

Studi Eksperimen Analisa Performa Compact Heat Exchanger Louvered Fin Flat Tube untuk Pemanfaatan Waste Energy

Taqwim Ismail, Ary Bachtiar Khrisna Putra

Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: arybach@me.its.ac.id

Abstrak—Waste Heat Recovery merupakan instalasi yang digunakan untuk memanfaatkan kembali waste energy seperti exhaust gas. Penelitian dilakukan pada compact heat exchanger tipe louvered fin flat tube sebagai salah satu komponen penyusun waste heat recovery system. Eksperimen dilakukan dengan mendesain compact heat exchanger tipe louvered fin flat tube kemudian dilakukan pengujian pada compact heat exchanger yang telah didesain. Pengujian dilakukan dengan memberikan tiga variasi kecepatan putaran fan sisi exhaust gas, yaitu 0.2, 0.3, dan 0.4 m/s untuk mengetahui unjuk kerja yang berbeda dari compact heat exchanger yang telah didesain. Hasil yang didapatkan dari studi eksperimen ini adalah dimensi dari compact heat exchanger tipe louvered fin flat tube dan beberapa parameter yang menunjukkan unjuk kerja dari compact heat exchanger seperti nilai heat transfer baik dari sisi air maupun sisi exhaust gas, effectiveness, number of transfer unit (NTU), overall heat transfer coefficient, dan ΔT_{LMTD} dari compact heat exchanger.

Kata kunci—Compact Heat Exchanger, Louvered-Fin, Waste Heat Recovery System

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara berkembang yang memiliki potensi untuk menghasilkan waste energy yang begitu besar. Salah satu bentuk dari waste energy yg dihasilkan di Indonesia adalah exhaust gas yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), exhaust gas yang dihasilkan oleh PLTD ini mempunyai kisaran temperatur yang cukup tinggi yaitu 300°C hingga 500°C. Dengan adanya potensi waste energy yang begitu besar tersebut maka dikembangkanlah suatu sistem waste heat recovery untuk memanfaatkan exhaust gas yang dihasilkan, waste heat recovery system dirancang untuk memanfaatkan exhaust gas sebagai sumber energi utama untuk pembangkit listrik skala kecil.

Salah satu komponen utama dari waste heat recovery system adalah heat exchanger. Fungsi utama dari heat exchanger adalah menyerap energi panas yang dihasilkan oleh exhaust gas. Tipe heat exchanger yang umumnya digunakan di dunia adalah tipe shell and cube dan compact heat exchanger.

Penelitian ini dilakukan dengan mendesain sebuah heat Exchanger sebagai salah satu komponen utama dari waste heat recovery system. Artikel George Thomas Hall dan James Edwin Marthinuss Jr yang berjudul *Air Cooled Heat Exchanger Design* meneliti tentang pengaruh beberapa parameter yang menjadi pertimbangan untuk design HE meliputi perpindahan panas, pressure drop, ukuran dan berat [1]. Tipe heat exchanger yang dipilih adalah compact heat

Tabel 1.

Data-data awal yang digunakan sebagai dasar perancangan compact heat exchanger tipe louvered fin flat tube

No	Data	Nilai
1	Temperatur inlet Gas ($T_{h,i}$)	280°C
2	Temperatur outlet Air ($T_{c,o}$)	120.2°C
3	Temperatur inlet Air ($T_{c,i}$)	27°C
4	Mass Flowrate Gas (\dot{m}_{gas})	0.48376 Kg/s
5	Mass Flowrate Air (\dot{m}_{air})	0.01023 Kg/s

exchanger yang umumnya digunakan untuk luasan perpindahan panas per unit volume yang besar dan salah satu fluida kerjanya berbentuk gas. Selanjutnya heat exchanger yang telah di desain akan diuji performanya dengan memberikan variasi flowrate exhaust gas. Dari penelitian ini didapatkan data-data sebagai dasar mengetahui kondisi operasi optimum untuk compact heat exchanger tipe louvered fin flat tube yang merupakan salah satu komponen utama dari waste heat recovery system.

II. METODE PENELITIAN

A. Perancangan Compact Heat Exchanger tipe Louvered Fin Flat Tube

Perancangan compact heat exchanger tipe louvered fin flat tube menggunakan data-data yang disesuaikan dengan kemampuan komponen penyusun instalasi pengujian performa untuk skala laboratorium sehingga didapatkan data-data yang menunjukkan kondisi operasi optimum dari compact heat exchanger yang dirancang. Data-data awal yang digunakan sebagai dasar perancangan compact heat exchanger tipe louvered fin flat tube disajikan dalam Tabel 1.

Data-data di atas diperoleh dengan keterangan sebagai berikut:

1. Temperatur inlet gas dirancang sebesar 280°C karena pengujian dilakukan dalam skala laboratorium dan disesuaikan dengan material thermocouple yang digunakan untuk mengukur temperatur exhaust gas.
2. Temperatur outlet air dirancang 120.2°C karena temperatur jenuh air pada tekanan 2 bar adalah 120.2°C dan diharapkan fase fluida keluar dari heat exchanger dalam fase campuran.
3. Temperatur inlet air dirancang pada temperatur kamar kurang lebih 27°C.

Tabel 2.

Hasil perancangan didapatkan *compact heat exchanger* tipe *louvered fin flat tube* dengan dimensi

Flat Tube	
Tebal tube	3.048 mm
Lebar tube	22.098 mm
Panjang tube	300 mm
Jumlah tube	34
Bentuk susunan tube	Aligned
Jarak tube transversal (ST)	8.0264 mm
Jarak tube arah longitudinal (SL)	6.35 mm
Fin	
Jumlah fin	4000
Tebal fin	0.1016 mm
Lebar fin	8.0264 mm
Core Compact Heat Exchanger	
Tinggi Compact Heat Exchanger	300 mm
Panjang Compact Heat Exchanger	400 mm
Lebar Compact Heat Exchanger	12 mm

1. *Mass flowrate exhaust gas* dirancang pada kapasitas maksimal fan hisap yang digunakan yaitu 2280 m³/jam dengan menggunakan persamaan :

$$\dot{m}_{gas} = \rho \cdot Q_{fan}$$

Dengan : ρ_{gas} : density gas pada T_{mean} gas

Q_{fan} : Kapasitas maksimal fan

2. *Mass flowrate air* dirancang sesuai dengan spesifikasi debit pompa yang digunakan yaitu 10 gallon/jam dengan persamaan :

$$\dot{m}_{water} = \rho_{water} \cdot Q_{pompa}$$

Dengan : ρ_{gas} : density gas pada T_{mean} air

Q_{pompa} : debit pompa

Dari data awal di atas kemudian dilakukan proses perancangan *compact heat exchanger* dengan menggunakan metode ΔT_{LMTD} (log mean temperature difference) yang kemudian dilanjutkan dengan mencari nilai *overall heat transfer* desain dari *compact heat exchanger* (UA_{desain}). Selanjutnya dilakukan proses perhitungan untuk mencari nilai *Reynolds number* (Re), *Nusselt number* (Nu), *Stanton number* (St), koefisien konveksi (h) dari sisi air maupun *exhaust gas* serta efisiensi dari *louvered fin* dengan persamaan sebagai berikut [2]:

Efisiensi Louvered Fin

$$\eta_o = 1 - \frac{A_f}{A} (1 - \eta_f) \quad (1)$$

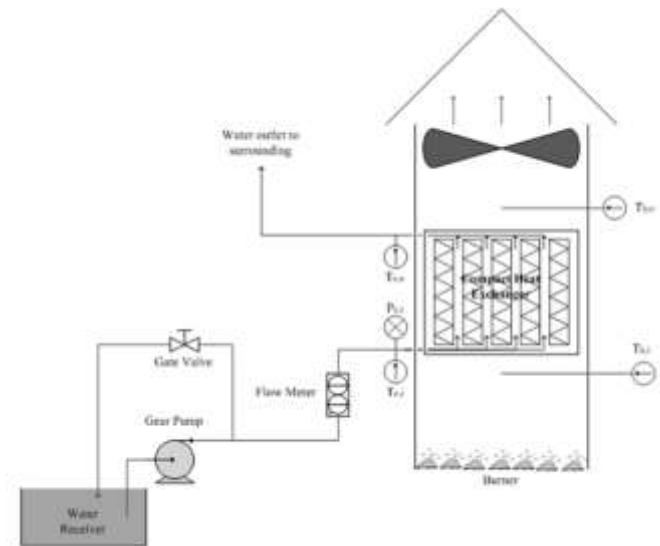
$$A_f = A_{HE} \times \beta \quad (2)$$

$$A_{HE} = \alpha x V_{HE} \quad (3)$$

Hasil akhir yang didapatkan dari proses perhitungan adalah *overall heat transfer* ($UA_{perhitungan}$).

Selanjutnya untuk memastikan bahwa *dimensi compact heat exchanger* tipe *louvered fin flat tube* yang didapat dari proses perhitungan sudah mendekati dengan desain maka dipilih nilai toleransi maksimal sebesar 10% antara UA_{desain} dan $UA_{perhitungan}$. Dari dalam Tabel 2.

B. Metode Pengujian Compact Heat Exchanger tipe Louvered Fin Flat Tube



Gambar 1. Skema Instalasi Percobaan Compact Heat Exchanger
Keterangan gambar:

Berikut berupa skema pengujian yang digunakan secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 1.

Cara kerja alat pada gambar 1 bermula dari air yang terdapat di dalam *water receiver* disedot oleh *gear pump* dan dialirkan masuk menuju ke *compact heat exchanger*. Gate valve digunakan untuk mengatur *flow* air yang masuk *compact heat exchanger* dan nilai *flow*nya bisa dilihat pada *flowmeter* yang ditempatkan sebelum masukan *compact heat exchanger*. Pada sisi *exhaust gas* sebagai sumber panas akan divariasikan tiga putaran fan hisap untuk mengetahui performa terbaik dari *compact heat exchanger*.

Penelitian kali ini dikhususkan pada pengujian performa *compact heat exchanger* tipe *louvered fin flat tube* sebagai salah satu komponen utama *waste heat recovery system*. Titik – titik pengukuran pada pengujian performa *compact heat exchanger* tipe *louvered fin flat tube* seperti dijelaskan pada gambar 1 adalah

Selama proses pengujian *compact heat exchanger* tipe *louvered fin flat tube* tersebut terdapat parameter-parameter yang diukur yaitu, debit air (Q) menggunakan *flowmeter*, Temperatur air masuk *compact heat exchanger* ($T_{c,i}$), Temperatur air keluar *compact heat exchanger* ($T_{c,o}$), Temperatur *exhaust gas* masuk *compact heat exchanger* ($T_{h,i}$), Temperatur air keluar *compact heat exchanger* ($T_{h,o}$), Tekanan air masuk *compact heat exchanger* ($P_{c,i}$), menggunakan *Pressure gage*, Kecepatan *exhaust gas* angin (v_{gas}) menggunakan *Anemometer digital*.

B. Perhitungan Compact Heat Exchanger

Berikut berupa rumus yang dipergunakan dalam perhitungan performa *compact heat exchanger* [3] :

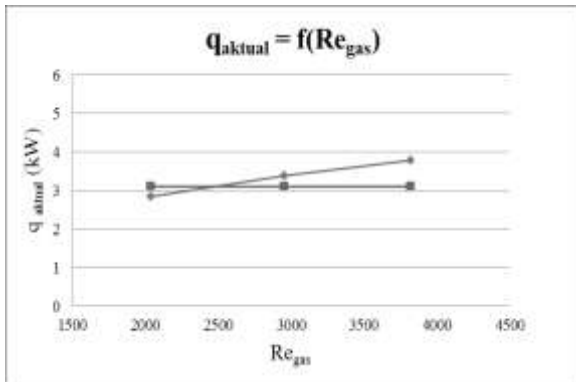
$$q_{gas} = \dot{m}_{gas} \cdot c_{p,gas} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (4)$$

$$q_{water} = \dot{m}_{water} (h_{c,o} - h_{c,i}) \quad (5)$$

$$q_{max} = C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (6)$$

Effectiveness *compact heat exchanger*

$$(\varepsilon) = \frac{q_{gas}}{q_{max}} \quad (7)$$



Gambar 2. Grafik q aktual fungsi Reynolds Number Sisi Gas

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian eksperimen *compact heat exchanger* tipe *louvered fin flat tube* dengan variasi *flowrate exhaust gas* didapatkan beberapa analisa performansi *compact heat exchanger* yang ditunjukkan oleh grafik dari tiap variasi *flowrate*.

Pada gambar 2 di bawah, terlihat bahwa nilai q aktual sisi air memiliki nilai yg relatif konstan terhadap perubahan *Reynolds Number* gas, sedangkan untuk nilai q aktual sisi gas mengalami kenaikan yang relatif rendah seiring bertambahnya nilai *Reynolds Number* sisi gas.

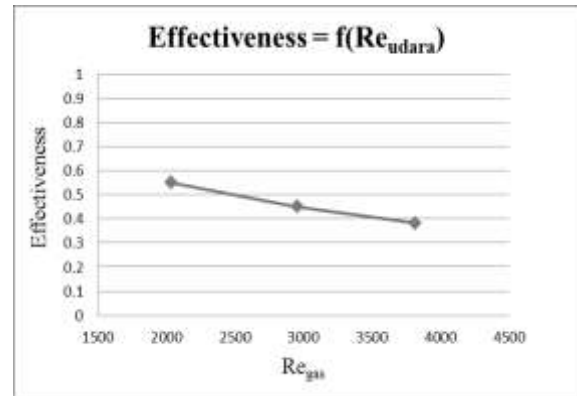
Dari hasil grafik di atas nilai q aktual sisi air memiliki nilai yang relatif konstan karena mass flowrate air tidak divariasikan dan outlet sisi air sudah dalam fase campuran sehingga temperatur keluaran sisi air relatif konstan. Sedangkan untuk nilai q aktual sisi gas yang kecepatan gasnya divariasikan, memiliki nilai q aktual yang terus meningkat seiring bertambahnya nilai *Reynolds Number* dikarenakan semakin bertambahnya nilai kecepatan maka nilai mass flowrate sisi gas akan semakin tinggi dan untuk nilai ΔT_{gas} yang relatif tetap maka nilai q aktual gasnya akan semakin tinggi.

Pada gambar 2, terlihat bahwa nilai q aktual sisi air memiliki nilai yg relatif konstan terhadap perubahan *Reynolds Number* gas, sedangkan untuk nilai q aktual sisi gas mengalami kenaikan yang relatif rendah seiring bertambahnya nilai *Reynolds Number* sisi gas.

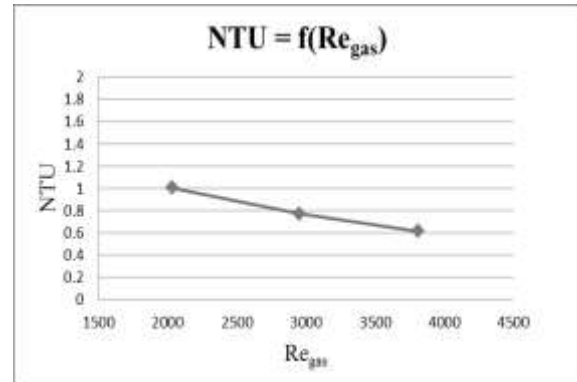
Dari hasil grafik di atas nilai q aktual sisi air memiliki nilai yang relatif konstan karena mass flowrate air tidak divariasikan dan outlet sisi air sudah dalam fase campuran sehingga temperatur keluaran sisi air relatif konstan. Sedangkan untuk nilai q aktual sisi gas yang kecepatan gasnya divariasikan, memiliki nilai q aktual yang terus meningkat seiring bertambahnya nilai *Reynolds Number* dikarenakan semakin bertambahnya nilai kecepatan maka nilai mass flowrate sisi gas akan semakin tinggi dan untuk nilai ΔT_{gas} yang relatif tetap maka nilai q aktual gasnya akan semakin tinggi.

Pada gambar 3, dilihat bahwa nilai *effectiveness* memiliki nilai yg menurun terhadap perubahan *Reynolds Number* sisi gas.

Dari hasil grafik di atas nilai *effectiveness* mengalami penurunan seiring bertambahnya nilai *Reynolds Number* sisi gas, hal ini dikarenakan *effectiveness* merupakan ratio antara q aktual sisi gas dan q maksimal dari Compact Heat Exchanger. Pada grafik di atas nilai heat transfer maksimal (q_{max}) dari Compact Heat Exchanger mengalami kenaikan



Gambar 3. Grafik Effectiveness Fungsi Reynolds Number Sisi Gas



Gambar 4. Grafik NTU Fungsi Reynolds Number Sisi Gas

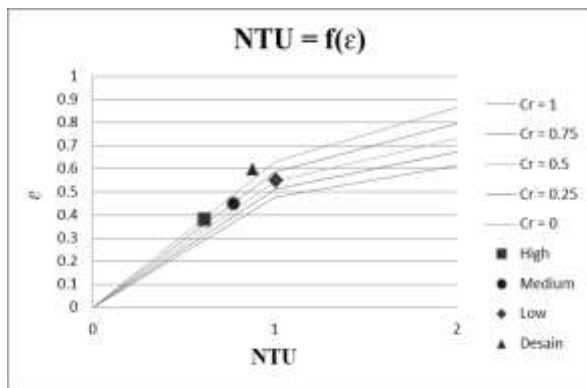
yang cukup signifikan terhadap nilai *Reynolds Number* yang semakin tinggi sedangkan nilai heat transfer aktual sisi gasnya (q_{aktual}) mengalami kenaikan yang relatif rendah terhadap perubahan *Reynolds Number* gas. Pada gambar 4, terlihat bahwa semakin tinggi nilai *Reynolds Number* sisi gas maka nilai NTU semakin menurun.

Dari hasil grafik di atas nilai NTU mengalami penurunan seiring bertambahnya nilai *Reynolds Number* sisi gas, hal ini dikarenakan semakin tingginya nilai *Reynolds Number* sisi gas maka nilai heat capacity rate sisi gas ($C_h = C_{\text{min}}$) akan semakin besar. Sehingga sesuai persamaan pendekatan yang ada pada buku incropera untuk overall heat transfer dan luasan total perpindahan panas yang relatif tetap maka nilai NTUnya akan semakin menurun.

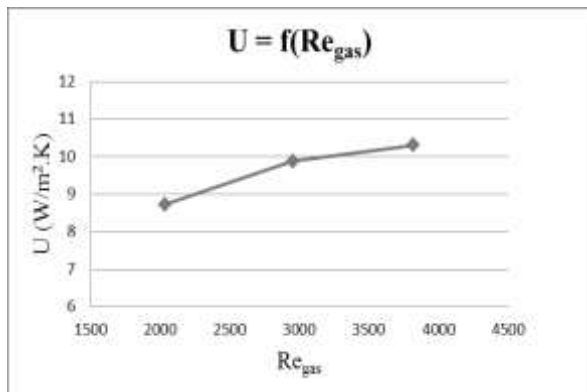
Gambar 5 dibawah menunjukkan bahwa *effectiveness* desain memiliki nilai tertinggi yaitu 0.571, nilai *effectivenessnya* pada saat percobaan lebih kecil dari nilai *effectiveness* desain karena pada desain diberlakukan beberapa asumsi untuk memudahkan proses perencanaan, seperti *thermal resistance* pada perpindahan panas konduksi sangat kecil sehingga bisa diabaikan.

Dari grafik di bawah dapat diketahui bahwa nilai *effectiveness* maksimal pada proses pengujian *compact heat exchanger* adalah pada saat putaran fan low yaitu 0.549.

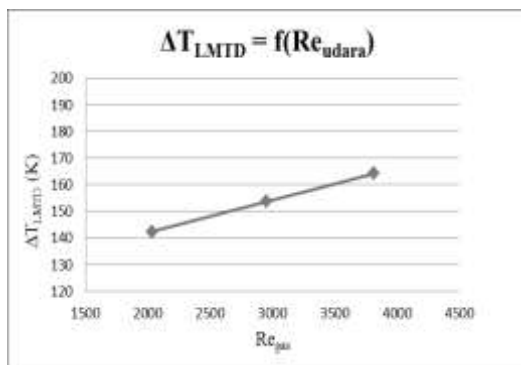
Gambar 6 menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai *Reynolds Number* sisi gas maka nilai *overall heat transfer coefficient* semakin tinggi. Akan tetapi kenaikan nilai *overall heat transfer coefficientnya* tidak terlalu signifikan.



Gambar 5. Grafik Effectiveness Fungsi NTU



Gambar 6. Grafik Overall Heat Transfer Coefficient Fungsi Reynolds Number Sisi Gas

Gambar 7. Grafik ΔT_{LMTD} Fungsi Reynolds Number Sisi Gas

Dari hasil grafik di atas nilai overall heat transfer coefficient mengalami kenaikan seiring bertambahnya nilai Reynolds Number sisi gas, hal ini dikarenakan semakin tingginya nilai Reynolds Number sisi gas maka nilai koefisien konveksi sisi gas akan semakin besar. Sedangkan koefisien konveksi berbanding terbalik dengan thermal resistance, jadi untuk koefisien konveksinya menurun maka thermal resistancenya semakin rendah. Sehingga untuk thermal resistance yang makin rendah nilai overall heat transfer coefficientnya akan semakin tinggi.

Gambar 7 menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai Reynolds Number sisi gas maka ΔT_{LMTD} semakin tinggi. Akan tetapi kenaikan nilai ΔT_{LMTD} tidak terlalu signifikan.

Dari hasil grafik di atas nilai ΔT_{LMTD} mengalami kenaikan seiring bertambahnya nilai Reynolds Number sisi gas, hal ini dikarenakan semakin tingginya nilai Reynolds Number sisi gas maka temperatur gas setelah melewati compact heat exchanger akan semakin tinggi. Sehingga sesuai persamaan ΔT_{LMTD} untuk aliran fluida cross flow jika temperatur gas setelah melewati compact heat exchanger semakin tinggi

maka nilai ΔT_{LMTD} akan semakin tinggi.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan dalam menguji performa compact heat exchanger tipe louvered fin flat tube sebagai komponen utama heat recovery system dapat disimpulkan:

1. Heat transfer aktual pada compact heat exchanger yang telah diuji memiliki nilai yang konstan pada sisi air yaitu 3.095 kW dan pada sisi gas memiliki range 2.836-3.786 kW pada range Reynolds number 2035.55-3814.84 dengan nilai heat transfer maksimum 3.786 kW pada Reynolds number 3814.84.
2. Nilai effectiveness dari compact heat exchanger yang telah diuji memiliki range 0.381-0.549 pada range Reynolds number 2035.55-3814.84 dengan nilai effectiveness maksimum 0.549 pada Reynolds number 2035.55.
3. Nilai NTU dari compact heat exchanger yang telah diuji memiliki range 0.6127-1.004 pada range Reynolds number 2035.55-3814.84 dengan nilai NTU maksimum 1.004 pada Reynolds number 2035.55.
4. Nilai overall heat transfer coefficient (U) dari compact heat exchanger yang telah diuji memiliki range 8.72-10.30 W/m².K pada range Reynolds number 2035.55-3814.84 dengan nilai overall heat transfer coefficient maksimum 10.30 W/m².K pada Reynolds number 3814.84.
5. Nilai overall heat transfer coefficient (U) dari compact heat exchanger yang telah diuji memiliki range 8.72-10.30 W/m².K pada range Reynolds number 2035.55-3814.84 dengan nilai overall heat transfer coefficient maksimum 10.30 W/m².K pada Reynolds number 3814.84.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada laboratorium Teknik Pendingin dan Pengkondisian Udara Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri ITS yang telah banyak mendukung kelancaran penelitian kali ini serta bapak dosen pembimbing dan semua pihak yang membantu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Hall G.T, Jr J.Edwin. 2004. *Air Cooled Heat Exchanger Design*. USA
- [2]. Kays, W. M., London, A. L. 1964. *Compact Heat Exchanger*. 2nd Ed. New York : McGraw Hill Book.
- [3]. Company Incropera, Frank P., DeWitt, Bergman, Lavine. 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition*. John Wiley & Sons Inc. New York.