

PERFORMA TERMAL DAN HIDROLIK ALIRAN UDARA MELALUI VORTEX GENERATOR BER-LUBANG TIPE CONCAVE RECTANGULAR WINGLET DI DALAM SALURAN PERSEGIEMPAT: STUDI EKSPERIMEN

Syaiful

Dosen
Teknik Mesin Universitas Diponegoro
syaiful.undip2011@gmail.com

Ahmadi Syarif H. D

Mahasiswa S1
Teknik Mesin Universitas Diponegoro
ahmadi.syarif.17@gmail.com

Bambang Yudianto

Tenaga Pengajar (Dosen)
Teknik Mesin Universitas Diponegoro
byunianto20@gmail.com

Nazaruddin Sinaga

Dosen
Teknik Mesin Universitas Diponegoro
nsinaga.ccfed@gmail.com

Fin and tube heat exchangers use gas as a cooling/heating medium on the fin side. The low thermal conductivity of gases results in high thermal resistance, which results in a low rate of heat transfer. Therefore, the researchers sought to reduce thermal resistance on the fin side. This study aims to increase heat transfer by reducing thermal resistance using a longitudinal vortex generator. However, the use of vortex generators will increase the pressure drop. Perforated vortex generators were investigated in this study to overcome this problem. Concave rectangular winglet vortex generator at an angle of attack of 30° with variations of without hole, one, two, and three holes were studied. In this experiment, the number of pairs of vortex generators was varied from one to three pairs. A plate on which the vortex generator is mounted is heated at a heat rate of 35 W. Air enters the channel through the straightener at variations in the velocity of 0.4 m/s to 2 m/s at intervals of 0.2 m/s. The results showed that the value of the convection heat transfer coefficient for the use of perforated concave rectangular winglet vortex generators was 85.4% higher than the baseline. This value is 13.7% higher than the use of perforated rectangular winglet vortex generators. Whereas the value of pressure drop for the use of perforated concave rectangular winglet vortex generators is five times higher than that of the baseline. This value is 104.9% higher than the use of perforated rectangular winglet vortex generators.

Keywords: Concave Rectangular Winglet Vortex Generator, Koefisien Perpindahan Panas Konveksi, Pressure Drop.

1. PENDAHULUAN

Penukar kalor jenis fin and tube merupakan salah satu jenis compact heat exchanger yang memiliki kemampuan untuk memindahkan panas antar dua fluida dalam jumlah besar dengan menggunakan volume yang kecil. Penukar kalor jenis fin-and-tube banyak digunakan pada refrigerasi dan pengondisian udara, pembangkit listrik, dan industri kimia. Umumnya, fin-and-tube menggunakan gas pada sisi fin sebagai media penukar kalor [1]. Lebih dari 75% dari total hambatan termal fin-and-tube heat exchanger berada pada sisi gas karena udara memiliki konduktivitas termal yang rendah berakibat pada rendahnya laju perpindahan panas [2, 3]. Oleh karena itu, laju perpindahan panas pada sisi fin perlu ditingkatkan.

Sejak tahun 1960-an, banyak peneliti yang telah mempelajari metode peningkatkan laju perpindahan panas. Salah satu metode untuk meningkatkan laju perpindahan panas pada sisi fin penukar kalor fin-and-tube adalah memperluas permukaan kontak perpindahan panas. Akan tetapi, ruang yang tersedia adalah terbatas. Cara lain untuk meningkatkan perpindahan panas pada sisi fin adalah peningkatan koefisien perpindahan panas konveksi. Peningkatan koefisien perpindahan panas konveksi dapat dilakukan dengan metode aktif dan metode

pasif [4]. Metode aktif membutuhkan energi eksternal seperti medan listrik, surface vibration, dan lainnya. Sedangkan metode pasif tidak memerlukan energi eksternal, namun memerlukan modifikasi pada permukaan perpindahan panas sehingga penggunaannya lebih ekonomis dan efisien. Modifikasi pada permukaan dapat menggunakan vortex generator yang bertujuan untuk menimbulkan vortisitas di dalam aliran utama. Vortisitas yang terbentuk meningkatkan pencampuran fluida berakibat pada peningkatan laju perpindahan panas.

Ada empat konfigurasi dasar dari vortex generator, yaitu: delta wing, rengtangular wing, delta winglet, dan rectangular winglet [5, 6]. Berdasarkan sumbu vortex terhadap arah aliran utama, vortex dibagi menjadi longitudinal vortex dan transverse vortex. Vortex generator tipe wing menghasilkan transverse vortex dan winglet menghasilkan longitudinal vortex. Transverse vortex memiliki sumbu melintang atau tegak lurus terhadap arah aliran utama dan konsisten dengan aliran dua dimensi. Sedangkan longitudinal vortex memiliki sumbu yang sejajar terhadap aliran utama dan membentuk aliran tiga dimensi. Longitudinal vortex mampu meningkatkan perpindahan panas yang lebih efektif dibandingkan dengan transverse vortex [6]. Longitudinal vortex mengganggu atau memotong perkembangan thermal boundary layer sepanjang dinding dan membawa panas dari dinding ke aliran freestream [7]. Vortex generator dapat mengganggu perkembangan lapisan batas, menghasilkan longitudinal vortex, dan mempercepat pertukaran fluida dengan suhu yang berbeda, sehingga perpindahan panas antara fluida dan dinding meningkat [1].

Li Li dkk [8] meneliti secara numerik perpindahan panas dan pressure drop pada penukar kalor jenis fin and tube menggunakan vortex generator. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa peningkatan perpindahan panas dengan menggunakan rectangular winglet adalah lebih baik dari pada delta winglet. Mohammad Oneissi dkk [9] melakukan simulasi numerik menggunakan delta winglet pair dan inclined projected winglet pair pada plate-fin heat exchanger. Tujuan dari penelitian tersebut adalah untuk dapat menurunkan pressure drop dan meningkatkan performa perpindahan panas. Hasilnya menunjukkan bahwa inclined projected winglet pair memiliki kemampuan lebih baik dalam peningkatan laju perpindahan panas sebesar 6% dari delta winglet pair.

L. H. Tang dkk [10] melakukan studi secara numerik dengan menggunakan rectangular winglet pairs dan delta winglet pairs dengan konfigurasi common flow up, common flow down, dan common flow up dengan memberi tambahan elliptical pole. Hasil pengujian mereka menunjukkan bahwa rectangular winglet pairs dengan elliptical pole memiliki nilai peningkatan perpindahan panas tertinggi. Namun, berdasarkan nilai JF factor, delta winglet pairs-common flow up dengan elliptical pole adalah vortex generator paling efektif. Anupam Sinha dkk. [11] melakukan pengujian secara numerik aliran udara pada fin-and-tube heat exchanger menggunakan rectangular winglet pairs setengah tinggi channel sebagai vortex generator. Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas dengan menggunakan variasi susunan tiga baris tube (inline dan staggered) dan variasi sudut serang vortex generator. Dari hasil pengujian mereka didapati bahwa performa termal susunan tube inline adalah lebih baik daripada susunan staggered. Kemudian, performa heat exchanger meningkat dengan bertambah besarnya sudut serang.

Selanjutnya, Agung Tri Wijayanta dkk. [12] melakukan pengujian eksperimental peningkatan perpindahan panas menggunakan punched delta winglet vortex generator (PDWVGs) dengan variasi sudut serang. Hasil eksperimen mereka menunjukkan bahwa penggunaan punched delta winglet vortex generator (PDWVGs) dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas pada tube disertai dengan peningkatan pressure drop. Qiang Zhang dkk. [13] meneliti secara numerik mekanisme peningkatan perpindahan panas menggunakan longitudinal vortex generators pada saluran aliran laminar dengan temperatur dinding yang seragam. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa terjadi peningkatan heat flux yang berbeda antara permukaan atas dan permukaan bawah serta terjadi peningkatan perpindahan panas yang disebabkan oleh longitudinal vortex.

Yonggang Lei dkk. [14] melakukan simulasi numerik performa termal pada circular tube dengan menggunakan delta winglet vortex generator. Hasil simulasi numerik mereka mengamati bahwa penggunaan delta winglet vortex generator menimbulkan terjadinya swirling motion sehingga dapat menipiskan lapisan batas kecepatan dan meningkatkan pencampuran aliran pada circular tube berakibat pada terjadinya peningkatan perpindahan panas diiringi dengan peningkatan pressure drop. Y. Xu dkk. [15] melakukan analisa numerik performa termal pada circular pipe menggunakan delta winglet vortex generator. Empat vortex generator dipasang di dalam circular pipe dengan melakukan variasi pada sudut serang dan rasio blockage. Hasil analisa numerik mereka menunjukkan bahwa pada sudut serang 30° dengan rasio blockage 0.1, kinerja termal meningkat. Ting Ma dkk. [16] melakukan studi secara numerik tentang pengaruh longitudinal vortex generator (LVG) pada thermoelectric power generator (TEG) dengan plate-fin heat exchanger. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa laju perpindahan panas adalah meningkat dibandingkan tanpa longitudinal vortex generator.

Kemudian, Uddip Kashyap dkk. [17] meneliti secara numerik dampak modifikasi bentuk permukaan pada

rectangular vortex generator terhadap laju perpindahan panas. Dari hasil numerik mereka dapat disimpulkan bahwa modifikasi permukaan menggunakan multiple concave dan single convex mampu memperkuat inti vortex sehingga dapat meningkatkan laju perpindahan panas. Mohammad Samadifar dan Davood Toghraie [18] meneliti secara numerik peningkatan perpindahan panas pada plate-fin heat exchanger menggunakan 6 macam vortex generator tipe winglet, yaitu: simple rectangular vortex generator (SRW), rectangular trapezius vortex generator (RTW), angular rectangular vortex generator (ARW), wishbone vortex generators (WW), intended vortex generator (IVG) and wavy vortex generator (WVG) pada saluran segitiga. Hasil studi numerik mereka menunjukkan bahwa SRW memiliki nilai peningkatan perpindahan panas tertinggi terhadap plate-fin heat exchanger. Penambahan tinggi vortex generator meningkatkan efek perpindahan panas. Zhimmin Han dkk. [19] melakukan penelitian secara numerik efek ukuran dan posisi lubang pada rectangular vortex generator sudut serang 90° terhadap karakteristik perpindahan panas dan pressure drop. Hasil analisa dari nilai Colburn factor (j), friction factor (f), dan thermohydraulic performance factor $PEC = j/(f)^{1/3}$ menunjukkan bahwa ukuran diameter lubang 5 mm merupakan diameter yang optimal. Syaiful dkk. [20] melakukan studi secara numerik dengan menggunakan vortex generator jenis delta winglet pair (DWP) dan concave delta winglet pair (CDWP). Variasi yang digunakan adalah jumlah baris vortex generator dan kecepatan aliran udara masuk. Hasil pengujian menunjukkan bahwa performa termal pada kasus CDWP adalah lebih baik dibandingkan dengan DWP. Hal ini dikarenakan CDWP menghasilkan longitudinal vortex yang lebih kuat akibat adanya ketidakstabilan gayasentrifugal ketika fluida mengalir melalui dinding cekung. Dari hasil investigasi numerik ini didapati bahwa performa termal meningkat dengan bertambahnya jumlah baris vortex generator.

Performa termal pada kasus concave rectangular winglet pair CRWP adalah lebih baik daripada rectangular winglet pair RWP menurut penelitian Syaiful dkk [21]. Performa termal meningkat diikuti dengan peningkatan jumlah baris pada kasus CRWP dengan variasi sudut serang 15° - 45° [22]. Namun, peningkatan laju perpindahan panas disertai dengan peningkatan pressure drop. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mereduksi pressure drop pada penggunaan vortex generator tanpa menurunkan laju perpindahan panas. Untuk mencapai tujuan ini, vortex generator jenis RWP dan CRWP berlubang diteliti. Variasi kecepatan udara masuk, jumlah baris vortex generator, dan jumlah lubang pada vortex generator diperhatikan. Sudut serang pada pengujian ini ditetapkan 30° .

2. BAHAN DAN EKSPERIMEN

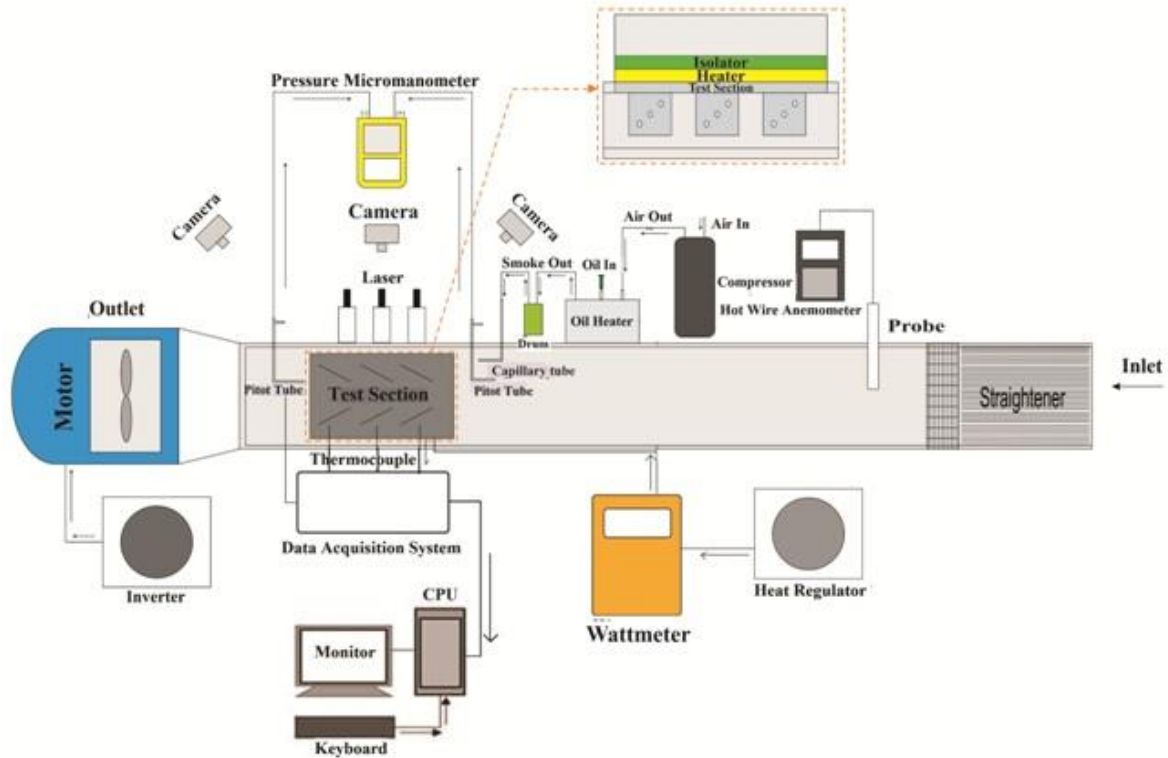
2.1 Perlengkapan dan Prosedur Pengujian

Eksperimen dilakukan di Laboratorium Termofluida Teknik Mesin Universitas Diponegoro dengan skema alat pengujian ditunjukkan pada Gambar 1. Saluran segi empat ini memiliki panjang 370 cm, tinggi 18 cm, dan lebar 8 cm yang terbuat dari kaca dengan ketebalan 1 cm. Sebuah blower (Wipro) ditempatkan pada ujung lainnya untuk menghisap udara. Besarnya kecepatan aliran udara masuk yang diinginkan ditentukan dengan mengatur inverter (Mitsubishi Electric tipe FR-D700 dengan ketelitian ± 0.01). Udara mengalir melewati straightener yang terdiri dari susunan pipa aluminium dengan diameter 5 mm yang panjangnya 290 mm dan wiremesh untuk menyeragamkan aliran. Sebuah hot wire anemometer (Lutron tipe AM-4204 dengan ketelitian ± 0.1) ditempatkan 27 cm di belakang straightener untuk mengukur kecepatan udara masuk di dalam saluran. Kecepatan aliran udara masuk divariasikan dari 0.4 m/det hingga 2.0 m/det dengan interval 0.2 m/det. Kemudian udara mengalir melewati spesimen uji pada test section. Spesimen uji terbuat dari lembaran aluminium yang dilengkapi dengan dan tanpa vortex generator (baseline) ditempelkan pada heater menggunakan thermal paste.

Pada studi ini, pengujian performa termal, hidrodinamik, dan visualisasi aliran dilakukan secara terpisah. Untuk pengujian performa termal, beberapa termokopel (tipe K dengan rentang suhu -200°C - 1250°C) digunakan untuk mengukur temperatur udara masuk, udara keluar, dan spesimen uji. Termokopel dihubungkan dengan data acquisition (Advantech tipe USB-4718 dengan ketelitian ± 0.001) yang terhubung dengan CPU sehingga temperatur dapat dimonitor dan disimpan. Kemudian, spesimen uji dipanaskan pada laju panas konstan 35 W hingga temperatur steady 54°C - 55°C dicapai. Laju panas pada heater diatur menggunakan heater regulator yang dihubungkan dengan wattmeter (Lutron DW-6060 dengan ketelitian ± 1.0) untuk memonitor laju panas yang diinduksikan ke dalam plat. Heater diisolasi menggunakan isolator pada salah satu sisinya sehingga panas ditransfer hanya ke salah satu sisi dimana vortex generator dipasang. Selanjutnya, hasil pengukuran temperatur dengan variasi kecepatan aliran masuk direkam dan disimpan di dalam CPU.

Pressure micromanometer (Fluke tipe 922 dengan ketelitian ± 0.05) digunakan untuk mengukur pressure drop pada uji hidrodinamik aliran. Dua tabung pitot masing-masing diletakkan 26 cm di depan inlet dan 2.5 cm di belakang outlet dari test section. Kedua tabung pitot tersebut dihubungkan dengan micromanometer untuk memonitor pressure drop. Hasil pengukuran pressure drop yang terbaca ketika udara dialirkan dengan variasi kecepatan dicatat setiap 5 detik.

Uji visualisasi aliran dilakukan untuk mengamati struktur longitudinal vortex dengan mengalirkan asap yang dihasilkan dari penguapan oli di dalam oil heater ke dalam aliran utama. Sebuah compressor digunakan untuk memompa asap di dalam oil heater melewati capillary tube masuk ke dalam aliran di dalam saluran segi empat. Ketika aliran melewati vortex generator, longitudinal vortex dibangkitkan di belakang vortex generator. Longitudinal vortex dua dimensi teramati pada bidang melintang yang dihasilkan dari pendaran sinar laser yang menumbuk silinder pejal transparan. Digital kamera digunakan untuk merekam struktur aliran di daerah uji.

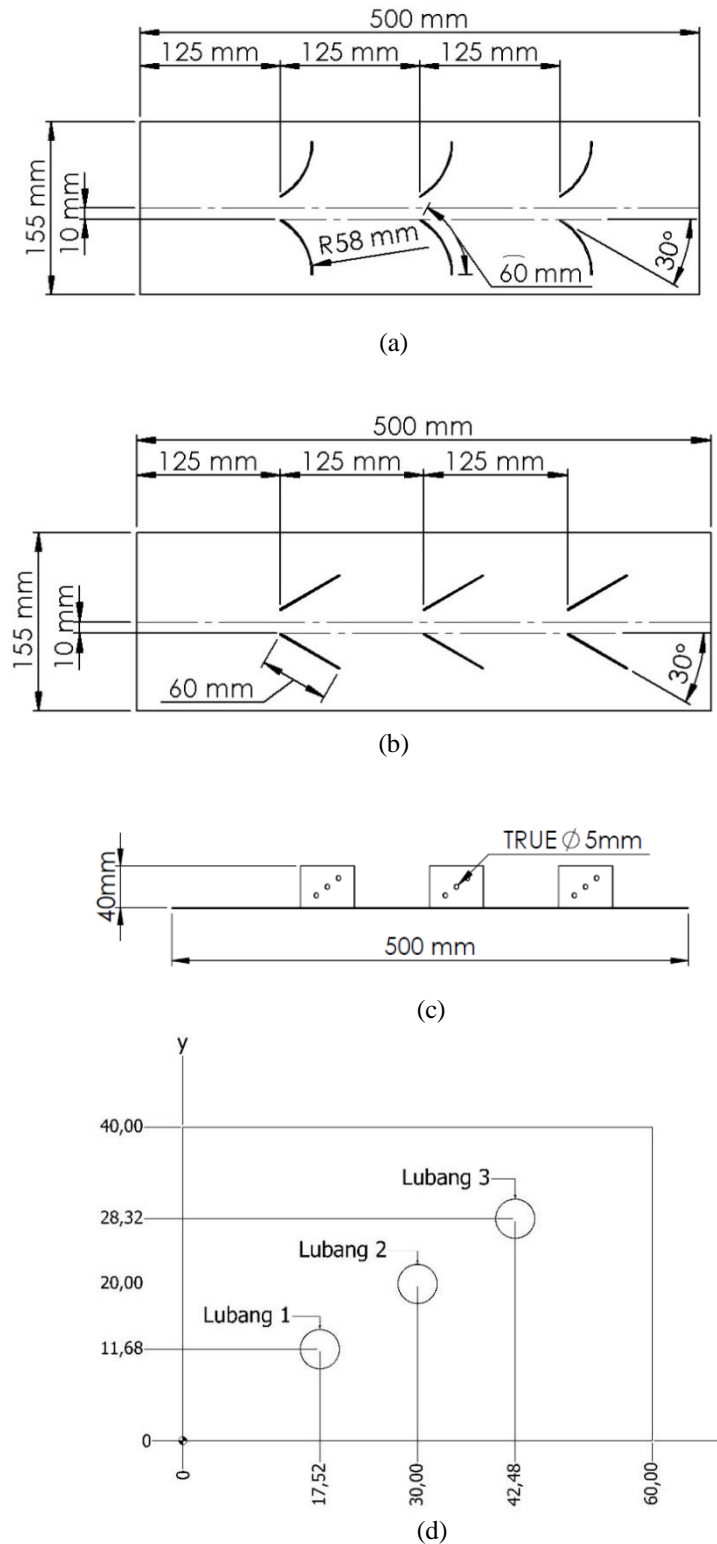


Gambar 1: Set up eksperimen

2.2 Spesimen Uji

Spesimen uji yang digunakan pada penelitian ini adalah plat aluminium dengan tebal 1 mm, panjang 500 mm, dan lebar 155 mm. Plain dan concave rectangular winglet pair vortex generators (berturut-turut RWP VGs dan CRWP VGs) dipasang pada plat uji. Dengan konfigurasi commom flow down (CFD), jarak antar leading edge pada vortex generator ditentukan 20 mm. Sementara itu, sudut serang ditentukan 30° dari arah aliran utamanya. Geometri dari spesimen uji dapat dilihat pada Gambar 2.

Pada variasi jumlah baris vortex generator, pengujian dilakukan untuk satu, dua serta tiga pasang RWP VGs dan CRWP VGs yang disusun secara inline (sejajar). Jarak antar leading edge antar satu pasang vortex generators dengan satu pasang vortex generator lainnya ditentukan 125 mm. Geometri tampak atas dari spesimen uji dapat dilihat pada Gambar 2(a) untuk RWP VGs dan Gambar 2(b) untuk CRWP VGs. Gambar 2 (c) menunjukkan geometri tampak samping spesimen uji. Dari gambar tersebut teramati bahwa vortex generator memiliki tinggi 40 mm dengan diameter lubang 5 mm. Pada variasi lubang, pengujian dilakukan untuk vortex generator dengan tiga lubang dan tanpa lubang. Posisi lubang dapat dilihat pada Gambar 2 (d).



Gambar 2: (a) Tampak atas rectangular winglet pair vortex generators, (b) tampak atas concave rectangular winglet pair vortex generators, (c) tampak samping vortex generator tiga lubang, dan (d) posisi lubang pada vortex generator

Gambar 3 merupakan contoh dari spesimen uji yang dilengkapi dengan vortex generator tiga lubang dandivariasikan pada satu, dua, dan tiga baris. Jumlah spesimen uji adalah 25, yaitu satu baseline, 12 variasi RWP VGs dan 12 variasi CRWP VGs. Secara umum, vortex generator ini divariasikan dalam tiga dan tanpa lubang untuk tiap satu, dua, dan tiga baris.



Gambar 3: Spesimen uji: (a) rectangular winglet pair vortex generators(RWP VGs) dan (b) concave rectangular winglet pair vortex generators(CRWP VGs)

Persamaan yang digunakan untuk menghitung koefisien perpindahan panas konveksi (h) mengacu pada penelitian Wu & Tao [23]. Nilai koefisien perpindahan panas konveksi dapat dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$h = \frac{\overline{Nu}k}{2H} \quad (1)$$

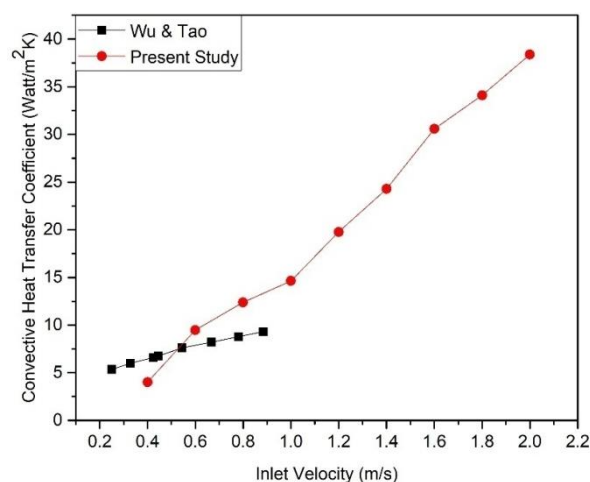
dimana \overline{Nu} , k , dan H berturut-turut merupakan bilangan Nusselt, konduktivitas termal, dan tinggi penampang saluran. Nilai bilangan Nusselt dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2).

$$\overline{Nu} = \frac{Q}{A \cdot (T_w - T_{mb})} \cdot \frac{2H}{k} \quad (2)$$

dimana Q diperoleh dari: $Q = \dot{m}c_p(\overline{T}_{out} - \overline{T}_{in})$. A adalah luas area plat spesimen uji, T_w adalah temperatur rata-rata permukaan plat spesimen uji dan T_{mb} adalah temperatur bulk fluida ($T_{mb} = (\overline{T}_{in} + \overline{T}_{out})/2$).

2.3 Verifikasi

Verifikasi dilakukan untuk memastikan eksperimen dilakukan dengan benar. Oleh karena itu, data hasil eksperimen pada kasus baseline dibandingkan dengan data hasil eksperimen dari Wu & Tao[23]. Verifikasi dilakukan dengan menentukan nilai koefisien perpindahan panas konveksi pada kasus *baseline* dari studi saat ini dan eksperimen Wu & Tao seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



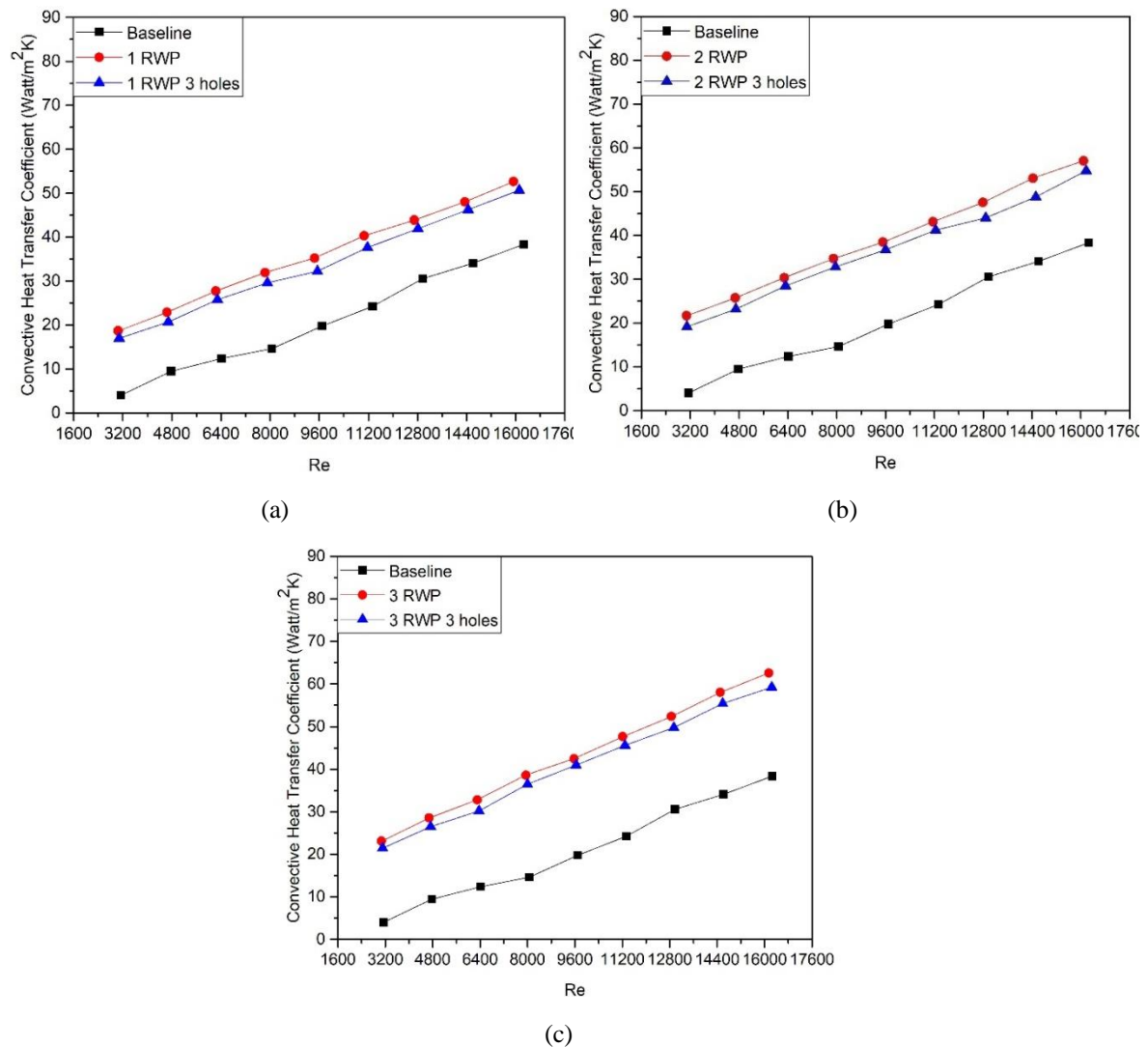
Gambar 4: Perbandingan hasil pengujian studi saat ini dengan hasil Wu dan Tao [24].

Dari Gambar 4 didapati bahwa kedua hasil eksperimen tersebut memperlihatkan kecenderungan yang sama. Namun, data hasil pengujian baseline pada penelitian ini menunjukkan nilai yang lebih besar daripada data hasil eksperimen Wu & Tao. Hal tersebut dikarenakan salah satu sisi heater untuk eksperimen ini diisolasi sehingga panas ditransfer hanya ke sisi yang terpasang vortex generator sedangkan heater pada eksperimen Wu & Tao tidak diisolasi sehingga panas menyebar di kedua sisi.

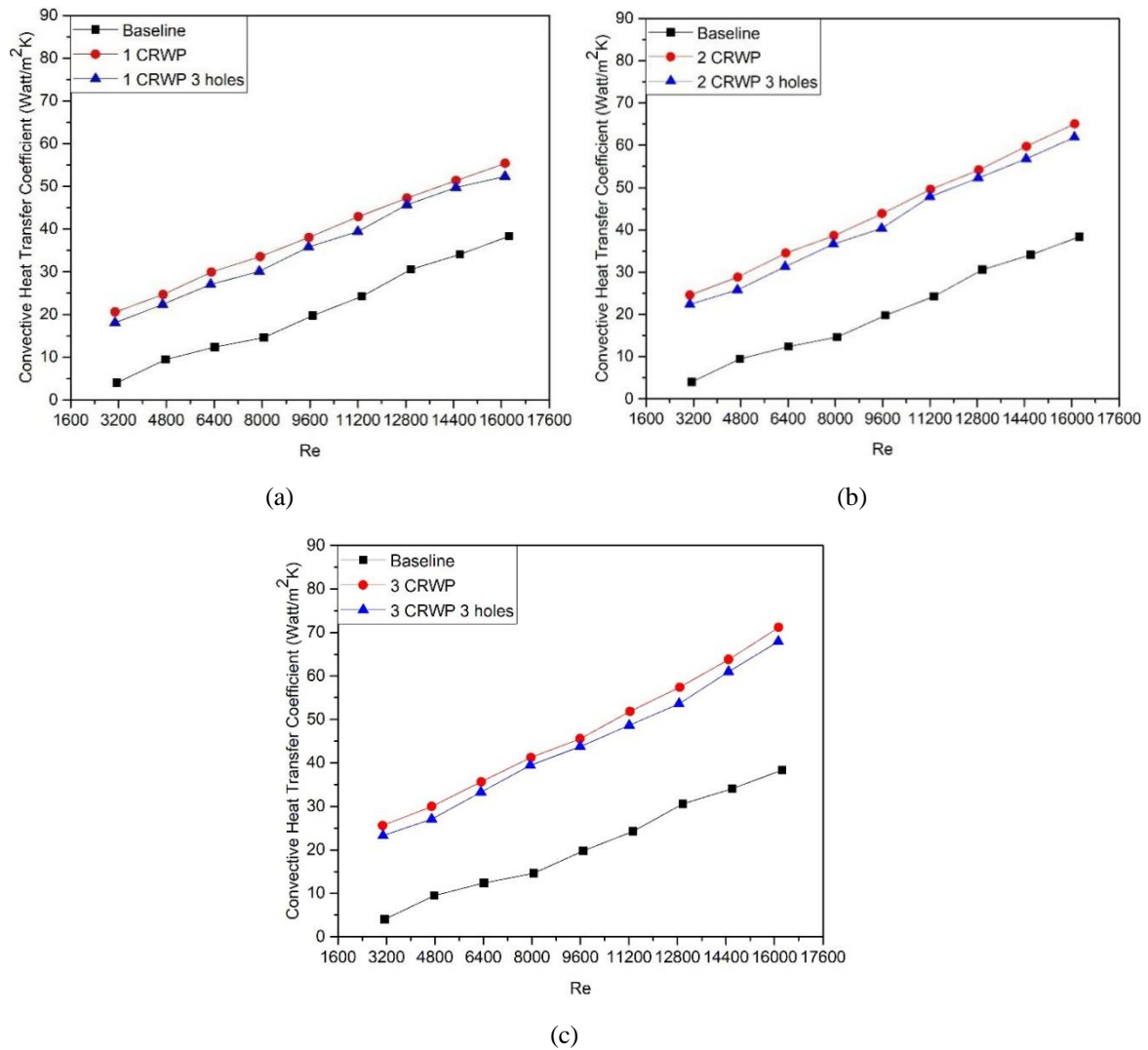
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Efek Vortex Generator terhadap Perpindahan Panas

Uji eksperimen vortex generator berlubang dengan variasi kecepatan udara, dan jumlah baris telah dilakukan. Gambar 5 dan 6 menunjukkan koefisien perpindahan panas konveksi pada berbagai variasi kecepatan aliran untuk kasus berturut-turut RWP dan CRWP vortex generator dengan/tanpa lubang. Dari kedua gambar tersebut teramati bahwa penggunaan RWP VGs dan CRWP VGs mampu meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi oleh karena adanya longitudinal vortex yang dibangkitkan oleh vortex generator. Penambahan jumlah baris vortex generator pada spesimen uji terbukti dapat mempertinggi koefisien perpindahan panas konveksi [6]. Hal ini diakibatkan oleh penguatan longitudinal vortex yang diproduksi oleh vortex generator berikutnya. Hal ini berakibat pada semakin kuatnya longitudinal vortex, sehingga pencampuran fluida panas dan dingin menjadi lebih baik yang pada akhirnya mempertinggi koefisien perpindahan panas konveksi [20]. Namun, lubang pada vortex generator sedikit menurunkan koefisien perpindahan panas konveksi. Hal ini terjadi karena longitudinal vortex terganggu oleh pengaruh jet dari lubang pada vortex generator [7, 19].



Gambar 5: Perbandingan koefisien perpindahan panas konveksi pada rectangular winglet pair vortex generators (RWP VGs) dengan variasi bilangan Reynolds dan jumlah baris yaitu (a) satu baris, (b) dua baris, dan (c) tiga baris



Gambar 6: Perbandingan koefisien perpindahan panas konveksi pada concave rectangular winget pair vortex generators (CRWP VGs) dengan variasi bilangan Reynolds dan jumlah baris yaitu (a) satu baris, (b) dua baris, dan (c) tiga baris

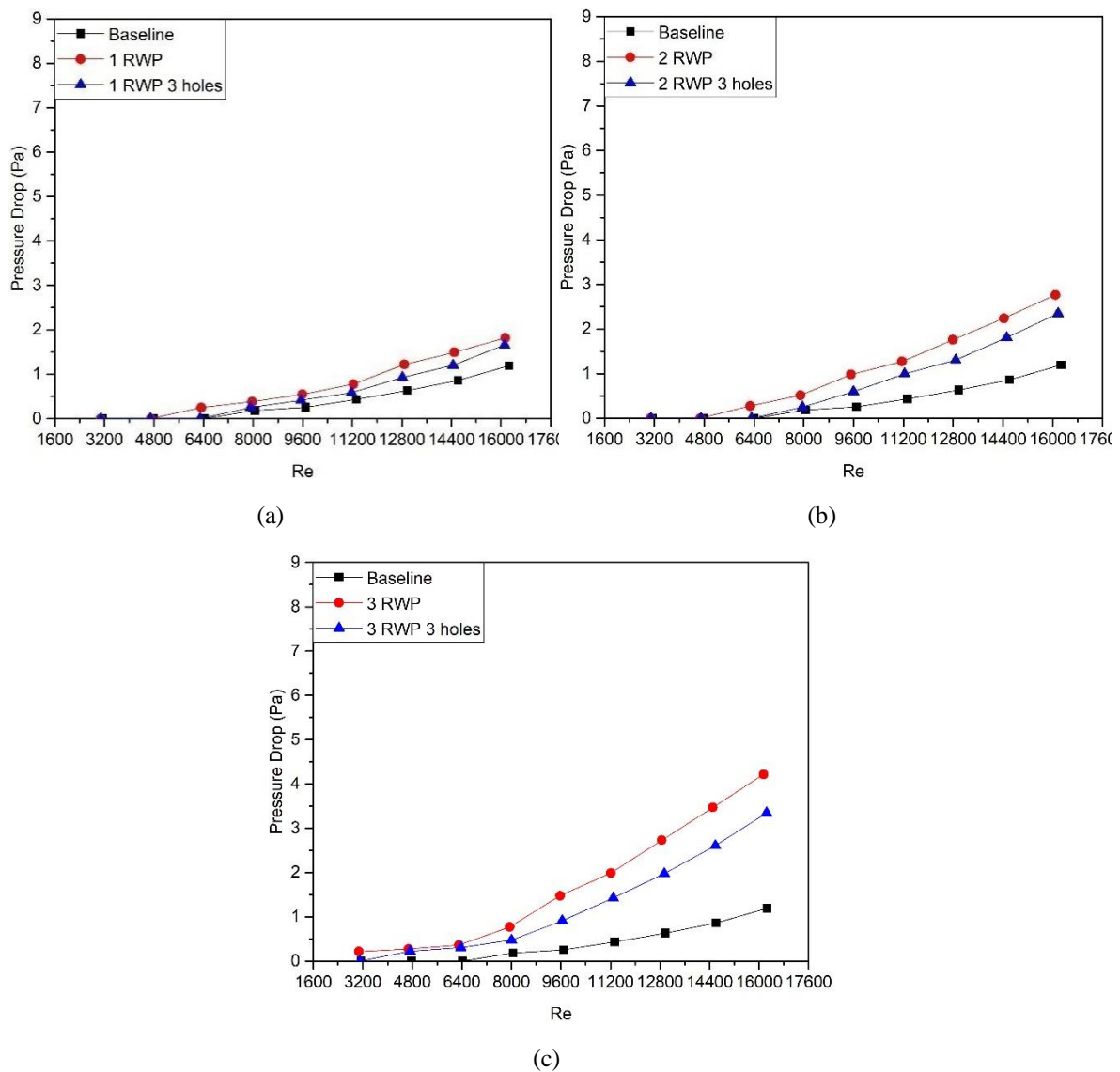
Longitudinal vortex adalah berperan penting dalam peningkatan koefisien perpindahan panas konveksi. Hal ini dibuktikan dengan adanya kenaikan koefisien perpindahan panas konveksi pada pengujian yang dipasang vortex generator. Kenaikan tertinggi koefisien perpindahan panas konveksi didapati untuk seluruh kasus pada kecepatan aliran 2 m/det. Koefisien perpindahan panas konveksi meningkat 37.1%, 48.6%, dan 63.1% dari baseline untuk kasus RWP VGs tanpa lubang berturut-turut untuk variasi satu, dua, dan tiga baris. Lubang pada RWP VGs berakibat pada penurunan koefisien perpindahan panas konveksi. Koefisien perpindahan panas konveksi meningkat dengan meningkatnya kecepatan aliran untuk kasus RWP VGs seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Hal ini terjadi karena intensitas turbulen dan interaksi fluida meningkat dengan meningkatnya kecepatan aliran [25].

Kenaikan koefisien perpindahan panas konveksi terhadap kecepatan aliran juga didapati pada kasus CRWP VGs. Koefisien perpindahan panas konveksi tertinggi didapati pada kecepatan aliran 2,0 m/det untuk seluruh variasi jumlah baris. Secara umum, penggunaan CRWP VGs meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi lebih baik daripada RWP VGs pada variasi jumlah baris dengan kecepatan aliran yang sama. Hal ini dikarenakan CRWP VGs menghasilkan longitudinal vortex yang lebih kuat akibat adanya ketidakstabilan gaya sentrifugal ketika fluida mengalir melalui permukaan cekung [22]. Disisi lain, perbedaan tekanan didapati pada upstream dan downstream vortex generator sehingga mampu meningkatkan intensitas longitudinal vortex [26]. Karenanya, longitudinal vortex yang dihasilkan menjadi semakin kuat sehingga pencampuran fluida panas dan dingin menjadi lebih baik [20]. Frontal area CRWP VGs yang lebih luas dari RWP VGs juga dapat menginduksi longitudinal vortex menjadi lebih kuat [27, 28]. Dengan demikian, koefisien perpindahan panas konveksi CRWP VGs tanpa lubang meningkat 44.3%, 69.5%, dan 85.4% daribaseline

berturut-turut untuk variasi satu, dua, dan tiga baris. Di sisi lain, kenaikan koefisien perpindahan panas konveksi dari CRWP VGs terhadap RWP VGs adalah 3.2%, 13.0%, dan 14.6% berturut-turut untuk satu, dua, dan tiga baris pada VGs berlubang. Lubang pada CRWP VGs berakibat pada sedikit penurunan koefisien perpindahan panas konveksi seperti yang terjadi pada kasus RWP VGs.

3.2 Efek Vortex Generator terhadap Pressure Drop

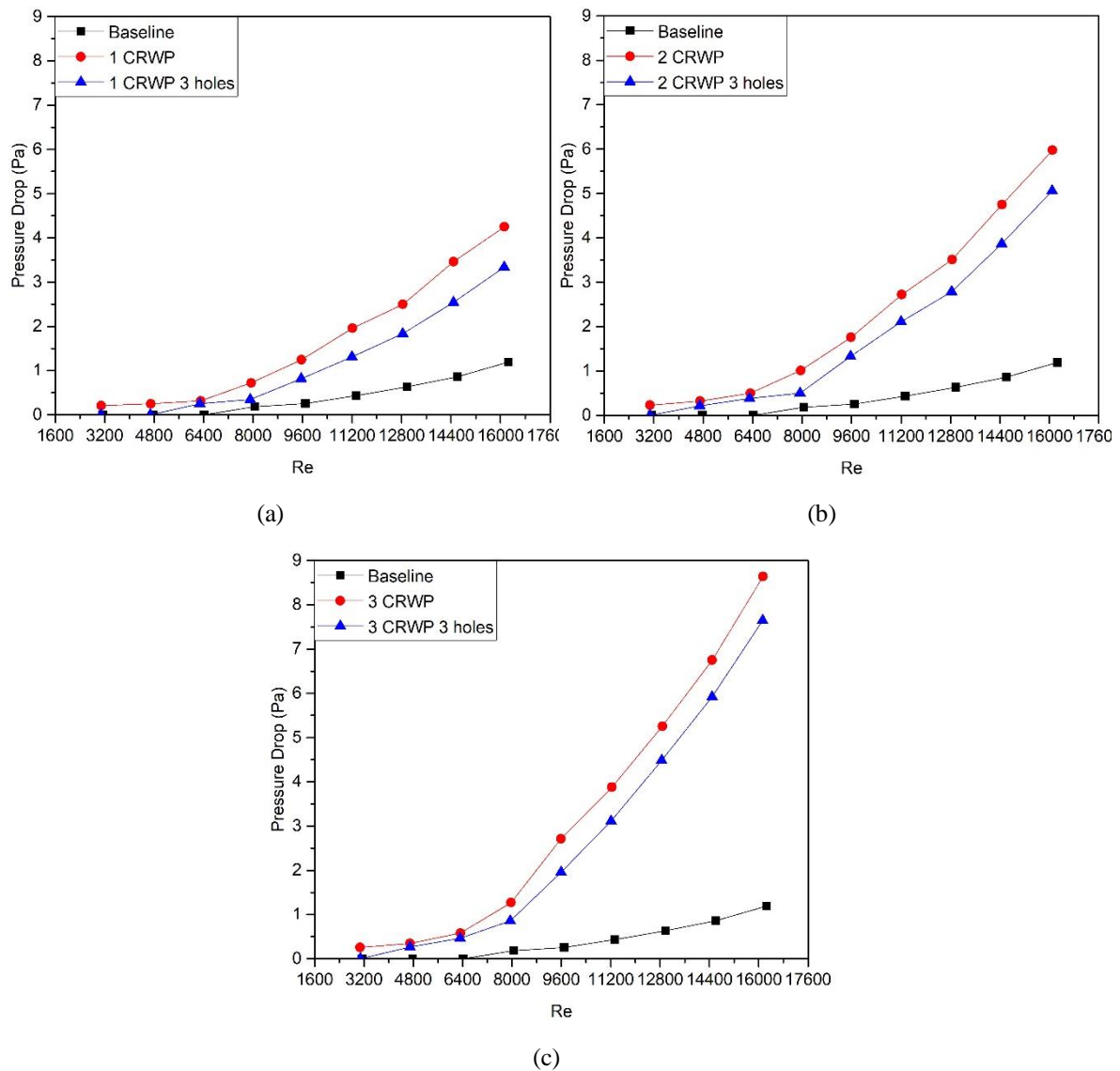
Penggunaan vortex generator mampu memperbaiki perpindahan panas. Akan tetapi, pemasangan vortex generator berdampak pada kenaikan pressure drop aliran. Pengaruh vortex generator dengan/tanpa lubang terhadap pressure drop ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8 berturut-turut untuk kasus RWP VGs dan CRWP VGs. Secara umum, penambahan jumlah baris vortex generator berakibat pada peningkatan pressure drop seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Dari kedua gambar tersebut teramati bahwa pressure drop yang diakibatkan oleh pemasangan CRWP VGs lebih besar daripada yang RWP VGs. Hal ini disebabkan frontal area CRWP VGs lebih luas daripada RWP VGs sehingga drag yang dihasilkan menjadi lebih besar [6, 22]. Namun, penggunaan lubang pada dinding vortex generator dapat menurunkan pressure drop [7, 19]. Kenaikan pressure drop, pada kasus RWP VGs tanpa lubang terhadap baseline dengan kecepatan aliran 2 m/det didapati 52.1%, 131.3%, dan 252.8% berturut-turut untuk variasi satu, dua, dan tiga baris.



Gambar 7. Perbandingan pressure drop pada rectangular winget pair vortex generators (RWP VGs) dengan variasi bilangan Reynolds dan jumlah baris yaitu (a) satu baris, (b) dua baris, dan (c) tiga baris

Dari Gambar 8(a)-(c) teramati bahwa pressure drop CRWP VGs tanpa lubang meningkat berturut-turut

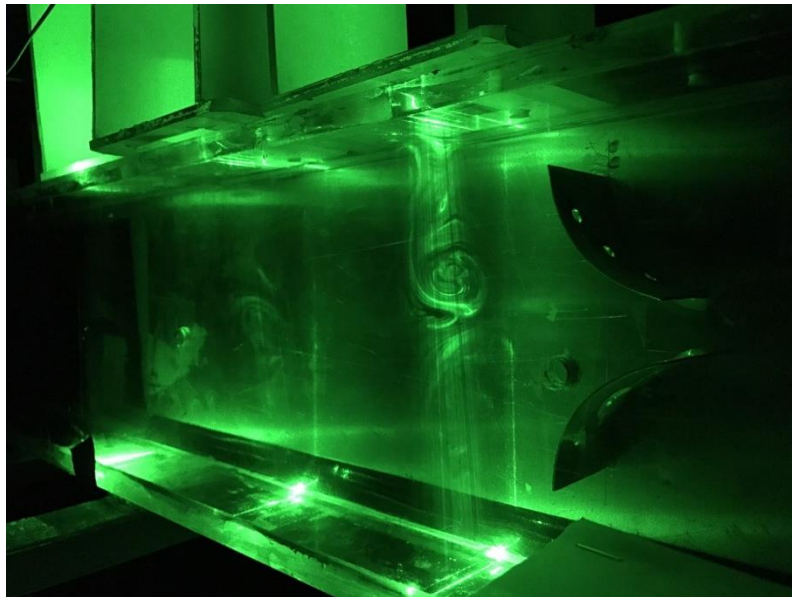
133.8%, 116.2%, dan 104.9% untuk kasus satu, dua, dan tiga baris terhadap RWP VGs atau meningkat hingga enam kali lipat terhadap baseline pada kecepatan aliran 2 m/det. Dengan demikian, pressure drop untuk kasus CRWP VGs adalah lebih besar daripada RWP VGs.



Gambar 8. Perbandingan pressure drop pada concave rectangular winget pair vortex generators (CRWP VGs) dengan variasi bilangan Reynolds dan jumlah baris yaitu (a) satu baris, (b) dua baris, dan (c) tiga baris

3.3 Visualisasi Aliran

Pengujian visualisasi aliran telah dilakukan untuk mengetahui struktur aliran di dalam saluran segi empat akibat pemasangan vortex generator. Pengujian ini dilakukan pada kondisi minimum cahaya. Hal ini dilakukan guna memaksimalkan penangkapan sinar laser oleh kamera. Sinar laser dibiaskan oleh kaca silinder sehingga menghasilkan bidang penampang yang tegak lurus arah aliran. Posisi sinar laser berada pada $x/L = 0.34, 0.59,$ dan 0.82 , dimana L merupakan panjang spesimen uji. Asap yang terbentuk akibat dari pemanasan oli pada oil heater digunakan sebagai media untuk memvisualisasikan longitudinal vortex dalam aliran. Longitudinal vortex yang terbentuk merupakan jenis co-counter. Vortex generator yang digunakan pada uji visualisasi ini adalah CRWP VGs satu baris dengan tiga lubang. Hasil uji visualisasi dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Visualisasi longitudinal vortex yang dibangkitkan oleh CRWP VGs dengan variasi satu baris dan tiga lubang pada kecepatan aliran 0,6 m/det

4. KESIMPULAN

Pada studi ini, pengaruh penggunaan RWP VGs dan CRWP VGs berlubang terhadap perpindahan panas dan pressure drop aliran di dalam saluran persegi empat telah diuji secara eksperimen. Hasil eksperimen dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Perpindahan panas untuk kasus CRWP VGs adalah lebih baik daripada RWP VGs. Hal ini ditandai dengan peningkatan koefisien perpindahan panas konveksi pada kasus CRWP VGs hingga 14.6% terhadap RWP VGs. Koefisien perpindahan panas konveksi untuk kasus vortex generator berlubang mengalami sedikit penurunan hingga 5.6% terhadap vortex generator tanpa lubang.
2. Pressure drop pada kasus CRWP VGs meningkat hingga 133.8% terhadap RWP VGs. Akan tetapi, penggunaan vortex generator berlubang dapat menurunkan pressure drop hingga 21.5% terhadap vortex generator tanpa lubang.
3. Dari hasil pengujian visualisasi aliran teramati bahwa winglet pair vortex generators dengan konfigurasi common flow down menghasilkan dua buah longitudinal vortex dengan arah putaran yang berlawanan.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih kami tujukan kepada kolega dan rekan-rekan mahasiswa yang telah membantu, serta Laboratorium Termofluida Teknik Mesin Universitas Diponegoro.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] KEWEI, S., TOSHIO, T., "The optimal arrangement of vortex generators for best heat transfer enhancement in flat-tube-fin heat exchanger", *International Journal of Thermal Sciences*, v.132, pp. 355–367, 2018.
- [2] LI, M. J., ZHANG, H., ZHANG, J., MU, Y. T., TIAN, E., DAN, D., ZHANG, X. D., TAO, W. Q., "Experimental and numerical study and comparison of performance for wavy fin and a plain fin with radiantly arranged winglets around each tube in fin-and-tube heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, v.133, pp. 298–307, 2018
- [3] ZUOQIN, Q., QIAN, W., JUNLIN, C., "Analysis of heat and resistance performance of plate fin-and-tube heat exchanger with rectangle-winglet vortex generator", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 124, pp. 1198–1211, 2018.
- [4] TABISH, A., MAN-HOE, K., "A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.81, pp. 813–839, 2018.
- [5] XIAOSE, D., LILI, F., LI, L., LIJUN, Y., YONGPING, Y., "Heat transfer enhancement of wavy finned

- flat tube by punched”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 75, pp. 368–380, 2014.
- [6] YA-LING, H., PAN, C., WEN-QUAN, T., YU-WEN, Z., TAO, X., “Analysis of heat transfer and pressure drop for fin-and-tube heat exchangers with rectangular winglet-type vortex generators”, *Applied Thermal Engineering*, v. 61, pp. 770-783, 2013.
- [7] GOUBING, Z., ZHIZENG, F., “Experimental investigations of heat transfer enhancement by plane and curved winglet type vortex generators with punched holes”, *International Journal of Thermal Sciences*, v.78, pp. 26-35, 2014.
- [8] LI, L., XIAOZE, D., YUWEN, Z., LIJUN, Y., YONGPING, Y., “Numerical simulation on flow and heat transfer of fin-and-tube heat exchanger with longitudinal vortex generators”, *International Journal of Thermal Sciences*, v. 92, pp. 85-96, 2015.
- [9] MOHAMMAD, O., CHARBEL, H., SERGE, R., DANIEL, B., “Novel design of delta winglet pair vortex generator for heat transfer”, *International Journal of Thermal Sciences*, v.109, pp. 1-9, 2016.
- [10] TANG, L. H., CHU, W. X., AHMED, N., ZENG, M., “A new configuration of winglet longitudinal vortex generator to enhance heat transfer in a rectangular channel”, *Applied Thermal Engineering*, v.104, pp. 74-84, 2016.
- [11] ANUPAM, S., HIMADRI, C., ASHWIN, K. I., DAN GAUTAM, B., “Enhancement of heat transfer in a fin-tube heat exchanger using rectangular winglet type vortex generators”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.101, pp. 667–681, 2016.
- [12] AGUNG, T. W., TRI, I., KEISHI, K., AKIO, M., “Heat transfer enhancement of internal flow by inserting punched delta winglet vortex generators with various attack angles”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.87, pp. 141-148, 2017.
- [13] QIANG, Z., LIANG-BI, W., YONG-HENG, Z., “The mechanism of heat transfer enhancement using longitudinal vortex generators in a laminar channel flow with uniform wall temperature”, *International Journal of Thermal Sciences*, v.117, pp. 26-43, 2017.
- [14] YONGGANG, L., FANG, Z., CHONGFAN, S., YONGKANG, L., “Improving the thermal hydraulic performance of a circular tube by using punched delta-winglet vortex generators”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.111, pp. 299-311, 2017.
- [15] XU, Y., ISLAM, M., DAN KHAROUA, N., “Numerical study of winglets vortex generator effects on thermal performance in a circular pipe”, *International Journal of Thermal Sciences*, v.112, pp. 304-317, 2017.
- [16] TING, M., XING, L., JAIDEEP, P., SRINATH, V. E., SCOTT, T. H., SAMRUDDHI, D., “Numerical study on thermoelectric-hydraulic performance of a thermoelectric power generator with a plate-fin heat exchanger with longitudinal vortex generators”, *Applied Energy*, v.185, pp. 1343–1354, 2017.
- [17] UDDIN, K., KOUSHIK, D., DAN BIPLAP, K. D., “Effect of surface modification of a rectangular vortex generator on heat transfer rate from a surface to fluid”, *International Journal of Thermal Sciences*, v.127, pp. 61-78, 2018.
- [18] MOHAMMAD, S., DAVOOD, T., “Numerical simulation of heat transfer enhancement in a plate-fin heat exchanger using a new type of vortex generators”, *Applied Thermal Engineering*, v.133, pp. 671-681, 2018.
- [19] ZHIMIN, H., ZHIMING, X., WANG, J., “Numerical simulation on heat transfer characteristics of rectangular vortex generators with a hole”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.126, pp. 993-1002, 2018.
- [20] SYAIFUL, ASTRID, A., MARIA, F. S., AHMAD, I. S., MYUNG-WAN, B., “Thermo-hydrodynamics performance analysis of fluid flow through concave delta winglet vortex generators by numerical simulation”, *International Journal of Technology*, v.7, pp. 1276-1285, 2017.
- [21] SYAIFUL, IMAM, S., MARIA, F. S., DAN MYUNG-WAN, B., “Numerical simulation of heat transfer augmentation in fin-and-tube heat exchanger with various number of rows of concave rectangular winglet vortex generator”, *Matec Web of Conferences*, v.159, pp. 02012, 2018.
- [22] SYAIFUL, “Experimental study of concave rectangular winglet vortex generators effect on thermal-hydrodynamic performances of airflow inside a channel”, *Heat Transfer - Models, Methods and Applications*, London, IntechOpen, pp. 214-230, 2018.
- [23] WU, J. M., TAO, W. Q., “Numerical study on laminar convection heat transfer in a rectangular channel with longitudinal vortex generator. Part A: Verification of fiel synergy principle”, *International Journal of Heat Transfer and Mass Transfer*, v.51, pp. 1179–1191, 2008.
- [24] SYAIFUL, ARSANTI RAKHA SIWI, TONY SURYO UTOMO, YURIANTO, dan RETNO

- WULANDARI, “Numerical Analysis of Heat and Fluid Flow Characteristics of Airflow Inside Rectangular Channel with Presence of Perforated Concave Delta Winglet Vortex Generators”, *International Journal of Heat and Technology*, v. 37, n. 4, pp. 1059 – 1070, 2019.
- [25] XU, Y., ISLAM, M. D., KHAROUA, N., “Experimental study of thermal performance and flow behaviour with winglet vortex generators in a circular tube”, *Applied Thermal Engineering*, v.135, pp. 257-268, 2018.
- [26] KEWEI, S., TOSHIO, T., ZHONGHAO, C., QIANG, Z., “Heat transfer characteristics of concave and convex curved vortex generators in the channel of plate heat exchanger under laminar flow”, *International Journal of Thermal Sciences*, v.137, pp. 215–228, 2019.
- [27] GAOFENG, L., GUOBING, Z., “Numerical simulation on performances of plane and curved winglet pair vortex generators in a rectangular channel and field synergy analysis”, *International Journal of Thermal Sciences*, v.109, pp. 323-333, 2016.
- [28] SYAIFUL, “Efek longitudinal vortex dihasilkan dari vortex generator jenis concave delta dan rectangular winglet terhadap perbaikan perpindahan panas: Visualisasi aliran/studi eksperimental”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 8, n. 3, pp. 167-173, 2017.