

Koefisien Perpindahan Panas Volumetris dan Kapasitas Penyimpanan Panas pada Sistem Penyimpan Energi Panas Kontak Langsung

Panut Mulyono*

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Kampus UGM Yogyakarta 55281

Abstract

The volumetric coefficient of heat transfer and the energy storage capacity in a direct contact thermal energy storage system using $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ solution as a thermal energy storage medium have been investigated. Hot kerosene was used as a heat transfer fluid. The experiments were carried out by bubbling hot kerosene from the bottom of a column containing $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ solution. The column used in this experiment was made of glass of 3 mm in thickness with 7 cm of inside diameter and 100 cm of height. A simple model to calculate the volumetric coefficient of heat transfer of the system has been developed. The effects of kerosene flow rate and kerosene bubble diameter on the volumetric coefficient of heat transfer and the storing rate of energy were studied. It was found that the volumetric coefficient of heat transfer was strongly affected by the flow rate of the kerosene and that the effect of the kerosene flow rate on the storing rate of energy was relatively high, while that of the effect of the bubble diameter was small. The relationship between volumetric coefficient of heat transfer (in the form of the dimensionless group) and the kerosene bubble Reynolds number is $Nu = 0.2362 Re^{1.1475}$ with a mean relative error of 0.45% for the range of Reynolds number of 5 to 13.2.

Keywords: direct contact, thermal energy storage, heat transfer coefficient, storage capacity

Pendahuluan

Penyimpanan energi panas sering kali harus dilakukan, karena pada saat suatu sumber mengeluarkan energi tersebut, kebutuhan untuk menggunakannya terjadi pada waktu lain. Sebagai contoh, energi panas matahari yang dipancarkan pada siang hari dapat disimpan untuk digunakan pada malam hari, misalnya untuk pemanasan air. Secara tradisional, energi panas tersebut disimpan dalam bentuk panas sensibel, misalnya untuk menaikkan suhu air, batu, dll. Tetapi penyimpanan dalam bentuk panas sensibel banyak menghadapi masalah dalam perancangan dan pengoperasian alatnya. Usaha-usaha untuk mencari sistem penyimpanan yang lebih baik telah banyak dilakukan, diantaranya adalah menggunakan panas laten peleburan dari suatu zat yang dikenal dengan *phase change material* (PCM), misalnya *paraffin wax* dan garam terhidrasi (Yanadori dan Matsuda, 1986; Ryu dkk., 1991). Penggunaan PCM sebagai media penyimpan panas mempunyai beberapa keuntungan, diantaranya adalah PCM menggunakan panas laten yang jauh lebih besar dibandingkan dengan panas sensibel dan pada waktu membebaskan panas laten pada suhu yang tetap. Kerugian penggunaan PCM sebagai media penyimpan panas adalah rendahnya kecepatan peleburan dan pembekuan karena rendahnya konduktivitas panas dari PCM.

Garam terhidrasi merupakan bahan yang baik sebagai penyimpan energi panas untuk suhu yang tidak terlalu tinggi karena kemampuan penyimpanan panas bahan ini cukup tinggi dan harganya relatif murah dibandingkan dengan bahan lain. Hal yang tidak menguntungkan dari penggunaan garam terhidrasi untuk penyimpanan energi panas adalah terjadinya pelelehan yang tidak merata sehingga menyebabkan pemisahan fasa selama siklus penyimpanan dan pemanfaatan panas yang berulang-ulang. Pendinginan di bawah titik beku juga merupakan masalah pada penggunaan garam terhidrasi untuk media penyimpan energi panas. Dua masalah ini telah didiskusikan oleh Telkes (1952), Etherington (1957), Biswas (1977), dan Farid dan Yacoub (1989).

Etherington (1957) adalah peneliti yang pertamanya memperkenalkan ide untuk menggunakan perpindahan panas kontak langsung antara zat yang tidak dapat bercampur sebagai sumber panas dan larutan garam terhidrasi sebagai media penyimpan panas. Minyak ringan yang digunakan sebagai fluida sumber panas digelembungkan dari dasar larutan *sodium phosphate decahydrate*. Panas dipindahkan dari gelembung minyak ke larutan garam tanpa melewati dinding logam. Garam-garam terhidrasi yang telah dipelajari oleh para peneliti antara lain adalah $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan sodium asetat (Etherington, 1957). Farid dan Khalaf (1994) mempelajari unjuk kerja sistem penyimpanan energi panas kontak langsung menggunakan dua jenis

*Alamat korespondensi: Tel.: +62-274-902171, Fax: +62-274-902170, E-mail: pmulyono@chemeng.ugm.ac.id

larutan garam terhidrasi yaitu $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Pemilihan kedua jenis garam tersebut adalah berdasarkan pada perbedaan suhu kristalisasi diantara keduanya. Pada penelitian-penelitian di atas, tidak dipelajari secara intensif tentang koefisien perpindahan panas volumetris antara fluida sumber panas dengan larutan garamnya dengan membuat model matematis yang dapat digunakan untuk mengevaluasi koefisien perpindahan panas volumetris tersebut. Mulyono (2004) telah membuat model matematis sistem penyimpanan panas kontak langsung menggunakan kerosin panas sebagai sumber panas dan larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ sebagai media penyimpan panasnya dengan koefisien perpindahan panas volumetris dihitung menggunakan cara yang dikembangkan oleh Farid dan Khalaf (1994).

Pada penelitian ini dibuat model matematis sederhana untuk mengevaluasi koefisien perpindahan panas volumetris. Pengaruh kecepatan alir fluida sumber panas dan diameter gelembung terhadap koefisien perpindahan panas volumetris dipelajari, lalu disajikan dalam bentuk persamaan bilangan tidak berdimensi.

Landasan Teori

Pada penelitian ini, gelembung-gelembung kerosin panas dengan suhu tertentu dialirkan vertikal menembus larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ yang mula-mula berada pada suhu kamar. Kecepatan perpindahan panas dari gelembung kerosin ke larutan dirumuskan dengan persamaan (1).

$$q = (m_k c_{p,k})(T_{k,in} - T_{k,out}) \quad (1)$$

Panas tersebut pada persamaan (1) diterima oleh larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ sesuai dengan persamaan (2).

$$q = U_v V (\Delta T_{\text{limd}}) \quad (2)$$

sehingga:

$$U_v = \frac{q}{V(\Delta T_{\text{limd}})} \quad (3)$$

Beda suhu rerata logaritmik pada persamaan (2) dan persamaan (3) dihitung dengan persamaan (4).

$$\Delta T_{\text{limd}} = \frac{(T_{k,in} - T_1) - (T_{k,out} - T_1)}{\ln \left[\frac{T_{k,in} - T_1}{T_{k,out} - T_1} \right]} \quad (4)$$

Jumlah energi panas yang tersimpan di larutan pada suatu saat dihitung dengan persamaan (5) sebagai berikut:

$$Q_1(t) = M_1 c_{p,l} [T_1(t) - T_{1,0}] \quad (5)$$

Koefisien perpindahan panas volumetris lalu diformulasikan dalam bentuk kelompok bilangan tidak berdimensi berupa bilangan Nusselt sebagai fungsi dari bilangan Reynolds sebagai berikut:

$$\text{Nu} = a \text{Re}_k^b \quad (6)$$

Tetapan a dan b pada persamaan (6) dicari dari data percobaan dengan cara regresi linier. Pada penelitian ini, hubungan antara diameter gelembung kerosin dengan kecepatan volumetrisnya dan luas total lubang *sparger* adalah (Farid dan Khalaf, 1994):

$$d = 2 \left[0,0038 - 0,0013 \left(\frac{F}{A} \right) \right] \quad (7)$$

Metodologi

Metodologi penelitian ini adalah menggunakan persamaan (1) untuk menghitung kecepatan perpindahan panas dari gelembung kerosin ke larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, persamaan (3) untuk menghitung koefisien perpindahan panas volumetris, dan persamaan (5) untuk menghitung panas total yang tersimpan di larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dari data percobaan laboratorium.

Percobaan Laboratorium

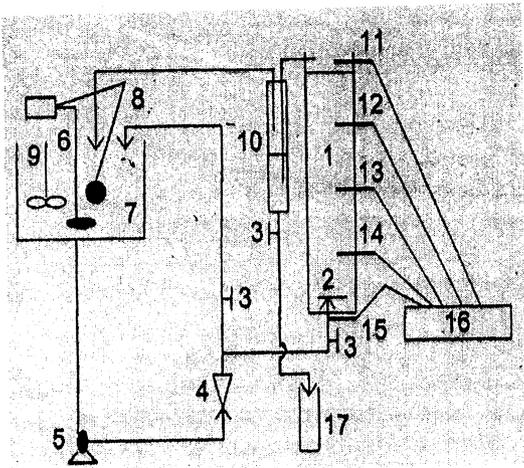
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah air suling, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dan kerosin sebagai fluida pembawa energi panas. Larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dibuat dengan melarutkan kristal $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ke dalam air suling. Daya larut kristal $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dalam air pada suhu 10, 20, dan 30 °C masing-masing adalah 12,5, 21,5, dan 38,8 g/100 g air. Sifat-sifat fisis bahan yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1 (Mulyono, 2000).

Tabel 1. Sifat-Sifat Fisis Bahan

Bahan	Berat Jenis (kg/m^3)	c_p ($\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$)
Larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 10%	1.098,7	3,9547
Larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 20%	1.208,6	3,7388
Larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 25%	-	3,6045
Larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 30%	1.327,7	3,4953
Kerosin	770	2,0794

Alat yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 (Mulyono, 2000; Mulyono 2004). Tabung terbuat dari gelas dengan tebal 3 mm, diameter dalam 7 cm dan tinggi 90 cm. *Sparger* terbuat dari pelat baja tahan karat dengan diameter lubang yang divariasikan (1 mm, 3 mm dan 5 mm). Jumlah lubang *sparger* tergantung pada diameter lubangnya, misal untuk diameter lubang 3 mm jumlah lubangnya 8 buah. Dalam percobaan, diameter lubang merupakan variabel yang diubah-ubah. Bejana pemanas kerosin terbuat dari ember yang dilengkapi dengan isolator panas. Volume bejana 13 liter.

Pemanas listrik 1000 Watt digunakan pada penelitian ini. Agar suhu kerosin dalam bejana selalu seragam, maka bejana dilengkapi dengan pengaduk listrik. Bejana tabung gelas diperlukan untuk memisahkan kerosin dengan larutan yang terbawa aliran kerosin dari puncak kolom perpindahan panas. Bejana ini berdiameter dalam 3,5 cm dengan tinggi 40 cm. Larutan yang terpisah dari bejana ini dikumpulkan dalam penampung larutan berupa ember plastik. Larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dengan konsentrasi tertentu dibuat dengan melarutkan kristal $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dalam akuades. Jarak dari dasar kolom ke termokopel 14 adalah 23 cm, jarak dari termokopel 14 ke termokopel 13 adalah 22 cm, jarak dari termokopel 13 ke termokopel 12 adalah 22 cm dan jarak dari termokopel 12 ke termokopel 11 adalah 24 cm.



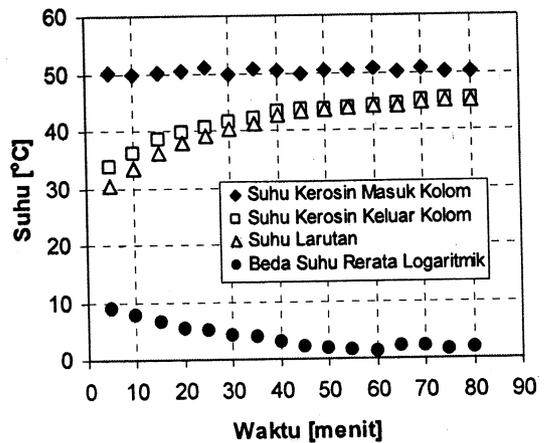
Gambar 1. Susunan alat penelitian: 1, kolom gelas; 2, distributor; 3, katub; 4, rotameter; 5, pompa; 6, pemanas listrik; 7, tangki air panas; 8, thermostat; 9, pengaduk; 10, pemisah kerosin-larutan; 11-15, termokopel; 16, pencatat suhu; 17, bejana penampung.

Prosedur Pelaksanaan

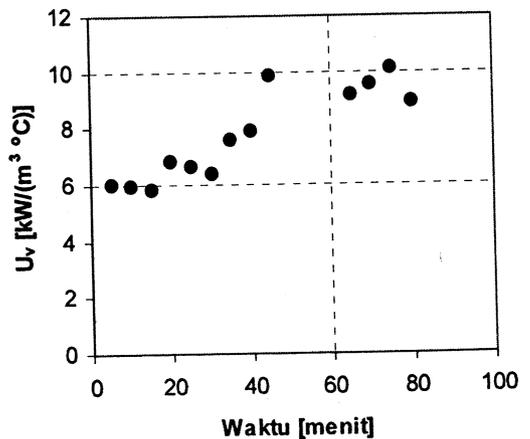
Sebelum alat-alat percobaan dirangkai seperti pada Gambar 1, terlebih dahulu dilakukan peneraan terhadap rotameter dan termokopel yang digunakan. Setelah itu, alat penelitian disusun seperti Gambar 1. Tabung gelas diisi dengan larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 30% berat dan kerosin ditempatkan pada tangki kerosin. Sebelum dilakukan percobaan, terlebih dahulu diadakan pengecekan mengenai kemungkinan kebocoran yang ada. Mula-mula kerosin dipanaskan pada tangki dengan pemanas listrik dan dikontrol pada suhu tertentu. Setelah suhu yang diinginkan dicapai, kerosin panas ini dialirkan ke dalam kolom melalui sparger sehingga gelembung-gelembung kerosin naik dan kontak langsung dengan larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dan memindahkan sebagian panas yang dibawanya. Laju aliran kerosin diatur dengan kran dan diukur dengan rotameter. Suhu kerosin masuk dan keluar kolom diukur dengan termokopel.

Hasil dan Pembahasan

Suhu kerosin keluar kolom, suhu rerata logaritmik, dan suhu larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ sebagai fungsi waktu untuk percobaan dengan suhu kerosin masuk kolom $50,8\text{ }^\circ\text{C}$, debit $6,762\text{ cm}^3/\text{detik}$, diameter gelembung $7,288\text{ mm}$, dan volume larutan $3463,61\text{ cm}^3$ ditunjukkan pada Gambar 2. Gambar 2 menunjukkan bahwa untuk suhu kerosin masuk kolom yang tetap, maka suhu larutan naik sebagai fungsi waktu. Demikian juga suhu kerosin keluar kolom. Kenaikan suhu kerosin keluar kolom dan kenaikan suhu larutan pada awal proses cukup besar lalu turun perlahan-lahan sampai akhirnya hampir konstan. Hal ini disebabkan pada awal proses, beda suhu antara kerosin dan larutan masih besar lalu perbedaan ini berangsur-angsur turun dengan berjalannya waktu. Kondisi ini ditunjukkan dengan menurunnya beda suhu rerata logaritmik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.



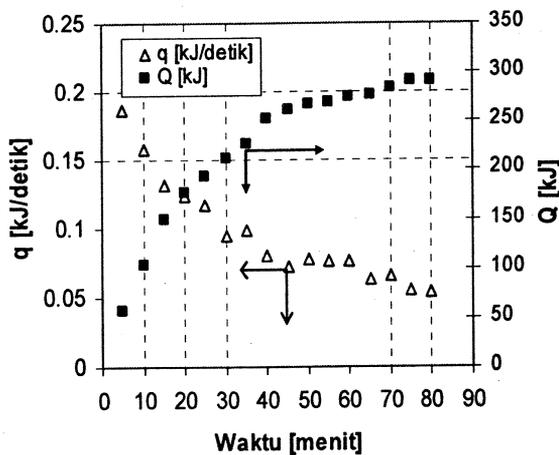
Gambar 2. $T_{k,out}$, $\Delta T_{lmt,d}$, dan T_l sebagai fungsi waktu untuk suhu $T_{k,in} = 50,8\text{ }^\circ\text{C}$, $F = 6,762\text{ cm}^3/\text{detik}$, $d = 7,288\text{ mm}$, dan $V = 3463,61\text{ cm}^3$.



Gambar 3. Nilai U_v sebagai fungsi waktu untuk $T_{k,in} = 50,8\text{ }^\circ\text{C}$, $F = 6,762\text{ cm}^3/\text{detik}$, $d = 7,288\text{ mm}$, dan $V = 3463,61\text{ cm}^3$.

Gambar 3 menunjukkan hasil perhitungan nilai U_v dengan persamaan (3) untuk suhu kerosin masuk kolom $50,8\text{ }^\circ\text{C}$, debit $6,762\text{ cm}^3/\text{detik}$, diameter gelembung $7,288\text{ mm}$, dan volume larutan $3463,61\text{ cm}^3$, yang hasil percobaannya disajikan pada Gambar 2. Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa pada awal proses nilai U_v relatif tetap kemudian naik dengan bertambahnya waktu. Kenaikan nilai U_v terhadap waktu disebabkan oleh mengecilnya nilai beda suhu rerata logaritmik dengan bertambahnya waktu. Walaupun dengan bertambahnya waktu kecepatan perpindahan panas dari kerosin ke larutan juga turun, Namun penurunannya lebih kecil dibanding dengan penurunan beda suhu rerata logaritmiknya. Dengan demikian jelaslah bahwa nilai U_v naik dengan naiknya waktu sesuai dengan persamaan (3).

Nilai kecepatan perpindahan panas dari kerosin ke larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (q) untuk kondisi operasi di atas dihitung dengan persamaan (1) dan nilai jumlah energi panas yang tersimpan di larutan (Q) dihitung dengan persamaan (5). Hasil perhitungan kedua besaran tersebut ditunjukkan pada Gambar 4. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa q pada awal proses cukup besar lalu turun dengan bertambahnya waktu. Hal ini karena naiknya suhu larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dan suhu kerosin keluar kolom sebagai fungsi waktu sehingga memperkecil beda suhu antara kerosin masuk kolom dengan larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dan juga beda suhu antara kerosin masuk kolom dengan suhu kerosin keluar kolom. Kondisi ini menurunkan nilai beda suhu rerata logaritmiknya.

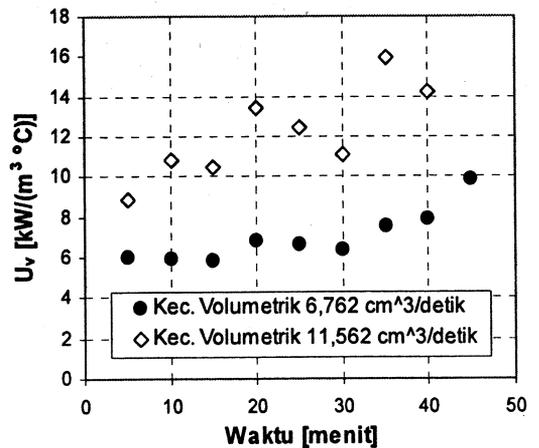


Gambar 4. Nilai q dan Q sebagai fungsi waktu untuk $T_{k,in} = 50,8\text{ }^\circ\text{C}$, $F = 6,762\text{ cm}^3/\text{detik}$, $d = 7,288\text{ mm}$, dan $V = 3463,61\text{ cm}^3$.

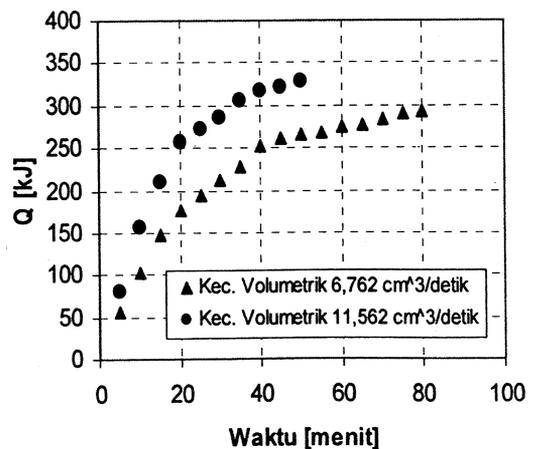
Pengaruh kecepatan volumetris kerosin terhadap nilai U_v untuk percobaan dengan suhu kerosin masuk kolom $50,8\text{ }^\circ\text{C}$, diameter gelembung $7,288\text{ mm}$, dan volume larutan $3463,61\text{ cm}^3$ ditunjukkan pada Gambar 5. Pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa nilai U_v makin besar jika kecepatan volumetris kerosin dinaikkan. Hal ini karena makin besar kecepatan volumetris kerosin

untuk luas penampang lintang kolom yang sama menyebabkan naiknya turbulensi di dalam kolom sedangkan nilai U_v dipengaruhi oleh turbulensi.

Gambar 6 menunjukkan pengaruh kecepatan volumetris kerosin terhadap jumlah energi panas yang tersimpan di larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ untuk percobaan dengan suhu kerosin masuk kolom $50,8\text{ }^\circ\text{C}$, diameter gelembung $7,288\text{ mm}$, dan volume larutan $3463,61\text{ cm}^3$. Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa kenaikan kecepatan volumetris kerosin meningkatkan jumlah energi panas yang tersimpan di larutan pada waktu yang sama. Hal ini karena naiknya kecepatan perpindahan panas dari kerosin ke larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dengan naiknya kecepatan volumetris kerosin untuk luas penampang lintang kolom yang sama. Naiknya kecepatan perpindahan panas dari kerosin ke larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dengan naiknya kecepatan volumetris kerosin untuk luas penampang lintang kolom yang sama karena naiknya nilai U_v .

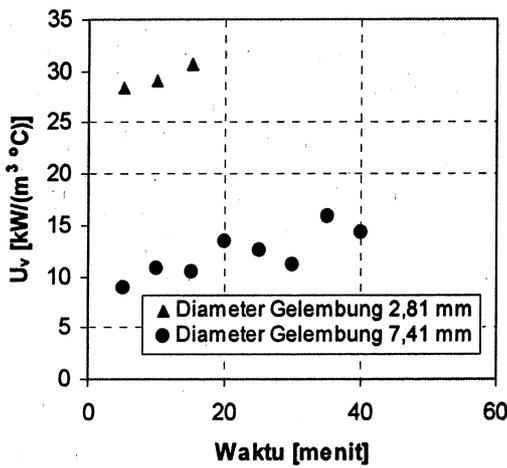


Gambar 5. Pengaruh F terhadap nilai U_v untuk percobaan dengan $T_{k,in} = 50,8\text{ }^\circ\text{C}$, $d = 7,288\text{ mm}$, dan $V = 3463,61\text{ cm}^3$.



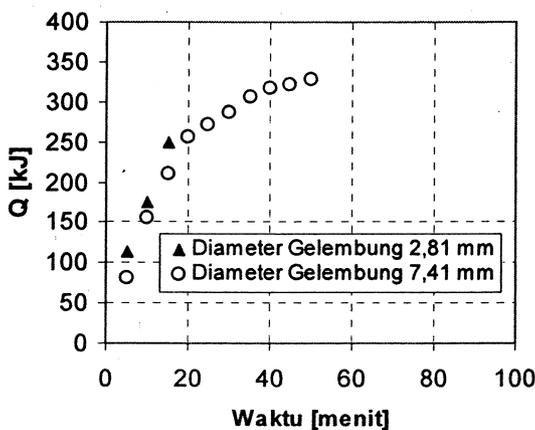
Gambar 6. Pengaruh F terhadap Q sebagai fungsi waktu untuk percobaan dengan $T_{k,in} = 50,8\text{ }^\circ\text{C}$, $d = 7,288\text{ mm}$, dan $V = 3463,61\text{ cm}^3$.

Pengaruh diameter gelembung kerosin terhadap U_v untuk percobaan dengan suhu kerosin masuk kolom $50,8\text{ }^\circ\text{C}$, kecepatan volumetris kerosin $11,562\text{ cm}^3/\text{detik}$, dan volume larutan $3463,61\text{ cm}^3$ ditunjukkan pada Gambar 7. Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa makin kecil diameter gelembung kerosin untuk kecepatan volumetris yang sama meningkatkan nilai U_v . Hal ini karena makin kecil diameter gelembung kerosin untuk kecepatan volumetris yang sama meningkatkan luas perpindahan panas per satuan volumenya. U_v menunjukkan koefisien perpindahan panas per satuan volume kolom.



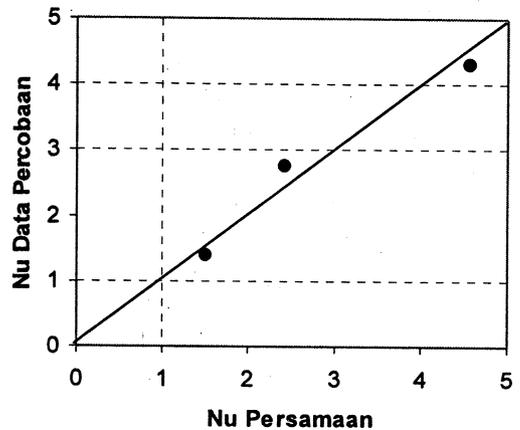
Gambar 7. Pengaruh d terhadap U_v untuk percobaan dengan $T_{k,in} = 50,8\text{ }^\circ\text{C}$, $F = 11,562\text{ cm}^3/\text{detik}$, dan $V = 3463,61\text{ cm}^3$.

Gambar 8 menunjukkan pengaruh diameter gelembung terhadap jumlah panas yang tersimpan di larutan sebagai fungsi waktu untuk percobaan dengan suhu kerosin masuk kolom $50,8\text{ }^\circ\text{C}$, kecepatan volumetris kerosin $11,562\text{ cm}^3/\text{detik}$, dan volume larutan $3463,61\text{ cm}^3$. Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa pengaruh diameter gelembung kerosin terhadap jumlah panas yang tersimpan di larutan kecil.



Gambar 8. Pengaruh d terhadap Q untuk percobaan dengan $T_{k,in} = 50,8\text{ }^\circ\text{C}$, $F = 11,562\text{ cm}^3/\text{detik}$, dan $V = 3463,61\text{ cm}^3$.

Dari pengaruh kecepatan volumetris dan ukuran gelembung kerosin terhadap U_v , lalu dibuat formulasi matematis hubungan antara nilai U_v dengan kecepatan aliran massa kerosin dan diameter gelembung kerosin dalam bentuk persamaan kelompok bilangan tidak berdimensi $Nu = 0,2362 Re^{1,475}$ dengan ralat rerata 0,45% terhadap data percobaan. Persamaan tersebut berlaku untuk kisaran nilai Re dari 5 sampai dengan 13,2. Perbandingan antara Nu dari persamaan dengan Nu dari data percobaan ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan Nu dari persamaan dengan Nu dari data percobaan.

Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Nilai koefisien perpindahan panas volumetris dipengaruhi oleh kecepatan volumetris kerosin dan diameter gelembung kerosin.
- Hubungan antara nilai koefisien perpindahan panas volumetris dengan kecepatan aliran massa dan ukuran diameter gelembung kerosin dinyatakan dengan persamaan kelompok bilangan tidak berdimensi $Nu = 0,2362 Re^{1,475}$ dengan ralat rerata 0,45% terhadap data percobaan. Persamaan tersebut berlaku untuk kisaran nilai Re dari 5 sampai dengan 13,2.
- Pengaruh kecepatan volumetris kerosin terhadap jumlah energi tersimpan di larutan lebih besar dibandingkan dengan pengaruh ukuran diameter gelembung kerosin.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian UGM untuk biaya yang diberikan untuk penelitian ini dengan No. Kontrak 3129/J01/KL.04.04/2000. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Achmad Rois, S.T. untuk bantuannya dalam pengambilan data percobaan penelitian ini waktu yang bersangkutan menjadi mahasiswa S1 di Jurusan Teknik Kimia, FT UGM.

Daftar Notasi

A	= luas total lubang <i>sparger</i> , m^2
a	= tetapan pada persamaan (6)
b	= tetapan pada persamaan (6)
$c_{p,k}$	= kapasitas panas kerosin, $kJ/kg/^\circ C$
$c_{p,l}$	= kapasitas panas larutan, $kJ/kg/^\circ C$
d	= diameter gelembung kerosin, m
F	= kecepatan volumetris kerosin, $m^3/detik$
L	= kecepatan aliran massa kerosin per satuan luas kolom, $kg/m^2/detik$
M_l	= massa larutan, kg
Nu	= bilangan Nusselt, $Nu = U_v d^2 k_x$
$Q(t)$	= energi tersimpan di larutan pada waktu t , kJ
q	= kecepatan perpindahan panas, $J/detik$
Re_x	= bilangan Reynolds kerosin, $Re = L/\mu_x$
$T_{k,in}$	= suhu kerosin masuk, $^\circ C$
$T_{k,out}$	= suhu kerosin keluar, $^\circ C$
T_l	= suhu larutan, $^\circ C$
$T_l(t)$	= suhu larutan pada waktu t , $^\circ C$
$T_{l,0}$	= suhu larutan mula-mula, $^\circ C$
ΔT_{lmtd}	= beda suhu rerata logaritmik, $^\circ C$
t	= waktu, detik
U_v	= koefisien perpindahan panas volumetris, $kW/m^3/^\circ C$
V	= volume larutan, m^3

Daftar Pustaka

Biswas, D. R., 1977, Thermal Energy Storage using Sodium Sulphate Decahydrate and Water, *Solar Energy*, 19, 99-100.

Etherington, T. L., 1957, A Dynamic Heat Storage System, *Heating Piping and Airconditioning J.*, 147-151.

Farid, M. M. and Khalaf, A. N., 1994, Performance of Direct Contact Latent Heat Storage Units with Two Hydrated Salts, *Solar Energy*, 52, 179-189.

Farid, M. M. and Yacoub, K., 1989, Performance of Direct Contact Latent Heat Storage Unit, *Solar Energy*, 43, 237-252.

Mulyono, P., 2000, *Koefisien Perpindahan Panas Volumetris pada Sistem Penyimpanan Panas Kontak Langsung Menggunakan Larutan $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$* , Laporan Penelitian, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Mulyono, P., 2004, Direct Contact Thermal Energy Storage System Using $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ Solution, *Energy*, 29, 2573-2583.

Ryu, H. W., Hong, S. A., Shin, B. C., and Kim, S. D., 1991, Heat Transfer Characteristics of Cool Thermal Storage Systems, *Energy*, 16, 727-737.

Telkes, M., 1952, Nucleation of the Supersaturated Inorganic Salt Solution, *Ind. Eng. Chem.* 44, 1308.

Yanadori, M. and Matsuda, T., 1986, Heat Transferential Study on a Heat Storage Container with Phase Change Material, *Solar Energy*, 36, 169-177.

Naskah diterima 9 Maret 2007
 Dinilai 15 Maret 2007
 Disetujui 28 Maret 2007
 jrp070305