

## Efek Orientasi Sudut Rectangular-Winglet *Vortex generator* Terhadap Performa Termal dan Hidrodinamik Penukar Kalor Jenis Fin-Tube dengan Susunan Pipa Sejajar

Rahmat Purnomojati<sup>1, a \*</sup> dan Syaiful<sup>2, b</sup>

<sup>1</sup> Magister Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Sudharto, Semarang 54272, Indonesia

<sup>2</sup> Jurusan Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Sudharto, Semarang 54272, Indonesia

email: rahmatpurnomojati@gmail.com, Syaiful.undip2011@gmail.com.

### Abstrak

*Fin tube heat exchanger* merupakan penukar kalor yang banyak dijumpai penggunaannya dalam dunia industri misalnya proses yang melibatkan reaksi kimia, HVAC (*heating, ventilating, air-conditioning and refrigeration*) dan pendinginan elektronik. Peningkatan performansi penukar kalor sangat penting untuk dapat memenuhi keterbatasan geometri dan efisiensi. *Vortex generator* merupakan metode meningkatkan performa dari penukar kalor. *Vortex generator* mampu menimbulkan *swirling motion* yang memicu timbulnya *vortex*. *Vortex* tersebut akan meningkatkan transfer massa sekaligus koefisien perpindahan panas konveksi dari suatu penukar kalor. *Pressure drop* merupakan batasan dari penukar kalor yang perlu diperhatikan. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efek *vortex generator* dan pengaruh sudut pemasangan *vortex generator* terhadap peningkatan koefisien perpindahan panas serta pengaruhnya terhadap *pressure drop*. Metode simulasi merupakan solusi yang digunakan dalam kasus ini. Simulasi menggunakan aliran laminar dengan bilangan Reynold berkisar antara 300-960. Jenis *vortex generator* yang digunakan yaitu *Rectangular winglet vortex generator* yang menghasilkan performa perpindahan panas lebih baik dengan penurunan tekanan yang lebih kecil dari wings. Pada bilangan Reynold 300-960 berturut-turut penambahan *vortex generator* untuk sudut serang 10° peningkatan koefisien perpindahan panas konveksi sebesar 13.94-32.14%, sudut serang 15° 20.73-45% dan sudut serang 20° 30.51-59.47%. Peningkatan *pressure drop* sudut serang 10° sebesar 32.74-110.68%, sudut serang 15° 44.41-144.26% dan sudut serang 20° 60.66-185.86%.

Kata kunci : *vortex generator*, koefisien perpindahan panas, *pressure drop*, efisiensi.

### Pendahuluan

Penukar kalor jenis *compact heat exchanger* sangat luas penggunaannya dalam dunia industry. Pembangkit tenaga, proses industri, penerbangan, HVAC (*heating, ventilating, air conditioning and refrigerating*), pendinginan elektronik dan proses *petrochemical* merupakan sebagian contoh dari banyaknya perindustrian yang selalu menggunakan *compact heat exchanger* dalam setiap prosesnya. Efisiensi yang baik dari sebuah penukar kalor merupakan hal yang sangat penting untuk memenuhi berbagai tujuan seperti penurunan emisi CO<sub>2</sub> dan peningkatan efisiensi energi.

Hambatan termal total dari sebuah penukar kalor terdiri atas tiga hal yaitu *air-side convective thermal resistance*, *wall conductive thermal resistance* dan *liquid side convective thermal resistance*. Koefisien perpindahan panas sisi udara biasanya memiliki nilai yang sangat rendah oleh karena properties udara itu sendiri yang memiliki

nilai koefisien perpindahan panas yang rendah. Hal ini menyebabkan resistansi sisi udara menjadi dominan dari keseluruhan perpindahan panas. Dari hal tersebut maka usaha untuk meningkatkan performa penukar kalor haruslah fokus pada bagian *air side surfaces* [1].

Performa dari penukar kalor dapat ditingkatkan dengan penambahan *protrusion* seperti *fins*, *ribs*, *winglets* dan *wings* pada sisi aliran udara. *Longitudinal vortex* yang dibangkitkan di dekat permukaan yang mengalami perpindahan panas akan meningkatkan perpindahan panas dengan memindahkan massa fluida dari dinding perpindahan panas menuju *free stream* dan *vice versa*. Efektifitas dari penukar kalor bergantung pada kekuatan *vortex* per satuan luasan. Aliran yang melalui sebuah penukar kalor sisi fin dianggap laminar karena jarak antar fin yang biasanya sangat rapat dan kecepatan rata-ratanya yang rendah [2].

Fluida yang melewati sebuah *vortex generator* akan membangkitkan *vortex* atau *swirling motion*

oleh adanya gesekan dan separasi pada daerah tepi dari *vortex generator*. Mekanisme peningkatan perpindahan panas oleh *vortex generator* merupakan salah satu metode peningkatan perpindahan panas secara pasif. Metode pasif ini terdiri dari tiga tahapan yaitu (1) terbentuknya lapisan batas; (2) timbulnya *swirl* dan (3) *flow destabilization* [3].

Gangguan pada daerah lapisan batas mengakibatkan peningkatan perpindahan panas karena aliran di lapisan batas tersebut diarahkan ke aliran [4]. Pencampuran aliran yang baiklah yang mengakibatkan perpindahan panas yang lebih baik. Beberapa permukaan atau geometri yang tergolong *enhanced surfaces* yaitu geometri seperti *slit*, *offset strip* dan *louver* [5]. *Vortex* pada dasarnya dapat dikelompokkan menjadi dua berdasarkan letak axis dari *vortex* yaitu *transverse vortices* dan *longitudinal vortices*. *Vortex* transversal memiliki axis yang sejajar terhadap arah aliran utama sedangkan *vortex* longitudinal memiliki axis yang tegak lurus terhadap arah aliran utama [6]. Fiebig, 1995 secara numeric dan eksperimental memperoleh bahwa *vortex* jenis longitudinal menghasilkan peningkatan perpindahan panas yang lebih baik daripada *vortex* transversal untuk *pressure loss penalty* yang sama [3]. Secara eksperimental telah dibuktikan juga bahwa ada korelasi antara *vortex* longitudinal dan peningkatan koefisien perpindahan panas [7-9].

*Wings* dan *winglets vortex generator* merupakan jenis *vortex generator* yang paling umum dijumpai penggunaannya. *Vortex generator* jenis *winglets* menghasilkan performa perpindahan panas yang sama dengan jenis *wings* akan tetapi *winglets* menghasilkan drop tekanan yang lebih kecil [6]. Biswas et al, 1992 menunjukkan hubungan antara sudut serang dan bilangan reynold terhadap distribusi kecepatan dan temperatur [10]. Biswas et al, 1996 secara numeric dan eksperimental memperoleh bahwa performa *vortex generator* jenis *winglets* terbaik pada kisaran sudut serang 15° [11]. Penelitian numerik sebelumnya oleh He menggunakan *vortex generator* jenis *rectangular winglets*, akan tetapi dengan kisaran sudut serang 10°, 20° dan 30°. Penelitian kali ini sudut serang akan lebih difokuskan pada kisaran sudut serang 15° yaitu 10°, 15° dan 20° dan telah divalidasi dengan penelitian eksperimental Joardan dan Jacobi [12].

Tujuan penelitian ini yaitu melihat karakteristik aliran, perpindahan panas dan pengaruhnya terhadap peningkatan koefisien konveksi dan *pressure drop* untuk penukar kalor jenis fin-tube dengan *rectangular winglet vortex*

*generator* dengan variasi sudut serang *vortex generator* sebesar 10°, 15° dan 20°.

### Metode Penelitian

Model geometri penelitian ini merujuk pada geometri yang digunakan dalam eksperimental oleh Joardan dan Jacobi, yaitu model dan dimensi penukar kalor yang umum digunakan dalam aplikasi HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*). Penelitian oleh Joardan dan Jacobi tidak memperhitungkan variasi sudut serang *vortex generator*, melainkan membandingkan pengaruh variasi jumlah pemasangan *vortex generator*. Penukar kalor jenis *compact plain fin and tube* dengan pemasangan *vortex generator* secara inline berjenis *delta winglets*. Fluida panas memasuki daerah antar sirip dengan temperature 310.6 K yang kemudian akan didinginkan oleh sisi tube pada temperature 291.77 K. Range bilangan Reynold akan berkisar antara 220-960 [12].

Penelitian ini menggunakan zone pemanjangan sisi masuk dan sisi keluar dengan tujuan memperoleh aliran berkembang penuh saat memasuki dan meninggalkan penukar kalor. Domain perhitungan dan pendefinisian aliran sesuai dengan penelitian sebelumnya oleh Ya-Ling He et al yang menggunakan *vortex generator* berjenis *rectangular winglets* juga, tetapi menggunakan variasi sudut serang berbeda dengan penelitian tersebut.

### Pendefinisian Model

#### Kondisi Batas

Aliran diasumsikan laminar oleh karena jarak pitch yang rapat dan kecepatan inlet yang rendah aliran. Aliran udara diasumsikan *steady* dan *incompressible*.

Pada daerah *fin coil* memiliki persamaan yang sama pada dinding (atas-bawah) dan sisi simetri yaitu berturut-turut.

$$u = v = w = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

Pada daerah dinding tube menggunakan *no slip condition* dengan temperatur dinding tube diatur konstan sebesar 573 K.

$$u = v = w = 0, T = T_w = const. \quad (3)$$

Pada daerah pemanjangan daerah masuk atau *upstream extended* kecepatan dibuat seragam dengan temperatur 310.6 K

$$u = u_{inlet} = const. v = w = 0 \quad (4)$$

$$T = T_{in} = const. \quad (5)$$

Sisi atas dan bawah didefinisikan sebagai

dinding dengan kondisi *no slip* dan sisi kiri dan kanan diasumsikan sebagai daerah simetris.

$$u = v = w = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0, v = 0 \text{ dan } \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

Pada daerah perpanjangan daerah keluar atau *downstream extended* pada daerah *outlet gradient* parameter terhadap arah aliran bernilai nol kecuali tekanan.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

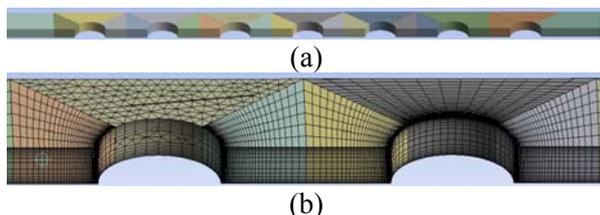
Sisi atas dan bawah didefinisikan sebagai dinding dan sisi kiri dan kanan adalah simetri sehingga persamaannya berturut-turut.

$$u = v = w = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0, v = 0 \text{ dan } \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

### Prosedur Simulasi Numerik

Simulasi ini menggunakan mesh berbentuk hexahedral pada domain daerah tanpa *vortex generator* dan menggunakan mesh tetrahedral untuk daerah dengan *vortex generator*. Penghalusan mesh pada mesh hexahedral menggunakan *edge sizing* dan pada mesh jenis *tetrahedral* menggunakan *inflation* untuk merapatkan mesh pada daerah dinding. Jumlah mesh yang digunakan yaitu 930078 untuk mesh tanpa *vortex generator*, 899905 untuk sudut serang 10°, 975983 untuk sudut serang 15° dan 977573 untuk sudut serang 20°. geometri fin tube memiliki bentuk yang unik dan kompleks. Adanya *vortex* juga membutuhkan ketelitian yang lebih dalam proses kalkulasi. Oleh karena itu persamaan momentum dan energi didiskritisasi dengan skema *second order differencing scheme*. Pressure dan velocity coupling diselesaikan dengan algoritma SIMPLE. Kriteria konvergensi menggunakan 10<sup>-5</sup> untuk persamaan momentum dan kecepatan dan 10<sup>-8</sup> untuk persamaan energi.



Gambar 1. (a) domain komputasi dan mesh dari domain komputasi dan (2) metode diskritisasi fin coil region yang dilakukan

### Pendefinisian parameter

Untuk menghitung bilangan nusselt dan bilangan reynold menggunakan persamaan umum sebagai berikut :

$$Re = \frac{\rho V_m D_h}{\mu}, Nu = \frac{h D_h}{\lambda} \quad (11)$$

Dengan  $\rho$ ,  $\mu$  dan  $\lambda$  masing masing yaitu massa jenis, viskositas dan konduktivitas thermal dari udara.  $V_m$  adalah kecepatan rata-rata pada penampang minimum yang dilalui fluida.  $D_h$  adalah diameter hidrolis dan  $h$  adalah koefisien perpindahan panas konveksi.

Persamaan untuk memperoleh penurunan tekanan antara sisi masuk dan keluar penukar kalor menggunakan persamaan :

$$\Delta P = \bar{p}_{in} - \bar{p}_{out} \quad (12)$$

$\Delta P$  adalah penurunan tekanan sepanjang daerah fin coil  $P_{in}$  dan  $P_{out}$  akan diperoleh dari hasil perhitungan nilai tekanan rata-rata pada area *cross section* sisi inlet maupun *outlet fin coil region*.

Perpindahan panas total dan log mean temperatur *difference* dihitung melalui persamaan :

$$Q = \dot{m} c_p (\bar{T}_{out} - \bar{T}_{in}) \quad (13)$$

$$\Delta T = \frac{(T_w - \bar{T}_{in}) - (T_w - \bar{T}_{out})}{\ln[(T_w - \bar{T}_{in}) / (T_w - \bar{T}_{out})]} \quad (14)$$

Besarnya temperature rata-rata diperoleh melalui persamaan :

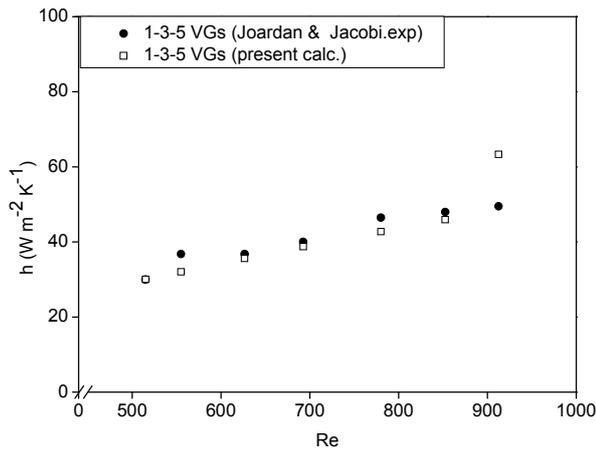
$$\bar{T} = \frac{\iint u T dA}{\iint u dA} \quad (15)$$

sedangkan persamaan untuk menghitung koefisien konveksi yaitu sebagai berikut:

$$h = \frac{Q}{A_f \Delta T} \quad (16)$$

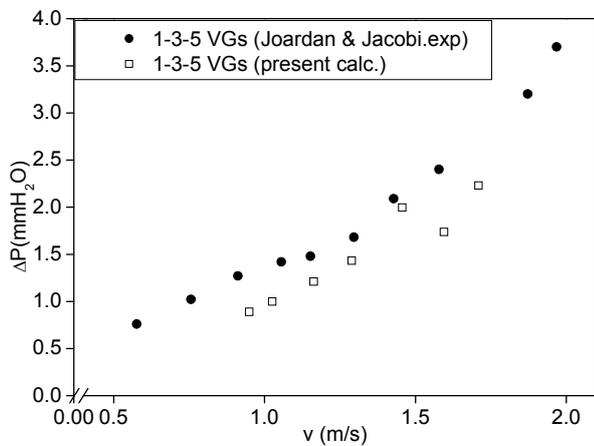
### Hasil dan Diskusi

Simulasi numerik ini telah divalidasi dengan data eksperimental Joardan dan Jacobi. Gambar menunjukkan hubungan antara bilangan reynold terhadap koefisien perpindahan panas konveksi aliran pada fin tube dengan pemasangan 3 *vortex generator* di tube nomer 1-3-5 dengan sudut serang spesifik yaitu 15°. Hasil validasi ini menunjukkan bahwa terdapat sedikit perbedaan antara data hasil eksperimental Joardan dan Jacobi dan hasil simulasi ini. Fin tube dengan pemasangan 3 vgs menunjukkan bahwa dt validasi menghasilkan selisih eksperimental dan simulasi terbesar terletak pada reynold terbesar yakni berkisar 0.17%-27.91%. Grafik ini menunjukkan bahwa semakin besar bilangan Reynold maka koefisien perpindahan panas konveksi juga semakin besar.



Gambar 2. Grafik validasi koefisien konveksi hasil simulasi terhadap eksperimental Joardan dan Jacobi.

Untuk validasi nilai *pressure drop* untuk aliran dalam penukar kalor fin tube dari hasil simulasi terhadap data eksperimental menunjukkan keserupaan kecenderungan kenaikan *pressure drop* seiring laju kenaikan laju aliran. Pada fin-tube dengan pemasangan 3 vgs selisih antara *pressure drop* hasil simulasi terhadap eksperimental oleh hasil simulasi berkisar antara 4.8% - 30.5% untuk 3 VGs.



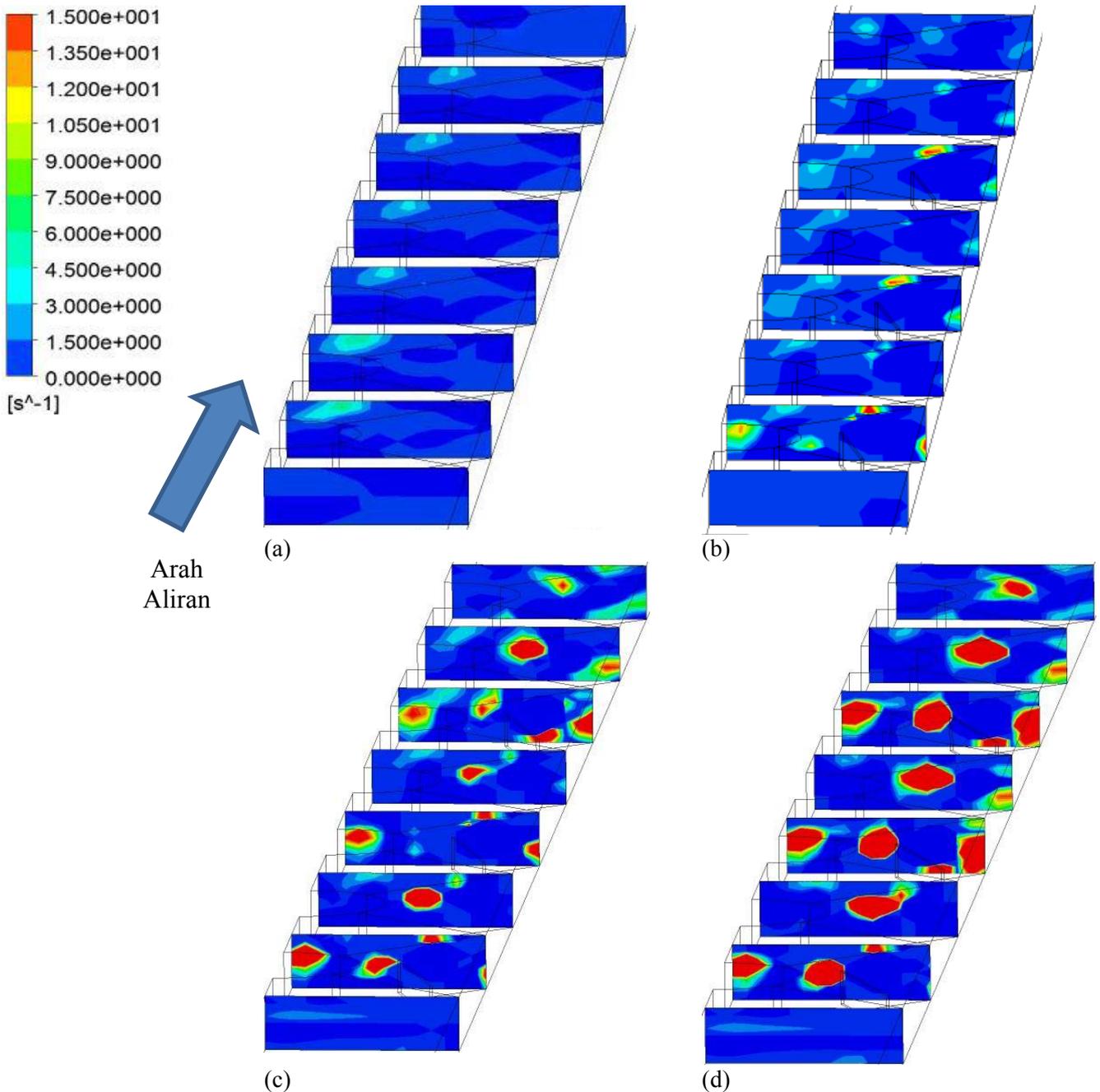
Gambar 3. Grafik validasi *pressure drop* hasil

simulasi terhadap eksperimental Joardan dan Jacobi.

### Timbulnya *Swirling* (kekuatan *vortex*)

Gambar 4 menunjukkan distribusi dan kekuatan *swirling* pada arah aliran, dimulai dari tanpa VG, 3 VGs 1-3-5 dengan sudut 10°, 15° dan 20°. Pada gambar 4 menunjukkan terjadinya *swirling motion* / gerakan aliran berputar yang nantinya memicu pembangkitan *vortex*.

Dengan membandingkan keempat kasus tersebut, dari gambar terlihat bahwa kontur *swirling* arah melintang pada geometri tanpa VG menunjukkan hampir tidak terjadi *swirling* atau gerakan aliran memutar. Geometri dengan pemasangan VGs pada tube nomer 1-3-5 menghasilkan pergerakan memutar atau *swirling* yang memicu *vortex*. Terciptanya *swirling motion* oleh *vortex generator* mengakibatkan daerah dekat *vortex generator* terjadi fenomena separasi, lapisan batas dan venomena aliran yang diarahkan oleh *vortex generator* sehingga memiliki kekuatan pada arah tertentu. Hal ini akan menghasilkan golakan-golakan. Golakan yang ditimbulkan mengakibatkan pencampuran yang baik antara fluida dalam aliran.



Gambar 4. Kontur swirling cross section area pada Rectangular winglets Re 850 VGs 1-3-5 (a) tanpa VGs (b) VGs 10° (c) VGs 15° dan (d) VGs 20°

Berdasarkan kontur swirling motionnya, semakin besar sudut serang *vortex generator* menghasilkan kekuatan swirling yang makin besar. Peningkatan kekuatan pusaran tersebut menghasilkan luasan semakin besar dimulai pada *vortex generator* dengan pemasangan pada sudut serang 10° kemudian pada 15° dan paling besar pada sudut serang yang lebih besar yaitu 20°. Hal ini menandakan pencampuran fluida oleh *vortex* semakin baik.

#### Distribusi Kecepatan

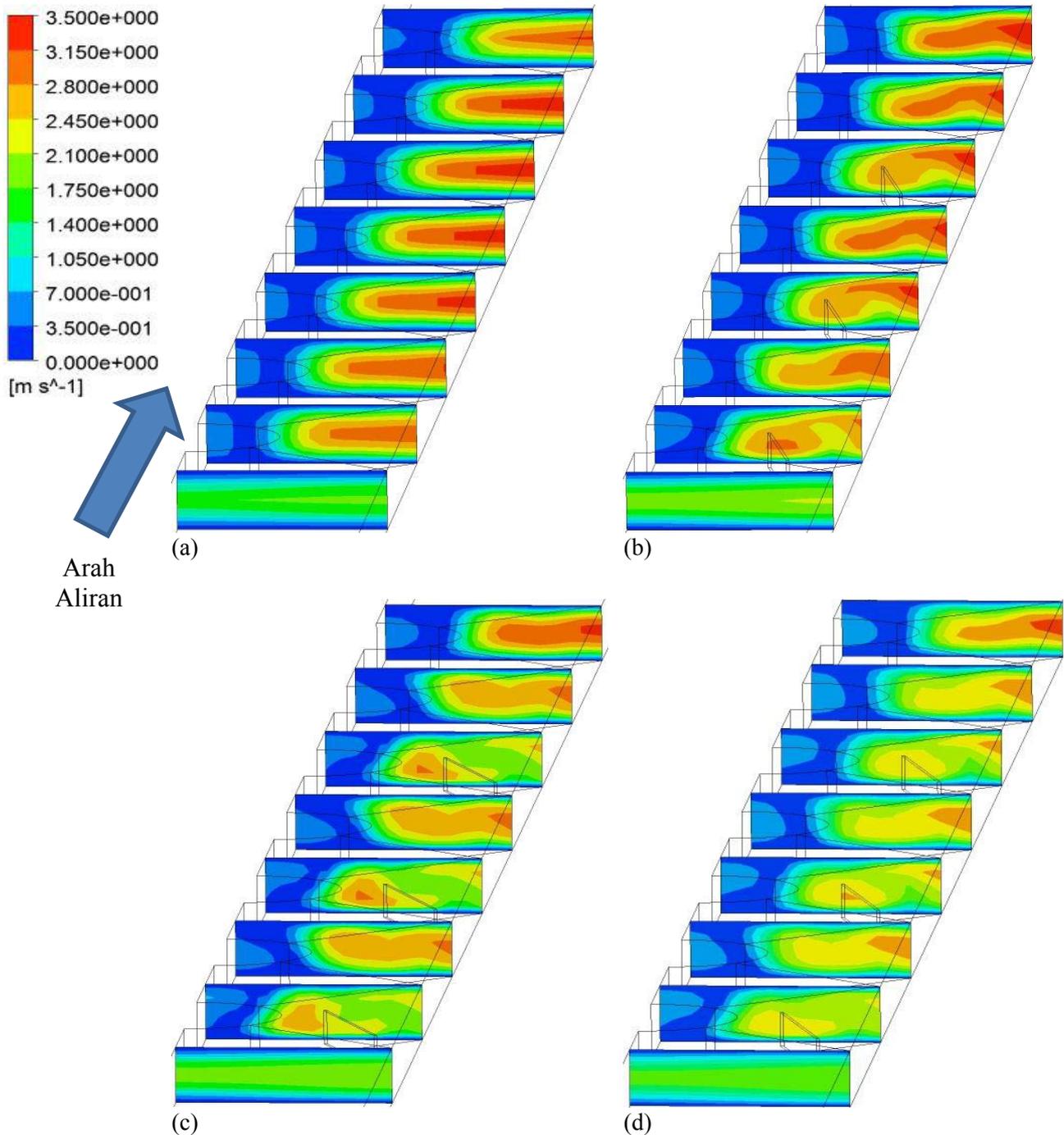
Dari hasil kontur kecepatan pada gambar 5 menunjukkan distribusi kontur kecepatan pada arah aliran. Pada cross section, kontur kecepatan mengalami keseragaman kecepatan pada aliran. Dengan pemasangan *vortex generator* pada sudut serang yang lebih besar. Secara umum gradient kecepatan pada *vortex generator* dengan sudut serang yang lebih besar memiliki nilai yang lebih rendah dari sudut serang lebih kecil dan tanpa

*vortex generator*. Hal ini menandakan bahwa terjadi pencampuran fluida dalam aliran sehingga gradien kecepatan di sisi dekat tube dan daerah aliran tidak terlalu jauh berbeda. Berdasarkan kontur kecepataannya, semakin besar sudut serang *vortex generator* menghasilkan kecepatan yang makin seragam. Keseragaman kecepatan semakin baik dimulai pada *vortex generator* dengan pemasangan pada sudut serang  $10^\circ$  kemudian pada  $15^\circ$  dan paling baik pada sudut serang yang lebih besar yaitu  $20^\circ$ .

### Distribusi Temperatur

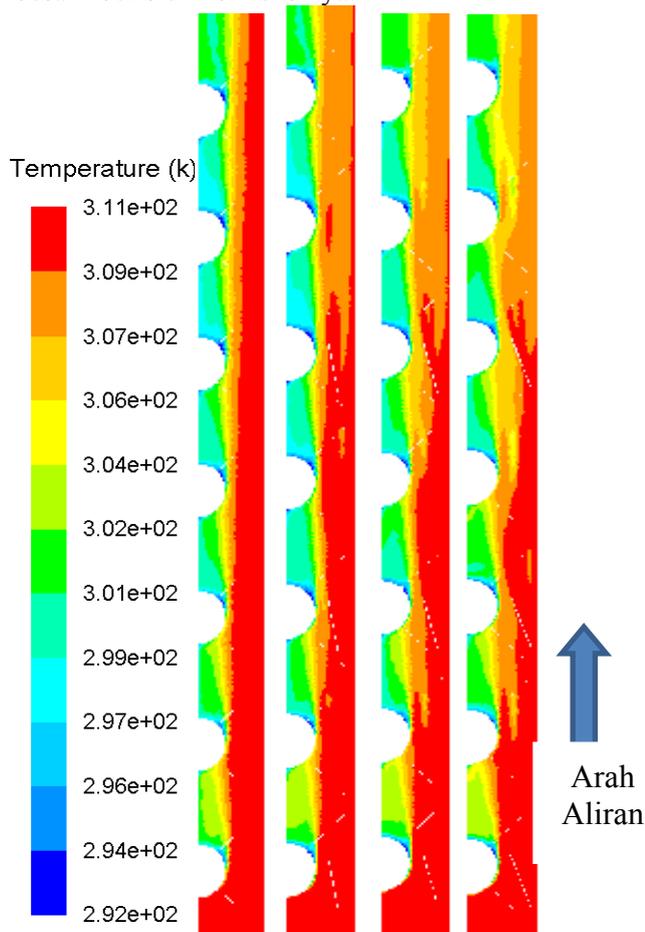
Distribusi temperatur penampang melintang pada arah menuju outlet pada gambar 6 menunjukkan kontur dengan gradient temperatur yang besar pada fin-tube tanpa VG dan kontur dengan gradient temperatur yang rendah pada fin-tube dengan pemasangan VGs pada tube nomor 1-3-5. Kontur temperatur yang terbentuk semakin seragam pada penampang dengan pemasangan *vortex generator*.

Semakin semakin besar sudut serang *vortex*



Gambar 5. Kontur kecepatan Rectangular Winglets arah cross section pada  $Re\ 850\ Vgs\ 1-3-5$  (a) tanpa VGs (b) VGs  $10^\circ$  (c) VGs  $15^\circ$  dan (d) VGs  $20^\circ$

*generator*, pencampuran fluida semakin baik, hal ini ditandai dengan kontur temperatur yang semakin merata pada sisi outlet sudut serang terbesar yaitu 20° kemudian sudut serang 15°, 10° dan paling besar gradien temperatur terjadi pada fin tube tanpa *vortex generator*. Semakin besar sudut serang menghasilkan kontur temperatur dengan gradient yang semakin rendah. Hal ini menandakan pencampuran fluidanya semakin baik. Hal ini berdampak pada peningkatan koefisien konveksi dari aliran. Semakin besar pencampuran fluida yang terjadi maka makin besar koefisien konveksinya.

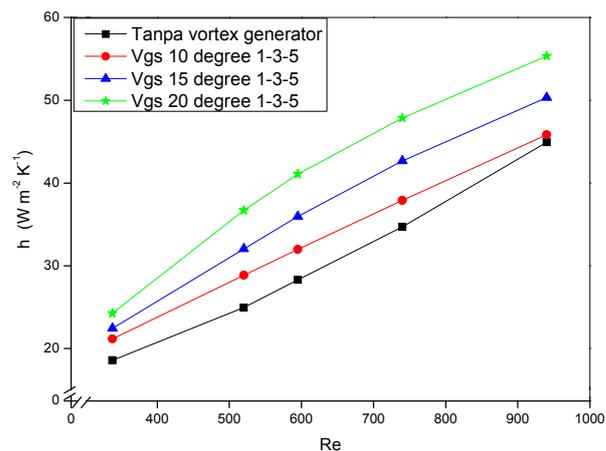


Gambar 6. Kontur kecepatan (a) tanpa *vortex generator*, (b) *vortex generator* 10°, (c) *vortex generator* 15° dan (d) *vortex generator* 20°.

### Koefisien Perpindahan Panas Konveksi

Gambar 7 menunjukkan hasil simulasi berupa perbandingan koefisien konveksi dari variasi tanpa *vortex generator* dan *vortex generator* jenis rectangular dengan pemasangan di tube nomer 1-3-5 yang divariasikan menurut sudut serang yang berbeda-beda yaitu 10°, 15° dan 20°. Berdasarkan hasil tersebut bahwa semakin besar bilangan reynold menghasilkan koefisien perpindahan panas konveksi yang makin besar pula. Koefisien konveksi juga akan semakin besar seiring

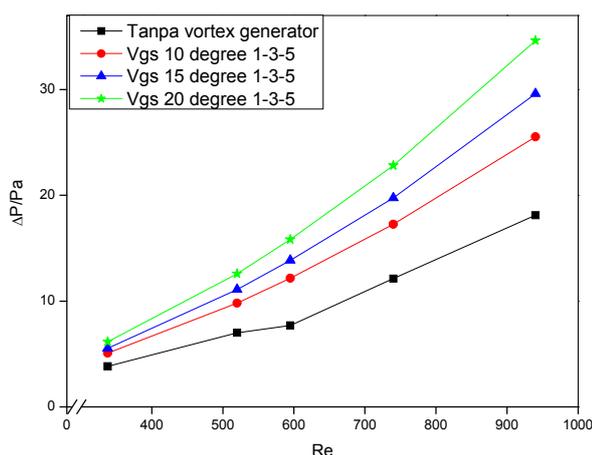
penambahan sudut serang *vortex generator*. Berdasarkan sudut serangnya koefisien konveksi terbesar diperoleh pada *vortex generator* dengan sudut serang 20° kemudian 15°, 10° dan paling rendah oleh fin tube tanpa pemasangan VGs. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin besar swirling area dan makin besar kekuatan swirling tersebut menandakan *vortex* yang terjadi juga makin besar. Hal tersebut memicu pencampuran yang lebih baik dalam aliran. Difusi masa tersebut yang meningkatkan perpindahan panas antar partikel yang juga lebih baik.



Gambar 7. Grafik koefisien konveksi terhadap bilangan Reynold sudut serang 10°, 15° dan 20°.

### Pressure Drop

Gambar 8 menunjukkan grafik pressure drop dari hasil simulasi dari perbandingan empat jenis variasi fin tube. Variasi tersebut yaitu dengan pemasangan di tube nomer 1-3-5 yang divariasikan menurut sudut serang yang berbeda-beda yaitu 10°, 15° dan 20° dan tanpa pemasangan VG. Berdasarkan grafik tersebut bahwa semakin besar bilangan Reynold maka pressure drop yang ditimbulkan juga semakin besar. Begitu juga semakin besar sudut serang *vortex generator*, pressure drop yang dihasilkan juga makin besar. Besarnya pressure drop tersebut diakibatkan oleh ketidakteraturan geometri akibat adanya tube dan penambahan geometri sisipan seperti *vortex generator*. Semakin tidak teratur daerah yang dilewati aliran maka pressure drop yang dihasilkan juga akan makin besar.



Gambar 8. Grafik pressure drop terhadap kecepatan sudut serang 10°, 15° dan 20°.

## Kesimpulan

Hasil penelitian ini menunjukkan pengaruh pemasangan vortex generator dan perbedaan sudut serang terhadap koefisien konveksi dan pressure drop. Melalui pemasangan *vortex generator* akan meningkatkan koefisien perpindahan panas secara konveksi oleh adanya swirling motion yang memicu adanya *vortex* yang menyebabkan pencampuran pada fluida. Pencampuran partikel yang babik merupakan penyebab tingginya koefisien perpindahan panas konveksi.

Berdasarkan sudut serangnya makin besar sudut serangnya maka koefisien konveksi yang diperoleh akan makin besar. Peningkatan koefisien konveksi tersebut masing masing sebesar 13.94-32.14% untuk sudut serang 10° kemudian 20.73-45% untuk sudut serang 15° dan 30.51-59.47% untuk sudut serang 20° jika dibandingkan dengan penukar kalor fin tube tanpa pemasangan *vortex generator*. Berdasarkan hasil tersebut disimpulkan bahwa *vortex generator* merupakan metode yang dapat ditempuh untuk meningkatkan koefisien perpindahan panas. Peningkatan *pressure drop* untuk sudut serang 10° berkisar antara 32.74-110.68%, untuk sudut serang 15° 44.41-144.26% dan untuk sudut serang 20° 60.66-185.86%.

## Referensi

- [1] Y. L. He, P. Chu, W. Q. Tao, Y. W. Zhang and T. Xie, "Analysis of Heat Transfer and Pressure Drop for Fin-and-Tube Heat Exchangers with Rectangular Winglet-Type Vortex generators," Applied Thermal Engineering, Vol. 61, pp. 770-783, 2013.
- [2] S. R. Hiravennavar, E. G. Tulapurkara and G. Biswas, "A Note on the Flow and Heat Transfer Enhancement in a Channel with Built-in Winglet Pair," International Journal

of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, pp. 299-305, 2007.

- [3] M. Fiebig, *Embedded vortices in internal flow: heat transfer and pressure loss enhancement*, Int. J. Heat Fluid Flow 16 (1995) 376e388.
- [4] S.H. Lee, H.S. Ryou, Y.K. Choi, *Heat transfer in a three-dimensional turbulent boundary layer with longitudinal vortices*, Int. J. Heat Mass Transfer 42 (1999) 1521e1534.
- [5] C.C. Wang, *Technology review – a survey of the recent progress of the patents of fin-and-tube heat exchangers*, J. Enhanced Heat Transfer 7 (2000) 333–345.
- [6] M. Fiebig, *Embedded vortices in internal flow: heat transfer and pressure loss enhancement*, Int. J. Heat Fluid Flow 16 (1995) 376e388.
- [7] F.J. Edwards, G.J.R. Alker, *The improvement of forced convection surface heat transfer using surface protrusion in the form of (A) cubes and (B) vortex generators*, in: Proceeding of Fifth Int. Heat Transfer Conf. Tokyo, Japan, vol.
- [8] A.Y. Turk, G.H. Junkhan, *Heat transfer enhancement downstream of vortex generators on a flat plate*, in: Proceeding of the Eighth Int. Heat Transfer Conf. Sanfrancisco, USA, vol. 6, 1986, pp. 2903–2908.
- [9] P.A. Eibeck, J.K. Eaton, *The effect of longitudinal vortices embedded in a turbulent boundary layer on momentum and thermal transport*, in: Proceeding of Eighth Int. Heat Transfer Conf. Sanfrancisco, USA, vol. 3, 1986, pp. 1115– 1120.
- [10] G. Biswas, and H. Chattopadhyay, *Heat transfer in a channel with built-in wing-type vortex generators*, Int. J. Heat Mass Transfer 35, 803-814 (1992).
- [11] Biswas, G., Torii, K., Fujii, D., Nishino, K., 1996. *Numerical and experimental determination of flow structure and heat transfer effects of longitudinal vortices in a channel flow*. International Journal of Heat and Mass Transfer 39, 3441–3451.
- [12] A. Joardar and A. M. Jacobi, *Heat Transfer Enhancement by Winglet-Type Vortex Generator Arrays in Compact Plain-Fin-and-Tube Heat Exchangers*, International Journal of Refrigeration, Vol. 31, pp. 87-97, 2008.