

PENGUKURAN INTENSITAS TURBULENSI PADA SUSUNAN SEBARIS DAN DUA BARIS PIPA BERSIRIP LINGKARAN MENGGUNAKAN LASER DOPPLER VELOCIMETER

N. Sinaga^{*)}

Abstrak

Artikel ini memaparkan hasil pengukuran kecepatan dan intensitas turbulensi di daerah hilir susunan sebaris dan dua baris pipa bersirip, yang dilatarbelakangi oleh anggapan bahwa, laju perpindahan kalor dan kerugian tekanan sangat dipengaruhi oleh intensitas turbulensi yang terjadi. Pengukuran dilakukan di dalam seksi uji sebuah kanal hidrolis berukuran 600 mm x 150 mm x 150 mm, dengan menggunakan teknik Laser Doppler Velocimetry. Pipa dan sirip disusun dalam konfigurasi sebaris dan berseling, dengan diameter luar silinder dan sirip masing-masing 16 mm dan 33,6 mm. Kecepatan aliran masuk seksi uji dijaga konstan sebesar 1,4 m/detik atau setara dengan $Re = 26000$, berdasarkan kecepatan arus bebas dan diameter pipa. Disimpulkan bahwa harga intensitas turbulensi dipengaruhi oleh cara penyusunan pipa dan sirip, dimana susunan pipa berseling cenderung membangkitkan turbulensi yang lebih besar dibandingkan dengan susunan pipa sebaris. Akan tetapi, didapatkan pula, intensitas turbulensi susunan pipa sebaris dapat ditingkatkan dengan menyusun sirip secara berseling.

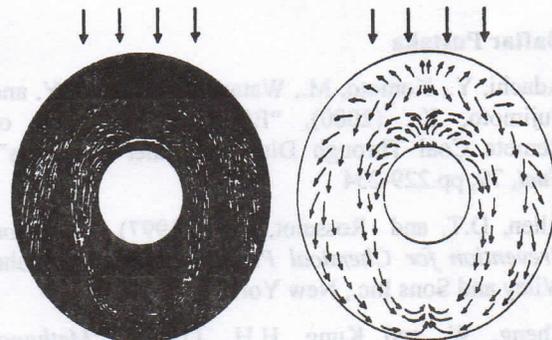
Kata Kunci: intensitas turbulensi; pipa bersirip; susunan sebaris; susunan berseling

Pendahuluan

Mekanisme aliran yang terjadi di sekitar suatu susunan berkas pipa bersirip lingkaran di dalam aliran silang adalah sangat kompleks. Hal ini disebabkan karena adanya interaksi antara dua jenis aliran, yaitu aliran melalui plat datar dan silinder. Beberapa peneliti telah melakukan pengamatan eksperimental untuk menjelaskannya, baik secara kualitatif maupun kuantitatif (Stasiulevicius dan Skrinska, 1988; Sinaga et al, 2003). Pengamatan visual yang dilakukan oleh Sparrow dan Chastain dengan menggunakan *oil-lampblack technique* pada sebuah pipa bersirip-tunggal, dapat memberi gambaran tentang pola aliran yang terjadi (Sparrow dan Chastain, 1986).

Pada Gambar 1 ditunjukkan bahwa di bagian terdepan sirip terbentuk gelembung separasi berkecepatan rendah, yang diikuti oleh daerah aliran balik dan pelekatan kembali. Selanjutnya terjadi pertumbuhan lapisan batas yang melawan gradien tekanan positif yang dihasilkan oleh stagnasi aliran di bagian depan pipa. Akibat gradien tekanan tersebut maka lapisan batas terseparasi. Daerah di dekat bagian depan pipa terdiri dari sistem vortex. Efeknya pada permukaan sirip adalah membentuk daerah aliran balik yang cukup luas, yang diikuti oleh daerah antar-vortex berkecepatan rendah. Vortex yang terbentuk di permukaan sirip berotasi di sekeliling pipa dengan sumbu rotasi tegak lurus bidang simetri pola aliran. Aliran *swirling* yang dihasilkan tersebut

membentuk konfigurasi huruf-U, yang biasa disebut dengan *horseshoe-vortex*. Daerah di bagian belakang pipa merupakan daerah berkecepatan rendah. Daerah ini merupakan daerah separasi dan wake pipa.



Gambar 1. Hasil visualisasi dan interpretasi pola aliran pada pipa bersirip lingkaran dengan sirip berpenampang segi empat (Sparrow dan Chastain, 1986).

^{*)} Efficiency and Energy Conservation Laboratory (EECL)
Mechanical Engineering Department Technical Faculty of Diponegoro University
Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang 50239
Phone. 62-24-70776752 Fax. 62-24-7460059 E-mail: nazarsinaga@yahoo.com

Penelitian yang dilakukan oleh Kestin (1966) serta Kestin dan Wood (1970) mengenai pengaruh intensitas turbulensi arus bebas (*free stream*) terhadap peningkatan laju perpindahan kalor di daerah sekitar titik stagnasi benda tumpul, disimpulkan bahwa peningkatan intensitas turbulensi akan memperbaiki laju perpindahan kalor. Beberapa penelitian lain yang telah dilakukan memberi kesimpulan bahwa peningkatan harga intensitas turbulensi cenderung akan meningkatkan laju perpindahan kalor. Pembangkitan turbulensi dapat dilakukan dengan berbagai cara, baik secara aktif maupun pasif (Webb, 1994). Salah satu cara yang diduga dapat membangkitkan turbulensi secara pasif adalah dengan menggunakan susunan berkas pipa, baik dengan sirip maupun tanpa sirip (Zukauskas, 1994).

Tulisan ini akan mengetengahkan hasil pengukuran intensitas turbulensi dan kecepatan yang terjadi di sekitar susunan berkas pipa bersirip lingkaran. Perhatian akan dipusatkan pada daerah di hilir susunan berkas pipa satu dan dua baris. Tujuan utama yang ingin dicapai adalah mengamati pengaruh penyusunan pipa dan sirip, yaitu secara segaris (*inline*) dan berseling (*staggered*), terhadap distribusi nilai intensitas turbulensi. Informasi yang diperoleh diharapkan dapat digunakan untuk mencari alternatif perancangan penukar kalor yang memiliki rasio laju pertukaran kalor terhadap daya pemompaan yang lebih baik, dibandingkan dengan rancangan penukar kalor sejenis yang pernah diusulkan sebelumnya.

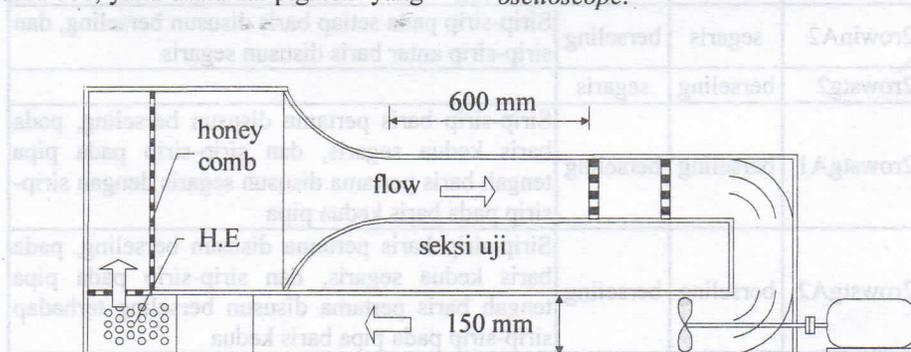
Sistem Pengujian

Instalasi pengujian terdiri dari sistem LDV lengkap dengan perangkat akuisisi dan pengolah data, meja datar tempat meletakkan probe sinar laser, kanal tertutup yang dialiri air, serta tachometer untuk mengukur kecepatan putar motor penggerak pompa. Probe fiber berfungsi untuk memancarkan dan menerima pantulan sinar laser dari *seeding particles* yang mengalir bersama air. Partikel penerima dan pemantul cahaya yang digunakan dalam pengukuran ini adalah Iridine-111, yaitu suatu zat pigmen yang

berwarna putih. Benda kerja ditempatkan di dalam seksi uji kanal hidrolik seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Kanal ini terbuat dari bahan plexyglass transparan, dan dilengkapi dengan sistem pemompaan yang terdiri dari motor dan impeller aksial. Kecepatan aliran masuk seksi uji dapat divariasikan dengan mengatur kecepatan putar motor yang dilengkapi dengan tachometer optik digital dengan resolusi sebesar 1 rpm. Meja datar dilengkapi dengan pengatur posisi dengan kecermatan pengukuran dimensi untuk setiap sumbu adalah 0,02 mm.

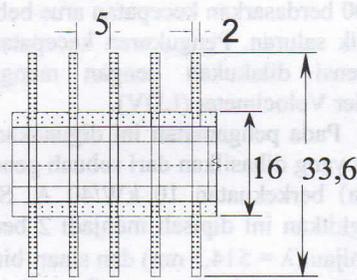
Model susunan berkas yang diamati sebanyak 8 buah, dan memiliki diameter luar pipa 16 mm serta diameter luar sirip 33,6 mm. Kecepatan arus bebas dijaga konstan sebesar 1,4 m/detik atau setara dengan bilangan Reynolds sebesar 26000, dihitung berdasarkan kecepatan arus bebas dan diameter pipa, atau sebesar 250000 berdasarkan kecepatan arus bebas dan diameter hidrolik saluran. Pengukuran kecepatan dan intensitas turbulensi dilakukan dengan menggunakan Laser Doppler Velocimeter (LDV).

Pada pengamatan ini digunakan sinar laser ion Argon yang dihasilkan dari sebuah generator (Coherent Innova) berkekuatan 10 kW/40 A. Sinar laser yang dibangkitkan ini dipisah menjadi 2 berkas sinar, yaitu sinar hijau ($\lambda = 514,5 \text{ nm}$) dan sinar biru ($\lambda = 488 \text{ nm}$), di dalam sebuah sistem optik modular yang dibuat oleh TSI Incorporated. Sinar hijau digunakan untuk mengukur vektor kecepatan dalam arah aksial (u), sedangkan sinar biru digunakan untuk mengukur kecepatan dalam arah tegaklurusnya (v). Kedua sinar ini difokuskan dengan menggunakan lensa tunggal yang berjarak fokus 350 mm. Pada titik fokus lensa tersebut dihasilkan pola *fringe* dengan jarak antar fringe sebesar $3,6107 \mu\text{m}$. Sinyal yang diterima oleh photodetector berupa gelombang sinusoidal dengan amplitudo yang bervariasi dalam gelombang Gaussian. Intensitas sinyal ini diperkuat kembali oleh *photo multiplier* dengan frekuensi yang tetap sama. Selanjutnya sinyal ini dinalisa di dalam *intelligent flow analyzer* IFA 750 yang dapat dilihat melalui *oscilloscope*.



Gambar 2. Kanal hidrolik yang digunakan dalam pengujian

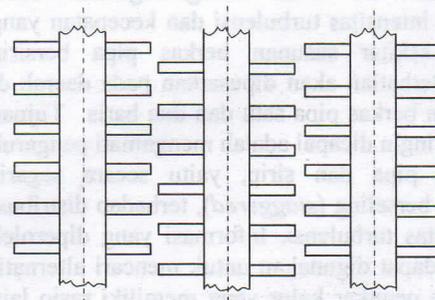
Secara paralel, sinyal tersebut juga diteruskan ke sistem akuisisi di dalam komputer yang menggunakan perangkat lunak FIND (*Flow Information Display*) yang dikeluarkan oleh TSI. Di dalam program ini dapat dilakukan analisa sinyal maupun analisa data statistik. Besaran yang dapat dihasilkan untuk setiap komponen adalah kecepatan lokal, kecepatan rata-rata, intensitas turbulensi, sudut-sudut vektor kecepatan, tegangan Reynolds, standard deviasi, dan koefisien korelasi. Pada analisa spektrum dapat dilihat distribusi energi dan frekuensi sinyal. Konfigurasi yang diuji pada pengamatan ini adalah susunan satu baris, dua baris segaris, dan dua baris berseling. Pada Gambar 3



Gambar 3. Geometri pipa bersirip

ditunjukkan geometri sebuah pipa bersirip dengan panjang pipa 150 mm. Cara penyusunan sirip berseling diperlihatkan pada Gambar 4. Untuk memudahkan pencirian konfigurasi pipa, maka di dalam Tabel 1 diberikan keterangan mengenai setiap model yang diuji.

Pada Gambar 5 dan 6 ditunjukkan, berturut-turut, cara penyusunan berkas pipa segaris dan berseling. Pengukuran kecepatan untuk setiap pengamatan dilakukan pada beberapa titik dalam arah longitudinal (X_B) dan transversal (Z) pada bidang yang dibentuk oleh kedua garis sumbu tersebut, yaitu bidang simetri seksi uji (di bagian tengah panjang pipa).



Gambar 4. Konfigurasi sirip berseling

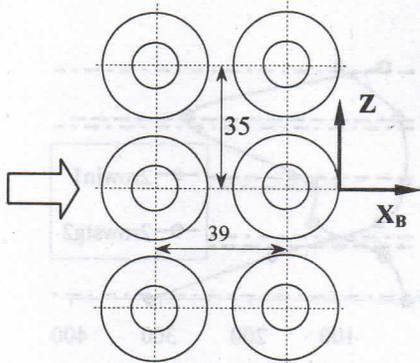
Tabel 1. Deskripsi model uji yang digunakan

Model	Konf. Pipa	Konf. sirip	Keterangan
1rowft2	-	segaris	Sebaris pipa dengan jarak antar pipa 35 mm
1rowft2a	-	berseling	Sirip-sirip antar pipa disusun berseling
2rowin1	segaris	segaris	Dua baris pipa dengan jarak antar baris 39 mm
2rowinA1	segaris	berseling	Sirip-sirip pada setiap dan antar baris disusun berseling
2rowinA2	segaris	berseling	Sirip-sirip pada setiap baris disusun berseling, dan sirip-sirip antar baris disusun segaris
2rowstg2	berseling	segaris	
2rowstgA1	berseling	berseling	Sirip-sirip baris pertama disusun berseling, pada baris kedua segaris, dan sirip-sirip pada pipa tengah baris pertama disusun segaris dengan sirip-sirip pada baris kedua pipa
2rowstgA2	berseling	berseling	Sirip-sirip baris pertama disusun berseling, pada baris kedua segaris, dan sirip-sirip pada pipa tengah baris pertama disusun berseling terhadap sirip-sirip pada pipa baris kedua

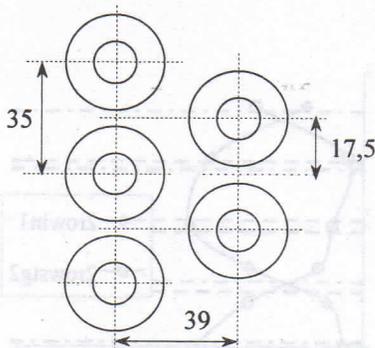
Posisi nol bagi X_B dan Z ditunjukkan pada Gambar 5, yaitu selalu berada pada diameter terluar sirip dan terletak diantara dua sirip yang berdekatan di bagian tengah pipa. Garis $Z=0$ adalah garis sumbu kanal dalam arah longitudinal. Pada pengamatan ini probe sinar laser diletakkan sedemikian rupa sehingga besaran-besaran yang diukur adalah terdiri dari komponen X_B dan Z , yaitu komponen kecepatan u dan v . Nilai kecepatan aliran merupakan besar kecepatan rata-rata resultan 2 dimensi dalam kedua arah tersebut. Definisi intensitas turbulensi yang digunakan dalam pengujian ini dinyatakan oleh persamaan:

$$IT = \frac{\sqrt{0.5(u'^2 + v'^2)}}{u + v}$$

dimana u dan v adalah vektor kecepatan rata-rata, sedangkan u' dan v' berturut-turut adalah komponen kecepatan fluktuatif dalam arah X_B dan Z .



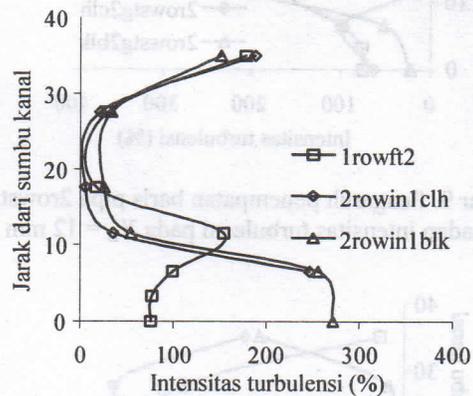
Gambar 5. Konfigurasi Segaris



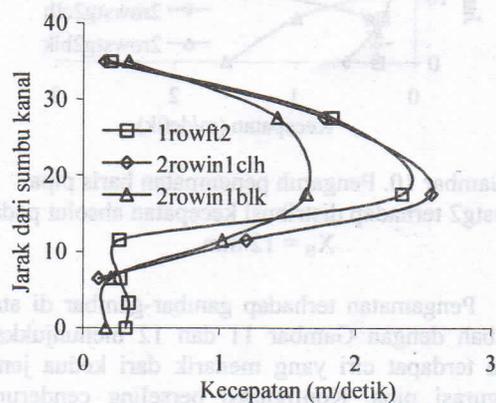
Gambar 6. Konfigurasi berseling

Hasil Pengujian dan Pembahasan

Data-data yang dihasilkan dari pengukuran dengan LDV ini disajikan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 7 hingga Gambar 18. Pengaruh penempatan baris pipa terhadap medan aliran dari konfigurasi sebaris pipa bersirip (1rowft2) diwakili oleh Gambar 7 dan 8. Kurva 2rowin1clh adalah hasil pengukuran yang dilakukan pada celah diantara dua baris pipa. Kurva 2rowin1blk menunjukkan hasil pengukuran yang dilakukan di hilir baris kedua konfigurasi 2rowin1. Terlihat bahwa terjadi perubahan distribusi intensitas turbulensi dan kecepatan yang cukup berarti pada penempatan baris pipa di belakang maupun di depan susunan pipa satu baris. Perubahan intensitas turbulensi terlihat lebih jelas dibandingkan dengan perubahan kecepatan. Penempatan sebaris pipa di belakang 1rowft2 ternyata tidak memberikan perubahan medan kecepatan yang berarti, sebaliknya penempatan sebaris pipa di bagian depan 1rowft2 akan menghasilkan perubahan medan kecepatan yang cukup berarti. Akan tetapi, distribusi harga intensitas turbulensi untuk daerah di celah antar dua baris pipa dan di bagian belakang susunan 2rowin1 tidak menunjukkan perbedaan yang berarti.

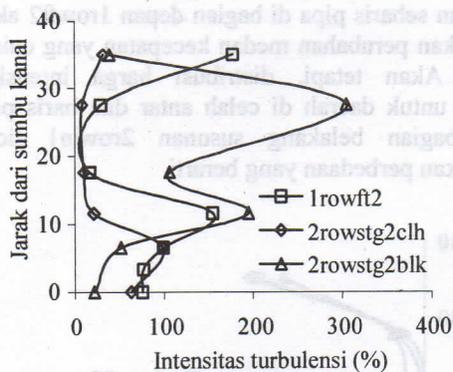


Gambar 7. Pengaruh penempatan baris pipa 2 baris segaris terhadap intensitas turbulensi pada $X_B = 12$ mm

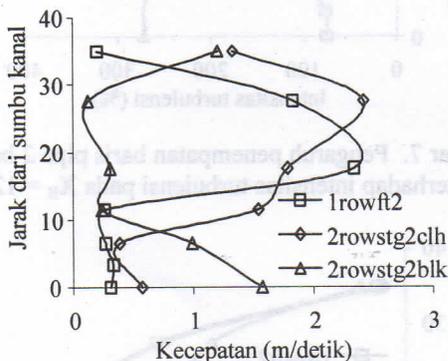


Gambar 8. Pengaruh penempatan baris pipa 2 baris segaris terhadap kecepatan absolut pada $X_B = 12$ mm

Pengaruh penempatan sebaris pipa di bagian belakang konfigurasi 1rowft2, sehingga membentuk konfigurasi 2rowstg2, dapat dilihat pada Gambar 9 dan 10. Perubahan medan aliran lebih nyata daripada kasus sebelumnya di atas. Hal ini cukup wajar, mengingat penempatan sebaris pipa di bagian belakang 1rowft2 adalah pada medan aliran yang berbeda dibandingkan dengan medan aliran konfigurasi 2rowin1, yaitu dengan menempatkan barisan yang terdiri dari 2 buah pipa. Berbeda dengan kasus 2rowin1, penempatan sebaris pipa di bagian belakang akan menurunkan intensitas turbulensi baris pipa yang di depan. Dari kedua pengamatan tersebut, yaitu pada dua baris pipa segaris dan berseling, dapat dikatakan bahwa medan aliran 1rowft2 akan berubah jika ditempatkan sebaris pipa di belakang maupun di depannya.



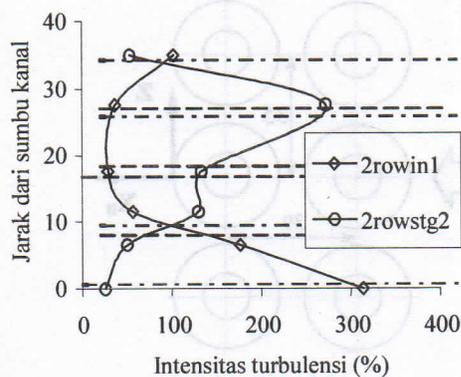
Gambar 9. Pengaruh penempatan baris pipa 2rowstg2 terhadap intensitas turbulensi pada $X_B = 12$ mm



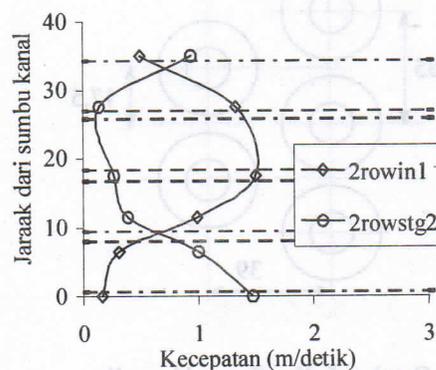
Gambar 10. Pengaruh penempatan baris pipa 2rowstg2 terhadap distribusi kecepatan absolut pada $X_B = 12$ mm

Pengamatan terhadap gambar-gambar di atas ditambah dengan Gambar 11 dan 12 menunjukkan bahwa terdapat ciri yang menarik dari kedua jenis konfigurasi pipa. Konfigurasi berseling cenderung menghasilkan distribusi intensitas turbulensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi segaris. Peningkatan harga intensitas turbulensi di sekitar pipa bersirip merupakan indikasi dari lebih intensifnya

pertukaran kalor konveksi. Keadaan ini juga dapat menjelaskan hasil pengamatan Sparrow dan Samie (1985) yang mengamati susunan 2 baris pipa segaris dan berseling. Pada penelitian yang dilakukan oleh Sparrow dan Samie diperlihatkan bahwa konfigurasi pipa berseling memiliki harga bilangan Nusselt yang lebih tinggi daripada konfigurasi segaris, akan tetapi konfigurasi berseling menghasilkan kerugian tekanan yang besar pula. Hal ini cukup menarik untuk dikaji lebih lanjut jika ingin diterapkan pada alat penukar kalor. Gejala ini mengantarkan pada petunjuk bahwa, jika aspek perpindahan kalor ingin lebih ditonjolkan daripada aspek pemompaan fluida, maka konfigurasi yang lebih sesuai adalah konfigurasi berseling. Sebaliknya, jika energi pemompaan merupakan suatu batasan yang lebih dominan, maka konfigurasi yang lebih sesuai adalah konfigurasi segaris. Kenyataan ini sesuai dengan kebanyakan persamaan-persamaan korelasi yang diusulkan untuk menghitung laju perpindahan kalor dan kerugian tekanan susunan pipa segaris dan berseling (Stasiulevicius dan Skrinska 1988).

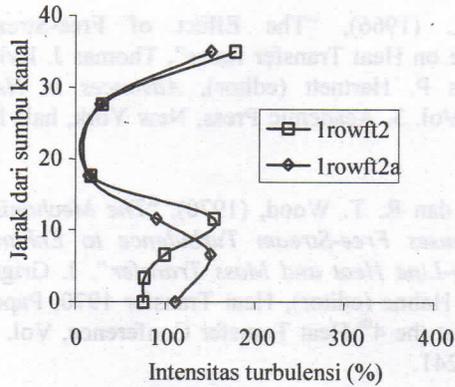


Gambar 11. Perbandingan intensitas turbulensi susunan 2 baris pipa pada $X_B = 17$ mm

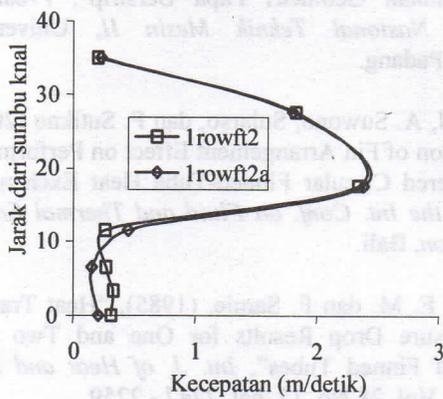


Gambar 12. Perbandingan distribusi kecepatan susunan 2 baris pipa pada $X_B = 17$ mm

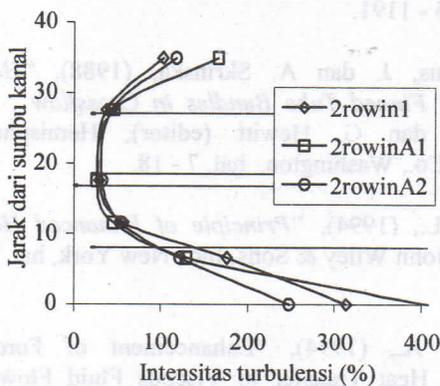
Pengaruh cara penyusunan sirip pada susunan sebaris pipa dan dua baris pipa segaris, ternyata tidak menunjukkan adanya perubahan yang berarti (Gambar 13 hingga 16). Jelas sekali terlihat bahwa intensitas turbulensi maupun kecepatan aliran hampir-hampir tidak berubah jika cara penyusunan siripnya divariasikan.



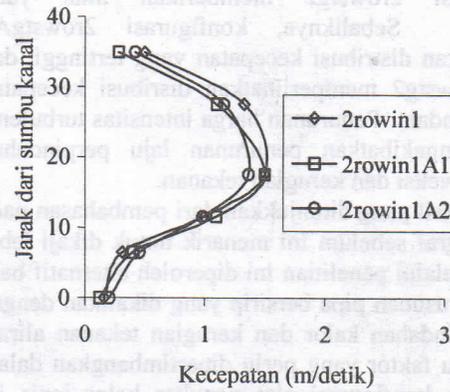
Gambar 13. Pengaruh penyusunan sirip terhadap intensitas turbulensi susunan pipa satu baris pada $X_B = 12$ mm



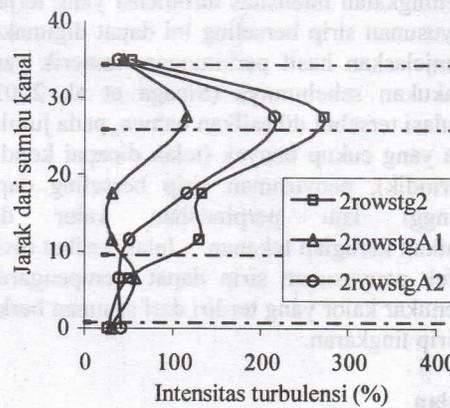
Gambar 14. Pengaruh penyusunan sirip terhadap distribusi kecepatan absolut susunan pipa sebaris pada $X_B = 12$ mm



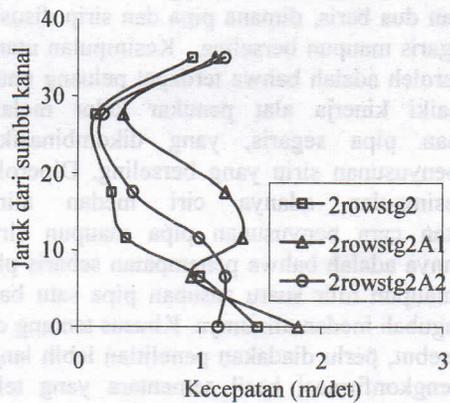
Gambar 15. Pengaruh penyusunan sirip terhadap intensitas turbulensi 2 baris pipa segaris pada $X_B = 17$ mm



Gambar 16. Pengaruh penyusunan sirip terhadap kecepatan absolut 2 baris pipa segaris pada $X_B = 17$ mm



Gambar 17. Pengaruh penyusunan sirip terhadap intensitas turbulensi di hilir 2 baris pipa berseling pada $X_B = 17$ mm



Gambar 18. Pengaruh penyusunan sirip terhadap kecepatan absolut 2 baris pipa berseling pada $X_B = 17$ mm

Hal yang menarik dijumpai pada susunan pipa berseling. Dalam kasus ini, penyusunan sirip berseling akan mengubah harga intensitas turbulensi dan distribusi kecepatan secara konsisten (Gambar 17 dan 18). Konfigurasi 2rowstgA1 mempunyai distribusi intensitas turbulensi yang terendah, sedangkan

konfigurasi 2rowstg2 memberikan nilai yang tertinggi. Sebaliknya, konfigurasi 2rowstgA1 memberikan distribusi kecepatan yang tertinggi, dan pada 2rowstg2 memperlihatkan distribusi kecepatan yang terendah. Penurunan harga intensitas turbulensi akan mengakibatkan penurunan laju perpindahan kalor konveksi dan kerugian tekanan.

Hasil yang ditunjukkan dari pembahasan pada dua paragraf sebelum ini menarik untuk dikaji lebih lanjut. Melalui penelitian ini diperoleh alternatif baru cara penyusunan pipa bersirip yang dikaitkan dengan laju perpindahan kalor dan kerugian tekanan aliran. Salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan konfigurasi alat penukar kalor jenis ini biasanya dilakukan dengan membandingkan harga kalor yang dapat dipindahkan terhadap biaya pemompaannya yaitu kerugian tekanan.

Peningkatan intensitas turbulensi yang terjadi pada penyusunan sirip berseling ini dapat digunakan untuk menjelaskan hasil perhitungan numerik yang telah dilakukan sebelumnya (Sinaga et al, 2003). Pada simulasi tersebut dihasilkan bahwa, pada jumlah baris pipa yang cukup banyak (telah dicapai kondisi aliran periodik), penyusunan sirip berseling dapat mempertinggi laju perpindahan kalor dan meningkatkan kerugian tekanan. Jelas terlihat disini bahwa efek penyusunan sirip dapat mempengaruhi kinerja penukar kalor yang terdiri dari susunan berkas pipa bersirip lingkaran.

Kesimpulan

Telah ditunjukkan hasil pengukuran distribusi kecepatan dan intensitas turbulensi yang terjadi di daerah hilir susunan berkas pipa bersirip lingkaran di dalam aliran silang, untuk konfigurasi berkas pipa sebaris dan dua baris, dimana pipa dan sirip disusun secara segaris maupun berseling. Kesimpulan utama yang diperoleh adalah bahwa terdapat peluang untuk memperbaiki kinerja alat penukar kalor melalui penyusunan pipa segaris, yang dikombinasikan dengan penyusunan sirip yang berseling. Diperoleh pula kesimpulan adanya ciri medan aliran berdasarkan cara penyusunan pipa maupun sirip. Hasil lainnya adalah bahwa penempatan sebaris pipa di hulu maupun hilir suatu susunan pipa satu baris akan mengubah medan alirannya. Khusus tentang ciri aliran tersebut, perlu diadakan penelitian lebih lanjut untuk mengkonfirmasi hasil sementara yang telah diperoleh dalam kajian ini.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada World Bank dan Direktorat Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia, atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk mengikuti Program "Sandwich" Proyek URGE Batch II tahun 1996/1997. Penghargaan juga disampaikan kepada Pemerintah Perancis dan Universite de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis

atas segala bantuannya selama penulis berada di Perancis. Pengarahan dan bimbingan dari Prof. Sularso, Prof. Aryadi Suwono, Prof. Pierre Florent dan Dr. Priyono Sutikno, merupakan sumbangsih yang sangat berharga dalam penulisan makalah ini.

Daftar Pustaka

Kestin, J., (1966), "The Effect of Free-Stream Turbulence on Heat Transfer Rates", Thomas J. Irvine dan James P. Hartnett (editor), *Advances in Heat Transfer*, Vol. 3, Academic Press, New York, hal. 1 - 32.

Kestin, J. dan R. T. Wood, (1970), "*The Mechanism Which Causes Free-Stream Turbulence to Enhance Stagnation-Line Heat and Mass Transfer*", J. Grigull dan Erich Hahne (editor), *Heat Transfer 1970, Papers Presented at the 4th Heat Transfer Conference*, Vol. II, hal. 234 - 241.

Sinaga, N, A. Suwono, dan Sularso (2003), "Pengamatan Visual Pembentukan Horseshoe Vortex pada Susunan Geometri Papa Bersirip", *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin II*, Universitas Andalas, Padang.

Sinaga, N, A. Suwono, Sularso, dan P. Sutikno (2003), "Simulation of Fin Arrangement Effect on Performance of Staggered Circular Finned-Tube Heat Exchanger", *Proc. of the Int. Conf. on Fluid and Thermal Energy Conversion*, Bali.

Sparrow, E. M. dan F. Samie, (1985), "Heat Transfer and Pressure Drop Results for One and Two Row Arrays of Finned Tubes", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28 No. 12, hal. 2247 - 2259.

Sparrow, E. M. dan S. R. Chastain, (1986), "Effect of Angle of Attack on the Heat Transfer Coefficient for an Annular Fin", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No. 8, hal. 1185 - 1191.

Stasiulevicius, J. dan A. Skrinska, (1988), "*Heat Transfer of Finned Tube Bundles in Crossflow*", A. Zukauskas dan G. Hewitt (editor), Hemisphere Publishing Co., Washington, hal. 7 - 18.

Webb, R. L., (1994), "*Principle of Enhanced Heat Transfer*", John Wiley & Sons, Inc., New York, hal. 8 - 12.

Zukauskas, A., (1994), "Enhancement of Forced Convection Heat Transfer in Viscous Fluid Flows", *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 37 No. 1, hal 207 - 212.