

RANCANG BANGUN *TEMPORARY AIR CONDITIONER* BERBASIS PENYIMPANAN ENERGI TERMAL ES

DESIGN AND CONSTRUCTION OF TEMPORARY AIR CONDITIONER BASED ON ICE THERMAL ENERGY STORAGE

Audi Riansyahputra¹, Drs. Suwandi, M.Si.², Tri Ayodha Ajiwiguna, S.T., M.Eng³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

Rianputra.218@gmail.com¹, suwandi.sains@gmail.com², tri.avodha@gmail.com³

Abstrak

Salah satu sistem pendinginan yang digunakan di penyejuk udara adalah pemanfaatan Penyimpanan Energi Termal Es (*Ice Thermal Energy Storage/ITES*). Pemanfaatan *ITES* pada penyejuk udara dilakukan dengan sistem terpusat (*Central System Air Conditioner*). Pada penelitian ini, dirancang penyejuk udara sementara (*temporary air conditioner*) berbasis penyimpanan energi termal es sebagai sistem yang mandiri dengan prinsip pertukaran kalor fluida antara air dan udara pada sistem. Pada awal penelitian dilakukan pemodelan sebagai referensi pengujian sistem dengan batas nilai kesalahan 10 %. Pengujian sistem dilakukan dengan massa es 1, 2, dan 3 kg dengan laju aliran air 0,3, 0,4, 2, dan 3 LPM. Hasil sistem berupa suhu udara akan dibandingkan dengan hasil pemodelan. Ketika nilai kesalahan lebih dari 10 % maka dilakukan perbaikan model dengan penambahan faktor *heat-loss*. Pada hasil pengujian didapatkan nilai suhu udara keluar dari penukar kalor paling rendah yaitu 8 °C dengan massa es 3 kg pada laju aliran 3 LPM, sementara untuk nilai kesalahan pemodelan dengan pengujian setelah dilakukan koreksi adalah 2.81 %. Pada tinjauan waktu kerja sistem, sistem dengan laju aliran 0,3 dan 0,4 LPM mampu bekerja selama ± 3 jam sampai dengan suhu udara keluar penukar kalor sama dengan suhu lingkungan.

Kata Kunci: penyimpanan energi termal es, pertukaran kalor, pemodelan, massa es, laju aliran air

Abstract

One of the cooling system process that used in Air Conditioner (AC) is Ice Thermal Energy Storage (ITES). ITES has used in AC system as central system. In this research we design Temporary AC based on ITES as a single system with heat exchange principal between water and air in the system. On initial research we conduct the modelling process as a reference for system test with the limitation error 10 %. System tested with ice mass 1, 2, and 3 kg with water flow rate 0.3, 0.4, 2, and 3 LPM. Air temperature as the system result will compared with modelling result. When the error exceed 10 % then modelling process need a correction with added the heat-loss factor. In test result the lowest output of air temperature from the heat exchanger is 8 °C with ice mass 3 kg on the flow 3 LPM, and for the error between modelling and test system after the correction is 2.81 %. In modelling based on timework, system with flow 0,3 and 0,4 LPM can work ± 3 hours until the output temperature from heat exchanger has same point with the environment.

Keyword: ice thermal energy storage, heat exchange, modelling, ice mass, water flow rate

1. Pendahuluan

Air Conditioner (AC)/ penyejuk udara merupakan perangkat dengan konsumsi energi tertinggi pada sektor tempat tinggal, bangunan komersil, dan bangunan industri di berbagai negara, terutama untuk daerah tropis [1]. Salah satu proses pengkondisian udara yang digunakan saat ini adalah pemanfaatan Penyimpanan Energi Termal (*Thermal Energy Storage/TES*) bahan. Penyimpanan energi termal adalah metode penyimpanan energi berdasarkan perbedaan suhu. Bahan penyimpanan energi termal yang umum digunakan saat ini adalah es, dikenal dengan Penyimpanan Energi Termal Es (*Ice Thermal Energy Storage/ITES*) dan diaplikasikan pada penyejuk udara [3]. Saat ini penyejuk udara berbasis penyimpanan energi termal es selalu bekerja dalam sistem terpusat [2]. Penelitian ini bertujuan membuat penyejuk udara berbasis penyimpanan energi termal es dalam bentuk yang lebih sederhana dan mudah dibawa.

2.4. Insulasi

Insulasi sebagai kebutuhan utama untuk menjaga suhu daerah yang dibutuhkan. Insulasi bekerja dengan mengurangi jumlah panas yang hilang, sehingga dapat mengurangi biaya ataupun energi.

2.5. Pertukaran Kalor Fluida

Pertukaran kalor fluida adalah proses yang terjadi antara dua fluida dengan perbedaan suhu tanpa terjadi pencampuran dua fluida yang dibantu dengan alat penukar kalor [5]. Terdapat beberapa metode analisis penukar kalor. Salah satunya adalah metode efektivitas *NTU* (*Effectiveness-Number of Transfer Units*). Metode ini digunakan untuk menentukan laju kalor dan suhu keluaran dua fluida pada penukar kalor apabila tipe dan ukuran penukar kalor telah diketahui [5]. Metode ini berdasarkan parameter tanpa satuan yang disebut efektivitas penukar kalor (ϵ) dengan definisi nilai perbandingan laju kalor aktual (\dot{Q}) penukar kalor dengan laju kalor maksimum penukar kalor (\dot{Q}_{\max}) [5]. Untuk menentukan efektivitas penukar kalor (ϵ) diperlukan nilai tanpa satuan yang disebut *NTU* (*Number of Transfer Units*). Nilai *NTU* ditentukan sebagai

$$NTU = \frac{U \cdot A_s}{C_{\min}} \quad (2.4)$$

dengan

NTU = Number of Transfer Units

U = koefisien perpindahan panas keseluruhan ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A_s = luas permukaan penukar kalor (m^2)

C_{\min} = kapasitas kalor minimum fluida ($J/s \cdot ^\circ C$)

Efektivitas penukar kalor (ϵ) bergantung dengan dimensi penukar kalor. Sehingga setiap tipe penukar kalor memiliki nilai efektivitas yang berbeda [5]. Ketika menentukan efektivitas penukar kalor (ϵ), diperlukan juga nilai rasio kapasitas (c) yang didefinisikan sebagai

$$c = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (2.5)$$

Dalam penentuan laju kalor maksimum penukar kalor (\dot{Q}_{\max}), ditentukan dahulu perbedaan suhu maksimum di penukar kalor [7]. Perbedaan suhu maksimum (ΔT_{\max}) adalah selisih suhu masuk dari fluida panas dan fluida dingin. Nilai perubahan suhu maksimum penukar kalor adalah [5].

$$\Delta T_{\max} = T_{h, \text{in}} - T_{c, \text{in}} \quad (2.6)$$

dengan

ΔT_{\max} = perubahan suhu maksimum ($^\circ C$)

$T_{c, \text{in}}$ = suhu masukan fluida dingin ($^\circ C$)

$T_{h, \text{in}}$ = suhu masukan fluida panas ($^\circ C$)

Ketika ΔT_{\max} diketahui, maka laju kalor maksimum penukar kalor, \dot{Q}_{\max} dinyatakan sebagai

$$\dot{Q}_{\max} = C_{\min} \cdot \Delta T_{\max} \quad (2.7)$$

dengan

\dot{Q}_{\max} = laju kalor maksimum penukar kalor (W)

Maka untuk mendapatkan laju perpindahan kalor aktual (\dot{Q}) dapat digunakan persamaan [5]

$$\dot{Q} = \epsilon \cdot \dot{Q}_{\max} \quad (2.8)$$

dengan

\dot{Q} = laju kalor aktual penukar kalor (W)

Nilai laju perpindahan kalor aktual penukar kalor dapat digunakan untuk menentukan suhu keluaran fluida penukar kalor [6]. Dengan definisi

a. Fluida panas

$$\dot{Q} = C_h (T_{h, \text{in}} - T_{h, \text{out}}) \quad (2.9)$$

dengan

\dot{Q} = laju kalor aktual penukar kalor (W)

C_h = kapasitas kalor fluida panas ($J/s \cdot ^\circ C$)

$T_{h, \text{in}}$ = suhu masuk fluida panas ($^\circ C$)

$T_{h, \text{out}}$ = suhu keluar fluida panas ($^\circ C$)

b. Fluida dingin

$$\dot{Q} = C_c (T_{c, \text{out}} - T_{c, \text{in}}) \quad (2.10)$$

dengan

\dot{Q} = laju kalor aktual penukar kalor (W)

C_c = kapasitas kalor fluida dingin ($J/s \cdot ^\circ C$)

$T_{c, in}$ = suhu masuk fluida dingin ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{c, out}$ = suhu keluar fluida dingin ($^{\circ}\text{C}$)

3. Metode Penelitian

3.1. Cara Kerja Sistem

Penyejuk udara sementara berbasis penyimpanan energi termal es merupakan solusi pelengkap dalam melakukan pengkondisian udara. Prinsip utama sistem ini adalah pemanfaatan energi termal es sebagai sumber dingin untuk melakukan pengkondisian udara di ruang yang dikondisikan. Kalor yang dimiliki air berpindah ke es, sehingga suhu air turun. Sirkulasi air dilakukan dengan pompa dan rotameter air sebagai alat pengaturan laju aliran air pada sistem. Pemanfaatan energi termal air dilakukan dengan penukar kalor dan kipas pada ruang yang dikondisikan. Akibat proses tersebut air yang menerima kalor dari udara memiliki suhu lebih tinggi dari keadaan sebelumnya. Air tersebut masuk kembali ke kotak insulasi berisi es yang telah mencair untuk proses perpindahan kalor dan siklus berulang.

Parameter yang diukur pada penelitian adalah suhu yang dihasilkan sistem. Parameter lainnya seperti laju aliran menjadi parameter pembanding dengan pemodelan yang telah dilakukan. Data suhu diketahui dari udara sebagai hasil kerja sistem dan air yang bertukar kalor dengan udara di penukar kalor. Perekaman data suhu air dan udara oleh *data logger* dilakukan di 4 titik sistem: saat air masuk ke penukar kalor, saat air keluar dari penukar kalor, ketika udara masuk ke penukar kalor, dan saat udara keluar dari penukar kalor. Untuk suhu di dalam kotak insulasi, digunakan indikator suhu pada thermostat. Suhu keluaran sistem direkam menggunakan *data logger* dalam rentang waktu 5 detik. Pengujian sistem dilakukan dengan dua metode, yaitu pengujian luar ruangan dan pengujian dalam ruangan. Analisis dilakukan dengan data suhu yang telah direkam oleh *data logger* pada dua metode pengujian dan dilakukan perbandingan sistem aktual dengan pemodelan sistem yang telah dilakukan sebelumnya. Nilai kesalahan maksimum perbandingan eksperimen dan pemodelan dibatasi pada 10 %. Apabila hasil didapatkan melebihi 10 %, maka diperlukan perbaikan model terhadap eksperimen.

3.2. Pemodelan

Pada penelitian ini, dilakukan pemodelan numerik suhu sistem dengan massa es 1 – 3 kg dan massa air 10 kg dengan variasi kecepatan aliran air 0,3, 0,4, 2, dan 3 LPM. Pemodelan hanya berlaku ketika suhu dalam kotak insulasi tidak mengalami penurunan suhu lagi sebagai akibat pencampuran air dan es dan air di kotak insulasi mulai dialirkan menuju penukar kalor. Suhu awal air 25°C digunakan sebagai asumsi pemodelan sistem. Suhu lingkungan acuan yang digunakan adalah suhu rata-rata dari hasil eksperimen.

3.2.1. Pemodelan suhu sub-sistem kotak insulasi es dan air dengan waktu $t = 0$

$$T_{\text{camp}}(0) = T_{\text{air}} - \frac{m_{\text{es}} \cdot L_{\text{es}}}{m_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}}} \quad (3.1)$$

dengan

m_{es} = massa es (kg)

L_{es} = kalor lebur es (J/kg)

m_{air} = massa air (kg)

c_{air} = kalor jenis air (J/kg $^{\circ}\text{C}$)

T_{air} = suhu awal air ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{\text{camp}}(0)$ = suhu campuran $t = 0$ ($^{\circ}\text{C}$)

3.2.2. Pemodelan suhu sub-sistem kotak insulasi saat $t \neq 0$

$$T_{\text{camp}}(t) = T_{c, in} + \frac{\dot{m}_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}} \cdot (T_{c, out} - T_{c, in}) \cdot \Delta t}{m \cdot c_{\text{air}}} \quad (3.2)$$

dengan

m = massa total es dan air (kg)

$T_{\text{camp}}(t)$ = Suhu campuran ($^{\circ}\text{C}$)

\dot{m}_{air} = Laju massa air (kg/s)

$T_{c, in}$ = Suhu masuk fluida dingin; air ($^{\circ}\text{C}$)

c_{air} = kalor jenis air (J/kg $^{\circ}\text{C}$)

$T_{c, out}$ = Suhu keluar fluida dingin; air ($^{\circ}\text{C}$)

Δt = Perubahan waktu (s)

3.2.3. Pemodelan suhu penukar kalor

Langkah pemodelan suhu penukar kalor, yaitu:

1. Menentukan tipe penukar kalor yang digunakan, yaitu penukar kalor tipe *Cross-flow (Single-pass): Both fluids unmixed*.
2. Menentukan nilai koefisien perpindahan kalor (U) yang digunakan berdasarkan dua fluida di penukar kalor, yaitu tipe penukar kalor *water-to-air in finned tubes (water in tubes)* dengan nilai 30-60 W/m². $^{\circ}\text{C}$.

3. Luas permukaan penukar kalor (A_s) yang kontak dengan fluida diketahui dari spesifikasi penukar kalor 360mm.
4. Menentukan nilai kapasitas kalor minimum (C_{\min}) dan maksimum (C_{\max}) fluida berdasarkan perbandingan kapasitas kalor kedua fluida.
5. Menghitung nilai NTU menggunakan persamaan (2.4)
6. Menghitung nilai rasio kapasitas kalor (c) menggunakan persamaan (2.5)
7. Menghitung efektivitas penukar kalor (ϵ) dengan persamaan penukar kalor tipe *Cross-flow (Single-pass): Both fluids unmixed*. Persamaan yang digunakan adalah

$$\epsilon = 1 - \exp\left\{\frac{NTU^{0.22}}{c} [\exp(-c NTU^{0.78}) - 1]\right\}$$
8. Menghitung perubahan suhu maksimum penukar kalor (ΔT_{\max}) dengan persamaan (2.6)
9. Menghitung kalor maksimum penukar kalor dengan persamaan (2.7)
10. Menghitung kalor aktual penukar kalor (\dot{Q}) dengan persamaan (2.8)
11. Menghitung suhu keluaran fluida panas penukar kalor dengan persamaan (2.9)
12. Menghitung suhu keluaran fluida dingin penukar kalor dengan persamaan (2.10)

4. Hasil dan Analisis

4.1. Perbaikan Model Numerik Sistem

Pada proses eksperimen didapatkan data suhu sebagai hasil sistem. Nilai ini dibandingkan dengan pemodelan yang dilakukan sebelum penelitian. Ada faktor pada pemodelan yang dianggap ideal yang berpengaruh terhadap hasil sistem pada eksperimen, yaitu faktor *heat-loss*. Sehingga diperlukan perbaikan pemodelan sistem dengan menambahkan faktor *heat-loss* ke persamaan model. Kalor yang diketahui dari model adalah kalor dengan keadaan ideal, yaitu tidak memiliki faktor *heat-loss*. Sementara untuk kalor eksperimen, terdapat faktor *heat-loss* yang mempengaruhi. Maka perlu diketahui nilai kalor *heat-loss* sebagai perbandingan kalor pemodelan dan eksperimen. Nilai kalor *heat-loss* dapat dituliskan sebagai

$$\dot{Q}_{heat-loss} = \dot{Q}_{eksp} - \dot{Q}_{model} \quad (4.1)$$

$$\dot{Q}_{heat-loss} = \text{kalor } heat-loss \text{ (J/s)}$$

Dengan persamaan tersebut, dapat diketahui selisih suhu yang hilang antara eksperimen dan pemodelan sebagai akibat adanya faktor *heat-loss*. Menggunakan persamaan (2), kalor *heat-loss* dapat dituliskan dengan

$$\dot{Q}_{heat-loss} = \dot{m}_h \cdot c_h \cdot \Delta T_{loss} \quad (4.2)$$

$$\Delta T_{loss} = \frac{\dot{Q}_{heat-loss}}{\dot{m}_h \cdot c_h} \quad (4.3)$$

$$\Delta T_{loss} = \text{suhu } heat-loss \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Selisih suhu (ΔT_{loss}) yang didapatkan ini yang menjadi komponen perbaikan pemodelan yang telah dilakukan sebelum penelitian. Dengan persamaan pemodelan seperti persamaan (16) maka perbaikan persamaan pemodelan menjadi

$$T_{h,out} = \left(T_{h,in} - \frac{\dot{Q}}{c_h}\right) \pm \Delta T_{loss} \quad (4.4)$$

4.2. Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan dengan massa es 1, 2, dan 3 kg dengan laju aliran 0.3, 0.4, 2, dan 3 LPM pada keadaan dalam dan luar ruangan. Pengujian sistem dilakukan selama 4690 detik atau ± 1.3 jam dengan rentang pengambilan data suhu setiap 5 detik. Pengujian dilakukan dengan massa es 1, 2, dan 3 kg dengan laju aliran 0.3, 0.4, 2, dan 3 LPM pada keadaan dalam dan luar ruangan. Berikut ditampilkan tabel nilai maksimum dan minimum hasil pengujian laju aliran 0.3 LPM dan 2 LPM pada pengujian dalam ruangan dan persentase nilai kesalahan eksperimen dan pemodelan tanpa koreksi faktor *heat-loss* dan dengan koreksi faktor *heat-loss* di pengujian dalam dan luar ruangan.

4.2.1. Laju Aliran Air 0.3 LPM dan Massa Es 1, 2, dan 3 Kg pada Pengujian Dalam Ruangan

Tabel 4.1. Nilai suhu maksimum dan minimum pengujian dengan laju aliran 0.3 LPM dan perbandingan dengan pemodelan

Massa Es (Kg)	Nilai Suhu (oC)					
	Eksperimen		Tanpa Koreksi Faktor <i>Heat-loss</i>		Dengan Koreksi Faktor <i>heat-loss</i>	
	Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum
1	26,80	21,50	25,67	22,23	25,56	21,52
2	23,60	18,10	24,50	18,47	23,33	16,22
3	21,20	15,10	23,08	14,65	21,31	12,93

Tabel 4.2. Nilai kesalahan pemodelan tanpa faktor *heat-loss* dan dengan faktor *heat-loss* terhadap eksperimen pada laju aliran 0.3 LPM

Massa Es (Kg)	0,3 LPM			
	Nilai Kesalahan (%)			
	Tanpa Koreksi Faktor <i>Heat-loss</i>		Dengan Koreksi Faktor <i>heat-loss</i>	
	Indoor	Outdoor	Indoor	Outdoor
1	0,81	5,54	2,37	2,92
2	5,58	3,46	1,87	5,77
3	11,04	10,38	1,82	3,14

4.2.2. Laju Aliran Air 2 LPM dan Massa Es 1, 2, dan 3 Kg pada Pengujian Dalam Ruangan

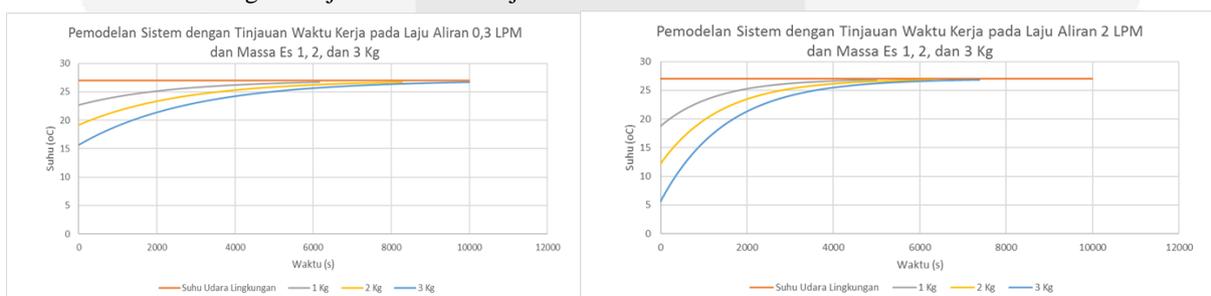
Tabel 4.4. Nilai suhu maksimum dan minimum pengujian dengan laju aliran 2 LPM dan perbandingan dengan pemodelan

Massa Es (Kg)	Laju Aliran 2 LPM dengan Pengujian Dalam Ruangan					
	Nilai Suhu (oC)					
	Eksperimen		Tanpa Koreksi Faktor <i>Heat-loss</i>		Dengan Koreksi Faktor <i>Heat-loss</i>	
	Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum
1	27,00	17,10	25,57	18,54	26,01	18,95
2	27,00	13,30	24,80	11,87	25,26	12,96
3	25,70	9,30	23,91	5,20	24,68	8,38

Tabel 4.3. Nilai kesalahan pemodelan tanpa faktor *heat-loss* dan dengan faktor *heat-loss* terhadap eksperimen pada laju aliran 2 LPM

Massa Es (Kg)	2 LPM			
	Nilai Kesalahan (%)			
	Tanpa Koreksi Faktor <i>Heat-loss</i>		Dengan Koreksi Faktor <i>heat-loss</i>	
	Indoor	Outdoor	Indoor	Outdoor
1	2,64	4,55	1,96	2,73
2	6,22	5,38	3,02	4,11
3	9,96	11,12	3,50	1,92

4.2.3. Pemodelan dengan Tinjauan Waktu Kerja Sistem



Grafik 4.1. Pemodelan Sistem Suhu Udara Keluar Penukar Kalor dengan Tinjauan Waktu Kerja pada Laju Aliran 0,3 dan 2 LPM

Pemodelan dengan tinjauan waktu kerja sistem dilakukan untuk mengetahui variasi laju aliran dan massa es yang memiliki waktu kerja paling lama sebagai sistem penyejuk udara. Pada hasil pemodelan diketahui bahwa untuk aliran 0,3 LPM dan massa es 3 kg, sistem mampu bekerja selama hampir 10000 detik atau ± 3 jam sebelum suhu keluar penukar kalor memiliki suhu yang sama dengan suhu lingkungan, yaitu 27 °C. Sementara untuk massa es 1 dan 2 kg pada laju aliran yang sama hanya mampu bekerja selama ± 6000 dan 8000 detik. Untuk laju aliran 2 dan 3 LPM, sistem tidak mampu bekerja selama ± 10000 detik, secara rata-rata untuk massa es 1 kg, laju aliran 2 dan 3 LPM bekerja selama ± 5000 detik, massa es 2 kg bekerja selama ± 6000 detik, dan massa es 3 kg bekerja selama ± 7000 detik. Tetapi untuk suhu yang dihasilkan, laju aliran 2 dan 3 LPM mampu menghasilkan suhu udara keluar dari penukar kalor lebih rendah dibandingkan dengan 0,3 dan 0,4 LPM yaitu mencapai suhu ± 5 °C dengan massa es 3 kg. Sementara 0,3 dan 0,4 LPM hanya menghasilkan suhu udara keluar dari penukar kalor ± 15 °C untuk massa es 3 kg.

4.3. Analisis Hasil Pengujian Sistem

Secara umum, massa es 3 kg mampu menghasilkan suhu udara keluar dari penukar kalor paling rendah, yaitu mencapai 8 °C pada eksperimen dengan laju aliran 3 LPM. Hal ini terjadi akibat suhu campuran air dan es dengan massa es 3 kg memiliki suhu terendah dibandingkan 2 variasi massa es lain. Faktor yang berpengaruh pada keadaan ini adalah faktor suhu campuran air dan es pada sistem. Semakin rendah suhu campuran air dan es pada sistem, semakin besar perubahan suhu udara (ΔT) yang dihasilkan sistem.

Ketika laju aliran 0.3 dan 0.4 LPM, fluida yang mengalami perubahan suhu maksimum adalah air. Ketika 2 dan 3 LPM, laju aliran akan berpengaruh terhadap perubahan suhu maksimum fluida udara. Faktor yang mempengaruhi hasil perubahan suhu maksimum pada variasi laju aliran ini adalah nilai kapasitas kalor (C) masing-masing fluida, yaitu air dan udara yang berpengaruh juga pada proses pemodelan, sesuai dengan persamaan (7). Dengan persamaan perhitungan penukar kalor yang digunakan, yaitu metode efektivitas NTU . Kapasitas kalor minimum (C_{min}) akan berpengaruh terhadap kalor maksimum (\dot{Q}_{max}) yang dapat terjadi pada proses pertukaran kalor. Maka dapat disimpulkan bahwa apabila kapasitas kalor salah satu fluida lebih besar dibandingkan fluida lainnya, maka fluida dengan kapasitas kalor lebih kecil akan mengalami perubahan suhu maksimum pada sistem.

Hasil pemodelan memiliki perbedaan dengan hasil eksperimen. Nilai kesalahan maksimal pada penelitian ditetapkan sebesar 10 %. Pemodelan sistem dilakukan koreksi untuk mendapatkan nilai kesalahan kurang dari 10 %. Diantaranya adalah penambahan faktor *heat-loss* pada sistem. Pada proses pemodelan, faktor tersebut dianggap ideal, sehingga tidak ada *heat-loss* yang terjadi pada sistem. Perbedaan suhu dua fluida juga menjadi faktor terjadinya *heat-loss*. Semakin besar perbedaan suhu dua fluida, maka semakin besar *heat-loss* yang terjadi pada sistem. Setelah dilakukan koreksi pada pemodelan, didapatkan model yang mendekati dengan eksperimen sistem yang dilakukan dengan nilai kesalahan kurang dari 10 %. Nilai kesalahan terbesar terjadi pada massa es 2 kg dengan laju aliran 0.3 LPM yaitu 6.76 % dan nilai kesalahan sistem adalah 2.93 %.

Pada pemodelan dengan tinjauan waktu kerja sistem, aliran 0,3 dan 0,4 LPM mampu bekerja selama ± 10000 detik atau ± 3 jam. Dengan suhu udara yang dihasilkan ± 15 °C untuk massa es 3 kg. Sementara meski suhu udara yang dihasilkan bisa mencapai ± 5 °C pada massa es 3 kg, tetapi waktu kerja aliran 2 dan 3 LPM hanya sekitar 5000 detik untuk massa es 1 kg, 6000 detik untuk massa es 2 kg, dan 7000 detik untuk massa es 3 kg. Hal ini juga dipengaruhi akibat kapasitas kalor dari fluida udara dan air yang berlaku sebagai kapasitas kalor minimum dan kalor maksimum pada pemodelan.

5. Kesimpulan

1. Dari hasil penelitian “Rancang Bangun *Temporary Air Conditioner* Sementara Berbasis Penyimpanan Energi Termal Es”, maka dapat disimpulkan bahwa massa es 3 kg mampu menghasilkan suhu udara keluar penukar kalor paling rendah dibandingkan dengan massa es lain, yaitu ± 8 °C pada eksperimen 3 LPM dengan waktu pengujian selama ± 1.3 jam

2. Model numerik sistem pada kotak insulasi pada $t = 0$, dapat menggunakan persamaan (3.1) dan untuk model kotak insulasi pada $t \neq 0$, menggunakan persamaan (3.2). Pada proses pemodelan suhu udara di setiap titik dengan keadaan ideal, dapat digunakan persamaan (2.9). Dengan batas nilai kesalahan 10 %. Ketika nilai kesalahan pemodelan dengan eksperimen lebih dari 10 % maka diperlukan koreksi pada pemodelan, sehingga persamaan yang digunakan adalah persamaan (4.4).

3. Nilai kesalahan perbandingan eksperimen dan pemodelan dengan koreksi faktor *heat-loss* adalah 2.81 %. Dengan nilai kesalahan minimum 1.79 % pada massa es 3 kg dengan laju aliran 0,4 LPM.

4. Pada tinjauan waktu kerja sistem, maka dapat disimpulkan bahwa pada laju aliran 0,3 dan 0,4 LPM, sistem dapat bekerja selama ± 10000 detik atau 3 jam untuk massa es 3 kg hingga suhu udara keluar penukar kalor memiliki suhu yang sama dengan suhu lingkungan. Sementara laju aliran 2 dan 3 LPM hanya mampu bekerja selama 5000, 6000, dan 7000 detik untuk massa es 1, 2, dan 3 kg.

Daftar Pustaka

- [1] S. Sanaye and M. Hekmatian, "Ice thermal energy storage (ITES) for air-conditioning application in full and partial load operating modes," *International Journal of Refrigeration*, p. 7, 2015.
- [2] S. K. Wang, *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*, New York: McGraw-Hill, 2001.
- [3] EVAPCO, *Thermal Ice Storage: Applications and Design Guide*, Maryland: EVAPCO Inc., 2007.
- [4] M. J. Moran and H. N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, London: John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [5] Y. A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, New York: McGraw-Hill, 2003.
- [6] Electrical Engineering Department of Indian Institute of Technology Kharagpur, *Refrigeration and Air Conditioning*, Kharagpur: Indian Institute of Technology Kharagpur, 2008.