

## PENGUJIAN KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS DAN PENURUNAN TEKANAN SIRIP-SIRIP PIN ELLIPS SUSUNAN SELANG-SELING DALAM SALURAN SEGIEMPAT

Tri Istanto<sup>1</sup>, Wibawa Endra J<sup>1</sup>, Akhyar Wahyu Rokhadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Staf Pengajar - Jurusan Teknik Mesin - Fakultas Teknik UNS

<sup>2</sup> Alumni Jurusan Teknik Mesin - Fakultas Teknik UNS

### **Keywords :**

*Elliptical Pin Fin  
Friction Factor  
Nusselt Number  
Reynolds Number  
Thermal Performance*

### **Abstract :**

*This research was conducted to investigate the characteristics of heat transfer and pressure drop as well as the thermal performance of elliptical pin fin array in the rectangular channel which air was passed through it as coolant fluid. The pin fins were arranged in staggered manner. Dimension of base plate in which pin fins were attached was 150 mm x 200 mm x 6.5 mm. The average temperature of base plate surface was kept constant at 60°C. Pin fins were made of duralumin having the dimension of 75 mm of height, the major and minor axis length of the elliptical pin fin 15 mm and 6 mm respectively, and the distance inter-fin pitch in the spanwise direction was kept constant at  $S_x/D_\pi = 3.57$ . The parameters of this research were Reynolds number ( $Re$ ) 3,152 – 37,879 based on averaged inlet air velocity and hydraulic diameter of rectangular channel, and the distance between the inter-fin pitch in the streamwise direction ( $S_y/D_\pi = 2.38 - 4.76$ )*

*The research result shown that increasing Reynolds number and decreasing the distance  $S_y/D_\pi$  increased Nusselt number ( $Nu$ ), that means increased heat transfer rate where it reach maximum at  $S_y/D_\pi = 2.38$ . The values of pressure drop ( $\Delta P$ ) and friction factor ( $f$ ) decreased with increasing  $S_y/D_\pi$ . Thermal performance decreased with increasing Reynolds number. The thermal performances ( $\eta$ ) varied between 0.84 – 1.52. For  $S_y/D_\pi = 3.57$  at  $Re > 37,965$  and  $S_y/D_\pi = 4.76$  at  $Re > 25,240$ , the thermal performance value is less than 1 and varied between 0.76 - 0.97. At  $S_y/D_\pi = 2.38$  produced the highest of thermal performances for the whole of  $Re$ . A net energy gain can be achieved up to 52% for the value of  $S_y/D_\pi = 2.38$  and  $Re = 3,132$ .*

### **PENDAHULUAN**

Sirip sering digunakan pada alat penukar kalor untuk meningkatkan luasan perpindahan panas antara permukaan utama dengan fluida di sekitarnya. Idealnya, material sirip harus memiliki konduktivitas termal yang tinggi untuk meminimalkan perbedaan temperatur antara permukaan utama dengan permukaan yang diperluas (*extended surface*). Aplikasi sirip sering dijumpai pada sistem pendinginan ruangan, peralatan elektronik, sistem pembakaran dalam pada motor, *trailing edge* sudu turbin gas, alat penukar kalor kompak (*compact heat exchanger*) dengan udara sebagai media perpindahan panasnya. Ada berbagai tipe sirip pada alat penukar kalor yang telah digunakan diantaranya mulai dari bentuk yang relatif sederhana seperti sirip segiempat (*rectangular*), silindris, annular, tirus (*tapered*) atau pin sampai dengan kombinasi dari berbagai geometri yang berbeda dengan jarak yang teratur dalam susunan selang-seling (*staggered*) ataupun segaris (*inline*). Hal ini menjadi subjek dari suatu penelitian yang menarik dan luas karena perannya yang penting untuk berbagai aplikasi dalam dunia keteknikan.

Salah satu tipe sirip dalam peralatan penukar kalor yang mempunyai banyak pemakaian dalam berbagai aplikasi industri adalah sirip pin. Sirip pin adalah elemen berbentuk silinder atau bentuk lainnya yang dipasang secara tegak lurus terhadap dinding alat penukar panas dengan fluida pendingin mengalir dalam arah aliran melintang (*crossflow*) terhadap dinding alat penukar panas tersebut (bagian permukaan yang terkena panas). Sirip-sirip pin yang menonjol dari sebuah permukaan yang mengalami pemanasan dapat meningkatkan luas permukaan disipasi atau pembuangan panas dan menyebabkan pencampuran aliran yang turbulen sehingga meningkatkan unjuk kerja disipasi panas yang berdampak pada meningkatnya ketahanan (*reliability*) dan umur peralatan.

Terdapat berbagai parameter yang menggolongkan sirip pin, seperti bentuk pin, tinggi pin, diameter pin, perbandingan tinggi-diameter pin ( $H/D$ ) dan sebagainya yang dapat disusun secara segaris (*inline*) ataupun secara selang-seling (*staggered*) terhadap arah aliran fluida pendinginnya. Selain itu laju perpindahan panas dari suatu rakitan sirip pin (*pin fin assembly*) ke lingkungan juga

tergantung pada distribusi temperatur pada sirip pin dan plat dasar (*base plate*), geometri sirip pin, *shroud clearance* (jarak antara ujung sirip pin dengan permukaan atas saluran udara), sifat-sifat fluida, laju aliran udara, jarak antara titik pusat sirip (*inter-fit pitch*), susunan sirip pin dan orientasi dari penukar panas (terutama untuk laju aliran udara yang rendah).

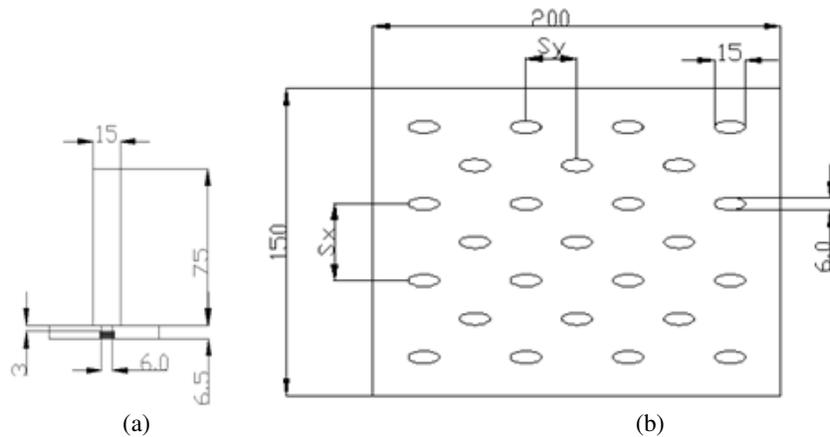
Laju perpindahan panas pada plat dasar dengan temperatur tertentu dapat ditingkatkan dengan menaikkan koefisien perpindahan panas rata-rata, menaikkan luas permukaan perpindahan panas atau kedua-duanya. Kenaikan perpindahan panas dapat dicapai dengan cara konveksi paksa (*forced convection*) atau mengubah konfigurasi geometri dari alat penukar panas. Dalam praktiknya, cara-cara ini dibatasi oleh penurunan tekanan maksimum yang diijinkan melalui susunan sirip pin tersebut karena kenaikan perpindahan panas akan disertai penurunan tekanan. Energi yang hilang karena penurunan tekanan dapat melebihi energi yang didapatkan dari usaha peningkatan perpindahan panas tersebut.

**METODOLOGI PENELITIAN**

Spesimen terdiri atas plat dasar (*base plate*) dengan panjang 200 mm, lebar 150 mm, tebal 6,5 mm yang diberi sejumlah sirip pin ellips jenis N fin dengan panjang sumbu mayor (2a) 15 mm dan panjang sumbu minor (2b) 6 mm. Plat dasar dan sirip-sirip pin ellips terbuat dari bahan duralumin.

Pengujian dilakukan dengan variasi kecepatan aliran udara masuk antara 0,5 – 6 m/s, dan jarak antar titik pusat sirip dalam arah aliran udara (*streamwise direction,  $S_y/D_p$* ) yaitu sebesar 25 mm, 30 mm, 37,5 mm dan 50 mm. Tabel 1 menunjukkan spesifikasi spesimen penelitian yang diuji, dan Gambar 2. adalah contoh salah satu spesimen penelitian.

Skema alat penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3. Saluran udara segiempat dibuat menggunakan triplek berlapis melamin dengan dengan rangka dari kayu, dengan spesifikasi dimensinya adalah 150 mm x 75 mm x 2000 mm. Pemanas elektrik (*heater*) dibuat dari lilitan pita nikelin dengan panjang 4 m, lebar 3 mm, dan tebal 1,3 mm yang dililitkan pada kertas mika tahan panas dengan dimensi panjang 200 mm, lebar 150 mm, dan tebal 1 mm.



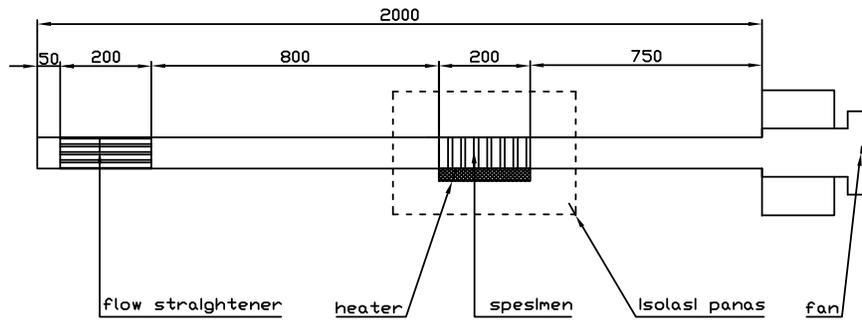
Gambar 1. (a) Dimensi sirip pin ellips (b) Dimensi plat dasar.



Gambar 2. Contoh spesimen penelitian.

Tabel 1. Spesifikasi spesimen penelitian.

Spesimen	$S_x$	$S_y$	$N_f$	$S_y/D_\pi$
1	37,5 mm	25 mm	25	2,38
2	37,5 mm	30 mm	21	2,86
3	37,5 mm	37,5 mm	18	3,57
4	37,5 mm	50 mm	14	4,76
5	Plat tanpa sirip		0	0



Gambar 3. Skema dan gambar alat penelitian.

Manometer tipe U digunakan untuk mengukur penurunan tekanan udara yang terjadi antara sisi masuk dan sisi keluar seksi uji. Termokopel terdiri dari 17 termokopel tipe T yang dipasang di tiap titik pengukuran berbeda, yaitu : 3 termokopel pada saluran udara masuk untuk mengukur temperatur udara masuk sebelum melewati seksi uji, 5 termokopel pada saluran udara keluar setelah melewati seksi uji untuk mengukur temperatur udara keluar seksi uji, dan 9 termokopel dipasang pada permukaan atas pada plat dasar untuk mengukur temperatur permukaan plat dasar. Pengujian dilakukan pada temperatur udara masuk saluran segiempat yang konstan sebesar 26°C dan temperatur permukaan plat dasar dijaga konstan sebesar 60°C.

Pengujian dilakukan pada keadaan diam (statis). Sistem beroperasi pada temperatur udara masuk yang konstan sebesar 26°C dan temperatur *base plate* yang konstan sebesar 60°C. Alat penelitian harus dinetralkan terlebih dahulu seperti pada kondisi pengujian sebelumnya (kondisi awal) untuk periode pengujian selanjutnya. Pengambilan data penelitian berupa temperatur dilakukan hingga semua temperatur udara keluar seksi uji mencapai kondisi *steady state*. Data-data temperatur dan beda tekanan pada keadaan *steady state* inilah yang akan digunakan untuk analisis data penelitian.

**Perhitungan Perpindahan Panas**

Kesetimbangan energi kondisi tunak (*steady state*) untuk permukaan uji yang dipanaskan secara elektrik adalah sebagai berikut (Bilen, 2001, 2002) :

$$Q_{elect} = Q_{conv} + Q_{loss} \tag{1}$$

Input panas listrik dapat dihitung dari tegangan listrik dan arus listrik yang disuplai ke permukaan. Kehilangan panas (*heat loss*) dari sistem bisa karena; (i) radiasi dari permukaan dan (ii) konduksi melalui dinding-dinding saluran ke atmosfer. Sehingga Persamaan (1) dapat ditulis menjadi :

$$Q_{elect} = Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{cond} \tag{2}$$

Pada penelitian yang serupa, Naik et al (1987) dan Hwang dan Liou (1995) melaporkan bahwa total *heat loss* radiasi dari permukaan uji yang serupa sekitar 0,5% dari total input panas listrik, sehingga *radiative heat loss* diabaikan. *Heat loss* karena konduksi dari sisi dinding-dinding dapat diabaikan dibandingkan dari permukaan bawah dari seksi uji, karena luas total sisi plat yang dipanaskan jauh lebih kecil dari luas permukaan bawah. Pada penelitian ini, permukaan bawah dari plat uji tidak dipapar ke aliran, dan disolasi dengan kombinasi lapisan isolator dan lapisan kayu, sehingga *heat loss* konduksi dapat diabaikan. Analisis data akan memuaskn jika persentase total *heat loss*,  $(Q_{elect} - Q_{conv})/Q_{conv}$  kurang dari 10% (Naphon, P., 2007).

Maka Persamaan (2) menjadi :

$$Q_{elect} = Q_{conv} \tag{3}$$

Panas yang dipindahkan dari permukaan bersirip dengan cara konveksi adalah :

$$Q_{conv} = h \cdot A_s \cdot \left[ \bar{T}_b - \left( \frac{\bar{T}_m + \bar{T}_{out}}{2} \right) \right] \tag{4}$$

Dari Persamaan (4),  $Q_{conv}$  dapat juga dinyatakan dengan :

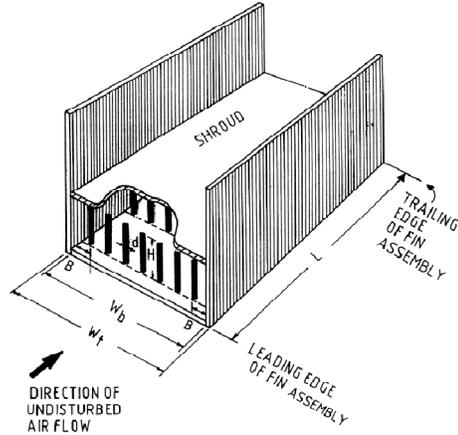
$$Q_{conv} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (\bar{T}_{out} - \bar{T}_{in}) \tag{5}$$

Koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata ( $h$ ) dapat dihitung dengan menggunakan kombinasi Persamaan (4) dan (5), sehingga didapatkan bahwa :

$$h = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (\bar{T}_{out} - \bar{T}_{in})}{A_s \cdot [\bar{T}_b - ((\bar{T}_{out} + \bar{T}_{in})/2)]} \quad (6)$$

Dari Persamaan (6), laju aliran massa,  $\dot{m}$ , dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\dot{m} = \rho \cdot A_t \cdot V \quad (7)$$



Gambar 4. Pin fin assembly dalam suatu saluran udara segiempat dengan clearance nol.

Untuk kasus dengan clearance nol seperti pada Gambar 4, maka  $A_t$  dihitung dengan rumus :

$$A = H \cdot W_b \quad (8)$$

$A_s$  adalah luas seluruh permukaan yang kontak dengan udara dari sirip-sirip pin ellips susunan segaris atau luas permukaan total dari permukaan plat dasar (base plate) dan fin, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$A_s = W_b \cdot L + \left\{ \left( \pi \frac{2a + 2b}{2} \right) \cdot H \cdot N_f \right\} - \left\{ \left( \pi \frac{2a \cdot 2b}{2} \right) \cdot N_f \right\} \quad (9)$$

Nilai-nilai  $T_b$ ,  $T_{in}$  dan  $T_{out}$  diukur dari percobaan yang dilakukan menggunakan termokopel. Sedangkan sifat termofisik dari udara,  $C_p$  dihitung berdasarkan temperatur udara rata-rata,  $T_f = (T_{in} + T_{out})/2$  menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$C_p = [9,8185 + 7,7 \times 10^{-4} (T_{in} + T_{out})/2] \times 10^{-2} \text{ J/kg} \quad (10)$$

Persamaan (10) berlaku untuk udara pada tekanan atmosfer dan  $250 \text{ K} \leq \frac{\bar{T}_{in} + \bar{T}_{out}}{2} \leq 400 \text{ K}$

Parameter tanpa dimensi (*dimensionless*) yang digunakan dalam perhitungan perpindahan panas untuk permukaan bersirip dihitung sebagai berikut :

a. Bilangan Reynolds (Re)

Duct Reynolds number dihitung berdasarkan kecepatan rata-rata ( $V$ ) dalam saluran halus (*smooth duct*) dan diameter hidrolis dari saluran ( $D_h$ ) dan dinyatakan dengan :

$$Re = \frac{V \cdot D_h}{\nu} \quad (11)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu} \quad (12)$$

b. Bilangan Nusselt (Nu)

Bilangan Nusselt rata-rata dinyatakan dengan duct Nusselt number, dimana dinyatakan dengan persamaan :

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k} \quad (13)$$

Untuk saluran udara segiempat, diameter hidrolis,  $D_h$ , dihitung dengan persamaan :

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P} = \frac{4 \cdot H \cdot W_b}{2(H + W_b)} \quad (14)$$

Properties udara,  $\mu$  dan  $k$  dihitung berdasarkan temperatur udara rata-rata,  $T_f = (T_{in} + T_{out})/2$  menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\mu = [4,9934 + 4,483 \times 10^{-2} (T_{in} + T_{out})/2] \times 10^6 \text{ kg/m.s} \quad (15)$$

$$k = [3,7415 + 7,495 \times 10^{-2} (T_{in} + T_{out})/2] \times 10^3 \text{ W/m.K} \quad (16)$$

Persamaan (15) dan (16) berlaku untuk udara pada tekanan atmosfer dan  $250 \text{ K} \leq \frac{\bar{T}_{in} + \bar{T}_{out}}{2} \leq 400 \text{ K}$

### Perhitungan Faktor Gesekan (Friction Factor)

Penelitian penurunan tekanan (*pressure drop*) sepanjang seksi uji dalam saluran bersirip diukur dibawah kondisi aliran panas. Pengukuran ini dikonversi ke faktor gesekan (*friction factor*),  $f$ . Faktor gesekan ditentukan dari nilai pengukuran penurunan tekanan,  $\Delta P$ , sepanjang seksi uji menggunakan persamaan

$$f = \frac{\Delta P}{\left[ \left( \frac{L_f}{D_h} \right) \left( \rho \frac{V^2}{2} \right) \right]} \quad (17)$$

### Perhitungan Unjuk Kerja Termal Pin Fin Assembly

Peningkatan perpindahan panas dicapai dengan mengorbankan penurunan tekanan. Banyak aplikasi praktis hal tersebut dibolehkan, sehingga perlu untuk menentukan keuntungan ekonomis karena peningkatan perpindahan panas dan pengaruh sirip-sirip pin dan susunannya terhadap unjuk kerja energi overall dari sistem perpindahan panas sekarang melalui sebuah analisis unjuk kerja termal.

Untuk sebuah daya pemompaan yang konstan, adalah berguna untuk menentukan effectiveness peningkatan perpindahan kalor dari promotor

perpindahan panas dibandingkan dengan permukaan halus, sedemikian sehingga :

$$\dot{V}_s \cdot \Delta P_s = \dot{V}_a \cdot \Delta P_a \quad (18)$$

Dimana  $\dot{V}_s$  dan  $\dot{V}_a$  berturut-turut adalah laju aliran volumetrik diatas plat tanpa halangan (*blocks*) dan dengan halangan, sedangkan  $\Delta P_s$  dan  $\Delta P_a$  berturut-turut adalah penurunan tekanan tanpa dan dengan halangan. Menggunakan persamaan Darcy untuk penurunan tekanan dan bilangan Reynolds untuk masing-masing geometri, dari hubungan antara permukaan dengan sirip dan permukaan halus untuk daya pemompaan yang sama, persamaan (18) dapat ditulis ulang menjadi :

$$f_s \cdot Re_s^3 = f_a \cdot Re_a^3 \quad (19)$$

Efisiensi peningkatan perpindahan panas untuk suatu daya pemompaan yang konstan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\eta = (h_a/h_s)_p \quad (20)$$

Jika nilai  $\eta \geq 1$ , teknik yang dipakai untuk menaikkan laju perpindahan panas adalah menguntungkan dari sudut pandang energi. Jika  $\eta \leq 1$ , energi yang telah digunakan untuk menaikkan laju perpindahan panas lebih besar daripada yang diperoleh.

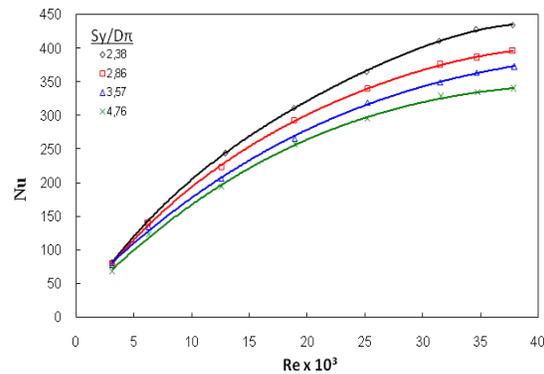
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### a. Pengaruh Bilangan Reynolds dan Jarak Antar Titik Pusat Sirip Dalam Arah *Streamwise* Terhadap Karakteristik Perpindahan Panas

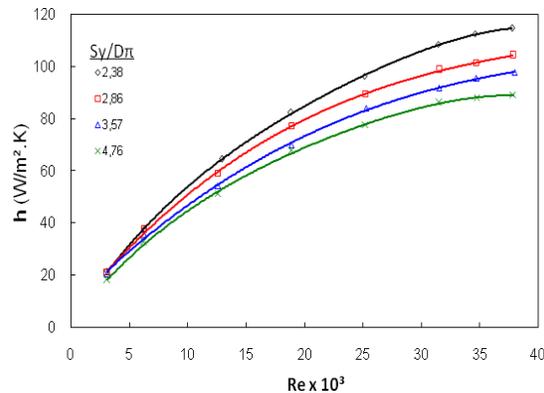
Sirip-sirip dipasang secara vertikal pada permukaan plat dasar sehingga mempunyai nilai perbandingan jarak antar titik pusat sirip pin ellips dalam arah *streamwise* dengan *equal circumference* diameter untuk susunan sirip selang-seling,  $S_y/D_\pi$ , sebesar 2,38, 2,86, 3,57 dan 4,76, sedangkan nilai perbandingan jarak antar titik pusat sirip pin ellips dalam arah *spanwise* dengan *equal circumference* diameter,  $S_x/D_\pi$ , konstan sebesar 3,57. Pengaruh bilangan Reynolds terhadap karakteristik perpindahan panas pada sirip-sirip pin ellips susunan selang-seling dapat dilihat pada gambar 5. Karakteristik perpindahan panas pada sirip-sirip pin ellips susunan selang-seling dapat dilihat pada hubungan antara *duct Nusselt number* dan *duct Reynolds number*.

Dari gambar 5 dapat dilihat bahwa bilangan Nusselt rata-rata meningkat dengan kenaikan bilangan Reynolds. Hal ini terjadi pada keseluruhan nilai,  $S_y/D_\pi$ , dimana nilai bilangan Nusselt rata-rata semakin tinggi untuk nilai  $S_y/D_\pi$  yang semakin kecil. Ini berarti bahwa dengan semakin kecil jarak antar titik pusat sirip dalam arah *streamwise* ( $S_y$ ), maka semakin besar nilai bilangan Nusselt yang terjadi. Fenomena ini juga terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Tanda (2001). Dengan semakin kecil

nilai  $S_y/D_\pi$  maka jumlah sirip pin ellips semakin banyak untuk luasan plat dasar yang sama. Faktor penambahan luasan permukaan perpindahan panas yang berasal dari luasan permukaan perpindahan panas sirip pin ellips memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan laju perpindahan panas konveksi pada sirip-sirip pin ellips susunan selang-seling tersebut. Dari fenomena ini terlihat bahwa bilangan Reynolds berpengaruh kuat pada laju perpindahan panas. Hal ini disebabkan dengan kenaikan laju aliran udara (kenaikan bilangan Reynolds), maka akan menurunkan ketebalan lapis batas (*boundary layer*) (Bilen, 2001, 2002).



Gambar 5. Grafik pengaruh bilangan Reynolds terhadap bilangan Nusselt pada  $S_x/D_\pi = 3,57$ .

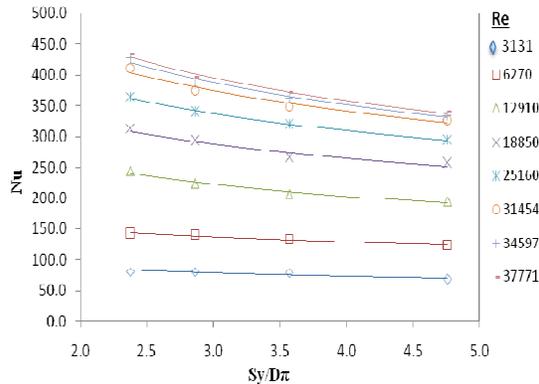


Gambar 6. Grafik pengaruh bilangan Reynolds terhadap koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata pada  $S_x/D_\pi = 3,57$ .

Gambar 6 menunjukkan kelakuan koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata terhadap bilangan Reynolds pada jarak antar titik pusat sirip dalam arah *streamwise* yang berbeda-beda. Dari gambar 6 dapat dilihat bahwa dengan kenaikan bilangan Reynolds, maka nilai koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata ( $h$ ) semakin besar. Hal ini terjadi pada keseluruhan nilai  $S_y/D_\pi$ , dimana nilai koefisien perpindahan panas konveksi semakin tinggi untuk nilai  $S_y/D_\pi$  yang semakin kecil, atau untuk jumlah sirip pin ellips yang semakin banyak. Semakin besar nilai koefisien perpindahan panas

konveksi rata-rata, maka semakin besar laju perpindahan panas konveksi yang terjadi.

Gambar 7 menunjukkan kelakuan bilangan Nusselt rata-rata terhadap  $S_y/D_\pi$  pada bilangan Reynolds yang berbeda-beda untuk sirip-sirip pin ellipsis susunan selang-seling. Dari gambar 7 dapat dilihat bahwa bahwa nilai  $S_y/D_\pi$  mempunyai pengaruh yang sedang (*moderate effect*) terhadap perpindahan panas ( $Nu$ ).



Gambar 6. Grafik pengaruh nilai  $S_y/D_\pi$  terhadap bilangan Nusselt pada  $S_x/D_\pi = 3,57$ .

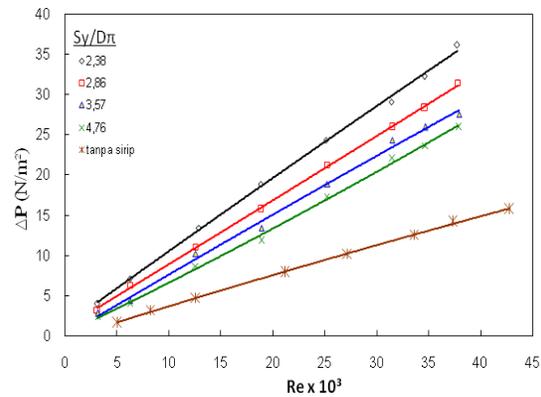
Dari data-data penelitian ini dapat diperoleh korelasi matematis untuk karakteristik perpindahan panas dari sirip-sirip pin ellipsis susunan selang-seling. Korelasi antara bilangan Nusselt ( $Nu$ ) dengan bilangan Reynolds ( $Re$ ), jarak antar titik pusat sirip ( $S_y$ ) dan panjang spesimen uji ( $L$ ) adalah sebagai berikut :

$$Nu = 0,481 \cdot Re^{0,583} (S_y/L)^{-0,329} \quad (21)$$

Korelasi perpindahan panas pada persamaan (22) berlaku valid untuk range bilangan Reynolds  $3.132 \leq Re \leq 37.965$ ,  $L/D_h = 2$  dan  $2,38 \leq S_y/D_\pi \leq 4,76$ .

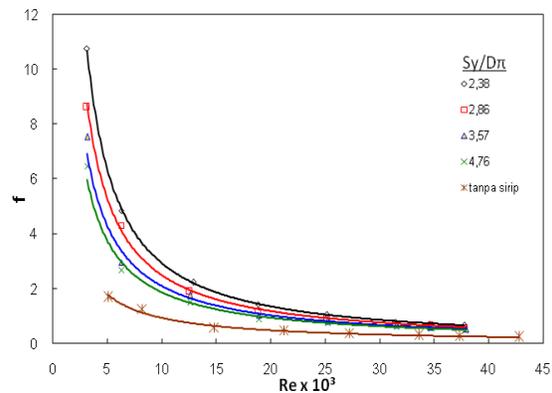
**b. Pengaruh Bilangan Reynolds dan Jarak Antar Titik Pusat Sirip Dalam Arah Streamwise Terhadap Karakteristik Penurunan Tekanan**

Pengaruh bilangan Reynolds dan jarak antar titik pusat sirip dalam arah *streamwise* terhadap penurunan tekanan (*pressure drop*) dan faktor gesekan dari sirip-sirip pin ellipsis susunan selang-seling berturut-turut dapat dilihat pada gambar 8 dan 9. Kelakuan penurunan tekanan ( $\Delta P$ ) terhadap bilangan Reynolds ( $Re$ ) serupa dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Yang et al (2007). Dari gambar 8 dapat dilihat bahwa penambahan sirip-sirip pin ellipsis susunan selang-seling, menyebabkan penurunan tekanan yang signifikan dibandingkan dengan permukaan tanpa sirip-sirip pin (*smooth surface*).



Gambar 8. Grafik pengaruh bilangan Reynolds terhadap penurunan tekanan pada  $S_x/D_\pi = 3,57$ .

Kelakuan faktor gesekan terhadap bilangan Reynolds pada gambar 9 serupa dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Kakac et al (1987). Nilai penurunan tekanan ( $\Delta P$ ) dan faktor gesekan ( $f$ ), semakin menurun dengan kenaikan nilai  $S_y/D_\pi$ . Hal ini disebabkan dengan semakin besar nilai  $S_y/D_\pi$ , maka jumlah sirip-sirip pin ellipsis akan semakin berkurang, sehingga tahanan terhadap aliran udara (*resistance to flow*) akan semakin berkurang (Bilen, 2002). Dari gambar 9 dapat dilihat bahwa nilai  $S_y/D_\pi$  lebih berpengaruh dibandingkan bilangan Reynolds terhadap nilai faktor gesekan ( $f$ ). Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan faktor gesekan ( $f$ ) seiring dengan berkurangnya nilai  $S_y/D_\pi$  pada dasarnya disebabkan karena meningkatnya luas permukaan halangan dan efek halangan (*blockage effect*) akibat kenaikan jumlah sirip-sirip pin.



Gambar 9. Grafik pengaruh bilangan Reynolds terhadap faktor gesekan pada  $S_x/D_\pi = 3,57$ .

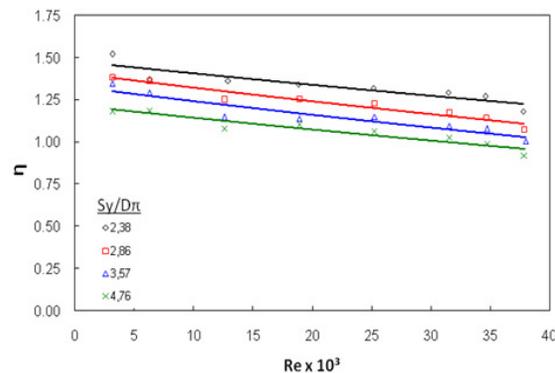
Dari data-data penelitian dapat dibuat korelasi matematis antara faktor gesekan ( $f$ ) yang dihasilkan oleh sirip-sirip pin ellipsis susunan selang-seling dengan bilangan Reynolds ( $Re$ ), jarak antar titik pusat sirip ( $S_y$ ) dan panjang spesimen uji ( $L$ ) sebagai berikut :

$$f = 1,567E4Re^{-1,109} (S_y/L)^{-0,767} \quad (22)$$

Korelasi faktor gesekan pada persamaan (23) berlaku valid untuk range bilangan Reynolds  $3.132 \leq Re \leq 37.965$ ,  $L/D_h = 2$  dan  $2,38 \leq S_y/D_\pi \leq 4,76$ .

### c. Pengaruh Bilangan Reynolds dan Jarak Antar Titik Pusat Sirip Dalam Arah Streamwise Terhadap Unjuk Kerja Termal

Dari data penelitian dapat diambil kesimpulan mengenai pengaruh bilangan Reynolds dan jarak antar titik pusat sirip dalam arah *streamwise* terhadap unjuk kerja umum dari sistem dan dapat dievaluasi perolehan energi netto karena penambahan sirip-sirip. Peningkatan perpindahan panas disertai oleh kenaikan penurunan tekanan yang signifikan, dimana dapat mengeliminasi perolehan energi karena peningkatan laju perpindahan panas. Untuk tujuan aplikasi praktis, analisis unjuk kerja termal menjadi sebuah pemikiran yang berguna untuk menentukan perolehan energi netto karena adanya penambahan sirip-sirip.



Gambar 10. Grafik pengaruh bilangan Reynolds terhadap unjuk kerja termal pada  $S_x/D_\pi = 3,57$ .

Gambar 10 menunjukkan hubungan antara unjuk kerja termal ( $\eta$ ) dengan dengan bilangan Reynolds ( $Re$ ) pada jarak antar titik pusat sirip dalam arah *streamwise* yang berbeda-beda untuk sirip-sirip pin ellips susunan selang-seling. Perlu ditekankan lagi disini bahwa untuk perolehan energi netto yaitu untuk perpindahan panas yang efektif, nilai  $\eta$  harus lebih besar dari 1 (batas ambang perolehan energi).

Dari gambar 10 dapat dilihat bahwa nilai  $\eta$  menurun dengan kenaikan bilangan Reynolds ( $Re$ ), dan nilai  $\eta$  bervariasi antara 0,84 dan 1,52 untuk seluruh  $S_y/D_\pi$  yang diteliti. Untuk  $S_y/D_\pi$  2,38 dan 2,86 mempunyai nilai  $\eta$  lebih besar dari 1 untuk keseluruhan nilai  $Re$ , sehingga penggunaan sirip-sirip pin ellips susunan selang-seling akan memperbaiki efisiensi sistem. Untuk  $S_y/D_\pi = 3,57$  pada  $Re > 34.707$  serta  $S_y/D_\pi = 4,76$  pada  $Re > 18.929$  nilai  $\eta$  lebih kecil dari 1 dan bervariasi antara 0,84 dan 0,98. Ini berarti bahwa pemakaian sirip-sirip ellips susunan selang-seling dengan  $S_y/D_\pi = 3,57$  pada  $Re > 34.707$  serta  $S_y/D_\pi = 4,76$  pada  $Re > 18.929$  akan menyebabkan kehilangan energi daripada perolehan energi. Nilai  $\eta$  lebih besar dari 1

hanya untuk  $S_y/D_\pi = 3,57$  pada  $Re < 34.707$  serta  $S_y/D_\pi = 4,76$  pada  $Re < 18.929$ . Sehingga direkomendasikan untuk memperbaiki efisiensi dari suatu sistem dengan menggunakan sirip-sirip pin ellips susunan selang-seling dibatasi pada spesifikasi  $S_y/D_\pi$  2,38 dan 2,86 untuk semua nilai  $Re$  dan  $S_y/D_\pi = 2,86$  pada  $Re < 34.707$  serta  $S_y/D_\pi = 4,76$  pada  $Re < 18.929$ .

Dari gambar 10 dapat dilihat bahwa pada  $S_y/D_\pi = 2,38$  menghasilkan unjuk kerja termal yang paling tinggi untuk keseluruhan  $Re$ , sehingga direkomendasikan penggunaan sirip-sirip pin ellips susunan selang-seling dengan nilai  $S_y/D_\pi = 2,38$  untuk memperbaiki efisiensi suatu sistem. Perolehan energi netto dapat dicapai hingga 52% untuk nilai  $S_y/D_\pi = 2,38$  pada  $Re = 3.132$ .

### KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan pembahasan, dapat diambil kesimpulan mengenai pengujian karakteristik perpindahan panas dan penurunan tekanan serta unjuk kerja termal dari sirip-sirip pin ellips susunan selang-seling dalam saluran segiempat sebagai berikut :

1. Sirip-sirip pin ellips susunan selang-seling meningkatkan perpindahan panas dari permukaan base plate sebagai hasil dari kenaikan luasan permukaan perpindahan panas, tetapi disertai dengan adanya penurunan tekanan lebih besar dalam saluran segiempat.
2. Kenaikan bilangan Reynolds ( $Re$ ) meningkatkan laju perpindahan panas, tetapi menurunkan unjuk kerja termal ( $\eta$ ) untuk keseluruhan nilai  $S_y/D_\pi$ .
3. Penurunan tekanan ( $\Delta P$ ) dan faktor gesekan ( $f$ ) meningkat seiring dengan berkurangnya nilai  $S_y/D_\pi$ .
4. Unjuk kerja termal meningkat dengan penurunan  $S_y/D_\pi$ .
5. Sirip-sirip pin ellips susunan selang-seling dapat mencapai perolehan energi netto dapat dicapai hingga 52% untuk nilai  $S_y/D_\pi = 2,38$  pada  $Re = 3.132$ .

### Daftar Notasi

- $A$  = luas penampang saluran udara ( $m^2$ )  
 $A_s$  = luas seluruh permukaan yang kontak dengan udara dari susunan sirip pin ( $m^2$ )  
 $C_p$  = panas jenis udara ( $J/kg.K$ )  
 $D, d$  = diameter sirip pin ( $m$ )  
 $D_h$  = diameter hidrolik dari saluran udara ( $m$ )  
 $D_\pi$  = equal circumference diameter ( $m$ )  
 $f$  = faktor gesekan  
 $h$  = koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata ( $W/m^2.K$ )  
 $h_a$  = koefisien perpindahan panas konveksi spesimen dengan sirip ( $W/m^2.K$ )  
 $h_s$  = koefisien perpindahan panas konveksi spesimen tanpa sirip ( $W/m^2.K$ )  
 $H$  = tinggi saluran udara atau sirip pin ( $m$ )  
 $k$  = konduktivitas termal udara ( $W/m.K$ )

$L$  = panjang plat dasar untuk susunan sirip pin (m)  
 $L_t$  = panjang seksi uji (m)  
 $\dot{m}$  = laju aliran massa udara (kg/s)  
 $Nu$  = duct Nusselt number  
 $Nu_D$  = pin Nusselt number  
 $N_f$  = jumlah total sirip pin dalam susunan sirip pin  
 $\Delta P$  = perbedaan tekanan statik ( $N/m^2$ )  
 $Q$  = laju perpindahan panas (Watt)  
 $Q_{elect}$  = laju aliran panas dari listrik (W)  
 $Q_{conv}$  = laju perpindahan panas konveksi (W)  
 $Q_{loss}$  = laju aliran panas yang hilang dari sistem (heat loss) (W)  
 $Q_{rad}$  = laju perpindahan panas radiasi (W)  
 $Q_{cond}$  = laju perpindahan panas konduksi (W)  
 $Re$  = duct Reynolds number  
 $\bar{T}_{in}$  = temperatur inlet dari aliran udara (K)  
 $\bar{T}_{out}$  = temperatur outlet dari aliran udara (K)  
 $\bar{T}_b$  = temperatur base plate (K)  
 $V$  = kecepatan rata-rata udara dalam saluran udara (m/s)  
 $W_b$  = lebar plat dasar untuk susunan sirip pin (m)  
 $\eta$  = unjuk kerja termal (%)  
 $\mu$  = viskositas dinamik udara (kg/m.s)  
 $\nu$  = viskositas kinematik udara ( $m^2/s$ )  
 $\rho$  = massa jenis udara ( $kg/m^3$ )

#### DAFTAR PUSTAKA

- Bilen K., Akyol U., Yapici S., 2001, "Heat Transfer and Friction Correlations and Thermal Performance Analysis for A Finned Surface", *Energy Conversion & Management*, Vol. 42, pp. 107–1083.
- Bilen K., Akyol, U., and Yapici, S., 2002, "Thermal Performance Analysis of A Tube Finned Surface", *International Journal of Energy Research*, Vol. 26, pp. 321–333.
- Hwang, J.J., Liou, C.C., 1999, "Detailed Heat Transfer Characteristic Comparison in Straight and 90-Deg Turned Trapezoidal Ducts with Pin - Fin Arrays", *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 4005 – 4016.
- Kakac, S., Shah, R.K., and Aung, W., 1987, *Handbook of Single Phase Convective Heat Transfer*, John Wiley and Sons, New York.
- Li Q., Chen Z., Flechtner U., Warnecke H.J., 1998, Heat transfer and pressure drop characteristics in rectangular channels with elliptic pin fins, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 19, pp. 245-250
- Naik.S., Propert, SD, Shilston, MJ, 1987, "Forced Convective Steady State Heat Transfer from Shrouded Vertically Fin Arrays, Aligned Paralel to An Undisturbed Air Stream", *Applied Energy*, Vol. 26, pp. 137–158.
- Naphon P., and Sookkasem A., 2007, " Investigation on Heat Transfer Characteristics of Tapered Cylinder Pin Fin Heat Sinks", *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 2671–2679.
- Tanda, G., 2001, "Heat Transfer and Pressure Drop in A Rectangular Channel with Diamond-Shaped Elements", *International Jurnal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 3529–2541.
- Yang Kai-Shing, Chu Wei-Hsin, Chen Ing-yong, 2007, "A Comparative Study of The Airside Performance of Heat Sinks Having Pin Fin Configurations", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 4661–4667.