

---

## KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS PADA PIPA PENUKAR KALOR SELONGSONG ALIRAN SEARAH VERTIKAL

Mahmuddin, Muhammad Syahrir

Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia  
Jl. Urip Sumoharjo KM. 05 Kampus II UMI, Makassar, Indonesia 90231  
e-mail: mahmud\_umitek@yahoo.co.id

### INTISARI

Telah melakukan penelitian tentang karakteristik Alat Penukar Kalor (APK) tipe selongsong dan tabung aliran searah vertikal dengan penambahan udara ke dalam aliran air panas. Pipa yang digunakan adalah pipa tembaga dengan panjang 0,75 m dan diameter dalam 0,0153 m. Sedangkan selongsong dari pipa transparan (*fiberglass*) dengan diameter 0,941 m. Untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas dengan cara memvariasikan debit air panas dan debit udara sehingga diperoleh perubahan temperatur masuk dan keluar. Pengukuran temperatur dengan termokopel digital yang dipasang pada sisi masuk dan keluar APK.

Data pengukuran menunjukkan bahwa penambahan udara ke dalam aliran air panas mencapai 0,50 kg/s teridentifikasi panas yang dilepaskan APK fluktuatif dan kecenderungan konstan. Tetapi, dengan penambahan debit udara hingga mengakibatkan terbentuk lapisan film pada permukaan pipa dan menambah tahanan termal konduksi. Sehingga laju perpindahan panas ke air pendingin menurun drastis. Fenomena tersebut menunjukkan efektivitas APK menurun.

Kata kunci: *Alat penukar kalor, Efektivitas APK dan Injeksi udara.*

### ABSTRACT

*Study was conducted to examine characteristics of a sleeve type Heat Exchanger Tube (HET) with vertical unidirectional flow tube, with additional pressurized air injected into the hot water line. Tubes are made of copper with diameter of 1.53 cm and 75 cm length, installed inside a transparent casing pipe (fiberglass) with diameter 9.41 cm. To determine heat transfer characteristics, adjustable flow rate of hot water and the injected air temperature were varied, obtaining series of inlet and outlet temperatures. Temperature changes were observed through digital thermocouple mounted on the side of hot water inlet and outlet of the heat exchanger tube.*

*Observation data shows that additional injected air of 0.5 kg/s into hot water line resulted in a fluctuated temperature released from the HEP outlet with decreasing trend of performance. The additional air injections affect the formation of layer of air film on the pipe surface, adding resistance of thermal conduction. Rate of heat transfer was reduced and the cooling process was dropped dramatically, confirming the decrease effectiveness of the heat exchanger tube.*

*Keywords: Heat exchanger, effectiveness, air injection.*

### PENDAHULUAN

Alat Penukar Kalor (APK) adalah suatu alat untuk memindahkan panas dari suatu fluida ke fluida yang lain karena adanya perbedaan temperatur. Alat tersebut dapat terjadi pertukaran dan pengendalian panas dengan menaikkan dan menurunkan temperatur zat dengan jalan memindahkan zat bertemperatur tinggi ke zat bertemperatur rendah. Industri-industri yang

berkaitan dengan pemrosesan selalu menggunakan APK, misalnya kondenser, evaporator.

Tipe APK yang banyak dipakai adalah selongsong dan tabung (*Shell and Tube Heat Exchanger*). Alat tersebut terdiri dari sebuah selongsong di bagian luar dan sejumlah pipa-pipa di bagian dalam. Temperatur fluida di dalam *tube bundle* berbeda dengan di luar pipa (di dalam selongsong) sehingga terjadi perpindahan panas antara aliran fluida di dalam pipa dan di luar pipa.

Daerah yang berhubungan dengan bagian dalam pipa disebut dengan *tube side* dan yang di luar dari pipa disebut *shell side*.

Berdasarkan uraian tersebut, maka diperlukan studi lebih lanjut tentang alat penukar panas dengan penambahan udara ke dalam aliran air panas.

Adapun tujuan penelitian yaitu untuk mengetahui panas yang diserap dan dilepaskan APK dan untuk mengetahui pengaruh penambahan laju aliran udara terhadap efektifitas APK.

Batasan masalah yaitu alat penukar kalor yang digunakan adalah tipe selongsong dan tabung vertikal dengan aliran searah ke atas. Pengukuran temperatur air panas dan air pendingin dilakukan pada kondisi aliran stedi dan model analisis adalah aliran satu fase.

### Dasar Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor dari suatu zat ke zat lain dapat terjadi dalam kehidupan sehari-hari baik penyerapan atau pelepasan kalor untuk mencapai dan mempertahankan keadaan yang dibutuhkan dalam proses berlangsung.

Mekanisme perpindahan panas dapat terjadi dengan tiga cara yaitu :

#### A. Konduksi (*conduction*)

Konduksi yaitu proses perpindahan panas mengalir dari daerah bertemperatur tinggi ke daerah bertemperatur lebih rendah dalam satu medium (padat, cair, gas). Dalam aliran panas konduksi, perpindahan energi terjadi karena interaksi molekul secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar

#### B. Konveksi (*convection*)

Perpindahan energi dari suatu permukaan yang temperturnya di atas temperatur sekitarnya dan angkutan energi, karena terjadinya dalam arah gradien temperatur sebagai akibat gerakan massa partikel-partikel zat yang mengalir.

#### C. Radiasi (*radiation*)

Proses perpindahan panas mengalir dari benda yang bertemperatur tinggi ke benda bertemperatur lebih rendah bila benda tersebut terpisah di dalam ruang. Energi radiasi bergerak dengan kecepatan  $3 \times 10^8$  m/s dan gejala-gejalanya seperti menyerupai radiasi cahaya.

### Alat Penukar Kalor

Di industri, banyak sekali peralatan penukar kalor seperti ketel uap (*boiler*), pemanas lanjut (*super heater*), pendingin oli pelumas (*oil cooler*), kondensor (*condensor*), dan lain-lain. Di industri semen, peralatan utama produksi seperti *suspension preheater*, *calciner*, *kiln*, dan *cooler*

sebenarnya juga merupakan alat penukar kalor. Selain itu APK juga dapat dipergunakan dalam industri semen seperti pendingin minyak pelumas, pendingin udara untuk kebutuhan *jet pulse filter*, dan lain sebagainya.

Alat penukar kalor selongsong dan tabung umumnya banyak digunakan dalam industri proses. Sekurang-kurangnya 60 % dari semua APK yang digunakan, karena dapat di-disain untuk enjalankan lebih banyak variasi tekanan dan temperatur seperti yang dijumpai dalam industri proses. APK tersebut dapat juga dikonstruksi dari bermacam macam material. Beberapa keuntungan APK selongsong dan tabung diantaranya adalah konstruksinya sederhana, dapat dipisah satu sama lain (tidak merupakan satu kesatuan yang utuh) sehingga pengangkutannya relatif mudah, pemakaian ruang relatif kecil, dan mudah membersihkannya. Farel H Napitupulu dkk (2005) melakukan kajian eksperimental efektifitas alat penukar kalor selongsong dan tabung (*shell and tube*) sebagai pemanas air dengan memanfaatkan energi thermal gas buang motor diesel bahwa dapat mencapai efektifitas tertinggi 0,825 dengan debit aliran air masuk konstan sebesar 5 liter/menit.

### Analisis Perpindahan Panas

Perpindahan kalor dan yang terjadi pada alat penukar kalor selongsong dan tabung sangat bergantung pada bentuk geometri dan dimensi dari tabung dan sekat (*baffle*), serta sifat-sifat fisik fluida yang mengalir di dalam tabung dan selongsong.

Neraca energi dalam proses perpindahan panas pada APK dengan memperhitungkan panas yang diserap oleh fluida dalam selongsong akan sama dengan besar dengan panas yang dipindahkan oleh fluida dalam tabung secara konduksi melalui dinding tabung. Analisis tersebut juga mengasumsikan bahwa tidak ada kehilangan kalor melalui dinding selongsong ke udara luar. Laju perpindahan kalor yang diserap oleh fluida dalam selongsong dapat dihitung dengan Persamaan (2.1).

$$Q = h_u \cdot A_o (T_{so} - T_{mu}) = m_u \cdot C_{pu} (T_{uk} - T_{um}) \quad (2.1)$$

Dengan :

$h_u$  = koefisien perpindahan panas konveksi uadra ( $W/m^2.C$ )

$A_o$  = Luas penampang dinding luar tabung ( $m^2$ )

$T_{so}$  = Temperatur dinding luar tabung ( $^{\circ}C$ )

$T_{mu}$  = Temperatur rata-rata udara ( $^{\circ}C$ )

$T_{um}$  = Temperatur fluida masuk selongsong ( $^{\circ}C$ )

$T_{uk}$  = Temperatur fluida keluar

selongsong (°C)

$C_{pu}$  = Panas jenis udara (kJ/kg.C)

Laju perpindahan kalor yang dilepaskan oleh fluida (air) dalam tabung dihitung dengan persamaan (2.2):

$$Q = h_a \cdot A_i (T_{ma} - T_{si}) = m_a \cdot C_{pa} (T_{ak} - T_{am}) \quad (2.2)$$

Dengan :

$h_a$  = koefisien perpindahan panas konveksi air (W/m<sup>2</sup>.C)

$A_i$  = Luas penampang dinding luar tabung (m<sup>2</sup>)

$T_{di}$  = Temperatur dinding dalam tabung (°C)

$T_a$  = Temperatur rata-rata air (°C)

$T_{ain}$  = Temperatur air masuk (°C)

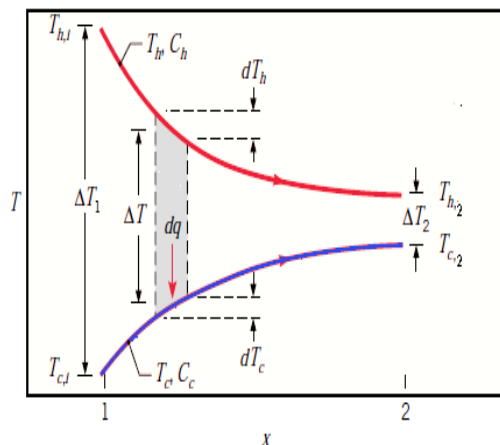
$T_{aout}$  = Temperatur air keluar (°C)

$C_{pa}$  = Panas jenis air (J/kg.C)

Laju perpindahan kalor menyeluruh dari fluida melalui dinding tabung ke fluida dihitung dengan Persamaan (2.3):

$$Q = UA \Delta T \quad (2.3)$$

Dengan :  $\Delta T_{lm}$  = Beda Temperatur rata-rata logaritmik dalam Kelvin.



Gambar 1. Diagram Temperatur.

Koefisien perpindahan panas konveksi fluida (air) dalam sisi tabung dapat dihitung dengan Persamaan (2.4) dan (2.5).

$$h_a = Nu_a \frac{k_a}{D_i} = \frac{48}{11} \frac{k_a}{D_i} = 4,36 \frac{k_a}{D_i}$$

(untuk aliran laminar  $Re \leq 2300$ ) (2.4)

$$h_a = Nu_a \frac{k_a}{D_i} = \frac{48}{11} \frac{k_a}{D_i} (0,023 Re_a^{0,8} Pr_a^n)$$

(untuk aliran turbulen  $Re \geq 4000$ ) (2.5)

Dengan :

$k_a$  = konduktifitas panas air (W/m<sup>2</sup> °C)

$n = 0,4$  (untuk pemanasan)

$n = 0,3$  (untuk pendinginan).

Efektivitas suatu alat penukar kalor merupakan salah satu hal yang sangat penting dalam mendesain alat penukar kalor. Hal ini disebabkan karena parameter efektifitas tersebut merupakan suatu ukuran unjuk kerja sebuah alat penukar kalor. Efektivitas alat penukar kalor (*heat-exchanger effectiveness*) dapat didefinisikan dengan Persamaan (2.6).

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{maks}} = \frac{\text{Laju Perpindahan Kalor Aktual}}{\text{Laju Perpindahan Kalor Maksimum}} \quad (2.6)$$

## METODOLOGI PENELITIAN

### Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Pusat Riset Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Muslim Indonesia.

### Alat dan Bahan Penelitian

#### Alat:

1. Seperangkat alat penukar panas tipe selongsong.
2. *Reservoir* untuk air pendingin dan air panas.
3. Pipa PVC untuk instalasi pipa air pendingin dan air panas.
4. Pompa air dingin dan air panas
5. Regulator listrik untuk menstabilkan tegangan dan arus pemanas air.
6. Elemen pemanas air.
7. *Flowmeter*, untuk mengukur debit air dingin dan air panas
8. Termokopel digital untuk mengukur suhu air pendingin dan air panas yang masuk dan keluar dari APK.
9. Katup pengatur debit aliran
10. Kompessor.

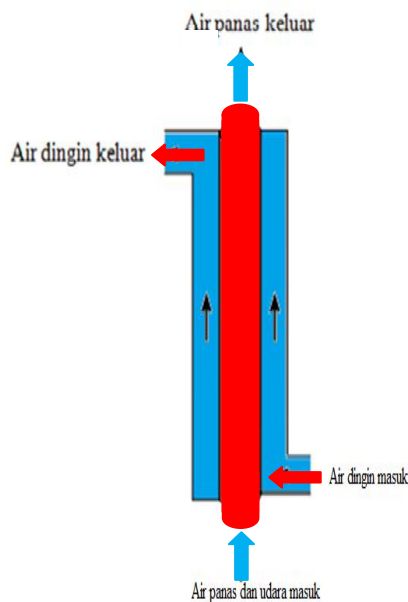
#### Bahan:

1. Air dingin yang mengalir di dalam selongsong.
2. Air panas yang mengalir di dalam pipa-pipa.
3. Injeksi udara dari kompressor.

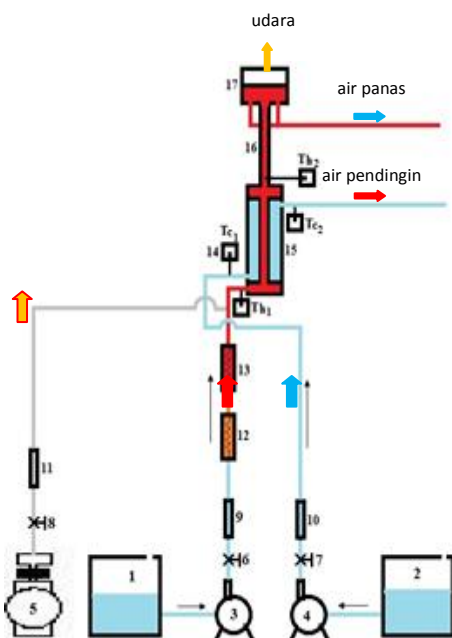
### Prosedur Penelitian

1. Mengalirkan air panas pada skala *flowmeter* 1 LPM.
2. Mengalirkan air pendingin air pada skala *flowmeter* 2 LPM.
3. Mengalirkan udara dengan kompressor.

4. Penambahan debit udara dimulai 5,5 LPM dengan mengatur katup masuk pada *flowmeter*.
5. Mengulangi prosedur 3 untuk debit air panas pada 2 LPM dan 3 LPM.
6. Pengambilan dapat dilakukan apabila aliran dianggap *steady state* untuk aliran air panas dan air pendingin.
7. Pengukuran meliputi:
  - a. Temperatur air pendingin masuk ( $T_{c1}$ ).
  - b. Temperatur air pendingin keluar ( $T_{c2}$ ).
  - c. Temperatur air panas masuk ( $T_{h1}$ ).
  - d. Temperatur air panas keluar ( $T_{h2}$ ).
  - e. Mengulangi prosedur 1-6 untuk debit air panas 2 LPM dan 3 LPM.



Gambar 2. Model alat uji APK.



Gambar 3. Skema instalasi penelitian  
Keterangan:

1. Reservoir I.
2. Reservoir II.
3. Pompa I untuk air panas.
4. Pompa II untuk air pendingin.
5. Kompresor.
6. Katup 1.
7. Katup 2.
8. Katup 3.
9. *Flowmeter* air panas.
10. *Flowmeter* air dingin.
11. *Flowmeter* udara.
12. Pemanas air I.
13. Pemanas air II.
14. Termokopel.
15. Alat penukar kalor.
16. Pipa separator.
17. Separator.

## PEMBAHASAN

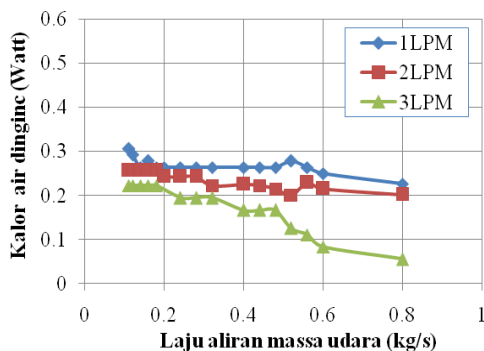
### Panas yang diserap air dingin.

Kurva besarnya kalor yang serap oleh air pendingin pada alat penukar kalor (APK) terhadap laju aliran massa udara seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3. Kurva tersebut menggambarkan bahwa pada laju aliran udara rendah besarnya kalor yang diserap kecenderungan konstan, kemudian secara perlahan-lahan besaran-besaran tersebut akan turun. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa panas yang dikandung air panas dikonduksikan melalui pipa tidak dapat memberikan perubahan temperatur air pendingin signifikan walaupun laju aliran udara meningkat.

Hal tersebut diindikasikan dapat terjadi ketidaksetimbangan termodinamika dalam aliran tidak sempurna. Perpindahan panas dari air panas ke butiran-butiran udara atau gelembung-gelembung masih kecil sehingga dapat dipertahankan kesetimbangan energi panas dari air panas dengan air pendingin. Pada laju aliran udara ditingkatkan panas yang diserap air pendingin akan menurun, karena sebagian panas yang dikandung air panas diserap oleh udara yang mengalir. Penambahan laju aliran udara dapat mendukung terbentuknya *slug flow* dan terbentuk pula lapisan film pada permukaan dinding pipa.

Efek terbentuknya lapisan film tersebut dapat menyebabkan lapis batas termal sangat tinggi sehingga perpindahan panas menjadi lambat, dimungkinkan serapan panas air pendingin turun

drastis. Artinya bahwa terjadi penurunan perpindahan panas di permukaan pipa. Peningkatan laju aliran udara akan menambah fraksi hampa atau *void* di dalam pipa akan mempengaruhi koefisien perpindahan panas konveski dan daya hantar panas oleh udara yang dapat menyebabkan temperatur permukaan pipa menurun. Dengan penambahan laju aliran udara terus menerus diatas 0,5 kg/s menyebabkan sebagian panas diserap oleh udara dan sebagian dikonduksikan melalui permukaan pipa. Dengan demikian panas yang diserap air pendingin menurun. Berarti batas kritis laju aliran udara untuk suatu proses teridentifikasi dengan terbentuknya tahanan termal konduksi lapisan film pada permukaan pipa.



Gambar 3. Kurva penyerapan panas.

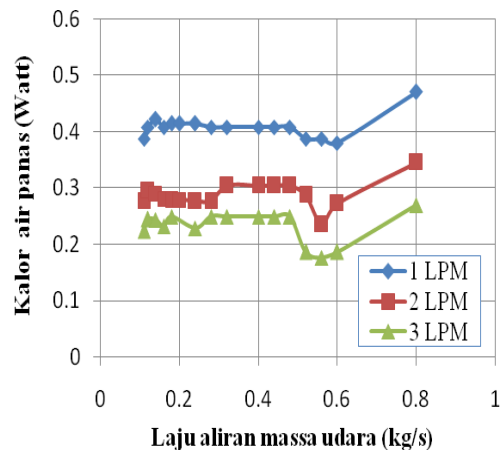
Pelepasan panas untuk laju aliran 1 LPM yang ditunjukkan oleh perbedaan suhu antara temperatur air panas masuk dan keluar lebih besar, perbedaan temperatur tersebut mengindikasikan laju penyerapan panas terhadap air pendingin besar. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa potensi air panas untuk melepaskan panas yang dikandungnya cukup tinggi, sebanding dengan penyerapan panas air pendingin. Hal tersebut mengikuti hukum *Fourier's* tentang pendinginan bahwa gradien temperatur  $dT/dx$  akan mempengaruhi proses perpindahan panas.

#### Panas yang dilepaskan APK.

Kurva kalor yang dilepaskan air panas melalui permukaan pipa secara konduksi terhadap laju aliran massa udara yang diperlihatkan pada Gambar 4. Pada laju aliran udara rendah menggambarkan suatu kurva yang memberikan karakteristik perpindahan panas yaitu besarnya energi panas yang dilepaskan oleh air panas kecenderungan konstan, walaupun laju aliran udara ditingkatkan. Pada kondisi tersebut potensial penggerak aliran panas yang menyebabkan L/Ap setara dengan tahanan termal (*thermal resistance*)

dan besarnya tidak berubah terhadap penambahan laju aliran udara, sehingga perbedaan temperatur juga tidak berubah signifikan ( $\Delta T$ ). Kondisi tersebut akan mempengaruhi rambatan panas konduksi. Tetapi pada laju aliran udara sebesar 0,5 kg/s dan fraksi hampa di dalam aliran meningkat dapat mengurangi besarnya panas konduksi yang merambat ke permukaan pipa.

Penambahan laju aliran udara di atas 0,5 kg/s akan meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi, tetapi daya serap air pendingin menurun. Karena konveksi juga menghasilkan pemindahan energi dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah bertemperatur lebih rendah.



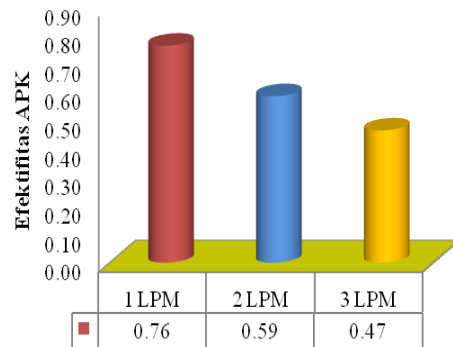
Gambar 4. Kurva pelepasan panas.

Bila pola aliran berubah menjadi pola aliran *plug flow* artinya bahwa terdapat lapisan film pada permukaan dinding pipa dan pada sisi tengah pipa mengalir udara dengan menyerupai bentuk peluru. Lapisan film tersebut akan menambah tahanan termal konduksi, sehingga proses perpindahan energi panas dengan tumbukan elastis (*elastic impact*) pada lapisan material pipa menjadi rendah. Sehingga pertukaran panas dari air temperatur tinggi ke air temperatur lebih rendah lebih lambat.

#### Efektivitas Alat Penukar kalor

Efektivitas dapat dinyatakan dengan perbandingan panas minimum terhadap laju pertukaran panas maksimum yang mungkin terjadi pada APK. Nilai efektivitas adalah suatu parameter untuk mengklasifikasi unjuk kerja (*performance*) suatu alat penukar panas. Bila APK berfungsi baik akan memberikan nilai efektivitas yang tinggi berarti proses perpindahan panas berlangsung baik. Perhitungan efektivitas alat penukar kalor yang

dikurvaikan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Efektivitas penukar kalor.

Tahanan termal yang terjadi dapat berlangsung dengan konveksi air panas, konduksi pada pipa dan konveksi pada air pendingin akan mempengaruhi laju perpindahan panas. Tentu saja diperoleh dengan gradien temperatur diupayakan tinggi antara permukaan pipa bagian dalam dan luar. Gradien temperatur tinggi menggambarkan penurunan temperatur terhadap ketebalan pipa tinggi, pada proses pertukaran air temperatur tinggi terhadap air temperatur lebih rendah pada permukaan luar pipa dapat berlangsung cepat. Hal tersebut merupakan indikator kinerja APK.

Penambahan laju aliran air panas menunjukkan bahwa terjadi penurunan efektivitas APK. Selain itu, memperlihatkan pula unjuk kerja (*performance*) alat APK dengan penambahan debit air panas 1 LPM relatif lebih baik, jika dibandingkan dengan debit 2 LPM dan 3 LPM. Sedangkan penambahan laju aliran udara tidak signifikan dapat mempengaruhi efektivitas APK.

Hasil perhitungan dapat diuraikan bahwa pada laju aliran udara sebesar 0,11 kg/s–0,8 kg/s dengan debit aliran air panas sebesar 1 LPM, maka efektivitas APK adalah sebesar 0,765. Namun pertambahan debit aliran air panas sebesar 2 LPM, diperoleh nilai efektivitas APK mengalami penurunan dengan nilai efektivitas APK sebesar 0.59, selanjutnya pada debit aliran air panas 3 LPM diperoleh efektivitas APK sebesar 0,47.

## KESIMPULAN

Penambahan debit udara ke dalam aliran air panas dapat menurunkan penyerapan panas dan teridentifikasi pula bahwa kondisi tersebut menunjukkan unjuk kerja APK menurun, terutama terbentuknya lapisan film pada permukaan pipa.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adrian Bejan, *Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- Ekadewi A. Handoyo, 2000, Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Efektivitas Shell and Tube Heat Exchanger, *Jurnal Teknik Mesin Universitas Kristen Petra*. Jakarta.
- Sugiyanto. 2005. Analisis Alat Penukar Kalor Tipe Shell and Tube Dan Aplikasi Perhitungan Dengan Microsoft Visual Basic 6.0, *Jurnal, Jurusan Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Gunadarma*. Depok. Jakarta.
- Sitompul, Tunggul M, *Alat Penukar Kalor*, PT. Raja Grafindo Persada. Jakarta. 1993.