

Published Maret 2019

Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi<http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME>**Pengaruh Diameter Lubang Pembangkit Vorteks Winglet Melengkung Terhadap Unjuk Kerja Apk Tipe Kompak Studi Eksperimental****K. Umurani^{*}), Muharnif M.**Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
Jalan Kapten Muchtar Basri No.3 Medan 20238, Indonesia*Email: khairulumurani@umsu.ac.id**ABSTRAK**

Alat Penukar Kalor (APK) tipe kompak yang memiliki unjuk kerja yang optimal, yaitu perpindahan kalor yang maksimal dan penurunan tekanan yang minimal dengan volume konstruksi APK yang kecil dan ringan dengan memvariasikan diameter lubang pembangkit vorteks winglet melengkung berlubang terhadap unjuk kerja apk tipe kompak melalui studi eksperimental sehingga diperoleh penyerapan kalor yang maksimal dan efektifitas APK tipe kompak yang ditunjukkan oleh koefisien perpindahan kalor dan mendapatkan penurunan tekanan total dan koefisien gesek yang terkait dengan desain pembangkit vorteks winglet melengkung berlubang. Model uji terdiri dari 12 pelat aluminium paralel dengan ukuran 300 mm x 300 dan 12 mm jarak antar sirip. Percobaan dilakukan dengan sejumlah pasangan pembangkit vorteks yang memiliki variasi diameter. Eksperimen dilakukan di terowongan angin dimana APK dipanaskan oleh air panas aliran silang (*cross-flow*). Udara yang dialirkan oleh blower, melewati generator vortex terpasang di bagian sirip aluminium. Seluruh data pengujian akan direkam setiap 3 detik dengan Arduino PLX Data Acquisition yang dihubungkan ke Laptop. Dalam penelitian ini sudut serangan dijaga konstan, $\beta = 45$, Dengan variasi diameter lubang pada pembangkit vorteks. Dari hasil pengujian alat penukar kalor terlihat bahwasanya alat-alat yang dibuat berkerja sesuai dengan yang diharapkan Winglet dengan lubang memiliki pengaruh dalam membuat aliran udara menjadi bergolak sehingga meningkatkan penyerapan kalor oleh udara. Pada penelitian ini terlihat bahwa diameter winglet sebesar 6 mm memberikan pengaruh yang baik dalam peningkatan penyerapan kalor dan juga penurunan tekanan yang relatif lebih rendah

Kata Kunci: APK tipe kompak, Arduino, plx daq, vorteks***Effect of Diameter of Curved Winglet Vortex Generating Hole on Apk Performance Compact Type: Experimental Study*****ABSTRACT**

Compact type heat exchanger (APK) that has optimal performance, namely maximum heat transfer and minimal pressure drop with a small and light APK construction volume by varying the diameter of perforated curved winglet vortex generator holes against compact type APK performance through study experimental so as to obtain maximum heat absorption and effectiveness of compact type APKs indicated by heat transfer coefficients and get a decrease in total pressure and friction coefficient associated with the design of perforated curved winglet vortex generators. The test model consists of 12 parallel aluminum plates with a size of 300 mm x 300 and 12 mm spacing between fins. Experiments were carried out with a number of vortex generator pairs that had a variation in diameter. Experiments are carried out in wind tunnels where the APK is heated by cross-flow hot water. The air flowed by the blower, passes through the vortex generator installed in the aluminum fin section. All test data will be recorded every 3

Published Maret 2019

Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi<http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME>

seconds with Arduino PLX Data Acquisition connected to the Laptop. In this study the angle of attack is kept constant, $\beta = 45$, with variations in the diameter of the hole in the vortex generator. From the results of testing the heat exchanger it can be seen that the tools made work in accordance with the expected Winglets with holes have an influence in making the air flow become turbulent thereby increasing the absorption of heat by air. In this study it was seen that a winglet diameter of 6 mm had a good influence in increasing heat absorption and also a relatively lower pressure drop

Keywords: compact type APK, Arduino, plx daq, vortex

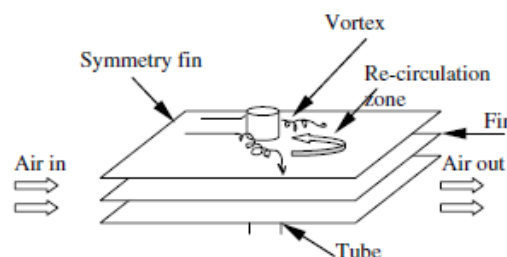
PENDAHULUAN

Alat penukar kalor (APK) tipe kompak (*compact heat exchanger*) banyak digunakan pada alat transportasi darat, laut, udara, industri-industri, alat pendingin, pengkondisian udara dan sebagainya. Dengan meningkatnya kepedulian terhadap kelestarian energi dan lingkungan, banyak usaha-usaha yang telah dilakukan dalam mencari cara meningkatkan desain dan unjuk kerja APK tipe kompak.

Manipulator aliran telah dipakai sebagai usaha peningkatan laju perpindahan panas, yang dikenal sebagai pembangkit vorteks (*vortex generators*). Pembangkit vorteks dikenal sebagai jenis perangkat peningkatan perpindahan panas pasif, pembangkit vorteks (VGs) telah diselidiki secara luas untuk meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi sisi udara. Ketika fluida mengalir melalui pembangkit vorteks akan menghasilkan pemisahan aliran di tepi ujung bidang aliran pembangkit vorteks, menyebabkan pencampuran aliran curah, modifikasi lapisan batas, dan destabilisasi aliran; peningkatan perpindahan panas karena vortisitas. Pola aliran fluida merupakan fungsi dari bilangan Reynolds.

Vorteks

Kecepatan aliran yang relatif besar akan menghasilkan aliran yang tidak laminar melainkan kompleks, lintasan gerak partikel saling tidak teratur antara satu dengan yang lain.



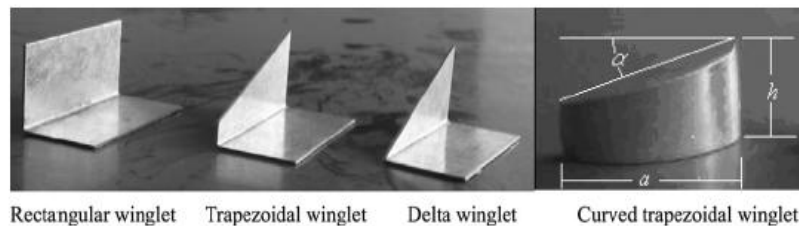
Gambar 1 Karakteristik aliran pada tabung bersirip (sumber: S.M. Pesteei, 2005)

Sehingga didapatkan ciri dari aliran turbulen: tidak adanya keteraturan dalam lintasan fluidanya, aliran bercampur, kecepatan fluida tinggi, panjang skala aliran besar dan viskositasnya rendah. Karakteristik aliran seperti ditunjukkan pada gambar 1, aliran turbulen ditunjukkan oleh terbentuknya pusaran-pusaran dalam aliran, yang menghasilkan pencampuran terus menerus antara partikel partikel fluida di seluruh penampang aliran.

Published Maret 2019

Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi<http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME>**Pembangkit Vorteks**

Pembangkit vorteks seperti pada gambar 2 adalah jenis perangkat peningkatan perpindahan panas pasif yang melekat pada dinding saluran atau permukaan sirip dan menonjol ke dalam aliran pada sudut serangan ke arah aliran. Prinsip dasar pembangkit vorteks adalah untuk mendorong aliran sekunder, terutama vortisitas longitudinal, yang mengganggu atau memotong lapisan batas termal yang berkembang sepanjang dinding dan menghilangkan panas dari dinding ke inti aliran dengan cara turbulensi skala besar (S. Ferrouillat, 2006).



Gambar. 2. Jenis-jenis pembangkit vorteks (sumber: Guobing Zhou, Qiuling Ye, 2012)

Penggunaan pembangkit vorteks dapat meningkatkan perpindahan panas di tepi tabung. Amit Appal dalam penelitiannya memperlihatkan hubungan perpindahan panas (Nu) dan penurunan tekanan (ΔP) meningkat dengan peningkatan ukuran *winglet* dan sudut serang (*angle of attack*) (Amit Appal, N.P.Gulhane, 2014). (Wu dan Tao, 2008) menunjukkan bahwa mekanisme dasar dari peningkatan perpindahan panas dengan pembangkit vorteks adalah peningkatan sinergi antara kecepatan dan gradien suhu fluida. Li-Ting Tiam dkk, 2008 menyatakan bahwasanya penggunaan pembangkit vorteks memanjang (*longitudinal vortex generators*) pada APK tipe kompak dengan kondisi aliran laminar dapat meningkatkan perpindahan kalor dan juga diiringi dengan meningkatnya penurunan tekanan. (Joardar dan Jacobi, 2008) telah melakukan evaluasi secara eksperimental mengenai potensi pembangkit vorteks susunan *winglet* terhadap perpindahan panas sisi udara pada APK tipe kompak pipa besirip polos dengan skala penuh dalam terowongan angin. Dari hasil pengujian menunjukkan koefisien perpindahan panas sisi udara meningkat dari 16,5% menjadi 44% untuk pengaturan *winglet* baris tunggal dengan peningkatan penurunan tekanan kurang dari 12% dan untuk susunan pembangkit vorteks tiga baris koefisien perpindahan panas meningkat dari 29,9% menjadi 68,8% dengan penurunan tekanan dari 26% menjadi 87,5%. Studi eksperimen dan numerik menganalisa unjuk kerja termal-hydraulic dari APK pipa panas bersirip dengan pembangkit vorteks pada konveksi paksa udara, hasil analisa tersebut menunjukkan peningkatan perpindahan panas 37% dan pengurangan biaya operasi fan (Aris dkk, 2011). L.H Tang telah melakukan analisa numerik tentang perbandingan konfigurasi pembangkit vorteks baru yaitu jenis *winglet* common-flow-up persegi panjang dikombinasikan dengan kutup elips dan *winglet* common-flow-up delta dikombinasikan dengan kutup elips, meningkatkan perpindahan panas dalam saluran persegi panjang. Hasil Analisis yang telah dilakukan menunjukkan konfigurasi *winglet* common-flow-up delta dikombinasikan dengan kutup elips memiliki perpindahan panas keseluruhan yang lebih tinggi (L.H. Tang dkk, 2016).

Bilangan Reynold:

$$Re = \frac{\rho u_{rata-rata} D_h}{\mu} \quad (1)$$

Published Maret 2019

Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi<http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME>**Koefisien perpindahan panas konveksi sisi udara**

$$h_{c,m} = \frac{Q}{A_p \Delta T_{lm}} \quad (2)$$

Dimana h adalah koefisien perpindahan panas konveksi dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini:

di mana Q adalah perpindahan panas sisi udara; A_p adalah area perpindahan panas dari plat tembaga dan ΔT_{lm} adalah perbedaan suhu logaritmik rata-rata antara dinding plat tembaga dan udara.

Q dihitung sebagai

$$Q = cp\rho UAc(t_{a,out} - t_{a,in}) \quad (3)$$

di mana U adalah kecepatan rata-rata aliran udara; Ac adalah luas penampang saluran udara; t_a , dan t_a , suhu rata-rata keluar antar bagian udara pada sisi masuk dan sisi keluar bagian tes, masing-masing, yang diukur dengan metode yang dijelaskan dalam bab 3.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(t_{w,m} - t_{a,in}) - (t_{w,m} - t_{a,out})}{\ln \frac{(t_{w,m} - t_{a,in})}{(t_{w,m} - t_{a,out})}} \quad (4)$$

dimana $t_{w,m}$ adalah temperature rata-rata pelat tembaga dihitung dari persamaann

$$t_{w,m} = \frac{\sum_{i=1}^{21} t_{w,i} A_i}{A_p} \quad (5)$$

dimana subscript i menunjukkan unsur perpindahan panas dari saluran udara diuji, yaitu 1, 2., 21 sesuai dengan lokasi termokopel pada pelat tembaga sepanjang arah aliran udara. Dan A_i adalah area setiap elemen perpindahan panas.

Rata-rata jumlah Nusselt, faktor Colburn dan faktor gesekan yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik termal dan aliran saluran udara dan didefinisikan sebagai

$$Num = \frac{h_{c,m} De}{k} \quad (6)$$

$$j = \frac{Num}{Re Pr^{1/3}} \quad (7)$$

$$f = \frac{2\Delta PD}{\rho u^2 L} \quad (8)$$

di mana ΔP adalah penurunan tekanan antara sisi masuk dan keluar dari bagian uji.

Kondisi Aliran laminar

Korelasi Hausen

$$Num = 3,66 + \frac{0,0668(D/L) Re Pr}{1 + 0,04[(D/L) Re Pr]^{2/3}} \quad (14)$$

Sieder dan Tate

$$Num = 1,86(Re Pr)^{1/3} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (15)$$

Published Maret 2019

Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi<http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME>

Korelasi Shah

$$f = \frac{19,072}{Re} \quad (16)$$

untuk perbandingan tinggi dan lebar saluran = 1/6

Kondisi Aliran Turbulen

Korelasi Dittus-Bolter

$$N_{um} = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (17)$$

Korelasi Gnielinski

$$N_{um} = 0,0214(Re^{0,8} - 100) Pr^{0,4} \quad (18)$$

Korelasi Petukhov:

$$f = (1,82 \log_{10} Re - 1,64)^{-2} \quad (19)$$

Korelasi Blasius:

$$f = 0,316 Re^{-0,25} \quad (20)$$

METODE**Rancangan Alat Penelitian**

Rancangan APK yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan atas perhitungan awal secara teoritis dan memilih dimensi yang sesuai dengan variabel yang diharapkan. Untuk hasil perhitungan awal APK dilakukan secara manual dan bantuan software yang dikembangkan untuk menghitung perancangan dan menghitung hasil penelitian. Dimensi utama (data konstruksi) APK tipe kompak yang akan digunakan dapat dilihat pada Tabel 1. Penelitian ini dilaksanakan dilaboratorium *Heat Transfer* program studi teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Tabel 1. Parameter prototipe APK tipe Kompak

Parameter	Simbol	Ukuran
Diameter tabung	D_t	25,5 mm
Panjang tabung	L_t	30 mm
Jumlah tabung	N_t	6 buah
Ketebalan sirip	t_f	1 mm
Jarak antara sirip	P_f	13 mm
Lebar sirip	W_f	300 mm
Panjang sirip	L_f	300 mm
Jumlah Sirip	N_f	12
Jarak memanjang antara tabung	P_L	82,55 mm
Jarak melintang antara tabung	P_T	71,49 mm

Rancangan Pembangkit Vorteks

Pembangkit vorteks yang dipakai dalam penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3 adalah jenis winglet trapesium melengkung dengan variasi diameter yang berlubang. Sepasang pembangkit vortex dipasang vertikal di atas plat aluminium menggunakan silika gel dengan konfigurasi umum aliran-down. Untuk membandingkan kinerja termal pembangkit vorteks yang

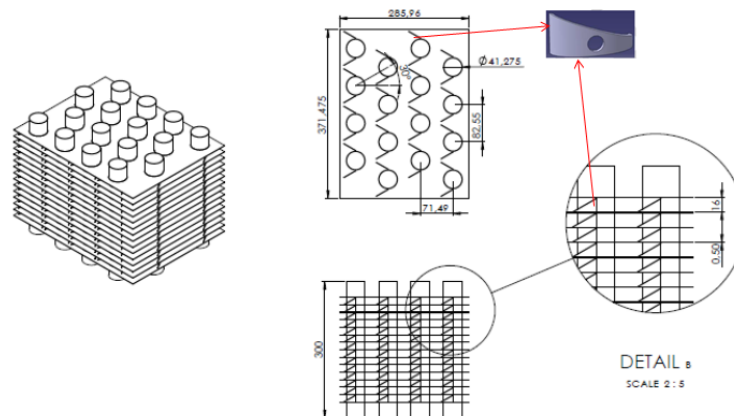
Published Maret 2019

Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi<http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME>

diakibatkan oleh perbedaan diameter lubang pada winglet, tes dilakukan di bawah sudut yang sama serangan ($\beta = 45,0$), dengan ukuran ($S1 = 82,55$ mm) dan penempatan ($S2 = 71,49$ mm) dengan bilangan Reynolds berkisar 2250 hingga 25000 meliputi aliran laminar, daerah transisi dan turbulen.



Gambar 3 Winglet trapasium dengan lubang



Gambar 4. Rancangan APK tipe kompak dan susunan pembangkit vorteks

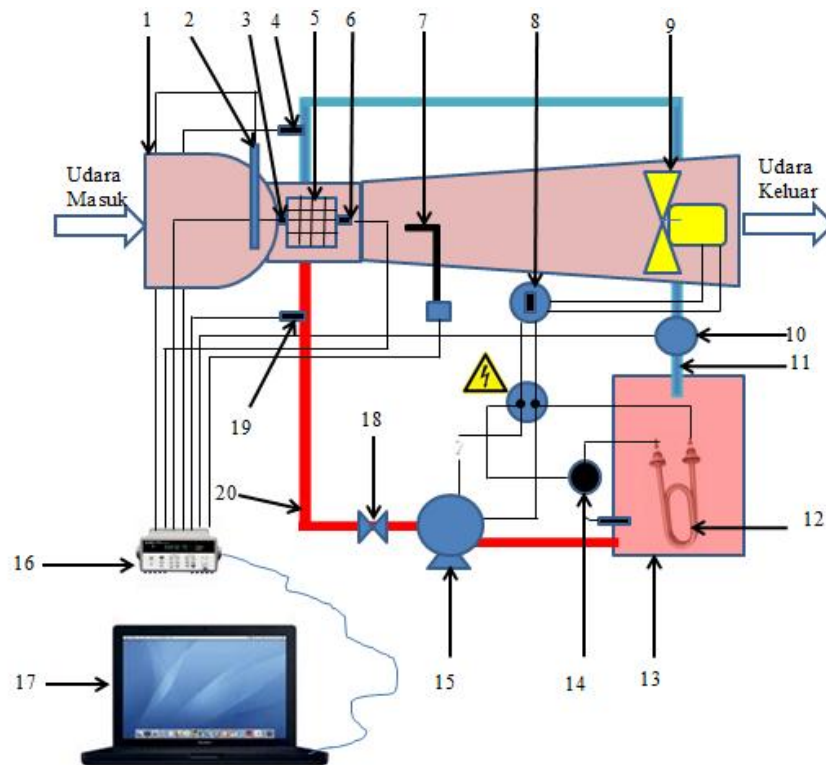
Prosedur pengujian

Setelah temperatur air dalam tangki air panas mencapai temperatur pengujian yaitu sebesar 80 °C kemudian pompa air (4) dihidupkan secara kontinu selama pengujian, demikian juga laju aliran air diatur pada katup (6) dengan memperhatikan flow meter air (7) yang semuanya ada pada Gambar 6. Selama pengujian temperatur air panas di jaga suhunya dengan mengatur suhu pemanas air secara otomatis melalui thermostat (5) pada Gambar 5. Hidupkan kipas sentrifugal, buka katup bypass (1) pada Gambar 6 dengan perlahan-lahan sementara itu anemometer udara diletakan pada titik pengukuran (11) pada Gambar 6 kemudian dibaca untuk menentukan kecepatan aliran udara yang telah ditentukan. Setelah besaran-besaran dari penunjukan alat ukur menjadi stabil, maka pencatatan tersebut dapat dilakukan dan hasilnya diambil sebagai data pengamatan penelitian.

Temperatur air panas masuk, air panas keluar, udara masuk, udara keluar di baca oleh termokopel (13,9,3,12) pada Gambar 6 kemudian hasil pembacaan termokopel tersebut diterjemahkan menjadi data digital oleh panel pembaca termokopel (8) pada Gambar 6. Hasil pembacaan tersebut menjadi data-data penelitian. Pembacaan penurunan tekanan dilakukan dengan melihat selisih ketinggian permukaan air pada manometer pipa U (5) Gambar 6, hasilnya dicatat sebagai data penelitian penurunan tekanan pada tabung.

Setiap kali pengamatan dilakukan, laju aliran air dibuat konstan sebesar 0,206 kg/s serta 6 variasi kecepatan udara yaitu 2,6; 3,1; 3,6; 4,1; 4,6 dan 5,1 m/s untuk setiap diameter winglet masing-masing 2 mm, 4mm, 6mm

Published Maret 2019

Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi<http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME>

Gambar 5 Set-up alat uji

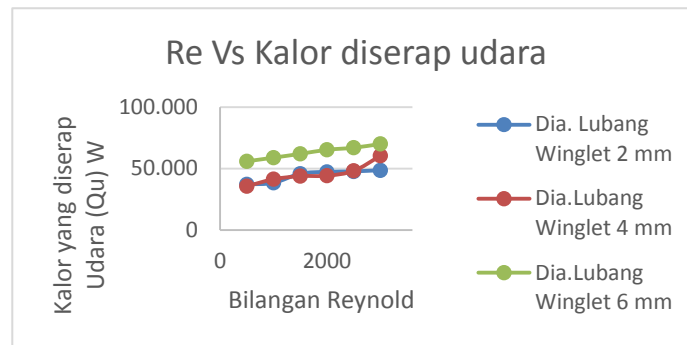
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil pembuatan winglet melengkung dengan diameter lubang 2 mm, 4 mm, 6mm dimulai dengan memotong plat aluminium kemudian dilubangi, kemudian dipasang pada plat. Hasilnya sebagai berikut

Pengaruh diameter lubang winglet terhadap penyerapan kalor

Gambar 6 menunjukkan pengaruh diameter lubang winglet, pada bilangan Reynold yang sama dan jarak pemasangan winglet yang sama tetapi pada diameter winglet yang berbeda akan memberikan dampak penyerapan kalor oleh udara berbeda pula. Hal ini karena terjadinya pola aliran udara pada winglet yang disebabkan diameter winglet. Pada Gambar 6 tersebut terlihat penyerapan kalor yang optimum terjadi pada diameter winglet 6 mm yaitu sebesar 70,166 W, hal ini sesuai menunjukkan bahwa diameter lubang pada winglet mempengaruhi dari penyerapan kalor pada udara. Terlihat juga dari Gambar 6 bahwasanya perilaku seperti itu menunjukkan penggunaan diameter lubang pada pembangkit vorteks menghasilkan vortisitas yang bervariasi. Penggunaan diameter winglet 6 mm ini menghasilkan peningkatan panas yang diserap rerata hingga 40,4% terhadap diameter 4 mm dan 43,7 % terhadap diameter 2 mm. Ini menunjukkan peningkatan penyerapan kalor maksimum terlihat terjadi di wilayah dengan kecepatan rendah

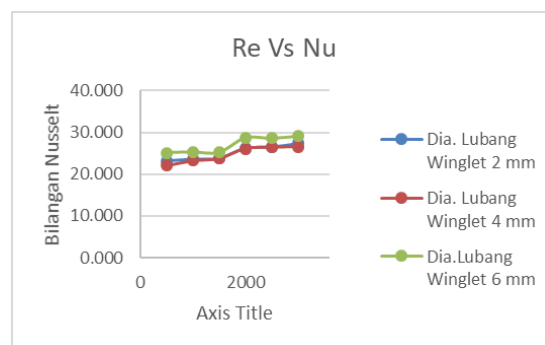
Published Maret 2019

Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi<http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME>

Gambar 6 Profil penyerapan kalor pada variasi diameter winglet

Pengaruh diameter lubang winglet terhadap bilangan Nusselt

Konduktifitas termal fluida dan laju aliran massa memegang peranan penting dalam perpindahan energi konveksi. Bilangan Nusselt merupakan gabungan antara koefisien konveksi, panjang dan konduktivitas termal fluida. Dengan meningkatnya viskositas maka akan meningkatkan bilangan Nusselt. Modifikasi lapisan batas dapat meningkatkan pencampuran massal, dan berpotensi menyebabkan ketidakstabilan aliran, vortisitas menghasilkan efek bersih dari penurunan hambatan termal sisi udara dan peningkatan koefisien perpindahan panas konvektif. Pada Gambar 7 terlihat dengan meningkatnya diameter lubang akan menaikkan bilangan Nusselt. Terlihat pada bilangan Reynold yang sama tetapi diameter winglet yang besar akan menghasilkan bilangan Nusselt yang cenderung meningkat. Pada Gambar 8 terlihat bilangan Nusselt maksimum terjadi pada diameter winglet 6 mm sebesar 29,127. Dengan rerata kenaikan bilangan Nusselt sebesar 9,5% terhadap diameter winglet 4 mm dan 7,55% terhadap diameter winglet 2 mm.

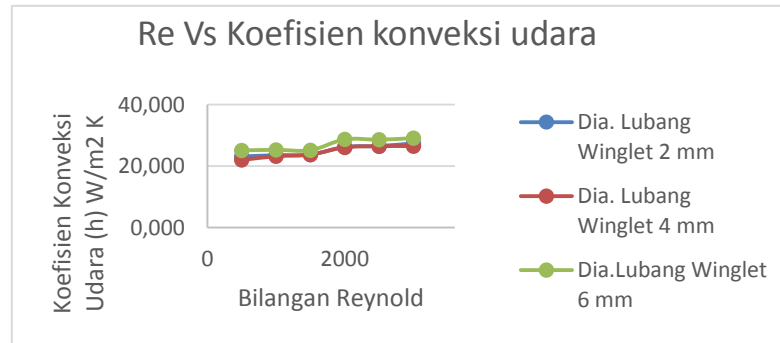


Gambar 7 Profil bilangan Nusselt pada variasi diameter winglet

Pengaruh diameter winglet terhadap koefisien konveksi udara

Pada Gambar 8. menunjukkan Grafik hubungan antara bilangan Reynold dan koefisien perpindahan kalor konveksi. Hal ini terlihat nilai koefisien konveksi akan meningkat seiring dengan meningkatnya bilangan Reynold. Koefisien perpindahan kalor konveksi maksimum terjadi sebesar 34,4 W/m² terjadi pada diameter winglet 6 mm. Dengan rerata kenaikan koefisien konveksi sebesar 9,5% terhadap diameter winglet 4 mm dan 14,4% terhadap diameter winglet 2 mm.

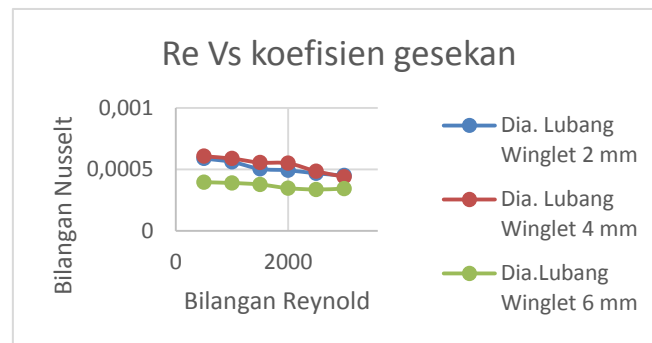
Published Maret 2019

Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi<http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME>

Gambar 8 Profil koefisien konveksi udara pada variasi diameter winglet

Pengaruh diameter winglet terhadap koefisien gesekan

Penurunan tekanan pada sisi hulu menunjukkan variasi kenaikan penurunan tekanan bersesuaian dengan bertambahnya bilangan Reynold pada setiap diameter winglet seperti terlihat pada Gambar 9. Hal ini memberi arti bahwa pertambahan nilai bilangan Reynold mengakibatkan bertambahnya efek kekacauan aliran yang kemudian diikuti kenaikan penurunan tekanan. Dari hasil data penelitian yang telah diolah terlihat hubungan antara bilangan Reynold dan diameter winglet menyebabkan terjadi perubahan pola aliran yaitu aliran konvergen-divergen karena belokan arah aliran. Oleh karena itu terlihat setiap kenaikan kecepatan pada aliran menyebabkan terjadinya penurunan koefisien gesek seperti terlihat pada Gambar 9 koefisien gesekan minimum terjadi pada diameter winglet 6 mm, yaitu sebesar 0,33.



Gambar 9 Profil koefisien konveksi udara pada variasi diameter winglet

KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan maka peralatan pengujian alat penukar kalor telah dapat digunakan sebagai alat uji dapat disimpulkan.

1. Winglet dengan lubang memiliki pengaruh dalam membuat aliran udara menjadi bergolak sehingga meningkatkan penyerapan kalor oleh udara.
2. Pada penelitian ini terlihat bahwa diameter winglet sebesar 6 mm memberikan pengaruh yang baik dalam peningkatan penyerapan kalor dan juga penurunan tekanan yang relatif lebih rendah

Published Maret 2019

Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi

<http://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME>

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Rektor UMSU melalui L2PM UMSU yang telah membiayai penelitian ini sampai selesai dengan nomor kontrak 031/II.3-AU/UMSU-LP2M/C/2018

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Amit Arora, PMV Subbarao, R.S. Agarwal ,2015, Development of parametric space for the vortex generator location for improving thermal compactness of an existing inline fin and tube heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, Volume 98, Pages 727-742
- [2] Amit Appal, Dr.N.P.Gulhane, 2014, CFD analysis of fin tube heat exchanger using rectangular winglet vortex generator *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*, 8(5), pp. 450-457
- [3] Daniel Jonas Dezan, Leandro Oliveira Salviano and Jurandir Itizo Yanagihara, 2015, Interaction Effects Between Parameters In A Flat-Tube Louvered Fin Compact Heat Exchanger With Delta-Winglets Vortex Generators, *Applied Thermal Engineering*
- [4] Erling Næss,2010, Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in serrated-fin tube bundleswith staggered tube layouts, *Applied ThermalEngineering*30, 1531-1537
- [5] Guobing Zhou, Qiuling Ye, 2012, Investigations of thermal and flow characteristics of curved trapezoidal winglet type vortex generators, *Applied Thermal Engineering* 37, 241-248
- [6] J.M. Wu, W.Q. Tao, 2008, Numerical study on laminar convection heat transfer in a rectangular channel with longitudinal vortex generator. Part A, verification of field synergy principle, *Int. J. Heat Mass Transfer* 51, 1179-1191
- [7] L.H. Tang, W.X. Chu, N. Ahmed, M. Zeng, 2016, A new configuration of winglet longitudinal vortex generator to enhance heat transfer in a rectangular channel, *Applied Thermal Engineering*, Volume 104, Pages 74-84
- [8] Li-Ting Tian, Ya-Ling He, Wen-Quan Tao, 2009, Numerical Study of fluid flow and heattransfer in a flat-plate channel with longitudinal vortex generators by applying field synergy principle analysis, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36, pp 111-120.
- [9] M.S. Aris, R. McGlen, I. Owen, C.J. Sutcliffe, 2011, An experimental investigation into the deployment of 3-D, finned wing and shape memory alloy vortex generators in a forced air convection heat pipe fin stack, *Appl. Therm. Eng.* 31, 2230-2240
- [10] Pongjet Promvong , Supattarachai Suwannapan, Monsak Pimsarn, Chinaruk Thianpong, , 2014, Experimental study on heat transfer in square duct with combined 2 twisted-tape and winglet vortex generators, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 59, Pages 158-165
- [11] S. Ferrouillat, P. Tochon, C. Garnier, H. Peerhossaini,2006, Intensification of Heat Transfer and mixing in multifunctional heat exchangers by artificially generated streamwise vorticity, *Applied Thermal Engineering* 26 (16) 1820-1829.
- [12] S.M. Pestei, P.M.V. Subbarao, R.S. Agarwal, 2005, Experimental study of the effect of winglet locationon heat transfer enhancement and pressure drop in fin-tube heat exchangers, *Applied Thermal Engineering* 25 (2005) 1684–1696
- [13] Sohankar A, 2007, Heat transfer augmentation in a rectangular channel with a vee-shaped vortex generator. *Int J Heat Fluid Flow* 28, 306–317. of winglet locationon heat transfer enhancement and pressure drop in fin-tube heat exchangers, *Applied Thermal Engineering* 25 1684–1696
- [14] Ya-Ling He, Pan Chu, Wen-Quan Tao , Yu-Wen Zhang , Tao Xie, 2012, Analysis of heat transfer and pressure drop for fin-and-tube heat exchangers with rectangular winglet-type vortex generators, *Applied Thermal Engineering* 1-14.