

Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Efektivitas *Shell-and-Tube Heat Exchanger*

Ekadewi Anggraini Handoyo

Dosen Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Abstrak

Sebagai alat untuk penukaran panas dari fluida dengan temperatur tinggi ke fluida dengan temperatur rendah, suatu *heat exchanger* diharapkan mempunyai efektivitas yang tinggi. Secara teoritis kenaikan kecepatan aliran akan menaikkan efektivitas. Namun, hal ini membuat waktu kontak menjadi singkat. Dari fenomena ini, ingin diteliti bagaimana pengaruh kecepatan terhadap efektivitas suatu *Shell-and-Tube Heat Exchanger* dengan udara sebagai fluida kerja.

Dari hasil penelitian didapat bahwa efektivitas naik seiring dengan kenaikan kecepatan hingga suatu harga tertentu dan kemudian akan turun. Efektivitas *Shell-and-Tube Heat Exchanger* lebih tinggi jika udara panas mengalir dengan kecepatan tinggi (di sisi *tube*) dan udara dingin mengalir dengan kecepatan rendah (di sisi *shell*).

Kata kunci: efektivitas, *shell-and-tube heat exchanger*.

Abstract

As a device to exchange heat from hot fluid to colder fluid, a heat exchanger is supposed to have high effectiveness. Theoretically, the increase of fluid rate would increase the effectiveness. Yet, it makes the contact time among the fluids become shorter. Based on this phenomenon, a research is carried on to find out how the fluid rate affects the effectiveness of a *Shell-and-Tube Heat Exchanger*. The working fluid used is air.

It is found out that the effectiveness would up to a certain value if the fluid rate increases and then it would decrease. The effectiveness of a *Shell-and-Tube Heat Exchanger* would be higher if the hot air flows faster (in the tube side) and the cold air flows slower (in the shell side).

Keywords: effectiveness, *shell-and-tube heat exchanger*.

1. Pendahuluan

Heat Exchanger merupakan peralatan yang digunakan untuk perpindahan panas antara dua atau lebih fluida. Banyak jenis *heat exchanger* yang dibuat dan digunakan dalam pusat pembangkit tenaga, unit pendingin, unit pengkondisi udara, proses di industri, sistem turbin gas, dll. Dalam *heat exchanger* tidak terjadi pencampuran seperti halnya dalam suatu *mixing chamber*. Dalam radiator mobil misalnya, panas berpindah dari air yang panas yang mengalir dalam pipa radiator ke udara yang mengalir dengan bantuan fan.

Menurut Cengel (1997), hampir pada semua *heat exchanger*, perpindahan panas didominasi oleh konveksi dan konduksi

dari fluida panas ke fluida dingin, dimana keduanya dipisahkan oleh dinding. Perpindahan panas secara konveksi sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri *heat exchanger* dan tiga bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan Reynold, bilangan Nusselt dan bilangan Prandtl fluida. Besar konveksi yang terjadi dalam suatu *double-pipe heat exchanger* akan berbeda dengan *cross-flow heat exchanger* atau *shell-and-tube heat exchanger* atau *compact heat exchanger* atau *plate heat exchanger* untuk beda temperatur yang sama. Sedang besar ketiga bilangan tak berdimensi tersebut tergantung pada kecepatan aliran serta properti fluida yang meliputi massa jenis, viskositas absolut, panas jenis dan konduktivitas panas.

Besar kecepatan aliran menentukan jenis aliran, yaitu aliran laminar atau turbulen. Turbulensi yang terjadi dalam aliran akibat tingginya kecepatan aliran dapat memperbesar bilangan Reynold dan bilangan Nusselt yang

Catatan : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Februari 2001. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 3 Nomor 1 April 2001.

kemudian meningkatkan perpindahan panas secara konveksi. Namun, semakin tinggi kecepatan aliran berarti waktu kontak kedua fluida semakin singkat. Berangkat dari kondisi ini, disusun hipotesa bahwa kenaikan kecepatan aliran akan meningkatkan efektivitas suatu *heat exchanger* hingga pada suatu harga tertentu, dan kemudian efektivitas tidak naik lagi melainkan turun. Pada penelitian ini akan dilihat bagaimana pengaruh kenaikan kecepatan aliran terhadap efektivitas *heat exchanger*.

2. Teori Dasar

Menurut Incropera dan Dewitt (1981), efektivitas suatu *heat exchanger* didefinisikan sebagai perbandingan antara perpindahan panas yang diharapkan (nyata) dengan perpindahan panas maksimum yang mungkin terjadi dalam *heat exchanger* tersebut.

$$\dot{a} = \frac{\text{perpindahan panas yang diharapkan}}{\text{perpindahan panas maksimum yang mungkin}}$$

Perpindahan panas yang diharapkan dalam penelitian ini adalah perpindahan panas yang diterima udara dingin:

$$Q_{\text{udara dingin}} = (m \cdot c_p)_{\text{udara dingin}} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (1)$$

Sedang perpindahan panas maksimum yang mungkin terjadi dalam *heat exchanger* ditentukan sebagai berikut:

- Jika $(m \cdot c_p)_{\text{udara dingin}} > (m \cdot c_p)_{\text{udara panas}}$, maka $Q_{\text{max}} = (m \cdot c_p)_{\text{udara panas}} (T_{h,i} - T_{c,i})$ (2)

- Jika $(m \cdot c_p)_{\text{udara dingin}} < (m \cdot c_p)_{\text{udara panas}}$, maka $Q_{\text{max}} = (m \cdot c_p)_{\text{udara dingin}} (T_{h,i} - T_{c,i})$ (3)

Perpindahan panas maksimum mungkin terjadi bila salah satu fluida mengalami perbedaan suhu sebesar beda suhu maksimum yang terdapat dalam *heat exchanger* tersebut, yaitu selisih antara suhu masuk fluida panas dan fluida dingin. Fluida yang mungkin mengalami perbedaan suhu maksimum ini ialah fluida yang mempunyai nilai kapasitas panas $(m \cdot c_p)$ minimum.

Dengan demikian efektivitas *heat exchanger* dalam penelitian ini adalah:

$$\dot{a} = \frac{(m \cdot c_p)_{\text{udara dingin}} (T_{c,o} - T_{c,i})}{(m \cdot c_p)_{\text{min}} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (4)$$

Pada penelitian ini, laju aliran massa udara panas dibuat sama dengan laju aliran massa udara dingin. Hal ini dilakukan untuk

menghilangkan pengaruh laju aliran massa dalam perpindahan panas antara udara panas dan udara dingin, mengingat panas jenis (c_p) udara panas hampir sama dengan panas jenis udara dingin. Dengan membuat laju aliran massa keduanya sama, kenaikan atau penurunan suhu benar-benar disebabkan perpindahan panas di antaranya.

Laju aliran massa dapat ditentukan dengan mengetahui kecepatan dan kerapatan fluida serta luas penampang aliran, yaitu:

$$\dot{m} = \rho v A \quad (5)$$

Jika udara dingin diharapkan mengalir dengan kecepatan 5 m/det dalam tiap *tube*, maka laju aliran massa udara dingin = 0,002 kg/s. Agar laju aliran massa keduanya sama, udara panas harus masuk *shell* dengan kecepatan: 0,7 m/det.

3. Alat Percobaan

Heat Exchanger yang diuji:

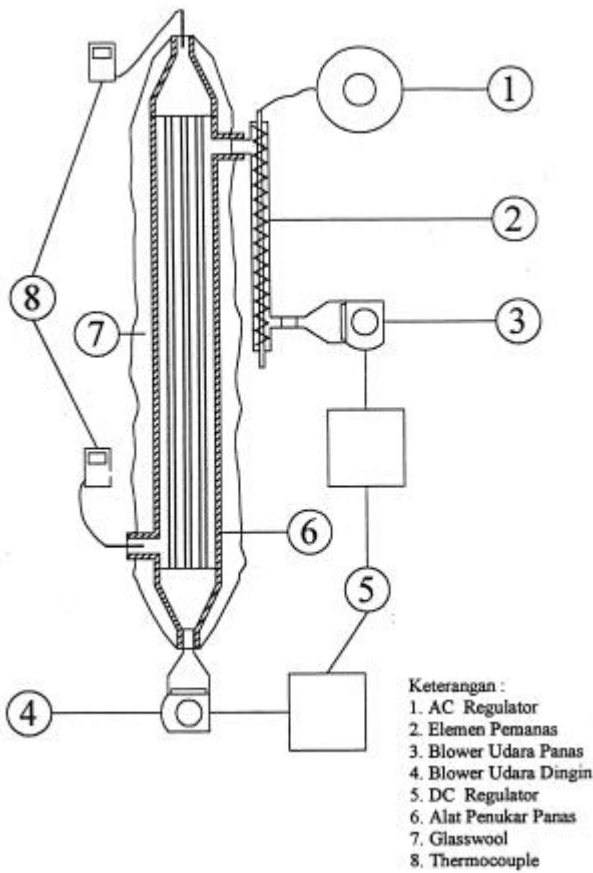
Heat Exchanger yang diuji adalah tipe *shell-and-tube* dengan konstruksi seperti pada Gambar 1. *Heat exchanger* ini dirancang dengan batasan:

- *One pass shell* dan *one pass tube* (ada 7 *tube*)
- Spesifikasi *tube*:
Jumlah 7 *tube*, dengan jarak *pitch* 17,5 mm.
Bahan tembaga dengan diameter dalam 8,1 mm, diameter luar 9,5 mm.
Spesifikasi *shell*:
Bahan besi dengan diameter dalam 70 mm, diameter luar 75 mm.
Spesifikasi isolator panas:
Bahan *glasswool* dengan tebal 2,5 cm.
- Temperatur udara panas masuk, $T_{h,i} = 165^\circ\text{C}$
- Temperatur udara dingin masuk, $T_{c,i} = 27^\circ\text{C}$
- Kondisi udara sekitar: temperatur, $T_\infty = 27^\circ\text{C}$
- Udara dingin diasumsikan keluar pada temperatur, $T_{c,o} = 60^\circ\text{C}$
- Dari perhitungan yang dilakukan oleh Ariyanto (2000), panjang *heat exchanger* adalah 1 m.

Peralatan lain:

- 2 buah *blower* model D12F-24PLMCIX (*Nippon Denso Corporation*), masing-masing untuk mengalirkan udara dingin dan udara panas.
- 1 buah elemen pemanas 667 Watt (A.C) untuk menghasilkan udara panas 165°C .

- 4 buah DC Regulator Power Supply 30V untuk mengatur tegangan input ke blower sehingga kecepatan aliran udara masuk heat exchanger dapat dijaga konstan.
- 1 buah AC Regulator 1000 Watt untuk mengatur tegangan input ke elemen pemanas sehingga temperatur udara panas masuk heat exchanger dapat dijaga konstan.
- 2 buah thermocouple untuk mengukur temperatur udara dingin dan udara panas saat keluar dari heat exchanger.
- 1 buah velometer tipe ALNOR untuk mengukur kecepatan aliran udara panas dan udara dingin.



Gambar 1. Konstruksi Shell-and-Tube Heat Exchanger

4. Prosedur Percobaan

- Mengatur DC regulator pada tegangan tertentu, kemudian dihubungkan ke blower yang dihubungkan dengan elemen pemanas, sehingga blower menghasilkan udara dengan kecepatan tertentu.
 - Mengatur AC regulator pada tegangan tertentu sehingga udara panas keluar elemen pemanas pada temperatur 165°C.
 - Mengukur temperatur udara yang keluar dari elemen pemanas dengan thermocouple.
 - Setelah temperatur udara panas mencapai harga yang ditentukan yaitu 165°C, blower dihubungkan dengan heat exchanger pada sisi shell seperti tampak pada Gambar 1.
 - Mengatur DC regulator pada tegangan tertentu dan dihubungkan dengan blower untuk menghasilkan udara dengan suhu 27°C yang mengalir dengan kecepatan tertentu.
 - Mengatur peralatan seperti pada Gambar 1.
 - Memasang thermocouple pada ujung keluaran udara panas (sisi shell) dan udara dingin (sisi tube) pada heat exchanger.
 - Menunggu sampai temperatur udara panas dan udara dingin keluar dari heat exchanger pada harga konstan.
 - Mencatat temperatur keluar udara panas dan udara dingin.
 - Mematikan elemen pemanas dan mengeluarkannya dari heat exchanger.
 - Menunggu heat exchanger menjadi 'dingin' dan kembali ke kondisi semula
 - Mengulangi percobaan untuk kecepatan yang berbeda.
- Percobaan dilakukan 2 kali masing-masing untuk kondisi:
- udara panas mengalir di sisi shell dan udara dingin di sisi tube.
 - udara panas mengalir di sisi tube dan udara dingin di sisi shell.

5. Hasil Percobaan dan Analisa

A. Udara panas mengalir di sisi shell dan udara dingin di sisi tube.

Dengan mengatur temperatur masukan udara dingin 27°C dan udara panas 165°C didapat hasil percobaan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Percobaan dimana Udara Panas Mengalir di sisi Shell.

| Percobaan ke | No. | V_{tube} (m/s) | V_{shell} (m/s) | $T_{c,o}$ (°C) | $T_{h,o}$ (°C) |
|--------------|-----|------------------|-------------------|----------------|----------------|
| I | 1 | 5 | 0,74 | 83,7 | 63,6 |
| | 2 | 8 | 1,18 | 85,5 | 67,5 |
| | 3 | 10 | 1,47 | 107,2 | 93,1 |
| | 4 | 13 | 1,92 | 97,8 | 92,8 |
| | 5 | 15 | 2,21 | 94,3 | 89,6 |
| II | 1 | 5 | 0,74 | 84,4 | 64,2 |
| | 2 | 8 | 1,18 | 86,4 | 68,9 |
| | 3 | 10 | 1,47 | 108,4 | 93,0 |
| | 4 | 13 | 1,92 | 98,1 | 91,7 |
| | 5 | 15 | 2,21 | 93,2 | 90,4 |

Dengan menggunakan persamaan (4) untuk mencari efektivitas dan persamaan (5) untuk

mencari laju aliran massa udara, didapat hasil seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Rata-Rata dimana Udara Panas Mengalir di sisi Shell.

| m (kg/s) | V_{tube} (m/s) | V_{shell} (m/s) | $T_{c,o}$ ($^{\circ}$ C) | $T_{h,o}$ ($^{\circ}$ C) | e |
|----------|------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|--------|
| 0,002 | 5 | 0,74 | 84,05 | 63,90 | 0,4125 |
| 0,0031 | 8 | 1,18 | 85,95 | 68,20 | 0,4271 |
| 0,0039 | 10 | 1,47 | 107,08 | 93,05 | 0,5885 |
| 0,0051 | 13 | 1,92 | 97,95 | 92,25 | 0,5134 |
| 0,0059 | 15 | 2,21 | 93,75 | 90,00 | 0,4870 |

B. Udara dingin mengalir di sisi shell dan udara panas di sisi tube.

Dengan mengatur temperatur masukan udara dingin 27 $^{\circ}$ C dan udara panas 165 $^{\circ}$ C didapat hasil percobaan seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Percobaan dimana Udara Panas Mengalir di sisi Tube.

| Percobaan ke | No. | V_{tube} (m/s) | V_{shell} (m/s) | $T_{c,o}$ ($^{\circ}$ C) | $T_{h,o}$ ($^{\circ}$ C) |
|--------------|-----|------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| I | 1 | 5 | 0,74 | 69,5 | 46,8 |
| | 2 | 8 | 1,18 | 74,6 | 67,0 |
| | 3 | 10 | 1,47 | 76,1 | 74,4 |
| | 4 | 13 | 1,92 | 80,0 | 78,1 |
| | 5 | 15 | 2,21 | 97,3 | 97,6 |
| II | 1 | 5 | 0,74 | 70,6 | 47,2 |
| | 2 | 8 | 1,18 | 73,1 | 67,0 |
| | 3 | 10 | 1,47 | 76,8 | 73,5 |
| | 4 | 13 | 1,92 | 80,0 | 77,2 |
| | 5 | 15 | 2,21 | 96,4 | 97,3 |

Sedang hasil perhitungan rata-rata dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Rata-Rata dimana Udara Panas Mengalir di sisi Tube.

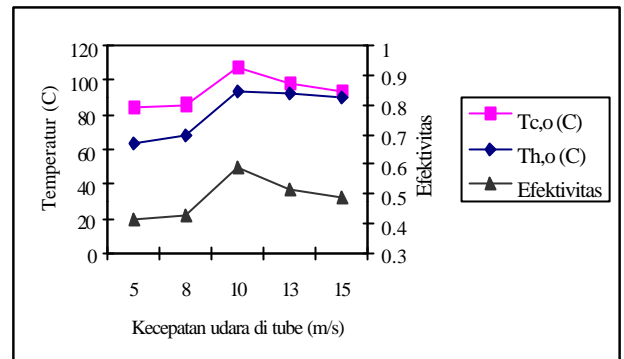
| m (kg/s) | V_{tube} (m/s) | V_{shell} (m/s) | $T_{c,o}$ ($^{\circ}$ C) | $T_{h,o}$ ($^{\circ}$ C) | e |
|----------|------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|--------|
| 0,002 | 5 | 0,74 | 70,05 | 47,00 | 0,5013 |
| 0,0031 | 8 | 1,18 | 73,85 | 67,00 | 0,5610 |
| 0,0039 | 10 | 1,47 | 76,45 | 73,95 | 0,5986 |
| 0,0051 | 13 | 1,92 | 80,00 | 77,65 | 0,6486 |
| 0,0059 | 15 | 2,21 | 96,85 | 97,45 | 0,7200 |

Dari hasil percobaan dan perhitungan di atas, dapat dibuat analisa sebagai berikut:

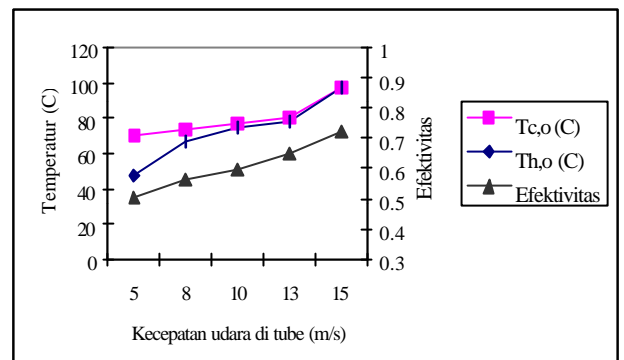
▪ Efektivitas dan Temperatur Keluar Sebagai Fungsi Kecepatan

Mengingat udara panas dan udara dingin direncanakan mengalir dengan laju aliran massa yang sama, maka dengan menaikkan kecepatan udara yang mengalir dalam tube

berarti menaikkan pula kecepatan udara dalam shell.



(a)



(b)

Gambar 2. Grafik Efektivitas dan Temperatur Keluar Sebagai Fungsi Kecepatan Udara di Tube:

(a) saat udara panas mengalir dalam shell, udara dingin mengalir dalam tube.

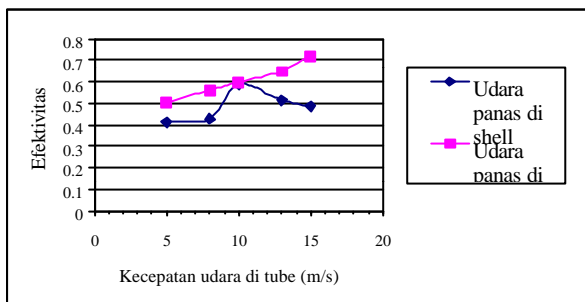
(b) saat udara dingin mengalir dalam shell, udara panas mengalir dalam tube

Dari Gambar 2(a) di atas, terlihat bahwa temperatur keluar udara panas dan udara dingin maupun efektivitas *heat exchanger* naik dengan kenaikan kecepatan aliran udara di tube dan di shell. Namun, kenaikan ini tidak berlangsung terus, setelah mencapai harga maksimum, efektivitas dan temperatur keduanya turun. Hal ini menunjukkan bahwa besar perpindahan panas dari udara panas ke udara dingin juga dipengaruhi oleh waktu kontak antara keduanya selain dipengaruhi oleh turbulensi aliran. Semakin tinggi kecepatan berarti turbulensi aliran meningkat tetapi waktu kontak berkurang.

Hal yang sama terjadi saat udara dingin yang mengalir dalam shell dan udara panas dalam tube, seperti pada Gambar 2(b). Namun, karena keterbatasan peralatan yang ada, dalam penelitian ini belum didapat harga maksimum efektivitas maupun temperatur keluar udara panas dan dingin.

▪ Efektivitas Heat Exchanger Sebagai Fungsi Kecepatan

Ada dua kondisi percobaan yang dilakukan dalam penelitian ini. Yang pertama, udara panas mengalir dengan kecepatan lebih rendah dibanding udara dingin. Untuk ini berarti udara panas harus mengalir di sisi *shell* dan udara dingin di sisi *tube*. Yang kedua merupakan kebalikan dari kondisi pertama, yaitu udara panas mengalir dengan kecepatan lebih tinggi (di sisi *tube*) dan udara dingin mengalir dengan kecepatan rendah (di sisi *shell*). Hasil dari percobaan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Efektivitas Fungsi Kecepatan Udara di Tube.

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa efektivitas *heat exchanger* tipe *shell-and-tube* lebih tinggi saat udara panas mengalir di sisi *tube* (kecepatan aliran tinggi) dan udara dingin mengalir di sisi *shell* (kecepatan aliran rendah). Hal ini bersesuaian dengan hasil penelitian Edymin (1999) dan Pudjisusamar (1999). Edymin (1999) meneliti pengaruh kecepatan aliran fluida terhadap efektivitas suatu *plate heat exchanger* yang dibuat dalam skala kecil. Sedang Pudjisusamar (1999) meneliti pengaruh kecepatan aliran fluida terhadap efektivitas suatu *double-pipe heat exchanger*. Dari keduanya didapat hasil yang sama, yaitu temperatur keluar udara dingin lebih tinggi jika udara panas mengalir dengan kecepatan tinggi dan udara dingin mengalir lebih lambat.

Sunden dan Faghri (1998) mengatakan bahwa untuk suatu *gas to liquid heat exchanger*, luasan untuk gas harus lebih besar dari yang untuk cairan karena koefisien perpindahan panas konveksi gas lebih kecil dari yang cairan.

Kemungkinan hal serupa dapat menjadi alasan kenapa efektivitas lebih tinggi saat udara panas mengalir di sisi *tube* dan udara dingin mengalir di sisi *shell*. Gas memiliki kerapatan lebih rendah dibanding cairan. Demikian pula udara panas memiliki kerapatan lebih rendah dibanding udara dingin. Karena

kerapatan udara panas lebih rendah maka agar koefisien perpindahan panas konveksinya tinggi, sementara luasan tidak diperbesar, udara panas harus mengalir dengan kecepatan tinggi (di sisi *tube*).

Untuk kondisi udara panas mengalir di *tube* dan udara dingin mengalir di *shell*, dalam penelitian ini belum didapat harga maksimum efektivitas *heat exchanger*. Hal ini disebabkan karena keterbatasan peralatan.

6. Kesimpulan

- Efektivitas *shell-and-tube heat exchanger* meningkat jika fluida, baik di sisi *shell* maupun di sisi *tube*, mengalir dengan kecepatan lebih tinggi hingga suatu harga maksimum dan kemudian akan menurun meskipun kecepatan fluida meningkat terus.
- Efektivitas *shell-and-tube heat exchanger* lebih tinggi jika udara panas mengalir di *tube* dan udara dingin mengalir di *shell*.

Daftar Pustaka

1. Ariyanto, H., *Pengaruh Kecepatan Aliran Fluida Masuk Terhadap Efektivitas Heat Exchanger Model Shell And Tube*, Tugas Akhir no. 00.54.401, Jurusan Teknik Mesin UK Petra, 2000.
2. Edymin, *Pengaruh Kecepatan Aliran Fluida Masuk Terhadap Efektivitas Heat Exchanger Plat Paralel*, Tugas Akhir no. 99.54.352, Jurusan Teknik Mesin UK Petra, 1999.
3. Pudjisusamar, A., *Pengaruh Perbandingan Kecepatan Masuk Fluida Panas dan Dingin Terhadap Efektivitas Heat Exchanger Tabung Konsentris Aliran Paralel*, Tugas Akhir no. 99.54.363, Jurusan Teknik Mesin UK Petra, 1999.
4. Sunden, B. and M. Faghri, *Computer Simulations in Compact Heat Exchangers*, United Kingdom: Computational Mechanics Publications, 1998.
5. Cengel, Y. A., *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*, New York: McGraw Hill, 1997.
6. Incropera, F.P. and D.P. DeWitt, *Fundamentals of Heat Transfer*, New York: John Wiley & Sons, 1981.