

---

# STUDI EKSPERIMENTAL KOEFISIEN PERPINDAHAN KALOR ALIRAN GELEMBUNG UDARA-AIR SEARAH DALAM PIPA KOIL HELIK VERTIKAL

Wandi Arnandi, Samsul Kamal

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik UGM

Jl. Grafika No. 2 Kompleks UGM, Yogyakarta

E-mail : [wandiarnandi@gmail.com](mailto:wandiarnandi@gmail.com)

## Abstrak

*Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh perubahan kecepatan superfisial air dan udara terhadap koefisien perpindahan kalor aliran gelembung udara-air searah dalam pipa koil helik vertikal. Seksi uji berupa penukar kalor pipa koil helik jenis shell and tube aliran berlawanan arah. Air panas dialirkan dibagian shell dan campuran air dan udara pada pola aliran gelembung dialirkan dibagian tube. Pipa koil dibuat dari pipa tembaga berdiameter dalam 7,02 mm, panjang 1700 mm, diameter koil 150 mm, jarak koil 30 dan 50 mm. Kecepatan superfisial air divariasikan 0,302 m/s dan 0,388 m/s, dan kecepatan superfisial udara 0 – 0,0694 m/s. Laju aliran massa air panas dipertahankan konstan pada 0,05 kg/s dan temperatur masuk 40°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien perpindahan kalor naik dengan bertambahnya kecepatan superfisial air dan udara dan turun dengan bertambahnya jarak koil.*

**Kata kunci :** Koefisien perpindahan kalor, aliran gelembung udara-air, pipa koil helik

## Pendahuluan

Persoalan krisis energi yang dampaknya mulai terasa akhir-akhir ini menuntut upaya peningkatan efektifitas dan efisiensi diberbagai bidang, termasuk sektor industri. Di industri upaya ini dapat dilakukan dengan meningkatkan efektifitas dan efisiensi dari peralatan yang digunakan. Salah satunya adalah penukar kalor.

Penukar kalor (*Heat Exchanger*) adalah alat untuk memindahkan energi kalor dari suatu fluida ke fluida lain yang berbeda temperatur. Alat ini digunakan secara luas pada berbagai sistem konversi energi seperti pembangkit tenaga, sistem refrigerasi, pengkondisian udara, dan reaktor nuklir juga dalam industri kimia dan pencairan gas.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk meningkatkan efektifitas penukar kalor dengan jalan meningkatkan koefisien perpindahan kalor. Secara umum, metode ini dikelompokkan menjadi dua yaitu metode aktif dan metode pasif. Metode aktif memerlukan daya eksternal untuk menciptakan efek turbulensi sedangkan metode pasif menggunakan bentuk geometri khusus atau dengan menambahkan aditif ke dalam fluida pemindah kalor. Karena kepraktisannya, metode pasif lebih banyak digunakan daripada metode aktif.

Salah satu metode pasif yang telah lama diaplikasikan sebagai penukar kalor adalah pipa koil helik. Penggunaan pipa koil helik selain dapat mengurangi panjang dari penukar kalor juga dapat meningkatkan efektifitas penukar kalor. Ini dikarenakan ketika fluida mengalir dalam lintasan pipa yang berbentuk kurva, gaya sentrifugal menyebabkan terjadinya aliran sekunder yang dapat meningkatkan perpindahan kalor.

Metode pasif lainnya adalah dengan menambahkan aditif ke dalam fluida pemindah kalor. Metode ini digunakan untuk meningkatkan koefisien perpindahan kalor fluida satu fase. Untuk fluida satu fase cair, aditif yang digunakan berupa partikel padat atau gelembung gas dan untuk fluida satu fase gas, aditif yang digunakan berupa partikel padat atau *droplet* cairan.

Penelitian tentang kedua metode di atas telah banyak dilakukan. Yildiz dkk. (1995) meneliti perpindahan kalor dan penurunan tekanan aliran udara dalam pipa koil helik berputar. Diameter koil dan kecepatan putar divariasikan. Ghajar dkk. (2004) meneliti perpindahan kalor berbagai pola aliran dua fase air-udara tanpa pendidihan. Salimpour (2008) meneliti perpindahan kalor satu fase dalam pipa koil helik horisontal. Diameter koil dan jarak koil divariasikan.

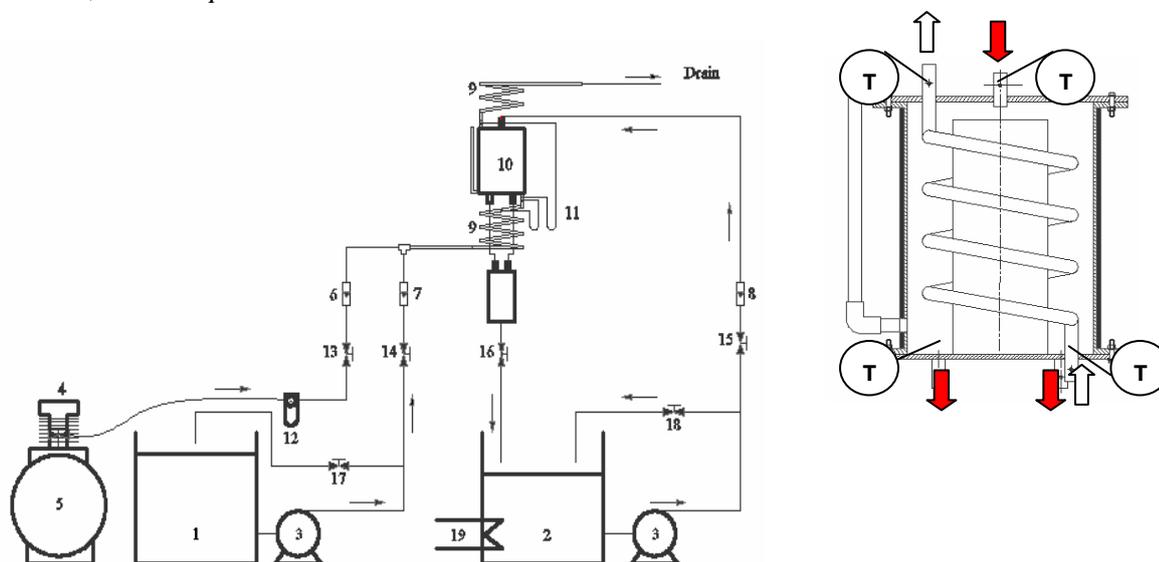
Menurut Bergles (1983), perpindahan kalor dapat lebih ditingkatkan dengan menggabungkan dua atau lebih metode yang disebut dengan metode gabungan (*compound method*). Penggunaan pipa koil helik dan gelembung udara bisa menjadi salah satu alternatif metode gabungan. Namun penerapan metode ini masih terkendala oleh belum adanya informasi

mengenai koefisien perpindahan kalor aliran gelembung udara-air dalam pipa koil helik. Mengingat pentingnya parameter tersebut dan untuk menambah informasi yang dibutuhkan bagi perancangan, penelitian mengenai koefisien perpindahan kalor aliran gelembung udara-air dalam pipa koil helik perlu dilakukan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji pengaruh perubahan kecepatan superfisial air dan udara terhadap koefisien perpindahan kalor aliran gelembung udara-air searah dalam pipa koil helik vertikal.

### Metodologi

Gambar 2 di bawah menunjukkan skema rangkaian alat percobaan dan seksi uji yang digunakan. Alat percobaan terdiri dari: tangki air dingin (1), tangki air panas (2), pompa sentrifugal (3) untuk mengalirkan air dingin dan air panas, kompresor torak (4), tangki udara (5), *rotameter* tipe bola kaca kapasitas 21-374 ml/menit untuk mengukur debit udara (6), *rotameter* tipe bola baja kapasitas 200-3000 CCM untuk mengukur debit air dingin (7), *rotameter* kapasitas 1,8-18 LPM untuk mengukur debit air panas (8), pipa koil transparan untuk mengamati pola aliran (9), seksi uji (10), manometer untuk mengukur penurunan tekanan pada seksi uji (11), regulator untuk mengatur tekanan udara (12), katup-katup untuk mengatur debit udara (13), debit air dingin (14) (17), dan debit air panas (15) (16) (18), pemanas listrik 2 kW (19), *thermometer reader digital OMEGA HH82*, dan *Multipoint selector OMEGA 405A*



Gambar 1. Skema rangkaian alat percobaan dan seksi uji

Seksi uji berupa penukar kalor pipa koil helik jenis *shell and tube* aliran vertikal berlawanan arah. Air panas dialirkan dibagian *shell* arah ke bawah dan fluida dingin yaitu campuran air-udara pada pola aliran gelembung dialirkan di dalam pipa koil helik arah ke atas. Pipa koil helik dibuat dari pipa tembaga lurus berdiameter luar 9,52 mm, diameter dalam 7,02 mm, dan panjang 1780 mm yang dililitkan berbentuk koil dengan diameter koil 150 mm, dan jarak koil 30 dan 50 mm. Temperatur fluida masuk dan keluar seksi uji diukur menggunakan termokopel tipe T yang telah dikalibrasi. Untuk mengurangi rugi-rugi kalor, permukaan luar *shell* ditutup menggunakan isolator asbes dan dilapisi dengan aluminium foil.

Pengambilan data dilakukan pada laju aliran massa air panas 0,05 kg/s dan temperatur masuk 40°C. Dari hasil pengamatan pola aliran yang dilakukan pada penelitian sebelumnya, ditetapkan variasi kecepatan superfisial air dan udara yang diteliti sebagai berikut. Kecepatan superfisial air divariasi 0,302 dan 0,388 m/s, dan kecepatan superfisial udara divariasi 0 – 0,0694 m/s.

Percobaan dimulai dengan memanaskan air hingga mencapai suhu 40°C. Selanjutnya air panas dialirkan dan diatur pada debit 3 liter/menit. Setelah kondisi aliran di dalam *shell* tunak, pompa air dingin dihidupkan dan debit air diatur sesuai variasi debit yang ditetapkan. Setelah aliran

stabil, kompresor dihidupkan dan debit udara diatur pada debit terendah yang ditetapkan. Setelah kondisi *steady*, suhu air panas, dan fluida dua fase sebelum dan sesudah seksi uji dicatat. Percobaan dilakukan untuk semua variasi debit air dan udara yang ditetapkan.

Koefisien perpindahan kalor eksperimen, ditentukan berdasarkan koefisien perpindahan kalor keseluruhan yang ditentukan dengan persamaan,

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (1)$$

dengan  $U_o$  adalah koefisien perpindahan kalor keseluruhan berdasarkan permukaan dinding luar pipa,  $h_i$  dan  $h_o$  adalah koefisien perpindahan kalor rata-rata pada sisi dalam dan luar pipa,  $A_i$  dan  $A_o$  adalah luas permukaan dalam dan luar pipa,  $d_i$  dan  $d_o$  adalah diameter dalam dan luar pipa,  $k$  adalah konduktivitas termal bahan pipa dan  $L$  adalah panjang pipa.

Koefisien perpindahan kalor sisi luar pipa ditentukan menggunakan korelasi dari Salimpour (2008), yaitu

$$\frac{h_o D_h}{k} = 19,64 Re_o^{0,513} Pr^{0,129} \gamma^{0,738} \quad (2)$$

dengan  $D_h$  adalah diameter hidrolis *shell*,  $k$  adalah konduktivitas termal fluida,  $Re_o$  adalah bilangan Reynold pada sisi shell,  $Pr$  adalah bilangan Prandtl, dan  $\gamma$  adalah bilangan tanpa dimensi untuk jarak koil. Parameter-parameter ini didefinisikan sebagai berikut.

Koefisien perpindahan kalor keseluruhan ditentukan menggunakan persamaan,

$$U_o = \frac{\dot{Q}}{A_o LMTD} \quad (3)$$

dengan  $\dot{Q}$  adalah laju perpindahan kalor rata-rata dan  $LMTD$  adalah beda temperatur rata-rata logaritmik antara fluida panas dengan fluida dua fase.

Laju perpindahan kalor rata-rata ditentukan menggunakan persamaan,

$$\dot{Q} = \frac{\dot{Q}_h + \dot{Q}_{TF}}{2} \quad (4)$$

dengan  $\dot{Q}_h$  adalah kalor yang dilepas oleh fluida panas dan  $\dot{Q}_{TF}$  adalah kalor yang diserap oleh fluida dua fase.

Berdasarkan hukum kekekalan energi, pada kondisi tunak (*steady*) dan dengan mengabaikan perubahan energi kinetik dan energi potensial,  $\dot{Q}_h$  dan  $\dot{Q}_{TF}$  dapat ditentukan menggunakan persamaan,

$$\dot{Q}_h = (\dot{m} c_p)_h (T_{in} - T_{out})_h \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{TF} = (\dot{m} c_p)_{TF} (T_{out} - T_{in})_{TF} \quad (6)$$

dengan  $\dot{m}$  adalah laju aliran massa fluida,  $c_p$  adalah kalor jenis fluida, dan  $T_{in}$  dan  $T_{out}$  adalah temperatur fluida sebelum dan sesudah seksi uji.

Beda temperatur rata-rata logaritmik ditentukan menggunakan persamaan,

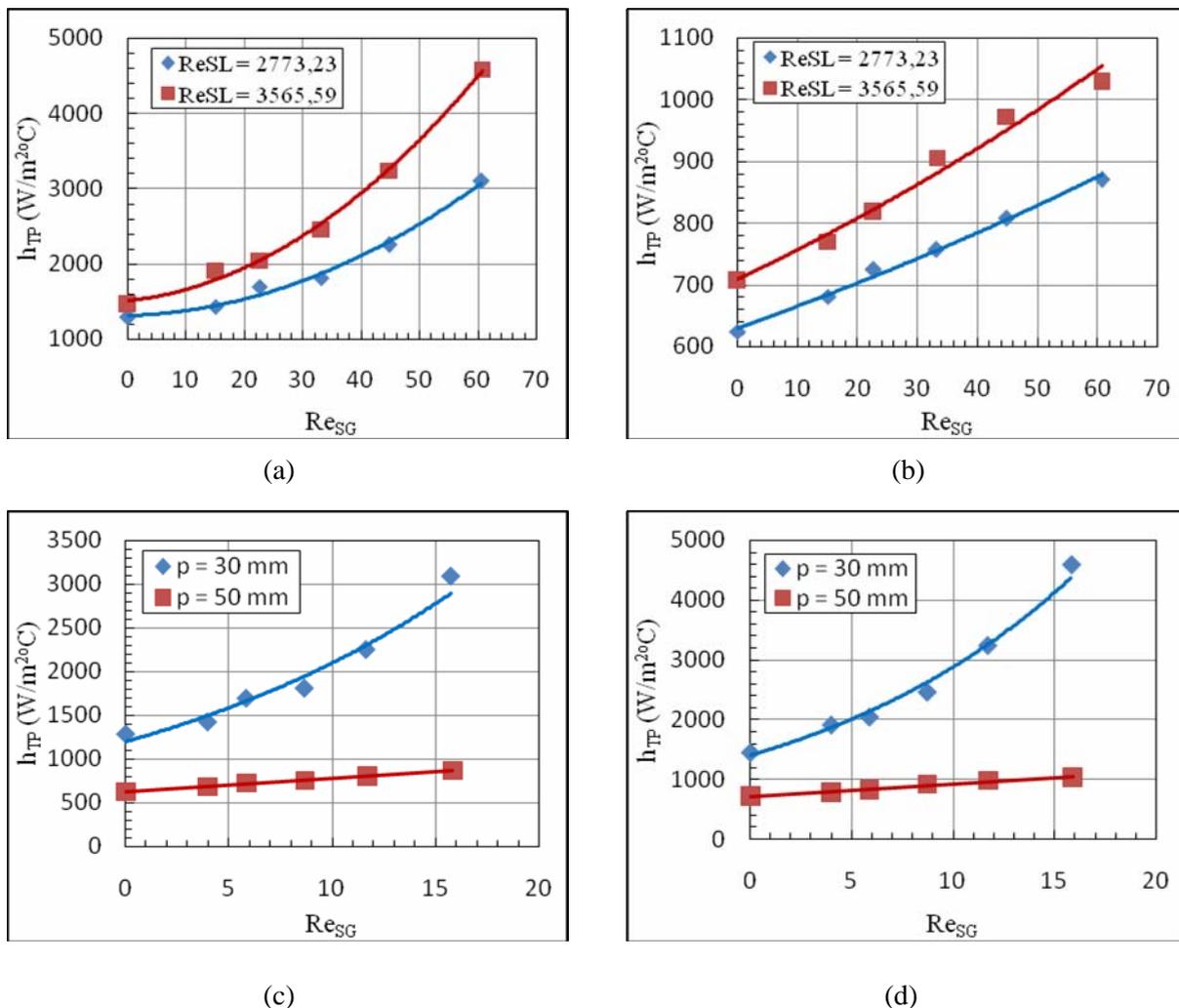
$$LMTD = \frac{\Delta T_i - \Delta T_o}{\ln \frac{\Delta T_i}{\Delta T_o}} \quad (7)$$

Untuk penukar kalor aliran berlawanan arah,  $\Delta T_i$  dan  $\Delta T_o$  adalah beda temperatur fluida panas dan fluida dua fase pada sisi fluida panas masuk dan keluar.

Koefisien perpindahan kalor eksperimen disajikan dalam bentuk grafik sebagai fungsi bilangan Reynold superfisial udara pada berbagai kecepatan superfisial air dan jarak koil.

### Hasil dan Pembahasan

Gambar 2 menunjukkan grafik hubungan koefisien perpindahan kalor eksperimen dan bilangan Reynold superfisial udara pada berbagai bilangan Reynold superfisial air dan jarak koil. Dari gambar diketahui bahwa koefisien perpindahan kalor eksperimen naik dengan bertambahnya kecepatan superfisial udara yang dipresentasikan dengan bilangan Reynold superfisial udara ( $Re_{SG}$ ). Hal ini dikarenakan penambahan kecepatan superfisial udara meningkatkan jumlah gelembung-gelembung udara yang bergerak diskret didekat dinding pipa atas. Akibat pergerakan ini aliran air disekitar gelembung udara dekat dinding pipa menjadi bergelombang. Kondisi ini menyebabkan perpindahan kalor menjadi lebih efektif sehingga koefisien perpindahan kalor meningkat.



Gambar 2. Grafik hubungan koefisien perpindahan kalor eksperimen dan bilangan Reynold superfisial udara ( $Re_{SG}$ ) (a)  $p = 30$  mm, (b)  $p = 50$  mm, (c)  $Re_{SL} = 2773,23$ , (d)  $Re_{SL} = 3565,59$

Penambahan kecepatan superfisial air yang dipresentasikan dengan bilangan Reynold superfisial air ( $Re_{SL}$ ), juga meningkatkan koefisien perpindahan kalor eksperimen. Hal ini dikarenakan penambahan kecepatan superfisial air akan meningkatkan intensitas aliran sekunder. Peningkatan intensitas aliran sekunder menyebabkan persinggungan fluida dengan dinding pipa menjadi lebih lama sehingga kalor yang diserap menjadi lebih banyak dan koefisien perpindahan kalor meningkat.

---

Gambar 2 juga menunjukkan bahwa koefisien perpindahan kalor eksperimen turun dengan bertambahnya jarak koil. Penurunan ini disebabkan oleh berkurangnya intensitas aliran sekunder. Disamping itu, bertambahnya jarak koil akan mengurangi luas permukaan pemindah kalor untuk tinggi penukar kalor yang sama sehingga laju perpindahan kalor juga berkurang.

### **Kesimpulan**

Studi eksperimental koefisien perpindahan kalor dan penurunan tekanan aliran gelembung udara- air searah dalam pipa koil helik vertikal telah dilakukan. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa,

1. koefisien perpindahan kalor aliran gelembung udara-air dalam pipa koil helik vertikal meningkat dengan bertambahnya kecepatan superficial air dan udara,
2. penambahan jarak koil menurunkan koefisien perpindahan kalor aliran gelembung udara-air dalam pipa koil helik vertikal.

### **Daftar Pustaka**

- Bergles, A. E., 1985, *Techniques to Augment Heat Transfer*, Handbook of Heat Transfer Applications, McGraw-Hill, New York, pp. 3-1—3-80.
- Burmeister, L.C., 1983, *Convective Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- Ghajar, A.J., 2004, Two Phase Heat Transfer In Gas-Liquid Non-Boiling Pipe Flows, *HEFA 2004 3<sup>rd</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 21-24 June 2004*, Cape Town.
- Ghiaasiaan, S.M., 2008, *Two-phase Flow: Boiling and Condensation in conventional and miniature system*, Cambridge University Press, USA.
- Holman J.P., 2002, *Heat Transfer*, 9<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, New York.
- Holloway, A. G. L., Smith, R. A., 1990, *Single and two phase flow in helical coils, Part 2 : A literature review*, HTFS DR43, Canada.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, USA.
- Kakac, S., Liu, H., 1998, *Heat Exchangers : selection, rating, and thermal design*, CRC Press, USA.
- Koestoer, R.A., Proborini, S., 1994, *Aliran Dua Fase dan Fluks Kalor Kritis*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Murai, Y., Yoshikawa, S., Toda, S., Ishikawa, M., Yamamoto, F., 2006, Structure of Air-Water Two Phase Flow in Helically Coiled Tubes, *Nuclear Engineering and Design*, 236, 94 – 106.
- Naphon, P., Wongwises, S., A review of flow and heat transfer Characteristics in curved tubes.
- Salimpour, M., R., 2008, Coefficients of Shell and Coiled Tube Heat Exchangers, *Experimental Thermal and Fluid Science*
- Yildiz C., Bicer Y., Pehlivan D., 1995, Heat Transfers and Pressure Drops in Rotating Helical Pipes, *Applied Energy*, 50, 85-94.