

KAJIAN NUMERIS KARAKTERISTIK ALIRAN UDARA KONVEKSI BEBAS PADA KONDENSOR TYPE CIRCULAR TUBE SUSUNAN DI TENGAH SALURAN TEGAK MENGGUNAKAN CFD

Mangkona¹⁾, Abdul Halim²⁾

^{1),2)} Dosen Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Samarinda

ABSTRACT

Further numerical study of the experiment conducted to examine the convected air flow characteristics free of gap ratio (S/D 1.05-4.20) on condenser with the capillary pipe length standard of the condenser refrigeration unit isothermal circular-type consisting of 20 in-line array in the middle of vertical channel was examined using CFD fluent. Numerical result shows S/D 1.05-4.20. It was obtained that the condenser heat transfer increased 4.4% to 226 W, which is equal to the experimental result. Started from S/D1.05, there was a strong blockage effect that the air flow characteristics between the tubes was dominated by recirculation, impacting the small temperature gradient and slow tangential velocity (v_t). On the other hands, S/D2.10 blockage effect reduced drastically and the buoyancy force produced a rapid air flow across the tubes. The Tangential velocity (V_t) increased rapidly, causing the local Nusselt number (Nu_θ) to pop up four times at $\theta = 0^\circ$ on the upstream tube 20. The average Nusselt number (\overline{Nu}) on the tubes surface increases 135%. The result q_{kond} increased significantly. Effect of S/D 3.15-4.20 temperature gradient relatively unchanged. Local Nusselt number (Nu_θ) did not undergo significant changes. The Air flow running across the channel only reduced the impact on the convected wall that in the gap ratio area the q_{kond} increases were no longer significant.

Keywords: *condensor, gap ratio, free convection, tangential velocity, temperature gradient, local Nusselt number.*

1. PENDAHULUAN

Karakteristik aliran udara konveksi bebas pada kondensor refrigerator yang berada di dalam enclosure dianggap kurang optimal. Karena udara sebagai fluida pendingin kondensor hanya berputar-putar di dalamnya. Oleh karena itu, kondensor refrigerator dalam kajian ini dibuat kisi-kisi pada ujung bawah dan atas untuk memberi kesempatan terjadi aliran udara dari luar yang secara alamiah menembus saluran vertikal. Untuk meningkatkan perpindahan panas, type semicircular atau setengah tube terbenam di styrofoam pada refrigerator, dalam kajian ini array ditempatkan di bagian tengah saluran vertikal menjadi type circular. Karakteristik aliran dan perpindahan panas konveksi alamiah pada jajaran tube secara in-line dalam vertical channel sangat dipengaruhi oleh jarak antara tube dan jarak antar dinding untuk panjang pipa kapiler yang sama sebagai beban panas tetap. Semakin dekat jarak antara tube, maka silinder kedua berada di daerah *wake* silinder pertama akan menyebabkan turunnya perpindahan panas pada sisi *upstream* silinder kedua. Bila silinder kedua berada jauh dari *wake* silinder pertama maka karakteristik aliran dan perpindahan panas silinder kedua mendekati silinder tunggal. Dalam penelitian ini jarak antar silinder dibuat konstan ditempatkan pada daerah dimana tiap silinder dapat dianggap sebagai silinder tunggal untuk memberikan perpindahan panas yang lebih optimal. Dilakukan variasi jarak antar dinding, peningkatan jarak antara dinding tersebut akan mengurangi *blockage* aliran udara dan memperbaiki perpindahan panas.

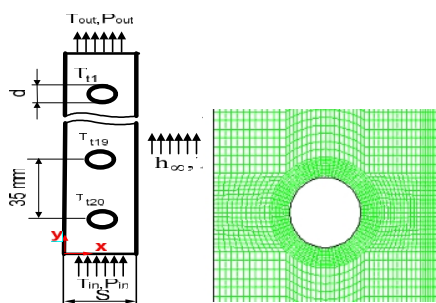
Untuk mengetahui performace perpindahan panas konveksi alamiah *vertical channel* maupun pada *enclosure*, dapat dilihat melalui beberapa kajian. Sefcik,dkk melakukan eksperimen perilaku konveksi alamiah pada enclosure yang diberi ventilasi di ujung bawah dan atas untuk memberi aliran udara guna memperbaiki perpindahan panas. Sisi luar salah satu dinding vertikal dipanasi dengan aliran air panas untuk menjaga suhu konstan pada dinding konveksi sedangkan dinding lainnya diisolasi. Mengemukakan bilangan Nusselt rerata akan meningkat sesuai dengan besarnya bukaan kedua ventilasi. Choickh,dkk mengkaji pola aliran pada dua silinder dengan memvariasikan jarak kedua silinder tersebut. Diperoleh garis isothermal yang menunjukkan thermal boundary layer semakin tipis dengan meningkatnya bilangan Rayleigh. Prabowo,dkk melakukan studi eksperimen dan numerik aliran kombinasi konveksi paksa dan bebas pada dua silinder disusun in-line. Bilangan Reynolds berada pada range $Re = 150-600$ dan bilangan Rayleigh modifikasi $Ra^* = 5 \times 10^5 - 10^7$ serta jarak antara silinder divariasikan. Menyimpulkan jarak antar kedua silinder mempengaruhi laju perpindahan

¹ Korespondensi penulis: Mangkono, Telp 085247867899, mangkono.polnes@gmail.com

perpindahan panas. Manca,dkk meneliti pengaruh variasi kemiringan pelat paralel yang dipanasi secara diskret. Memperkenalkan distribusi temperatur dinding sebagai fungsi jarak dinding channel dan sudut kemiringan (θ). Pada sudut kemiringan $< 85^\circ$ air inflow menghambat aliran udara di sisi keluar sehingga meningkatkan temperatur di dalam channel. Ary B dan Prabowo melakukan kajian eksperimen dan numerik untuk mengetahui pengaruh perubahan gap ratio dan laju massa fluida (oli panas) terhadap karakteristik aliran udara dan perpindahan panas konveksi bebas dari jajaran dua belas silinder dalam vertical channel. Menuliskan aliran udara dan perpindahan panas meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya gap ratio maupun bertambahnya beban panas.

2. METODE PENELITIAN

Studi numerik dilakukan dengan membuat model uji sesuai dengan geometri dan dimensi pada studi eksperimen yang diperlihatkan pada gambar 1, terdiri atas 20 array circular tube berada di tengah saluran tegak. Urutan tube dihitung no.1 paling atas sampai no.20 paling bawah. Gap ratio (S/D) 1.05; 2.10; 3.15 dan 4.20 pada panjang pipa kapiler 3.0 m (standard). S = jarak antar dinding, D = 1/4" (dia. silinder).

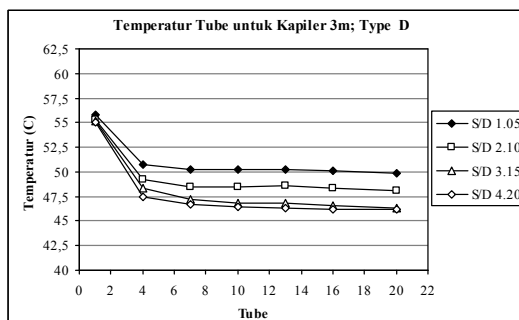


Gambar 1. Domain numerik dan model grid.

Dinding tegak didefinisikan sebagai dinding adiabatik dan dinding konveksi. Saluran masuk dan keluar didefinisikan sebagai pressure inlet dan pressure outlet. Solusi numerik diselesaikan dengan metode upwind differencing dan metode SIMPLE.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

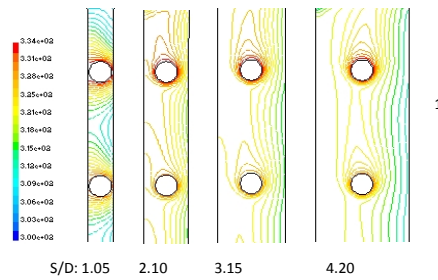
Grafik 1 memperlihatkan distribusi temperatur tube kondensor dalam variasi gap ratio. Perubahan S/D1.05-3.15 terjadi penurunan temperatur yang signifikan. Perubahan S/D1.05-2.10 menunjukkan besarnya pengaruh dinding konveksi terhadap perpindahan panas setelah blockage aliran terbuka. Sedangkan S/D2.10-3.15 laju aliran udara semakin bertambah, pengaruh dinding konveksi mulai berkurang. Bukaan S/D3.15-4.20 penurunan temperatur tube yang terjadi tidak signifikan lagi. Fenomena ini menunjukkan bahwa tambahan jarak dinding konveksi tidak berpengaruh lagi meningkatkan perpindahan panas yang signifikan, karena kecepatan udara melintasi tube lebih dahulu telah terakselerasi.



Grafik 1. Distribusi temperatur tube kondensensor terhadap gap ratio.

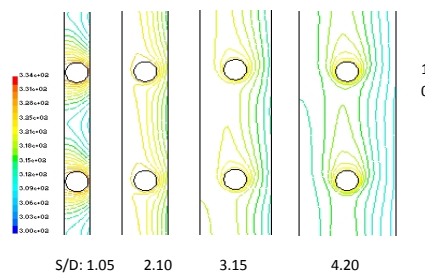
Garis-Garis Isotermal Udara

Gambar 2,3 dan 4 memperlihatkan peningkatan gap ratio menyebabkan temperatur udara menjadi semakin rendah, ditandai oleh garis-garis isothermal atau kontur temperatur udara yang melebar. Hal ini terjadi karena semakin meningkatnya laju massa udara yang masuk ke dalam saluran.



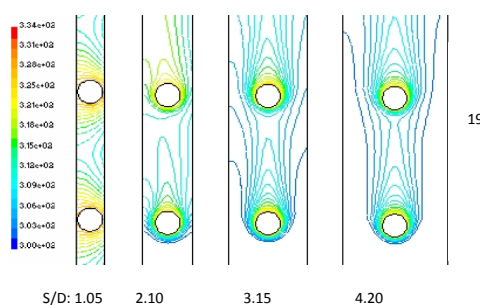
Gambar 2. Kontur temperatur udara tube 1-2.

S/D1.05-2.10, garis-garis isothermal yang tadinya rapat menjadi lebih renggang, berarti terjadi penurunan temperatur yang signifikan di dalam channel.



Gambar 3. Kontur temperatur udara tube 10-11.

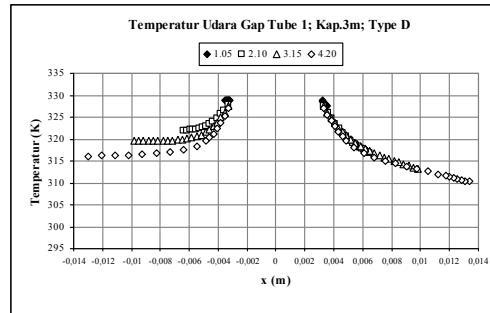
Awalnya S/D1.05 warna garis-garis isothermal terlihat perbedaan yang kontras, menandakan distribusi temperatur tidak tersebar secara efektif. Penyebabnya karena minimnya aliran udara menembus saluran. S/D2.10 penyebaran warna tersebut lebih merata, berarti distribusi temperatur menjadi lebih efektif. Garis-garis isothermal lebih rapat pada daerah dinding konveksi (Gambar 2 dan3), menandakan terjadinya penurunan temperatur dengan gradien yang lebih curam pada lokasi tersebut. S/D3.15-4.20, memperlihatkan garis-garis isothermal menjadi semakin renggang dan warnanya lebih hijau pada daerah dekat dinding konveksi. Fenomena ini menunjukkan temperatur udara yang makin rendah pada gap ratio yang besar, disebabkan oleh semakin besarnya massa udara yang melintas.



Gambar 4. Kontur temperatur udara tube 19-20

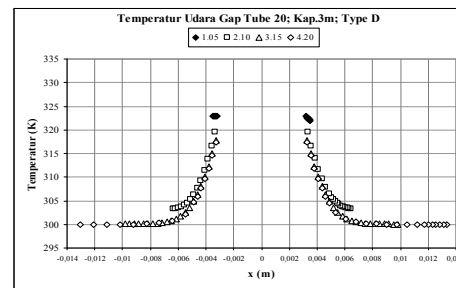
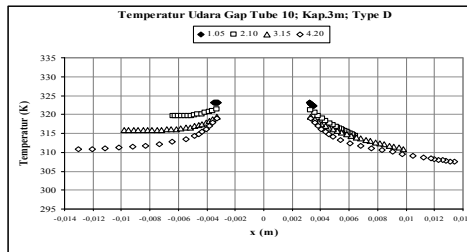
Profil Temperatur Gap Tube

Temperatur udara gap tube semakin rendah dengan meningkatnya gap ratio diperlihatkan pada Grafik 1 dan Gambar 5.



Gambar 5. Profil temperatur udara gap tube1.

S/D1.05-2.10 menyebabkan terjadinya penurunan temperatur udara gap dengan gradient yang curam. Penurunan temperatur ke arah dinding konveksi lebih curam dibandingkan ke arah dinding adiabatik untuk gap tube 1 dan 10 pada grafik 1, Gambar 5 dan 6. Sedangkan fenomena yang terjadi di gap tube 20 pada Gambar 6, memperlihatkan terjadinya penurunan temperatur antara permukaan tube dan udara dengan gradient tercuram.

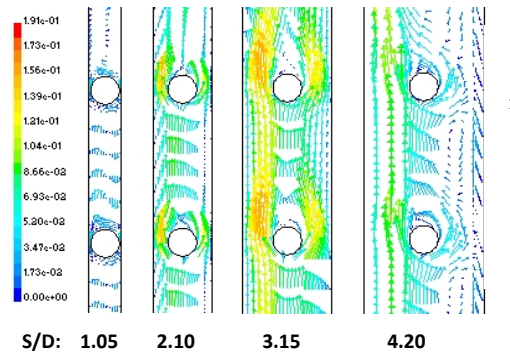


Gambar 6. Profil tempetratur udara gap tube10. Gambar 7. Profil tempetratur udara gap tube20.

Gap tube 20 menunjukkan profil temperatur yang relatif seimbang pada kedua sisi, karena tube 20 merupakan laluan udara masuk yang berperilaku sebagai silinder tunggal. Penurunan temperatur yang lebih besar pada gap tube 1 dibandingkan pada gap tube 10. Disebabkan oleh permukaan tube 1 merupakan temperatur tertinggi, karena tube ini merupakan sisi masuk berupa gas refrigerant *panas lanjut* dari kompressor. Sebaliknya gap tube 10, temperatur tube jauh lebih rendah karena refrigerant di dalamnya sebagian sudah mencair. Perbedaan penurunan temperatur ini berdampak kepada perbedaan Nusselt number di permukaan tube tersebut. Sedangkan profil temperatur tube 1, garis-garis isothermal condong ke kanan, terjadi *air inflow* yang mengganggu aliran keluar di sisi kiri gap menyebabkan kontur temperatur condong ke kanan. Terjadinya fenomena *air inflow* seperti ini juga dijumpai oleh *Manca dkk* pada eksperimen *inclined Discretely heated plat and a parallel shroud below*.

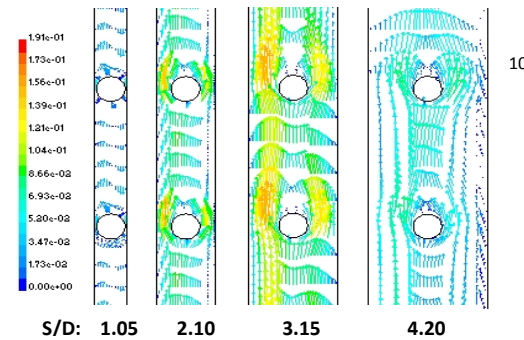
Vektor Kecepatan Udara

Gambar 8,10 dan 10 menunjukkan velocity vector di daerah tube 1-2, 10-11 dan 19-20, merupakan gambaran velocity vektor dalam gap secara keseluruhan untuk semua variasi gap ratio dengan panjang pipa kapiler standard.



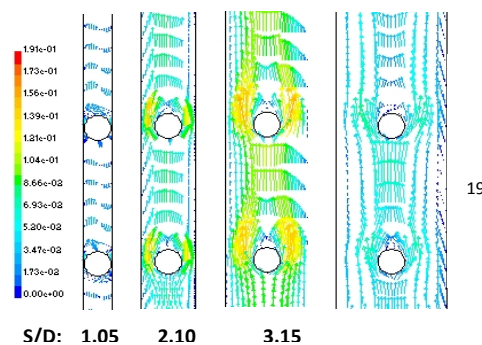
Gambar 8. Vektor Kecepatan udara tube 1-2.

Pada gambar ini terlihat kecepatan udara yang melintasi tube semakin terakselerasi dengan semakin meningkatnya gap ratio. S/D1.05-2.10 gerakan udara mengalami akselerasi yang besar karena hambatan aliran dari gap terkecil mulai dibuka, menyebabkan semakin besarnya laju massa udara yang mengalir. Mulai S/D1.05 di semua daerah gap terhadap dinding mempunyai kecepatan sangat kecil atau mendekati nol, ditandai dengan vektor warna biru tua. Hal ini disebabkan oleh kecilnya gap di setiap tube yang relatif rapat dengan kedua dinding. Karakter aliran udara yang terjadi di dominasi oleh *recirculation* di antara masing-masing tube.



Gambar 9. Vektor Kecepatan udara tube 10-11.

Udara mengalir ke bawah pada daerah dinding konveksi kemudian tertumbuk pada tube di atasnya yang relatif rapat dengan kedua dinding, aliran kemudian berbalik arah ke atas pada daerah dinding adiabatik. Sedangkan aliran udara ke atas yang dapat menembus gap tube intensitasnya sangat kecil, sehingga aliran kembali turun lagi melalui daerah dinding konveksi, demikian yang terjadi antara setiap array tube. S/D2.10 kecepatan udara meningkat pesat, karena berkurangnya blockage effect maka udara dengan leluasa dapat menembus saluran. Daerah dekat dinding konveksi menunjukkan vektor kecepatan warna kuning, sementara dekat dinding adiabatik dengan warna merah muda. Karakter ini menunjukkan udara dekat dinding konveksi bergerak lebih lambat dibandingkan dengan udara dekat dinding adiabatik yang disebabkan oleh perbedaan gaya *bouyancy* yang terjadi.

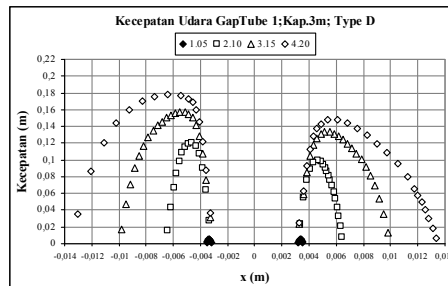


Gambar 10. Vektor Kecepatan udara tube 19-20.

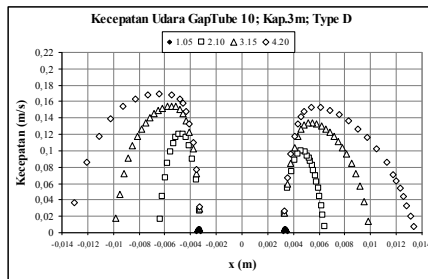
Peningkatan S/D3.15-4.20, kecepatan udara hanya meningkat sedikit, ditandai dengan warna vektor yang tidak banyak berubah. Daerah kecepatan lebih tinggi berubah menjadi lebar yang menandakan semakin banyaknya udara yang melintasi channel, namun tidak banyak berpengaruh terhadap peningkatan konveksi.

Laju Aliran Udara Gap Tube

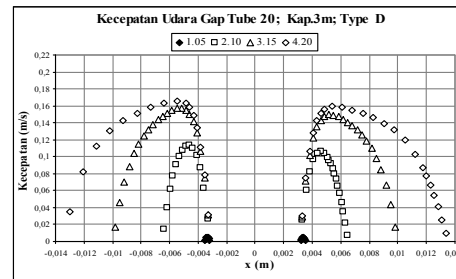
Gambar 11,12 dan 13 menunjukkan laju udara melintasi gap tube pada setiap gap ratio. Daerah S/D1.05-2.10 menyebabkan kecepatan udara meningkat dengan kemiringan yang terjal terjadi pada gap tube 1, 10 dan 20. Kecepatan maksimum pada gap tube 1, 10 dan 20 meningkat dari 0,2 cm/s menjadi 12 cm/s (naik drastis).



Gambar 11. Laju udara gap tube 1.



Gambar 12. Laju udara gap tube 10.

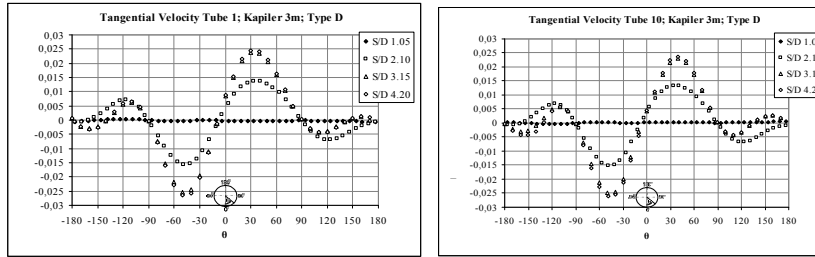


Gambar 13. Laju udara gap tube 20.

S/D3.15-4.20 memberikan akselerasi dengan gradien yang landai. Pada gap tube kecepatan udara maksimum yaitu pada S/D 4.20 Kecepatan maksimum meningkat dari 16 cm/s menjadi 18 cm/s. Gap ratio memberikan pengaruh kecepatan atau percepatan udara yang berbeda-beda, perubahan geometri saluran sangat mempengaruhi besarnya hambatan aliran. Demikian pula semakin tinggi posisi tube kecepatan udara dekat dinding konveksi semakin menurun. Sebaliknya kecepatan udara dekat dinding adiabatik semakin meningkat. Fenomena ini terjadi karena adanya perbedaan gaya bouyancy yang kuat dampak dari perbedaan temperatur pada posisi tersebut. Disamping itu semakin besar kecepatan, posisi kecepatan maksimum makin bergeser menjauhi permukaan tube. Sehingga peningkatan gap ratio berpengaruh kepada aliran massa udara semakin besar untuk mendinginkan channel sehingga memperbesar gradient temperatur antara permukaan tube dan udara. Juga berarti memperbaiki intensitas tangential velocity yang berguna meningkatkan Nusselt number.

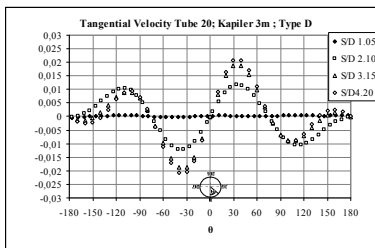
Kecepatan Tangensial

Gambar 14-15 menunjukkan distribusi tangential velocity melintasi permukaan tube S/D1.05-4.20, terlihat intensitas tangential velocity meningkat. S/D1.05-2.10 tangential velocity bertambah dengan gradien yang terjal, kerena pesatnya peningkatan aliran udara.

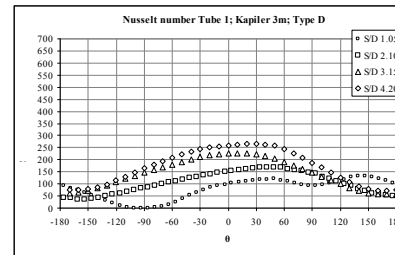


Gambar 14. Kecepatan tangensial tube 1. Gambar 15. Kecepatan tangensial tube 10.

S/D3.15-4.20 nilai tangential velocity hanya meningkat landai, pola profil tangential velocity hampir tidak mengalami perubahan. Daerah tube 1 (Gambar 14) menunjukkan aliran udara melintasi permukaan tube mempunyai titik stagnasi sekitar $\theta = -12^\circ$, kemudian mengalami akselerasi hingga sekitar $\theta = 35^\circ$ dan $\theta = -45^\circ$. Selanjutnya mengalami deselerasi, hingga $\theta = 86^\circ$ dan $\theta = -92^\circ$ aliran mulai terseparasi. Pada daerah antara $\theta = 86^\circ$ sampai 130° dan sekitar $\theta = -92^\circ$ sampai -137° terdapat tangential velocity arah berlawanan. Arah yang berlawanan ini disebabkan oleh adanya vortex separasi di daerah *downstream* tube 1 yang mengganggu *tangential velocity* dibelakang tube. *Tangential velocity* di permukaan tube daerah dinding konveksi lebih kecil dibandingkan pada permukaan tube daerah dinding adiabatik. Dimana semakin tinggi posisi tube titik stagnasi semakin ke kiri, hal ini disebabkan oleh terjadinya gaya *bouyancy* yang lebih besar di sebelah kiri karena temperaturnya lebih tinggi.



Gambar 15. Kecep. tangensial tube 20.

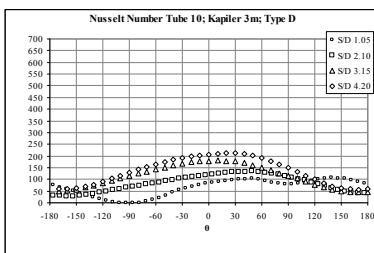


Gambar 16. Distribusi Nusselt number tube 1.

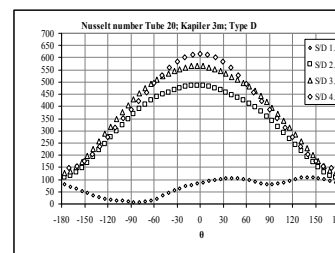
Local Nusselt number

Distribusi *Local Nusselt number* di permukaan tube pada S/D1.05-4.20 diperlihatkan pada grafik 5a-c. Peningkatan gap ratio menyebabkan Nusselt number yang bertambah. Fenomena ini dijumpai pula oleh Sefcik dkk dalam penelitian *vertically vented enclosure* tanpa tube, mengemukakan apabila ventilasi *enclosure* dibuka lebih lebar secara umum meningkatkan koefisien perpindahan panas.

Peningkatan gap ratio pada range S/D1.05-2.10 menghasilkan Nusselt number menanjak dengan gradient yang terjal. Dimulai S/D1.05 Nusselt number dominan berada di daerah *upstream* dan *downstream* tube, disebabkan oleh aliran didominasi *recirculation* pada daerah antar tube. Pada S/D2.10 Nusselt number kemudian meningkat karena adanya akselerasi yang kuat.



Gambar 17. Distribusi Nusselt number tube 10.



Gambar 18. Distribusi Nusselt number tube 20.

Sebaliknya pada range $S/D3.15-4.20$ Nusselt number masih bertambah dengan gradient yang landai. Dari Gambar 16-18, menunjukkan distribusi Nusselt number tetap tertinggi di daerah *upstream* dibandingkan dengan daerah *downstream* tube. Gejala ini terjadi oleh perbedaan *tangential velocity* dan temperature gradient antara permukaan tube dan udara gap. Untuk semua tube tersebut, pada daerah titik separasi yang seharusnya mempunyai Nusselt number paling kecil ternyata mempunyai Nusselt number yang cukup tinggi, hal ini terjadi karena adanya *vortex* separasi yang mengisi daerah belakang titik separasi.

Untuk semua tube dan gap ratio pada type circular ini, walaupun tangential velocity lebih tinggi pada daerah sebelah kiri tube tetapi profil Nusselt number tetap condong ke kanan. Disebabkan oleh pengaruh dinding adiabatik sehingga temperature gradient antara tube dan udara menjadi landai di sisi kiri tube, disusul oleh menurunnya Rayleigh number dipermukaan tube tersebut. Sedangkan untuk tiap gap ratio, Nusselt number pada tube 1 lebih tinggi daripada tube 10, karena gradien temperatur pada tube 1 lebih curam daripada tube 10. Nusselt number mempunyai angka maksimum 600 pada tube 20 (Gambar 17) dibandingkan 230 pada tube 10; dan 260 di tube 1 (Gambar 16-18). Disebabkan oleh tube 20 mempunyai temperature gradient yang paling curam. Sedangkan tube 1 mempunyai Nusselt number lebih besar daripada tube 10, karena tube 1 lepas ke udara luar.

4. KESIMPULAN

Peningkatan gap ratio S/D menyebabkan kecepatan aliran udara meningkat, terlihat dari semakin besarnya vektor kecepatan udara dan luasannya. Pada $S/D1.05-2.10$ terjadi peningkatan kecepatan yang signifikan sehingga memberikan penurunan temperatur dengan gradient yang curam. $S/D1.05$ tangential velocity sangat kecil akibat *blockage* aliran. Karakter aliran didominasi oleh *recirculation* yang terjadi pada daerah diantara tube. Udara bergerak naik di sisi dinding adiabatik akibat *bouyancy force*, sebaliknya bergerak turun di sisi dinding konveksi akibat gaya grafitasi. Pada $S/D2.10$ tangential velocity meningkat kuat karena *blockage effect* yang berkurang secara drastis. Terbukanya *blockage* menghasilkan intensitas aliran udara yang kuat. Akibatnya temperatur antara permukaan tube dan udara mengalami penurunan dengan gradient yang curam. Sedangkan pada $S/D3.15-4.20$ terjadi peningkatan kecepatan dengan intensitas yang lemah, akibatnya hanya memberikan penurunan temperatur yang kecil. Peningkatan gap ratio pada range ini untuk mengurangi *blockage* aliran sudah tidak signifikan lagi. Aliran udara di sisi sebelah kiri tube lebih cepat dibandingkan dengan di sisi sebelah kanan, terjadi akibat adanya perbedaan gaya bouyancy.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Davidson, J., Wei Liii, 2002, "Natural Convection of a Horizontal Tube Heat Exchanger Immersed in a Tilted Enclosure", Journal of Solar Energi Engineering, vol.III, p.1-35.
- Krishna, Ary B., dan Prabowo, 2004, "Perpindahan Panas pada Heat Exchanger Vertical Channel", Jurnal Teknik Mesin Vo.4 no.3, ITS Surabaya.
- Manca, O, Nardini, S dan Naso, V., 2002, "Effect on Natural Convection of the Distance Between an Inclined Discretely Heated Plat and a Parallel Shroud Below", Journal of Heat Transfer, vol.124, p. 441-451.
- Newport, D.T., 2001, "On the Thermal Interaction Between an Isothermal Cylinder and Its Isothermal Enclosure for Cylinder Rayleigh Numbers of Order 10^4 ", Journal of Heat Transfer vol. 133 P 1052-1061.
- Olajuwon, B.I., 2009, "Flow and Natural Convection Heat Transfer in a Power Law Fluid Past a Vertical Plate with Heat Generation", International Journal of Science, Vol.7(2009) No.1, pp.50-56.
- Prabowo, Tajima,N., Kikuchi,Y., 2000, "Hysteretic Phenomena of Combined Forced And Natural Convection From Single Row of Five Cylinders", Journal of em. Fac. Eng. Hiroshima Univ.Vol.49.
- Zahrani dan Kiwan, S, 2008, " Mixed Convection Heat Transfer in the Annulus Between Two Concentric Vertical Cylinders Using Porous Layers", Springer Netherlands, Vol. 76, p391-405.