

## KARAKTERISTIK TEMPERATUR FLUIDA DINGIN PADA GROOVED DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER

### COLD FLUID TEMPERATURE CHARACTERISTICS ON GROOVED DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER

*\*<sup>1</sup>Putu Wijaya Sunu, <sup>1</sup>Putu Darmawa<sup>2</sup>, A.A.N.B Mulawarman<sup>3</sup>,  
<sup>4</sup>I Made Suarta<sup>4</sup>, dan <sup>5</sup>I Putu Gede Sopan Rahtika<sup>5</sup>  
Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali*

Submitted: 03-02-2019; Revised:07-02-2020; Accepted: 07-02-2020

#### ABSTRACT

Heat exchangers have widespread applications in many industrial processes. There are many kinds of heat exchanger. One of the simple heat exchanger is double pipe heat exchanger. The need for lightweight and enhancing the heat transfer of heat exchanger is accommodated by surface engineering. One of the surface passive technique applications is groove. Incising groove in pipe is given wide consideration as it needs no additional power, decreases in weight of system and hence gives more benefit in heat transfer. The characteristics of heat transfer in grooved double pipe heat exchanger were investigated experimentally in this article. The aim of this investigation is to reveal the phenomenon of temperature characteristics of cold fluid in the heat transfer process in the grooved double pipe heat exchanger. In this study, water was used as both hot and cold fluid with counter flow pattern, and the water flow rate equal to 15 lpm for both fluids. Grooves were incised on the annulus area in the outer wall of tube side with rectangular shape and circumferential pattern. The characteristics of groove dimension that are height of groove is 0,3 mm; distance between grooves is 8 mm; and the groove space which is as independent variables are 1 mm and 2 mm. The data from 1 mm and 2 mm groove spaces were compared with no grooved double pipe heat exchanger data (smooth pipe). The hot fluid temperature is  $50 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  while the cold fluid temperature is  $30 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . The temperature data on the inlet and outlet side of heat exchangers for smooth pipe, 1 mm and 2 mm groove space were compared to find out the characteristics of increasing cold fluid temperature. This study used the temperature rate and temperature acceleration method to compare the variables. The result shows that groove installation increases the amount of heat absorbed by cold fluid. The heat exchanger with 1 mm groove spaces, was able to absorb heat about  $\pm 2.3\%$  better than heat exchanger with 2 mm groove space and  $13,1\%$  better than heat exchanger with no groove.

**Keywords:** Groove; Circumferential; Heat exchanger; Temperature acceleration; Temperature characteristics.

#### ABSTRAK

Peralatan pemindah panas (heat exchanger) memiliki aplikasi yang luas dalam perindustrian. Peralatan ini memiliki beragam jenis. Salah satu peralatan pemindah panas yang sederhana adalah jenis double pipe. Kebutuhan bobot dan peningkatan transfer panas pada heat exchanger diakomodasi dengan cara rekayasa permukaan. Salah satu jenis rekayasa permukaan secara pasif adalah groove. Penambahan

\*Corresponding author: [wijayasunu@pnb.ac.id](mailto:wijayasunu@pnb.ac.id)

Copyright ©2020 THE AUTHOR(S). This article is distributed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Jurnal Teknosains is published by the Graduate School of Universitas Gadjah Mada.

groove dalam pipa menjadi perhatian mengingat aplikasinya tanpa energi tambahan, mengurangi bobot sistem dan memberi manfaat dalam perpindahan panas. Karakteristik perpindahan panas pada grooved double pipe heat exchanger diteliti secara experimental dalam artikel ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengungkap fenomena karakteristik temperatur fluida dingin pada proses perpindahan panas pada heat exchanger. Dalam penelitian ini, digunakan air sebagai fluida panas dan dingin dengan pola aliran counter flow dan laju aliran sama untuk kedua fluida yaitu 15 lpm. Groove digoreskan pada daerah annulus yaitu pada dinding luar tube dengan bentuk penampang rectangular dan pola circumferential. Karakteristik dimensi groove yaitu dalam tinggi groove adalah 0,3 mm; jarak antar groove adalah 8 mm; dan lebar groove sebagai variabel bebas yaitu 1 mm dan 2 mm. Temperatur fluida panas yang digunakan adalah  $50 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  sedangkan temperatur fluida dingin adalah  $30 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Data hasil pengukuran temperatur pada sisi masuk dan keluar pada penukar kalor dengan lebar groove 1 mm dan 2 mm dibandingkan dengan heat exchanger tanpa groove untuk mengetahui karakteristik peningkatan temperatur fluida dingin. Pada penelitian ini digunakan metode laju temperatur dan akselerasi temperatur untuk membandingkan variabel dalam penelitian. Hasil penelitian ini mengungkap bahwa pemasangan groove meningkatkan jumlah kalor yang mampu diserap fluida dingin. Heat exchanger dengan lebar groove 1 mm, mampu menyerap panas  $\pm 2,3$  % lebih baik dibandingkan dengan heat exchanger dengan lebar groove 2 mm dan 13,1 % lebih baik dibandingkan heat exchanger tanpa groove.

**Keywords:** *Groove; Circumferential; Heat exchanger; Akselerasi temperatur; Karakteristik temperatur.*

## PENGANTAR

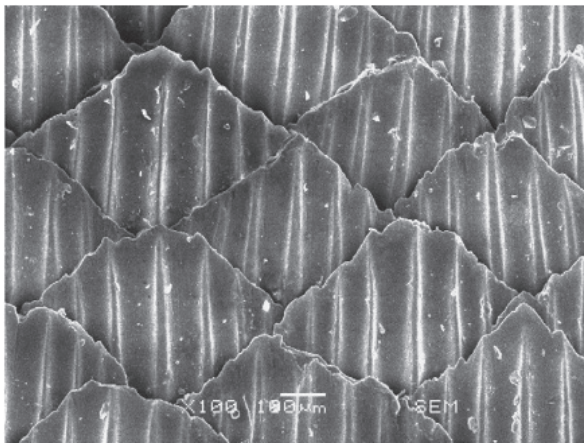
Kebijakan energi nasional dituangkan melalui Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 0983 K/16/MEM/2004. Keputusan ini [1] ditindaklanjuti dengan menyusun Blueprint Pengelolaan Energi Nasional (BP-PEN) 2005 - 2025 [2], yang kemudian diperkuat dengan menuangkannya ke dalam Perpres No. 5 tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional. Perpres ini [3] menargetkan tahun 2025 sumber energi

alternatif memainkan peranan yang lebih besar untuk mengurangi ketergantungan terhadap minyak bumi. Kebijakan ini menjawab isu utama yang mengemuka di dunia saat ini adalah masalah energi, lingkungan, pangan dan ekonomi. Dalam permasalahan energi, isu mengenai penggunaan bahan bakar fosil, ketimpangan penggunaan energi dunia, ketersediaan sumber-sumber energi serta efisiensi energi dan emisi rumah kaca [4] menjadi hal yang mendesak untuk diselesaikan. Dalam hal transportasi energi, *heat exchanger* sebagai peralatan yang menangani energi termal banyak digunakan dalam industri perhotelan, perminyakan, pembangkit listrik, petrokimia, pendingin maupun industri lainnya [5, 6, 7, 8].

Pada *heat exchanger* beberapa parameter yang menjadi pertimbangan dalam kinerja sistem adalah temperatur masuk dan keluar sistem, laju aliran fluida panas dan dingin serta besarnya penurunan tekanan. Beberapa hal teknis yang menjadi dasar pertimbangan adalah unjuk kerja, karakteristik operasional serta kemudahan perawatan *heat exchanger* [9]. Diantara semua jenis *heat exchanger*, *double pipe heat exchanger* adalah yang paling sederhana dalam hal desain, dapat dioperasikan pada tekanan dan temperatur medium serta mudah dalam perawatannya. Akhir-akhir ini yang menjadi fokus penelitian banyak peneliti adalah meningkatkan laju perpindahan panas maupun kontrol aliran fluida dengan metode pasif seperti aplikasi *groove* [10, 11, 12], integrasi riblets pada dinding pipa [13, 14] maupun pemanfaatan nanopartikel/nanofluid untuk meningkatkan laju perpindahan panas pada *heat exchanger* [15].

Alur (*groove*) [16] seperti pada gambar 1 adalah bentuk longitudinal sepanjang arah *streamwise* yang berfungsi untuk kontrol aliran fluida dengan cara mengubah struktur aliran dekat permukaan pada sebuah bentuk/body. Teknik kontrol aliran dengan *groove* secara alamiah banyak digunakan banyak hewan untuk mempermudah gerak melalui hambatan fluida seperti kulit ikan hiu. Teknik kontrol aliran untuk pengurangan drag, hambatan aliran fluida maupun meningkatkan *heat transfer*

sangatlah penting dalam aplikasi *engineering*. Metode kontrol aliran tanpa energi input disebut metode pasif. Pada metode ini kontrol dilakukan dengan memodifikasi struktur aliran dengan mengubah konfigurasi permukaan dengan jalan menambahkan peralatan tambahan seperti *groove* [17]. Pemanfaatan metode pasif sangat efektif dari segi biaya karena tidak memerlukan energi tambahan. Pemasangan alur longitudinal pada permukaan efektif mengurangi drag dan meningkatkan *heat transfer*, namun performanya sangat sensitif terhadap konfigurasi pemasangannya [18].



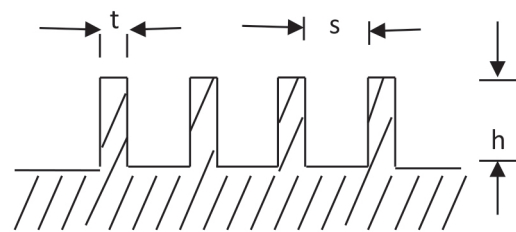
Gambar 1.

Riblet groove pada kulit ikan hiu  
 Sumber: Zhao D.Y. dkk (2012)

Dalam kaitan dengan kondisi aliran fluida pada *heat exchanger* yang secara aplikatif adalah turbulen, solusi penambahan alur mempengaruhi kondisi lapisan batas serta daerah *viscous* dekat dinding pipa. [19] mempelajari *free stream* turbulen yang melalui *transversely-grooved surface*. Hasilnya adalah tambahan turbulensi dihasilkan oleh alur mampu meningkatkan momentum fluid partikel. [9, 11, 20, 21, 22] meneliti aplikasi *groove* dalam pipa lurus dengan menggunakan *rectangular groove* pada  $Re = 15000-24000$ , didapat bahwa pada kasus peningkatan *pressure drop* aliran dalam pipa cenderung memutar sedangkan pada kasus penurunan *pressure drop* pola aliran cenderung *smooth*. Hasil lainnya adalah pada jumlah alur tertentu, alur mampu mengurangi *friction factor* dan mengurangi gradien kecepatan antara pusat

pipa dan dinding pipa sehingga *pressure drop* mengecil sedangkan karakteristik peningkatan *pressure drop* disebabkan terbentuknya *small scale fluid motion*.

[23] meneliti karakteristik perpindahan panas dari profil alur triangular pada terowongan angin. Hasilnya *heat transfer* koefisien meningkat sebesar 10% dibandingkan dengan kondisi tanpa alur. [24] menginvestigasi hubungan antara *heat transfer enhancement* akibat kekasaran permukaan pada turbulen *channel flow* dan hasilnya adalah kekasaran permukaan elemen memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan *heat transfer*. [5, 8, 25] mengoptimalkan proses perpindahan panas pada *heat exchanger* dengan mempertimbangkan karakteristik *heat transfer* dengan meneliti aplikasi *groove* pada *heat exchanger* jenis *double pipe*. Penambahan *groove* jenis *rectangular circumferential* meningkatkan laju perpindahan panas namun perlakuan ini juga sedikit meningkatkan *pressure drop* pada bagian *annulus heat exchanger*. [26] meneliti perpindahan panas dan karakteristik aliran air melalui pipa beralur yang terbuat dari *stainless steel* pada bilangan  $Re$  4000 s/d 10000. Hasilnya *thermal enhancement factor* meningkat menjadi 1.4 s/d 2.2.



Gambar 2.

Karakteristik fisik *groove*  
 Sumber: Dokumentasi pribadi

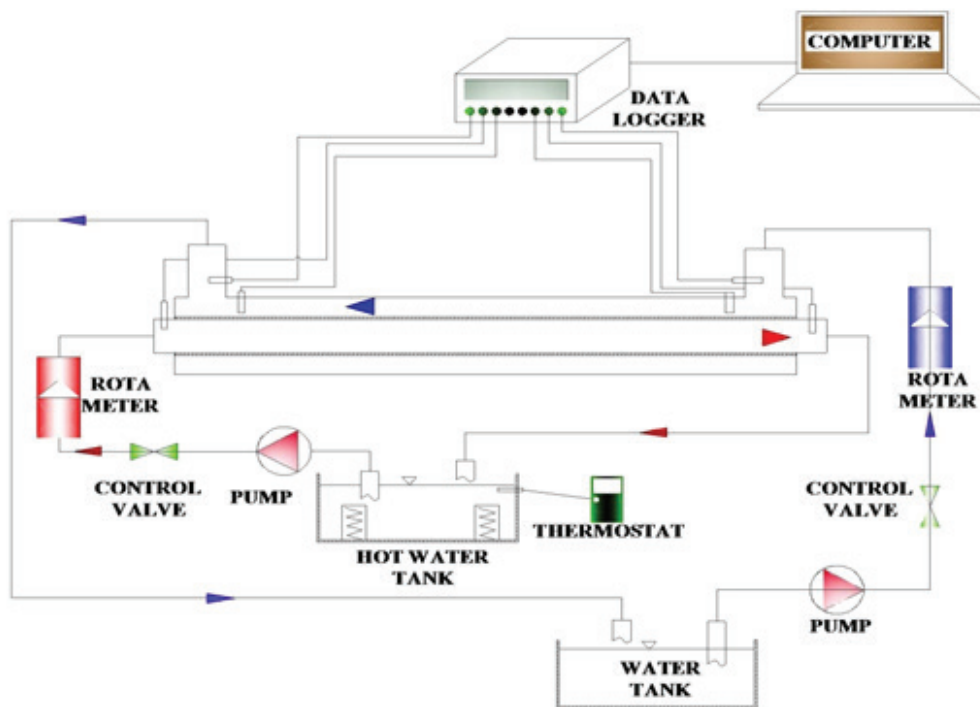
Karakteristik fisik *groove* terdiri atas lebar *groove* ( $s$ ); jarak antar *groove* ( $t$ ); dan tinggi *groove* ( $h$ ) seperti pada gambar 2. Penelitian ini memfokuskan permasalahan pada lebar *groove*. Lebar *groove* menjadi penting karena variabel ini menentukan seberapa besar penetrasi *vortex* yang terbentuk pada dinding permukaan pipa ke dalam *groove*. Perilaku dan interaksi akibat lebar *groove* akan mengoptimasi laju perpindahan

panas yang terjadi pada *heat exchanger*. Penelitian saat ini, mengungkap karakteristik temperatur fluida dingin berdasarkan metode laju temperatur dan akselerasi temperatur. Metode ini mampu mengungkap fenomena perpindahan panas secara lebih detail berdasarkan *time series* temperatur fluida dingin. Pada penelitian ini, lebar *groove* pada daerah annulus dalam *double pipe heat exchanger* digunakan sebagai variabel bebas.

### Metode

Berdasarkan latar belakang serta analisis penelitian terdahulu, dikembangkan analisis baru dengan analisis laju temperatur dan

akselerasi temperatur untuk mengidentifikasi perpindahan panas dalam sistem termofluid dalam *double pipe heat exchanger*. Pengembangan *grooved-double pipe heat exchanger* guna mendapatkan efisiensi perpindahan yang baik. Investigasi ini menggunakan metode *true experimental research* yaitu dengan pengamatan langsung untuk mengetahui efektifitas perpindahan panas menggunakan *temperature time series* analisis pada *fluid experiment* apparatus seperti pada gambar 3. Penelitian ini membandingkan karakteristik perpindahan panas pada dua variasi lebar *groove* melalui analisis peningkatan temperatur fluida dingin.



Gambar 3.  
Skema *experiment apparatus*  
Sumber: Sunu P.W dan Rasta I M. (2017)

Pengujian dilakukan di Laboratorium Tata Udara Politeknik Negeri Bali dengan variabel bebas dalam penelitian ini adalah lebar *groove* yaitu 1 mm dan 2 mm. Tinggi *groove* adalah 0,3 mm dan jarak antar *groove* 8 mm yang dibuat konstan untuk pada semua variabel bebas. Fluida panas yang digunakan

adalah air dengan temperatur awal  $50 \pm 0,5^\circ\text{C}$  yang dipanaskan menggunakan *heater* dengan kontrol termostat dan fluida dingin adalah air dengan temperatur awal sesuai keadaan lingkungan ( $30 \pm 0,5^\circ\text{C}$ ). Laju aliran fluida panas dan fluida dingin adalah 15 lpm sedemikian sehingga diperoleh bilangan Reynolds ( $Re$ )



± 43610 untuk fluida dingin dan  $Re \pm 30900$  untuk fluida panas. Bilangan Reynolds untuk fluida panas dan dingin dikalkulasi dengan persamaan 1 [5],

$$Re = uD_p / \nu \dots\dots\dots(1)$$

Sedangkan diameter hidrolik ruang annulus dihitung dengan persamaan 2 [5],

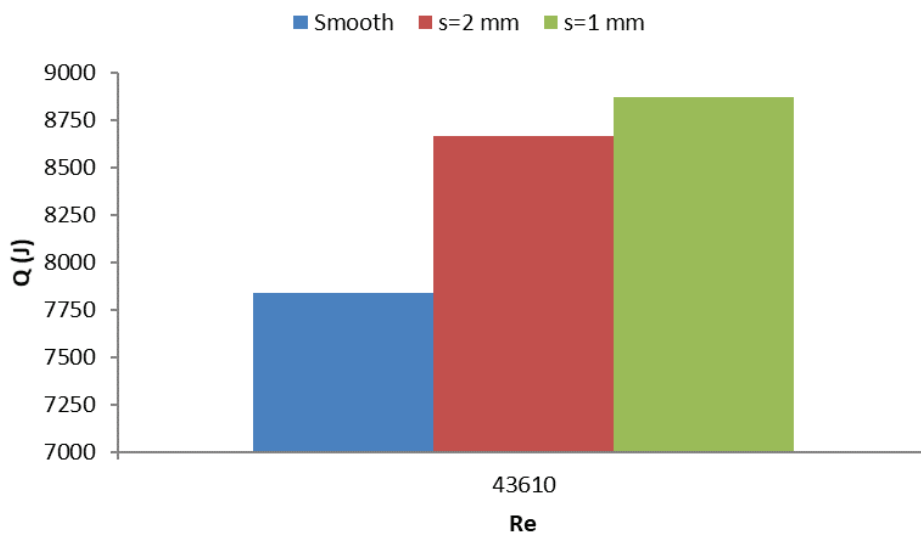
$$D_h = \frac{4 \cdot \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4}}{\pi(D_2 + D_1)} = D_2 - D_1 \dots\dots(2)$$

Instalasi pipa uji sepanjang 0,5 m dengan penambahan alur berpenampang segiempat membentuk pola *circumferensial* yang berada pada sisi luar pipa bagian dalam atau di daerah annulus. Pipa bagian dalam terbuat dari aluminium dengan diameter 20 mm sedangkan pipa bagian luar berdiameter 28 mm terbuat

dari akrilik. Termokopel type K digunakan untuk mengukur temperatur fluida pada sisi masuk dan keluar pada *shell* dan *tube*. Signal termokopel didigitalisasi menggunakan data logger dan direkam menggunakan memori komputer selama 600 detik. Analisis data dilakukan menggunakan metode differensial menggunakan software *spread sheet* pada data temperatur fluida dingin sehingga terlihat perbedaan kondisi temperatur fluida dingin pada masing-masing lebar *groove*.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Data temperatur fluida panas dan dingin pada sisi masuk dan keluar *double pipe heat exchanger* direkam untuk mengetahui karakteristik *heat transfer* akibat variasi lebar *groove* pada ruang annulus. Eksperimen pengambilan data awal merupakan data kondisi ruang annulus tanpa *groove* (*smooth*). Data ini digunakan sebagai data pembanding untuk kondisi ruang annulus ber-*groove* dengan variasi lebar *groove*.



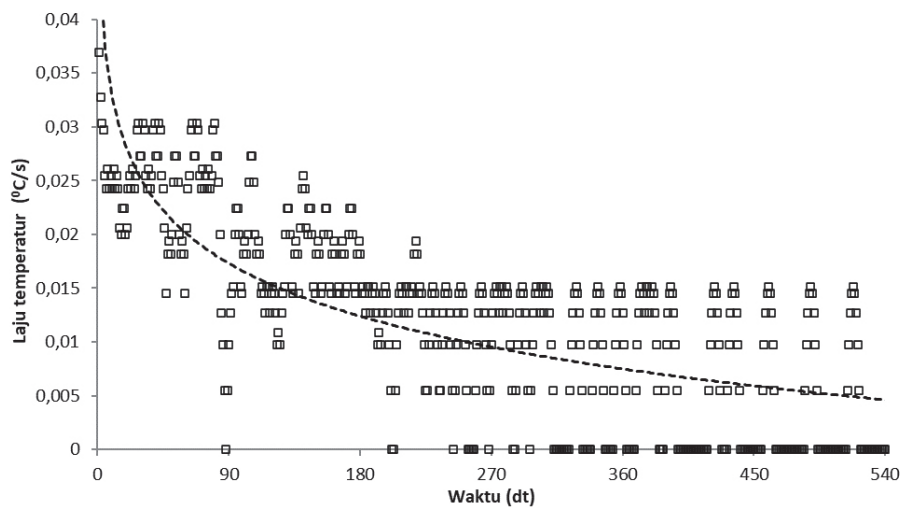
Gambar 4. Total panas yang diserap fluida dingin  
Sumber: Dokumentasi pribadi

$$Q = \dot{m} \cdot C \cdot \Delta T \dots\dots\dots(3)$$

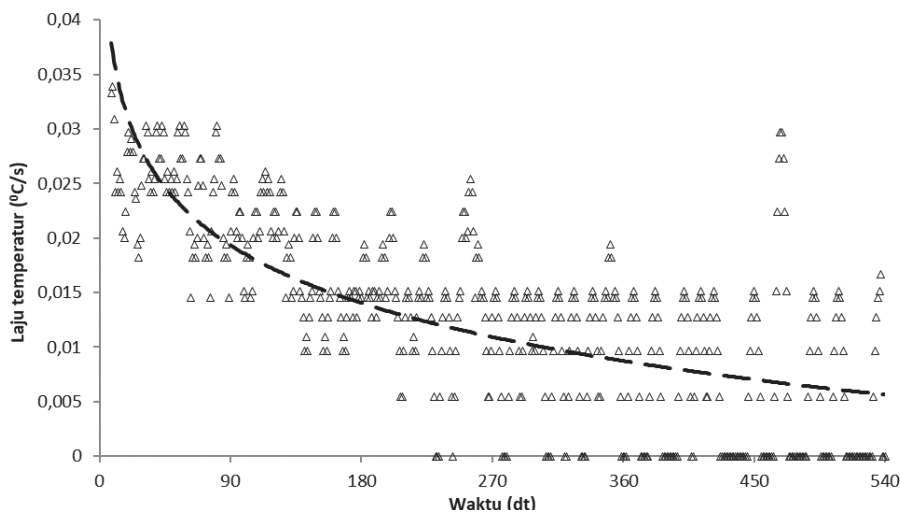
Total jumlah panas yang diserap oleh fluida dingin dihitung menggunakan persamaan 3 [5].

Gambar 4 menunjukkan total jumlah panas yang diserap oleh fluida dingin dalam 600 detik pada  $Re = 43610$ . Pada *smooth* annulus; lebar *groove* 1 mm; dan lebar *groove* 2 mm, jumlah panas yang diserap fluida dingin berturut-turut adalah 7840,56 J; 8872,21 J; 8666,95 J. Pada ruang annulus dengan lebar *groove* 1 mm memiliki total perpindahan panas tertinggi yaitu sekitar 2,3 % lebih besar dibandingkan dengan ruang annulus dengan lebar *groove* 2 mm dan sekitar 13,1 % dibandingkan dengan ruang annulus tanpa *groove*. Pada laju aliran

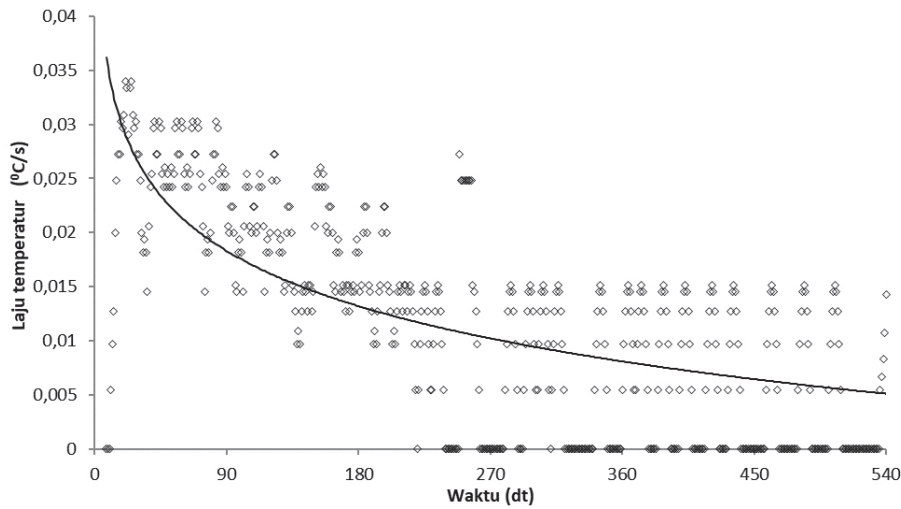
fluida yang konstan, besarnya total jumlah kalor yang berpindah hanya ditentukan oleh beda temperatur antara sisi masuk dan keluar pada fluida dingin (). Untuk mengungkap fenomena perpindahan panas pada fluida dingin secara detail serta membandingkan antara ruang *smooth* annulus dengan annulus yang memiliki lebar *groove* 1 mm dan 2 mm maka dilakukan perhitungan laju peningkatan temperatur fluida dingin. Laju peningkatan temperatur fluida dingin merupakan diferensial pertama/gradient dari data temperatur fluida dingin.



Gambar 5.  
Laju peningkatan temperatur fluida dingin pada *smooth pipe*  
Sumber: Dokumentasi pribadi



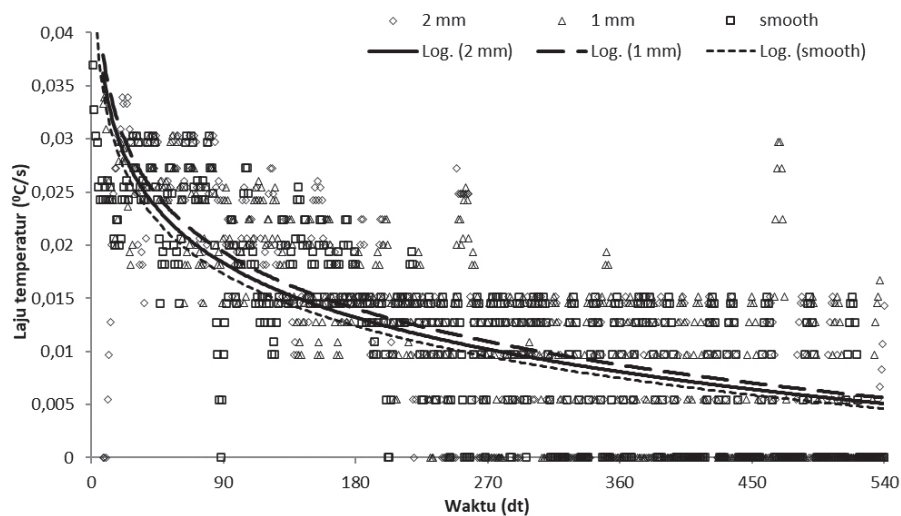
Gambar 6.  
Laju peningkatan temperatur fluida dingin pada *groove* 1 mm  
Sumber: Dokumentasi pribadi



Gambar 7.  
Laju peningkatan temperatur fluida dingin pada groove 2 mm  
Sumber: Dokumentasi pribadi

Grafik laju peningkatan temperatur fluida dingin pada masing-masing variabel tersaji pada gambar 5 s/d 7. Ketiga grafik ini memiliki trend yang sama secara logaritmik. Diawal periode waktu, peningkatan temperatur fluida dingin memiliki laju paling tinggi. Perpindahan energi yang tinggi menyebabkan momentum

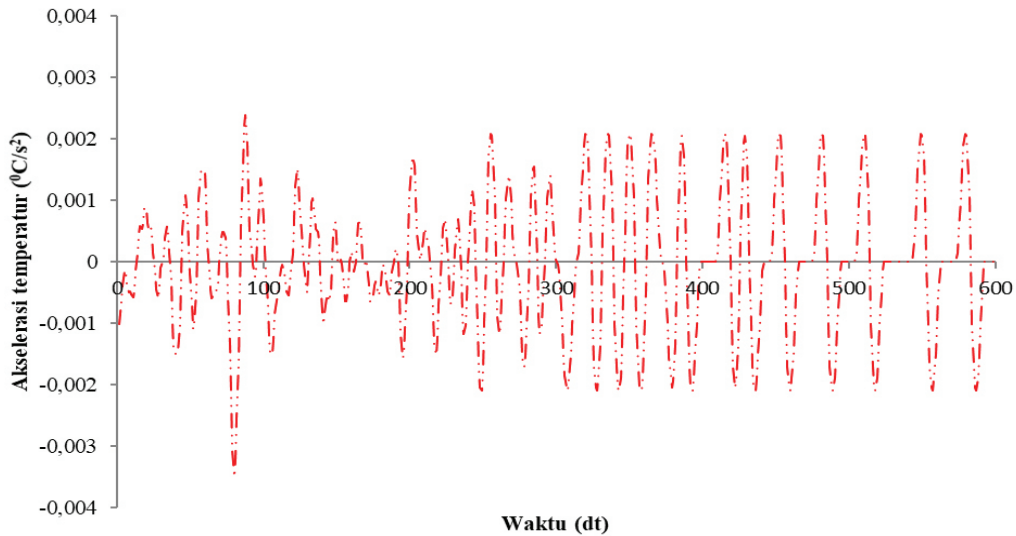
temperatur fluida tinggi sehingga gradien temperatur yang tinggi. Laju peningkatan temperatur fluida dingin mengalami penurunan secara logaritmik seiring peningkatan waktu. Gradien temperatur relatif lebih stabil pada bagian akhir waktu karena perbedaan temperatur fluida panas dan dingin yang semakin mengecil serta cenderung tidak mengalami perubahan.



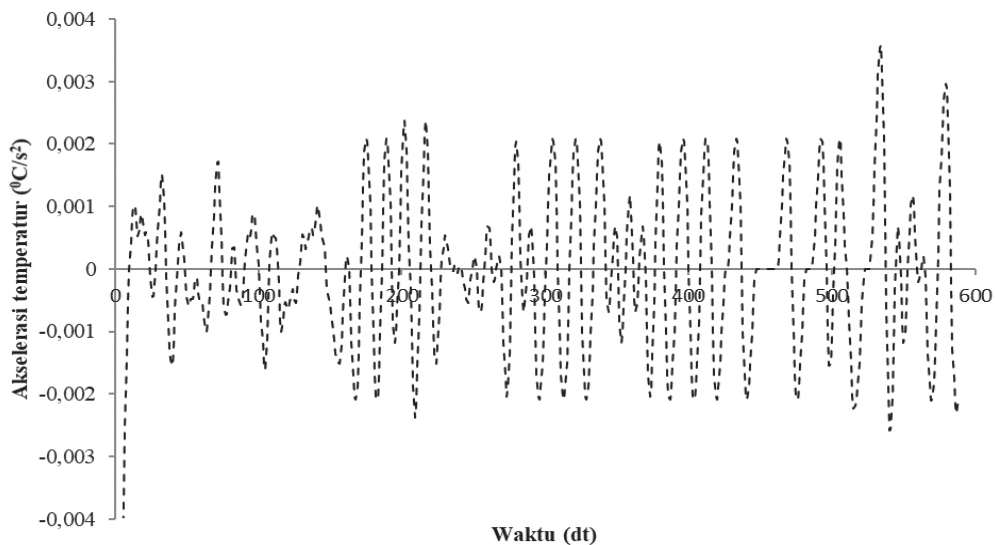
Gambar 8.  
Kompilasi laju peningkatan temperatur fluida dingin  
Sumber: Dokumentasi pribadi

Gambar 8 memperlihatkan kompilasi dan perbandingan laju peningkatan temperatur fluida dingin sebagai fungsi waktu pada *double pipe heat exchanger* tanpa *groove*, *groove* 1 mm dan *groove* 2 mm. Dari gambar 8 terlihat lebih jelas bahwa garis gradien temperatur untuk *groove* 1 mm berada lebih diatas dari garis

lainnya sehingga laju peningkatan temperatur fluida dingin pada ruang annulus dengan lebar *groove* 1 mm lebih baik dibandingkan ruang annulus dengan lebar *groove* 2 mm dan *smooth* annulus. Untuk menajamkan karakteristik temperatur fluida dingin maka dilakukan analisis akselerasi temperatur fluida dingin pada masing-masing lebar *groove*.

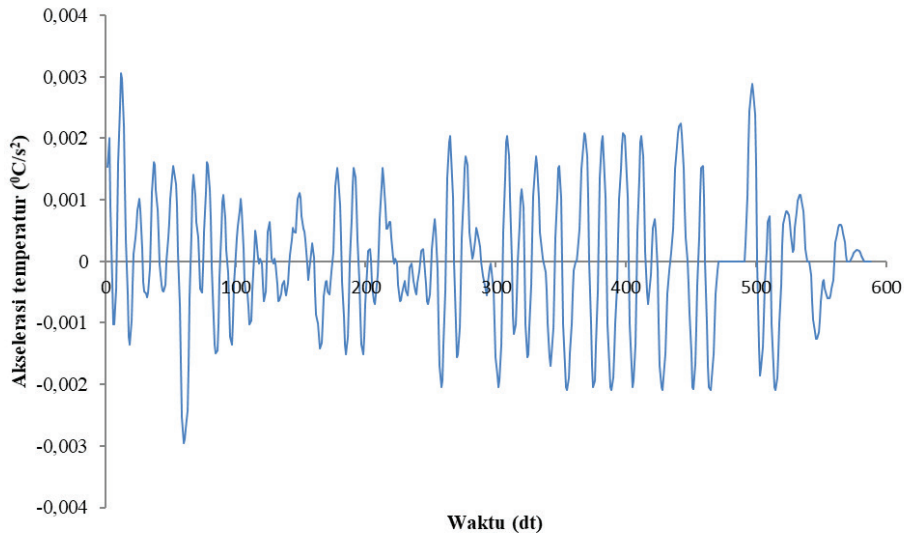


Gambar 9.  
Akselerasi temperatur fluida dingin pada *smooth pipe*  
Sumber: Dokumentasi pribadi



Gambar 10.  
Akselerasi temperatur fluida dingin pada *groove* 1 mm  
Sumber: Dokumentasi pribadi

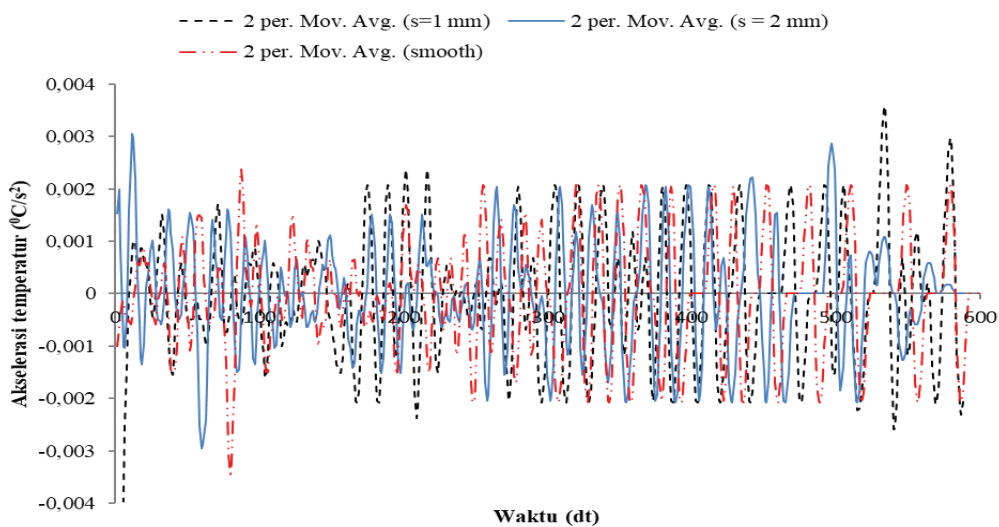




Gambar 11.  
Akselerasi temperatur fluida dingin pada groove 2 mm  
Sumber: Dokumentasi pribadi

Grafik akselerasi temperatur fluida dingin pada masing-masing variabel penelitian tersaji pada gambar 9 s/d 11. Ketiga grafik ini memiliki trend yang sama yaitu secara sinusoidal. Akselerasi temperatur fluida dingin memiliki amplitudo positif maupun negatif. Amplitudo positif menandakan adanya percepatan/akselerasi sesaat sedangkan

amplitudo negatif mengindikasikan adanya perlambatan (deselerasi) sesaat. Akselerasi/deselerasi temperatur juga menandakan adanya peningkatan/penurunan energi fluida secara mikroskopis yang menyebabkan peningkatan gaya fluida. Untuk menentukan yang manakah diantara variabel *smooth annulus*, *groove 1 mm* dan *groove 2 mm* yang lebih berakselerasi maka dibuat gambar 12.



Gambar 12.  
Kompilasi akselerasi temperatur fluida dingin  
Sumber: Dokumentasi pribadi

Gambar 12 merupakan grafik kompilasi akselerasi temperatur fluida dingin. Terlihat dengan jelas bahwa amplitudo akselerasi temperatur pada pipa ber-groove 1 mm dan 2 mm lebih besar dibanding pipa tanpa groove. Sedangkan untuk setiap periode waktu pada groove 1 mm memiliki akselerasi lebih tinggi (positif) dari pada groove 2 mm. Akselerasi temperatur dapat mengindikasikan adanya kemampuan mentransfer energi panas yang lebih besar. Tambahan energi ini digunakan untuk melawan hambatan termal. Berdasarkan data laju temperatur dan akselerasi temperatur terlihat jelas bahwa peningkatan temperatur fluida dingin yang berhubungan dengan jumlah kalor yang diserap fluida dingin pada ruang annulus dengan lebar groove 1 mm lebih baik dibandingkan annulus dengan lebar groove 2 mm.

## SIMPULAN

Studi experimental pada *grooved double pipe heat exchanger* dengan lebar groove 1 mm dan 2 mm diteliti dan dianalisis menggunakan metode gradien dan akselerasi temperatur fluida dingin untuk menjelaskan karakteristik perpindahan panas. Jumlah panas yang diserap fluida dingin pada *smooth annulus*, 1 mm groove dan 2 mm groove berturut-turut adalah 7840,56 J; 8872,21 J; 8666,95 J. Pada *double pipe heat exchanger* dengan lebar groove 1 mm memiliki total perpindahan panas tertinggi yaitu sekitar 2,3 % lebih besar dibandingkan dengan *double pipe heat exchanger* dengan lebar groove 2 mm dan sekitar 13,1 % dibandingkan dengan *double pipe heat exchanger* tanpa groove. Dengan metode gradien dan akselerasi temperatur diperoleh bahwa *double pipe heat exchanger* dengan lebar groove 1 mm memiliki gradien dan akselerasi temperatur yang lebih baik dibandingkan dengan *double pipe heat exchanger* tanpa dan dengan groove 2 mm. Melalui investigasi ini, metode gradien dan akselerasi temperatur dapat digunakan untuk menganalisis karakteristik temperatur fluida dingin dalam proses perpindahan panas.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bali atas Hibah Penelitian

DIPA No. 01636/PL8/LT/2018 sehingga kegiatan ini dapat diselesaikan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adiansyah, J. S. 2011. Pipeline program CDM di Indonesia: Sebuah peluang dan Tantangan untuk Industri Pertambangan. *Jurnal Teknosains*, 1: 7-15.
- Anakottapary, D.S., Wibolo, A., Sunu, P.W. dan Rajendra I M. 2017. Approach temperature of heating process in double tube heat exchanger with  $Al_2O_3$ -water nanofluid. *Advanced Science Letters*, 23: 12094-12097.
- Aroonrat, K., Jumpholkul, C., Leelaprachakul, R., Dalkilic, A.S., Mahian, O. dan Wongwises, S. 2013. Heat transfer and single-phase flow in internally grooved tube. *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 42: 62-68.
- Baloutaki, M. A., Carriveau, R. dan Ting, D. S. K. 2013. Effect of free-stream turbulence on flow characteristics over a transversely-grooved surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51: 56-70.
- Blue Print Pengelolaan Energi Nasional 2005 - 2025. 2005. Jakarta: Badan Koordinasi Energi Nasional.
- Choi, K.S. and Orchard, D.M. 1997. Turbulence management using riblets for heat and momentum transfer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 15: 109-124.
- Gad-el-Hak, M. 1989. Flow control. *Applied Mechanics Review*, 42: 261-293.
- Katoh, K., Choi, K.S. dan Azuma, T. 2000. Heat-transfer enhancement and pressure loss by surface roughness in turbulent channel flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43: 4009-4017.
- Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 0983 K/16/MEM/2004 *Kebijakan Energi Nasional*. 6 Mei 2004. Jakarta: Biro Hukum dan Humas,

- Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Lee S.J, Hee-Chang Lim, Manhee Han dan Seung S. Lee. 2005. Flow control of circular cylinder with a V-grooved micro-riblet film. *Fluid Dynamics Research*, 37: 246–266.
- Liu, J., Xie, G. dan Simon, T. W. 2015. Turbulent flow and heat transfer enhancement in rectangular channels with novel cylindrical grooves. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81: 563–577.
- Peraturan Presiden No. 5 tahun 2006 *Kebijakan Energi Nasional*. Jakarta: LL RI 2006 diundangkan 25 Januari 2006.
- Promvonge, P. 2015. Thermal performance in square-duct heat exchanger with quadruple V-finned twisted tapes. *Applied Thermal Engineering*, 91: 298-307.
- Sunu P.W., Anakottapary D.S. dan Santika W.G. 2016. Temperature approach optimization in the double pipe heat exchanger with groove. *Matec web of conference*, 58 (04006).
- Sunu, P. W. dan Rasta, I M. 2017. Heat transfer enhancement and pressure drop of grooved annulus of double pipe heat exchanger. *Acta Polytechnica*, 57(2): 125–130.
- Sunu, P. W., Arsawan, I M., Anakottapary, D. S., Santosa, I D. M. C. dan Yasa, I K. A. 2017. Experimental studies on grooved double pipe heat exchanger with different groove space. *Journal of Physics: Conference Series*, 953 (012064).
- Sunu, P. W., Rasta, I M., Anakottapary, D. S., Suarta I M. dan Santosa, I D. M. C. 2017. Capillary tube and thermostatic expansion valve comparative analysis in water chiller air conditioning. *Journal of Physics: Conference Series*, 953 (012063).
- Sunu, P. W., Wardana, I N. G., Sonief A. A. dan Hamidi, N. 2014. Flow behavior and friction factor in internally grooved pipe wall. *Advanced Studies in Theoretical Physics*, 8(14): 643-647.
- Sunu, P. W., Wardana, I N. G., Sonief A.A. dan Hamidi, N. 2014. Turbulent Flow Characteristics in Internally Grooved Pipe. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(9): 187-194.
- Sunu, P. W., Wardana, I N. G., Sonief A.A. dan Hamidi, N. 2015. The effect of wall groove numbers on pressure drop in pipe flows. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 42(2): 119 – 130.
- Sunu, P. W., Wardana, I N. G., Sonief, A.A. dan Hamidi, N. 2016. Optimal grooves number for reducing pressure drop. *Contemporary Engineering Sciences*, 9(22): 1067- 1074.
- Sunu, P.W. 2015. The characteristics of increased pressure drop in pipes with grooves. *Advanced Studies in Theoretical Physics*, 9(2): 57–61.
- Sunu, P.W., Anakottapary, D.S., Mulawarman, A. A. N. B., Santosa I D. M. C. dan Negara, I P. S. 2017. Heat transfer characteristics of Fan Coil Unit (FCU) under the effect of chilled water volume flowrate. *Journal of Physics: Conference Series*, 953 (012058).
- Viswanath, P. R. 2002. Aircraft viscous drag reduction using riblets. *Progress in Aerospace Sciences*, 38: 571–600.
- Yu, R., Sommers A. D. dan Okamoto N.C. 2013. Effect of a micro-grooved fin surface design on the air-side thermal-hydraulic performance of a plain fin-and-tube heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 36: 1078-1089.
- Zhao D.Y, Huang Z.P, Wang M.J, Wang T dan Jin Y. 2012. Vacuum Casting Replication of micro riblets on Shark Skin for Drag- Reducing Applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 212: 198 – 202.