

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH POROSITY RATIO PADA PERFORATED TWISTED TAPE INSERT TERHADAP KARAKTERISTIK HEAT TRANSFER DAN FRICTION FACTOR PADA PENUKAR KALOR PIPA GANDA

Susi Puspitasari¹, Arrad Ghani Safitra²

^{1,2}Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Email: ¹susipuspitasari01@gmail.com, ²arradgs@pens.ac.id

Masuk: 1 September 2018, Revisi masuk: 10 September 2018, Diterima: 14 September 2018

ABSTRACT

Heat exchanger is used device to transfer thermal energy (enthalpy) between two or more fluids at different temperatures. One type of heat exchanger is double pipe heat exchanger. Double pipe heat exchanger consists of one pipe placed concentrically in another pipe with a larger diameter. One fluid passes through the inner pipe and the other fluid passes through the outer pipe (annulus). Performance of double pipe heat exchangers can be determined based on the characteristics of heat transfer and friction factor. One effort to improve the performance of double pipe heat exchanger can by passive method which is adding perforated twisted tape in the inner pipe. Perforated twisted tape had three different porosity ratios, that is 1.88, 3.77, and 5.65% that comparison with plain twisted tape (porosity ratio 0). Fluid flowed in double pipe heat exchanger is water in liquid phase in laminar-transition flow regime. Reynolds number in annulus is made constant at 2000, while in inner pipe is 1000-5000. Temperature of water entering annulus and inner pipe is kept constant at 20°C and 50°C, respectively. From the experimental results it found that perforated twisted tape increased Nusselt number and friction factor values respectively 0.1-0.8% and 203-1536% higher than double pipe heat exchanger without twisted tape (plain tube). Perforated twisted tape with porosity ratio 3.77% has the best performance, that is increasing Nusselt number average of 0.31% from 28.8913 in plain tube to 28.9810 and increasing friction factor average of 366.34% from 0.6521 in plain tube to 3.0410.

Keywords: Heat transfer, friction factor, double pipe heat exchanger, perforated twisted tape

INTISARI

Penukar kalor merupakan alat yang digunakan untuk mentransfer energi termal (entalpi) antara dua atau lebih fluida pada temperatur yang berbeda. Salah satu jenis penukar kalor adalah penukar kalor pipa ganda. Penukar kalor pipa ganda terdiri dari satu pipa ditempatkan secara konsentris di dalam pipa yang lain dengan ukuran diameter yang lebih besar. Satu fluida melewati pipa bagian dalam (inner pipe) dan fluida lainnya melewati pipa bagian luar (annulus). Kinerja penukar kalor pipa ganda dapat ditentukan berdasarkan karakteristik heat transfer dan friction factor. Salah satu upaya untuk meningkatkan kinerja penukar kalor pipa ganda dapat dilakukan dengan metode pasif yaitu menambahkan perforated twisted tape pada pipa bagian dalam. Perforated twisted tape yang digunakan memiliki tiga porosity ratio yang berbeda yaitu 1.88, 3.77, dan 5.65 % yang nantinya dibandingkan dengan plain twisted tape (porosity ratio 0). Fluida yang dialirkan dalam penukar kalor pipa ganda berupa air dalam fasa liquid pada rezim aliran laminar-transisi. Bilangan Reynolds pada annulus dibuat konstan sebesar 2000, sedangkan pada inner pipe dibuat 1000-5000. Temperatur air yang masuk annulus dan inner pipe dibuat konstan masing-masing sebesar 20°C dan 50°C. Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa perforated twisted tape meningkatkan nilai bilangan Nusselt dan friction factor masing-masing sebesar 0.1-0.8% dan 203-1536% lebih tinggi daripada penukar kalor pipa ganda tanpa adanya twisted tape (plain tube). Perforated twisted tape dengan porosity ratio 3.77% memiliki kinerja yang paling baik yaitu meningkatkan bilangan Nusselt rata-rata 0.31% dari 28.8913 pada plain tube menjadi 28.9810 dan

meningkatkan *friction factor* rata-rata 366.34% dari 0.6521 pada *plain tube* menjadi 3.0410.

Kata-kata kunci : *Heat transfer, friction factor, penukar kalor pipa ganda, perforated twisted tape*

PENDAHULUAN

Penukar kalor merupakan alat yang digunakan untuk mentransfer energi termal (entalpi) antara dua atau lebih fluida pada temperatur yang berbeda (Shah & Sakulic, 2003). Salah satu jenis penukar kalor adalah penukar kalor pipa ganda. Penukar kalor pipa ganda terdiri dari satu pipa yang ditempatkan secara konsentris di dalam pipa yang lain dengan ukuran diameter yang lebih besar (Kakac & Liu, 2002). Satu fluida melewati pipa bagian dalam (*inner pipe*) dan fluida lainnya melewati pipa bagian luar (*annulus*) (Incopera & Dewitt, 2011). Penukar kalor pipa ganda dapat digunakan dalam area *heat transfer* yang kecil.

Dalam penggunaannya, dibutuhkan penukar kalor pipa ganda dengan karakteristik *heat transfer* yang tinggi serta *friction factor* yang rendah agar semakin efisien. Salah satu cara yang dapat dilakukan yaitu dengan menambahkan *twisted tape* di aliran pipa bagian dalam. *Twisted tape* ini dibuat dari suatu logam yang dipluntir, yang biasanya disebut *plain twisted tape*. Fungsinya untuk mencampur aliran bagian tengah dan aliran yang dekat dengan dinding (sebagai turbulator) sehingga mengganggu lapisan batas termal (Naphon, 2006; Eiamsa-ard, Wongcharee, & Sripattanapipat, 2009). Penggunaan *twisted tape* juga dapat dimodifikasi untuk meningkatkan performanya. Salah satunya adalah memberikan *perforated* dengan rasio *porosity* tertentu. *Perforated twisted tape* ini selain dapat meningkatkan karakteristik *heat transfer* juga dapat menurunkan *friction factor*.

Penelitian mengenai penukar kalor pipa ganda dengan penambahan *twisted tape* telah banyak dilakukan. Pada tahun 2006, Paisarn Naphon (Naphon, 2006) melakukan penelitian mengenai *heat transfer* dan *pressure drop* pada pipa ganda horisontal dengan

dan tanpa menambahkan *twisted tape* didalamnya. *Twisted tape* yang digunakan terbuat dari plat aluminium dengan tebal 1 mm dan panjang 2000 mm dengan memvariasikan panjang satu *twist (H)* yaitu sebesar 2.5 cm dan 3 cm. Fluida yang digunakan berupa air dalam fasa *liquid*. Hasil yang didapatkan adalah dengan penambahan *twisted tape* terjadi peningkatan karakteristik *heat transfer* sebesar 15% dari perhitungan serta *friction factor* sebesar 10% dari perhitungan. Temperatur air panas dan dingin terbaik yang masuk pada pipa yang digunakan masing-masing sebesar 45°C dan 15°C dengan laju alir massa 0.03 kg/s.

Perkembangan dari penelitian sebelumnya dilakukan oleh S. Naga Sarada, dkk. (2010) mengenai penggunaan *twisted tape*. *Twisted tape* yang digunakan dengan memvariasikan rasio *twist*. Rasio *twist* merupakan perbandingan antara panjang satu *twist/pitch (H)* terhadap diameter pipa bagian dalam. Rasio *twist* yang digunakan adalah 3, 4 dan 5 dengan *pitch* masing-masing 82.5, 110, dan 137.5 mm serta diameter pipa bagian dalam 27.5 mm. Selain itu, variasi yang digunakan adalah lebar dari *twisted tape* sebesar 10, 14, 18, 22, dan 26 mm. Hasil yang didapatkan adalah *Nusselt number* dan *friction factor* tertinggi adalah pada rasio *twist* 3 dengan lebar *twisted tape* 26 mm. Nilai *Nusselt number* dan *friction factor* masing-masing adalah 36 dan 0.0093 pada *Re* sebesar 10000.

Selanjutnya Bhuiya, dkk. (2013) juga melakukan penelitian mengenai *twisted tape*. Namun dimodifikasi dengan menambahkan lubang dengan diameter tertentu di sepanjang *twist (perforated)*. *Twisted tape* jenis ini dinamakan *perforated twisted tape*. *Perforated twisted tape* yang digunakan rasio *porosity* berbeda-beda. Rasio *porosity* merupakan rasio antara luasan *perforated* di sepanjang *twisted tape* dan luasan *twisted tape* secara keseluruhan.

Pada penelitian ini, *twisted tape* yang digunakan memiliki panjang 1500 mm, lebar 62 mm, tebal 3 mm, dan rasio *twist* 1.92. Variasi rasio *porosity* sebesar 1.6, 4.5, 8.9, dan 14.7% dengan diameter *perforated* masing-masing 3, 5, 7, dan 9 mm. Aliran yang digunakan dalam rezim turbulen ($Re = 7200-49800$) pada fluida kerja udara. Hasil yang didapatkan, terjadi peningkatan *nusselt number* sebesar 110-340%, *friction factor* sebesar 110-360%, dan *thermal performance* sebesar 28-59%. *Porosity* yang menghasilkan *transfer* panas yang baik adalah 4.5%. Namun semakin besar atau semakin kecil rasio *porosity* tidak dapat menentukan kemampuan *heat transfer* yang efisien. Begitu pula dengan *friction factor* yang terjadi.

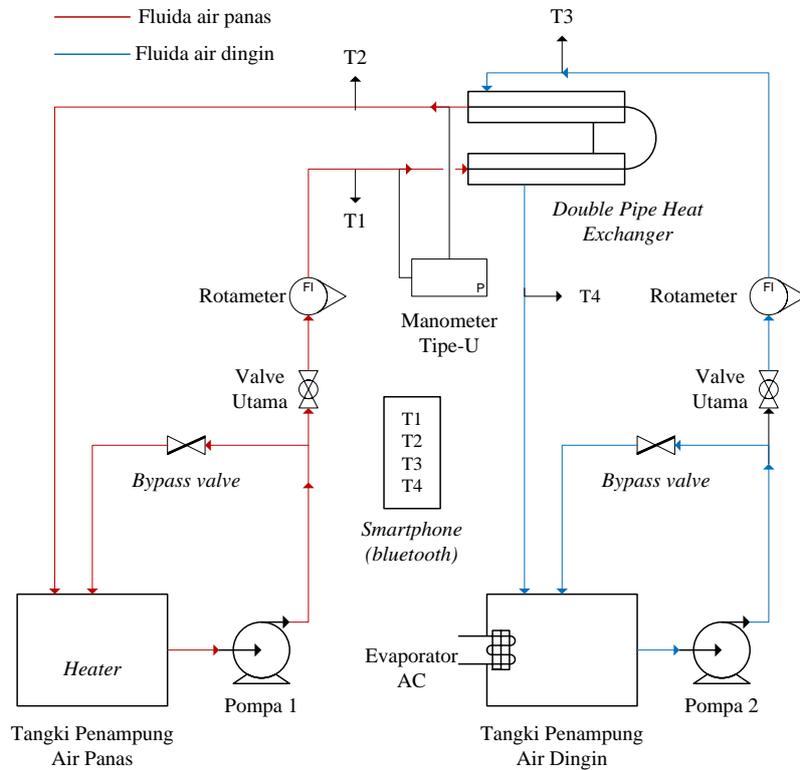
Oleh karena itu, pada penelitian ini akan membahas mengenai pengaruh rasio *porosity* 1.88, 3.77, dan 5.65% terhadap karakteristik *heat transfer* dan *friction factor* penukar kalor pipa ganda pada aliran laminar-transisi agar peningkatan dengan ada atau tidaknya *perforated* pada *twisted tape* dapat diketahui perbedaannya secara signifikan. Karakteristik *heat transfer* dan *friction factor* dengan penambahan *twisted tape* sendiri lebih baik ketika berada di aliran laminar karena aliran laminar menyebabkan resistansi termal lebih rendah (Kumar & Murugesan, 2012). Fluida yang digunakan adalah air dalam fasa *liquid*. Tahap selanjutnya akan dibandingkan peningkatan yang terjadi dari tanpa adanya *twisted tape* (*plain tube*) dengan menambahkan *perforated twisted tape* dengan variasi *porosity ratio* dan *plain twisted tape*.

METODE PENELITIAN

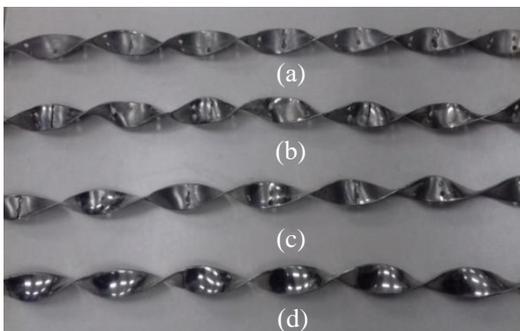
Penelitian secara eksperimen dilakukan dengan menguji penukar kalor pipa ganda dengan penambahan *perforated twisted tape* dengan variasi rasio *porosity* di Laboratorium Termal Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS). Skema dari pengujian dapat ditunjukkan pada gambar 1. Air dingin dengan temperatur 20°C dan laju alir

massa 0.3 kg/s ($Re = 2000$) dialirkan menggunakan pompa 1 ke sisi *annulus*. Sedangkan air panas dengan temperatur 50°C dan laju alir massa 0.0074, 0.0148, 0.0222, 0.0296, dan 0.0370 kg/s ($Re = 1000, 2000, 3000, 4000, \text{ dan } 5000$) dialirkan menggunakan pompa 2 ke sisi *inner pipe* dengan arah aliran yang berlawanan (*counter flow*). Terdapat empat sensor temperatur NTC yang terpasang di sisi masuk dan keluar pada *inner pipe* dan *annulus*. Keempat sensor tersebut dirangkai dan dihubungkan menggunakan *bluetooth* ke *smartphone* untuk mengetahui temperatur air yang nantinya digunakan untuk menghitung karakteristik *heat transfer*. Selain itu, dipasang manometer tipe-U di sisi masuk dan keluar *inner pipe* untuk mengetahui beda ketinggian air dalam manometer tipe-U yang nantinya digunakan untuk menghitung *pressure drop* yang selanjutnya menghitung *friction factor*. *Inner pipe* yang digunakan terbuat dari aluminium dengan diameter 0.017 m, ketebalan 0.001 m, dan panjang 1.5909 m yang dibuat menjadi bentuk U. Sedangkan *annulus* terbuat dari *acrylic* dengan diameter 0.038 m, ketebalan 0.001 m, dan panjang 0.435 m yang dipasang secara konsentris di *inner pipe*.

Pada sisi *inner pipe* ditambahkan *perforated twisted tape* dengan variasi rasio *porosity* 0, 1.88, 3.77, dan 5.65% yang ditunjukkan pada gambar 2. Sementara penukar kalor dengan penambahan *perforated twisted tape* dapat ditunjukkan pada gambar 3. Rasio *porosity* merupakan rasio antara luasan *perforated* di sepanjang *twisted tape* dan luasan *twisted tape* secara keseluruhan. *Twisted tape* yang digunakan terbuat dari *stainless steel* dengan panjang *tape* 0.500 m, lebar 0.015 m, ketebalan 0.001 m, panjang satu pluntiran (*pitch*) 0.050 dan rasio *twist* 2.94. Sementara *perforated* yang terdapat di *twisted tape* memiliki diameter 0.003 m, jarak transversal 0.006 m, dan jarak aksial: 0.0100 m ($R_p = 1.88\%$); 0.0125 m ($R_p = 3.77\%$); dan 0.0167 m ($R_p = 5.65\%$).



Gambar 1. Skema sistem pengujian *double pipe heat exchanger*



Gambar 2. *Perforated twisted tape* dengan *porosity ratio* (a) 5.65% (b) 3.77% (c) 1.88% (d) 0 atau *plain twisted tape*



Gambar 3. Penukar kalor pipa ganda dengan penambahan *perforated twisted tape*

Terdapat beberapa parameter untuk menghitung karakteristik *heat transfer* dan *friction factor* pada penelitian ini, diantaranya adalah sebagai berikut.

Menghitung laju heat transfer

Laju *heat transfer* yang dihitung terdiri dari dua bagian yaitu pada *inner pipe* dan *annulus* yang selanjutnya dicari nilai rata-rata dari keduanya. Persamaan yang digunakan untuk menghitung laju *heat transfer* adalah sebagai berikut.

$$q_h = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (1)$$

$$q_c = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (2)$$

$$q_{ave} = \frac{q_h + q_c}{2}$$

Keterangan:

- q : Laju perpindahan panas (W)
- \dot{m} : Laju alir massa (kg/s)
- C_p : Kapasitas kalor spesifik (J/kg.K)
- T : Temperatur (K)

Menghitung bilangan Nusselt

Bilangan *Nusselt* mendefinisikan karakteristik *heat transfer*. Persamaan yang digunakan untuk menghitung bilangan *Nusselt* adalah sebagai berikut (Cengel, 2005).

$$Nu_h = \frac{h_i d_i}{k_h} \quad (4)$$

Dimana koefisien *heat transfer* (h_i) dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$h_i = \frac{q_h}{A(T_{h,i} - T_{h,o})} \quad (5)$$

Keterangan:

- Nu : Bilangan *Nusselt*
- h : Koefisien *heat transfer* konveksi (W/m.K)
- d_i : Diameter pipa bagian dalam (m)
- k : Konduktivitas termal (W/m²K)
- A : Area terjadinya *heat transfer* (m²)

Menghitung friction factor

Friction factor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Bhuiya, dkk., 2013).

$$f = \frac{2 \Delta P d_i}{\rho v^2 l} \quad (6)$$

Dimana *pressure drop* (ΔP) dan kecepatan fluida (v) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta P = \rho g \Delta h \quad (7)$$

$$v_h = \frac{\dot{m}_h}{\rho_h A_h} \quad (8)$$

Keterangan:

- f : Faktora gesekan
- l : Panjang *inner pipe* (m)
- ρ : Densitas fluida (kg/m³)
- ΔP : *Pressure drop* (Pa)

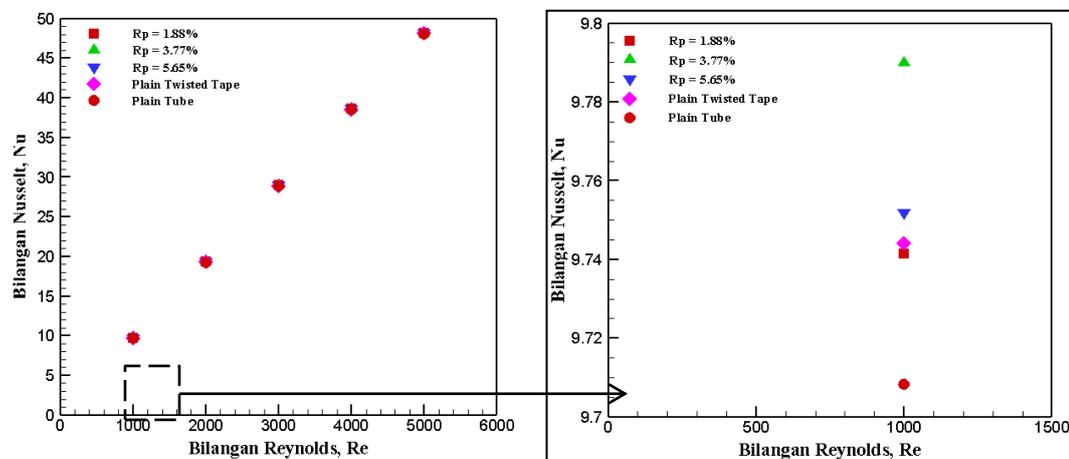
v : Kecepatan aliran (m/s)

PEMBAHASAN

Terdapat dua bahasan pokok dalam penelitian ini, yaitu pengaruh *porosity ratio* pada *perforated twisted tape insert* terhadap karakteristik *heat transfer* dan pengaruh *porosity ratio* pada *perforated twisted tape insert* terhadap *friction factor*.

Pengaruh porosity ratio pada perforated twisted tape insert terhadap karakteristik heat transfer

Pengaruh *porosity ratio* terhadap bilangan *Nusselt* dapat ditunjukkan pada Gambar 4. Semakin besar bilangan *Reynolds* maka *heat transfer* yang terjadi dalam suatu fluida semakin besar. Hal itu dikarenakan intensitas turbulensi dapat meningkatkan *heat transfer* secara konveksi (Bhuiya, dkk., 2013). Namun, nilai bilangan *Nusselt* yang terjadi pada masing-masing variasi dalam satu nilai bilangan *Reynolds* yang sama memiliki selisih yang sedikit, karena sistem bekerja pada aliran laminar-transisi, yang menyebabkan kinerja dari penukar kalor pipa ganda kurang maksimal. Penambahan *twisted tape* baik *plain* maupun *perforated* dapat meningkatkan *heat transfer* dibandingkan dengan tanpa adanya *twisted tape* (*plain tube*). Hal itu dikarenakan dengan adanya *twisted tape* dapat menyebabkan *swirl flow* atau *secondary flow* di sepanjang aliran fluida (Bhuiya, dkk., 2013).



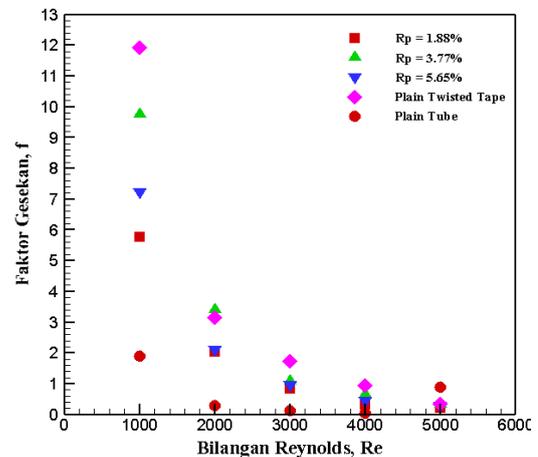
Gambar 4. Grafik pengaruh *porosity ratio* terhadap bilangan *Nusselt*

Penambahan *perforated twisted tape* dengan variasi rasio *porosity* dapat meningkatkan bilangan *Nusselt* 0.1-0.8% lebih tinggi dibandingkan dengan *plain tube*, sedangkan penggunaan *plain twisted tape* dapat meningkatkan bilangan *Nusselt* 0.2-0.4% dibandingkan *plain tube*. Variasi rasio *porosity* 3.77% merupakan variasi yang dapat meningkatkan *heat transfer* paling tinggi dibandingkan dengan variasi rasio *porosity* yang lain dan *plain twisted tape*. Apabila dirata-rata dari bilangan *Reynolds* 1000-5000 didapatkan peningkatan bilangan *Nusselt* rata-rata 0.20% dari 28.8913 pada *plain tube* menjadi 28.9481 untuk *plain twisted tape*, sedangkan rasio *porosity* 3.77% dapat meningkatkan bilangan *Nusselt* rata-rata 0.31% dari 28.8913 pada *plain tube* menjadi 28.9810. Tingginya nilai bilangan *Nusselt* pada *perforated twisted tape* dengan rasio *porosity* 3.77% disebabkan oleh kuatnya intensitas *swirl flow* yang dihasilkan, sehingga menyebabkan gangguan yang lebih efisien pada lapisan batas di sepanjang jalur aliran. Rasio *porosity* yang tinggi dapat menyebabkan efek *swirl flow* yang lebih sedikit, sedangkan rasio *porosity* yang rendah dapat menyebabkan agitasi yang rendah pada aliran fluida (Bhuiya, dkk., 2013). Namun, semakin besar atau kecil rasio *porosity* tidak dapat menunjukkan besar atau kecilnya nilai *heat transfer* yang terjadi.

Pengaruh *porosity ratio* pada *perforated twisted tape insert* terhadap *friction factor*

Pengaruh *porosity ratio* terhadap *friction factor* dapat ditunjukkan pada Gambar 5. Semakin besar bilangan *Reynolds* maka *friction factor* yang terjadi semakin menurun. Artinya semakin turbulen suatu aliran yang melewati pipa, maka gesekan yang terjadi semakin sedikit. Penambahan *twisted tape* dapat meningkatkan *friction factor*, penyebabnya karena adanya *flow blockage* dan luas permukaan kontak fluida yang lebih besar antara fluida dengan dinding *tube* dan *twisted tape* dengan jalur aliran fluida yang lebih panjang sehingga *pressure drop* tinggi terjadi karena

interaksi gaya tekanan dengan gaya inersia pada lapisan batas (Bhuiya, dkk., 2013).



Gambar 5. Grafik pengaruh *porosity ratio* terhadap *friction factor*

Penambahan *perforated twisted tape* dengan variasi rasio *porosity* dapat meningkatkan *friction factor* 203-1536% lebih tinggi dibandingkan dengan *plain tube*, sedangkan penggunaan *plain twisted tape* dapat meningkatkan *friction factor* 528-2243% dibandingkan *plain tube*. Variasi *porosity ratio* 3.77% dapat meningkatkan *friction factor* yang lebih tinggi dibandingkan dengan variasi rasio *porosity* yang lain, namun lebih rendah dibandingkan dengan *plain twisted tape*. Apabila dirata-rata dari bilangan *Reynolds* 1000-5000 didapatkan peningkatan *friction factor* rata-rata 455.05% dari 0.6521 pada *plain tube* menjadi 3.6194 untuk *plain twisted tape*, sedangkan rasio *porosity* 3.77% dapat meningkatkan *friction factor* rata-rata 366.34% dari 0.6521 pada *plain tube* menjadi 3.0410. Hal itu disebabkan karena pada rasio *porosity* 3.77% menghasilkan *swirl flow* atau aliran turbulen yang tinggi dan waktu tinggal yang lama dan *inner pipe* sehingga gesekan yang terjadi semakin besar (Bhuiya, Chowdhury, M.Saha, & Islam, 2013). Namun, semakin besar atau kecil rasio *porosity* tidak dapat menunjukkan besar atau kecilnya nilai *friction factor* yang terjadi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan analisis mengenai pengaruh *porosity ratio* pada

perforated twisted tape insert terhadap karakteristik *heat transfer* dan *friction factor* dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Penambahan *perforated twisted tape* dapat meningkatkan bilangan *Nusselt* dan *friction factor* masing-masing 0.1-0.8% dan 203-1536% lebih tinggi dari *plain tube*.
2. *Perforated twisted tape* dengan *porosity ratio* 3.77% dapat meningkatkan karakteristik *heat transfer* paling tinggi dibandingkan dengan *porosity ratio* yang lain dan *plain twisted tape*, yaitu meningkatkan bilangan *Nusselt* rata-rata 0.31% dari 28.8913 pada *plain tube* menjadi 28.9810.
3. *Perforated twisted tape* dengan *porosity ratio* 3.77% juga dapat meningkatkan *friction factor* lebih tinggi dibandingkan dengan *porosity ratio* yang lain namun lebih rendah dibandingkan *plain twisted tape*, yaitu meningkatkan *friction factor* rata-rata 366.34% dari 0.6521 pada *plain tube* menjadi 3.0410.
4. Semakin besar atau kecil *porosity ratio* tidak dapat menentukan semakin besar atau kecil karakteristik *heat transfer* dan *friction factor*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada program studi Sistem Pembangkit Energi, Departemen Teknik Mekanika dan Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya yang telah menunjang dalam penelitian ini, khususnya pihak-pihak terkait dan Laboratorium Thermal.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhuiya, M., Chowdhury, M., M.Saha, & Islam, M., 2013, Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape insert. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 49-57.
- Cengel, Y. A., 2005, *Heat Transfer A Pratical Approach* (2nd ed.).
- Eiamsa-ard, S., Wongcharee, K., Sripattanapipat, S., 2009, 3-D Numerical simulation of swirling flow and convective heat transfer in a

circular tube induced by means of loose-fit twisted tape. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 36, pp. 947-955.

- Incopera, F. P., Dewitt, D. P., 2011, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.), United Sates of America: John Wiley & Sons.
- Kakac, S., Liu, H., 2002, *Heat Exchanger Selection, Rating and Thermal Design* (2nd ed.), Florida: CRC Press LLC.
- Kumar, C. N., Murugesan, P., 2012, (April). Review on Twisted Tapes Heat Transfer Enhancement. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 3, pp. 1-9.
- Naphon, P., 2006, Heat transfer and pressure drop in the horizontal double pipes with and without twisted tape insert. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 33, pp. 166-175.
- Sarada, S. N., Raju, A. S., Radha, K. K., & Sunder, L. S., 2010, Enhancement of heat transfer using varying width twisted tape insert. *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, pp. 107-118.
- Serth, R. W., 2007, *Process Heat Transfer Principles and Applications*. United Kingdom: Elsevier.
- Shah, R. K., Sakulic, D. P., 2003, *Fundamental of Heat Exchanger Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

BIODATA PENULIS

Susi Puspitasari, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.

Arrad Ghani Safitra, S.T., M.T., menyelesaikan pendidikan D3 dari Universitas Gadjah Mada tahun 2010, S1 dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember tahun 2013, dan S2 dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember tahun 2016. Saat ini tercatat sebagai dosen tetap program studi Sistem Pembangkitan Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.