ}\text{C}$)	
		T_{db} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{wb} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{db} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{wb} ($^{\circ}\text{C}$)		
26,7 / 55%	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
27,4 / 53%	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
27,3 / 52%	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

Tabel 3. Nilai *Number of Transfer Unit* (NTU) dan Efektivitas (Eff) Menara Pendingin untuk kerapatan ijuk = $21,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$.

m_w/m_a	9,48			7,25			4,46		
	T_{wi} ($^{\circ}\text{C}$)			T_{wi} ($^{\circ}\text{C}$)			T_{wi} ($^{\circ}\text{C}$)		
Z (cm)	50	55	60	50	55	60	50	55	60
30	0,175	0,221	0,199	0,171	0,265	0,249	0,462	0,458	0,427
	0,135	0,169	0,188	0,152	0,208	0,232	0,287	0,319	0,346
60	0,236	0,351	0,239	0,232	0,456	0,278	0,737	0,626	0,554
	0,152	0,192	0,200	0,174	0,244	0,241	0,329	0,353	0,378
90	0,333	0,533	0,370	0,391	0,577	0,375	0,737	0,703	0,578
	0,165	0,214	0,224	0,206	0,256	0,266	0,329	0,364	0,383

Tabel 4. Nilai *Number of Transfer Unit* (NTU) dan Efektivitas (Eff) Menara Pendingin untuk kerapatan ijuk = $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$.

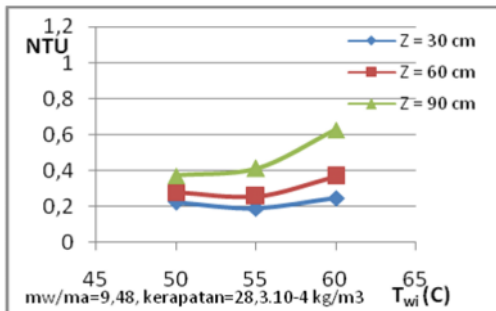
m_w/m_a	9,48			7,25			4,46		
	T_{wi} ($^{\circ}\text{C}$)			T_{wi} ($^{\circ}\text{C}$)			T_{wi} ($^{\circ}\text{C}$)		
Z (cm)	50	55	60	50	55	60	50	55	60
30	0,224	0,192	0,248	0,232	0,274	0,294	0,495	0,458	0,520
	0,153	0,171	0,202	0,180	0,224	0,246	0,297	0,338	0,371
60	0,278	0,258	0,370	0,267	0,332	0,341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

Pada Gambar 7 terlihat bahwa semakin tinggi bahan isian, maka nilai NTU semakin besar, ini terjadi pada

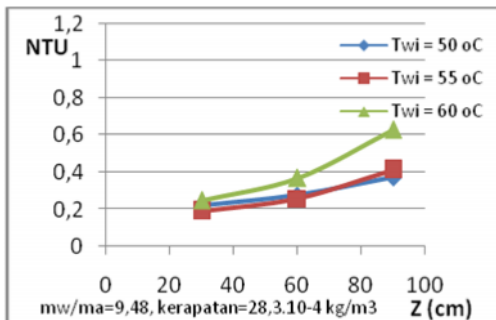
berbagai harga temperatur air masuk menara pendingin. Hal ini disebabkan karena, waktu kontak air dengan udara

semakin lama disamping itu bidang kontak antara air dan udara yang terbentuk semakin besar.

Gambar 8(a) menunjukkan hubungan antara karakteristik menara (NTU) dengan rasio laju aliran massa air/udara (m_w/m_a), untuk temperatur air masuk menara $T_{wi} = 55^\circ\text{C}$ dan kerapatan ijuk $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, dengan variasi tinggi bahan isian (Z).

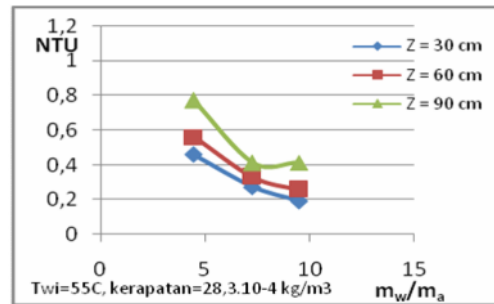


Gambar 6. Pengaruh temperatur air masuk (T_{wi}), dan tinggi bahan isian (Z), terhadap karakteristik menara pendingin (NTU)

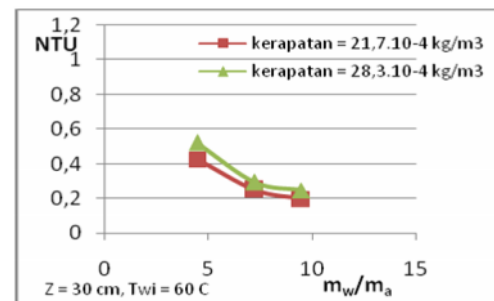


Gambar 7. Pengaruh tinggi bahan isian (Z), dan suhu air masuk (T_{wi}), terhadap karakteristik menara pendingin (NTU)

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 pendingin.



Gambar 8(a). Pengaruh rasio laju aliran massa air/udara (m_w/m_a), dan tinggi bahan isian (Z), terhadap karakteristik menara pendingin, (NTU), untuk kerapatan ijuk $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$.



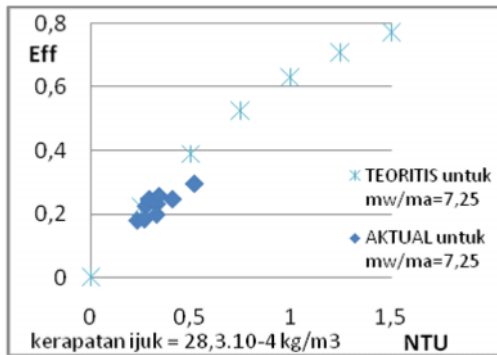
Gambar 8(b). Pengaruh rasio laju aliran massa air/udara (m_w/m_a), dan kerapatan, terhadap karakteristik menara, (NTU)

Pada Gambar 8(b) terlihat bahwa terjadi kenaikan nilai NTU ketika kerapatan ijuk bertambah. Hal ini disebabkan meningkatnya luas bidang kontak antara udara dengan air ketika kerapatan ijuk bertambah, selain itu terjadi peningkatan waktu kontak.

Gambar 9 menunjukkan hubungan antara efektivitas (Eff) dan karakteristik menara pendingin (NTU), untuk rasio laju aliran massa air/udara $m_w/m_a = 7,25$ dan kerapatan ijuk $28,4 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$. Kurva actual dibandingkan dengan kurva teoritis (aliran lawan arah), dengan asumsi mengabaikan evaporasi yang terjadi. Nilai efektivitas actual sedikit lebih rendah dari pada harga teoritis.

Pada penelitian ini dihasilkan nilai rata-rata karakteristik menara pendingin, $\text{NTU} = 0,620 - 0,313$, dan efektivitas perpindahan kalor, $\text{Eff} = (35,1 - 18,6)\%$, ini berlaku untuk kisaran rasio laju aliran massa air/udara, $m_w/m_a = 4,46 - 9,48$.

Dari hasil ini kemudian dibuat persamaan korelasi yang merupakan hubungan antara karakteristik menara pendingin dengan faktor-faktor yang mempengaruhinya, dan selanjutnya dibandingkan hasil penelitian lain. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 9. Hubungan efektivitas (Eff) dan karakteristik menara pendingin (NTU), teoritis dan aktual, untuk kerapatan ijuk $28,4 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ dan rasio laju aliran massa air/udara, $m_w/m_a = 7,25$

Hasil penelitian yang disajikan pada Gambar 10, adalah untuk nilai ketinggian bahan isian, $Z = 30 \text{ cm}$ dan temperatur air masuk menara pendingin, $T_{wi} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$, baik untuk kerapatan ijuk $21,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ dan $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$.

Dari penelitian ini, dihasilkan rumusan karakteristik menara, yaitu sebagai persamaan (6a) dan (6b) berikut :

$$NTU = 165,24 \cdot 10^{-3} (m_w/m_a)^{-0,999} (Z)^{0,5343} (T_{wi})^{0,1429} \quad (6a)$$

untuk kerapatan ijuk $21,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, dengan kesalahan relatif rata-rata 6,1 %,

$$NTU = 3,35 \cdot 10^{-3} (m_w/m_a)^{-0,995} (Z)^{0,5050} (T_{wi})^{1,1643} \quad (6b)$$

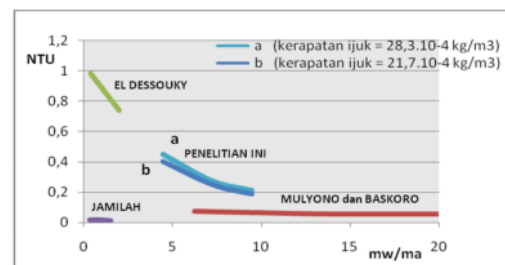
untuk kerapatan ijuk $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, dengan kesalahan relatif rata-rata 5,5 %. Ke dua persamaan di atas berlaku untuk kisaran $m_w/m_a = 4,46-9,48$, $Z = 30-90 \text{ (cm)}$, dan $T_{wi} = 50-60 \text{ (}^\circ\text{C)}$.

Menurut El Dessouky (1993), melakukan penelitian tentang karakteristik menara pendingin dengan

bahan isian terfluidisasi, dan menghasilkan rumusan karakteristik menara sebagai fungsi peubah-peubah yang mempengaruhinya, sebagai persamaan (7) berikut.:

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

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



Gambar 10. Karakteristik menara pendingin NTU, dari beberapa hasil penelitian.

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

$$(KaV)/L = 7,2034 \cdot 10^{-12} (L/G)^{0,8184} (Z)^{0,5982} (T_{wi})^{3,941} \quad (8)$$

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

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

$$(KaV)/L = 4,1849 \cdot 10^{-5} (L/G)^{-0,3047} (Z)^{0,141} (T_{wi})^{1,9074} \quad (9)$$

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

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

Peneliti telah mencoba berbagai macam model pemecah aliran air, diantaranya plat datar berlubang, pipa PVC $\frac{3}{4}$ inci yang dilubangi dengan ukuran 1,5 mm, permukaan cembung yang dilubangi, namun semua model yang telah dicoba hasilnya kurang 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.

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 bahan isian (Z). Seperti dikatakan Mulyono dan Baskoro (2000) dalam penelitiannya, akibat jarak jatuh yang panjang dari puncak menara pendingin 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 pendingin yang berbeda.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini dapat disimpulkan beberapa hal yaitu Karakteristik menara pendingin (NTU) hanya sedikit mengalami kenaikan dengan naiknya temperatur air masuk menara pendingin (T_{wi}). Karakteristik menara pendingin (NTU) mengalami kenaikan dengan bertambahnya tinggi bahan isian (Z). Karakteristik menara pendingin (NTU) mengalami kenaikan dengan bertambahnya kerapatan ijuk. Karakteristik menara pendingin (NTU) dan efektivitas perpindahan kalor (Eff) mengalami penurunan dengan naiknya rasio laju aliran massa air/udara (m_w/m_a).

Persamaan empiris yang menghubungkan antara karakteristik menara pendingin dengan peubah-peubah yang mempengaruhinya adalah :

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

untuk kerapatan ijuk $21,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, m_w/m_a 4,46 – 9,48, Z 30 - 90 cm, dan T_{wi} 50-60 $^{\circ}C$, dengan kesalahan relatif rata-rata 6,1 %, dan

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

untuk kerapatan ijuk $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, m_w/m_a 4,46 – 9,48, Z 30 - 90 cm, dan T_{wi} 50-60 $^{\circ}C$, dengan kesalahan relatif rata-rata 5,5 %.

Rentang nilai dari rata-rata karakteristik menara pendingin, NTU adalah 0,620-0,313, dan efektivitas perpindahan kalor, Eff adalah (35,1–

18,6) %, 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 tersebut perlu dijelaskan sebagai berikut.

- NTU = $k_w aV/m_w = K aV/L$
= *Number of transfer unit*
= karakteristik menara pendingin
- L/G = m_w/m_a
= perbandingan fluks massa air/udara
= rasio laju aliran massa air/udara
- k_w = 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_w = laju aliran massa air, kg/det
- c_w = panas jenis air pada tekanan tetap, $kJ/(kg \text{ K})$
- 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, K
- T_{wi} = temperatur air masuk menara pendingin, K
- T_{wo} = temperatur air keluar menara pendingin, K
- m_a = laju aliran massa udara, kg/det
- T_r = kisaran pendinginan atau = *range*, yaitu perbedaan antara suhu air masuk (T_{wi}) dan suhu air keluar (T_{wo}).
- T_{ap} = pendekatan suhu bola basah, atau = *approach*, didefinisikan sebagai selisih antara suhu air keluar menara pendingin (T_{wo}) dan suhu bola basah udara masuk menara pendingin (T_{si}).

DAFTAR PUSTAKA

- Arora, C P., 1986, *Refrigeration and Air Conditioning*, 3th ed., Tata Mcgraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
- El-Dessouky, H., 1993, *Thermal and Hydraulic Performance of a Three-Phase Fluidized Cooling tower*, *Thermal Experimental and Fluid Science*, 6, 417-426.
- Haar, L., Gallagher, J.S., dan Kell, G.S., 1984, *NBS/NRC Steam Tables*, The United States Secretary of Commerce, USA.
- Jamilah, S., 1999, *Unjuk Kerja Menara Pendingin dengan Plat Aluminium Sebagai Pendistribusi Aliran*, Laporan Penelitian Laboratorium Teknologi Kimia Umum, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Prayitno, 1993, *Karakteristik Susunan Bilah Pengisi yang Menggunakan Permukaan Bergelombang pada Menara Pendingin dengan Aliran Lawan Arah*, Laporan Penelitian DPP-UGM 1992/1993, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Mulyono dan Baskoro, 2000, *Karakteristik Menara Pendingin Dengan Bahan Isian Plastik Bergelombang*, Media Teknik, No.1, Tahun XXII, Edisi Februari.
- Ramli, 1998, *Karakteristik Menara Pendingin dengan Plat Sebagai Pendistribusi Cairan*, Laporan Penelitian Laboratorium Teknologi Kimia Umum, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Stoecker, Jones, 1987, *Refrigerasi dan Pengkondisian*

