

Perpindahan Panas Aliran Fluida Viskos Melintas Berkas Tabung (Suatu Overview)

*Budi Utomo Kukuh Widodo, **Samsul Kamal,
**Suhanan dan **I Made Suardjaja

*Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, Mahasiswa Pasca Sarjana Teknik Mesin FT UGM

E-mail: buditem@me.its.ac.id

**Jurusan Teknik Mesin FT UGM

Abstrak

Penjual panas kompak dengan rasio antara luas dan volume $A/V \geq 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ sering dipilih untuk menangani proses perpindahan panas bila salah satu mediumnya adalah gas yang mengalir pada sisi luar tabung dengan tekanan tidak berbeda jauh dengan tekanan atmosfer. Tahanan termal sisi gas jauh lebih besar bila dibandingkan dengan tahanan termal sisi tabung, oleh karenanya sangat menentukan unjuk kerja penukar panas yang biasanya dinyatakan dalam koefisien perpindahan panas baik lokal maupun merata, fluks panas, penurunan tekanan dan daya yang diperlukan untuk mengalirkan gas. Tiga parameter yang mempengaruhi unjuk kerja penukar panas adalah geometri berkas tabung, sifat-sifat gas dan keadaan aliran. Dari berbagai studi yang telah dilakukan untuk mengkaji ketiga parameter diatas diperoleh simpulan bahwa berkas tabung eliptik mempunyai banyak keunggulan bila dibandingkan dengan tabung sirkular dan susunan berseling lebih menguntungkan daripada susunan sebaris. Aspek ratio dan jarak antar tabung juga berpengaruh terhadap unjuk kerja penukar panas. Tersedia banyak peluang untuk melakukan studi lebih lanjut baik secara analitik, numerik maupun eksperimental dalam hal variasi jarak antar tabung, kerapatan sirip dan eksentrisitas tabung. Perlu juga dilakukan studi dalam hal proses manufaktur penukar panas kompak dengan tabung eliptik.

Kata kunci: Penukar panas kompak, berkas tabung, tabung eliptik, aspek ratio, jarak antar tabung.

1. Pendahuluan

Penukar panas kompak ('Compact Heat Exchanger') sering dipilih bila salah satu fluida yang dilibatkan dalam pesawat penukar panas adalah gas, sistem tidak bertekanan dan ruang yang tersedia untuk pesawat penukar panas sangat terbatas. Rasio antara luas dan volume penukar panas ini sangat besar ($A/V \geq 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$) sebagai kompensasi atas koefisien perpindahan panas yang cukup kecil disisi gas. Untuk menghasilkan luas permukaan perpindahan panas sisi gas yang besar seperti itu maka ditambahkan sirip dengan berbagai varian dan mengatur pola susunan berkas tabung. Disamping untuk meningkatkan luas permukaan perpindahan panas, susunan berkas tabung dan konfigurasi sirip juga berpengaruh pada koefisien perpindahan panas sisi luar tabung. Peningkatan koefisien perpindahan panas ini harus berhadapan dengan keterbatasan luas laluan, dan energi yang diperlukan untuk mengalirkan fluida sisi tabung. Tampang lintang tabung yang banyak dipergunakan adalah lingkaran sesuai dengan ketersediaan pipa sirkular yang melimpah dan sebagian kecil bertampang eliptik dengan berbagai variasi rasio sumbu ('aspect ratio'), bujur sangkar, persegi panjang dan lentikular.

Hasil berbagai penelitian mengkaji aliran sisi luar berkas tabung khususnya dengan tampang lintang sirkular sudah banyak tersedia di buku teks dan jurnal ilmiah.

Tujuan dari makalah ini adalah: pertama memaparkan berbagai hasil penelitian tentang aliran fluida melintasi tabung tunggal dan berkas tabung dengan tampang sirkular dan eliptik pada berbagai kondisi operasi. Kedua, memajukan berbagai peluang studi yang masih mungkin dilakukan.

2. Tabung sirkular

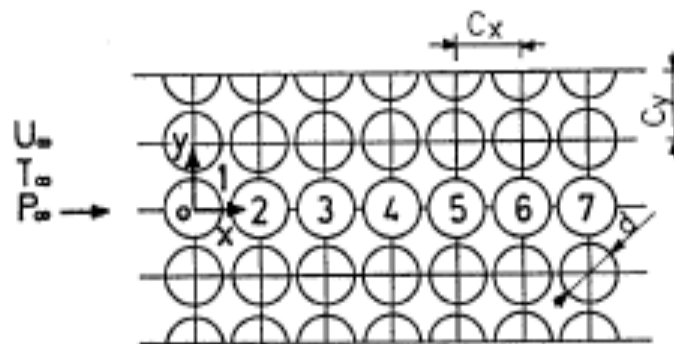
L. Schiller dan W. Linke (1933) melakukan studi tentang tekanan dan tahanan friksi pada suatu silinder yang berada dalam aliran melintang dengan bilangan Reynolds 5000 – 40000.

Brevoort, M.J. dan A.N. Tifford (1942) meneliti karakteristik aliran udara melintasi berkas tabung sirkular dengan susunan berseling (sembilan baris) pada bilangan Reynolds 1000, 7000, 20000, 42300

dan 70500. Disimpulkan bahwa koefisien drag total semakin kecil pada baris di hilir, dan meningkat sejalan dengan peningkatan 'blockage ratio'.

Shinya AIBA, et al. (1980,1981) mengkaji karakteristik perpindahan panas pada susunan tiga dan empat tabung sebaris pada bilangan Reynolds 12000 – 52000. Perpindahan panas pada silinder kedua sangat dipengaruhi oleh lebar wake dibelakang tabung pertama, dan pada kombinasi 'pitch' ($c/d \geq 4.0$) dan Reynolds tertentu ($Re_d \geq 4.8 \times 10^4$) tidak terjadi perubahan perpindahan panas. Disimpulkan juga bahwa dua baris tabung yang terakhir mempunyai karakteristik perpindahan panas yang sama.

Shinya AIBA, et al. (1982) melanjutkan eksperimen mereka dengan meneliti berkas tabung dengan susunan sebaris dan berseling. Rasio jarak antar sumbu terhadap diameter tabung (pitch) searah aliran c_x/d dan arah melintang aliran c_y/d bervariasi 1.2 dan 2.4 untuk set pengujian pertama sedangkan untuk pengujian kali kedua dipergunakan variasi 1.6 dan 3.2. Intensitas turbulensi (Tu) aliran bebas bervariasi 5-6 % pada pengujian pertama dan 2-3 % pada pengujian yang kedua. Para peneliti menyimpulkan bahwa pada konfigurasi spasi 1.6 x 1.6



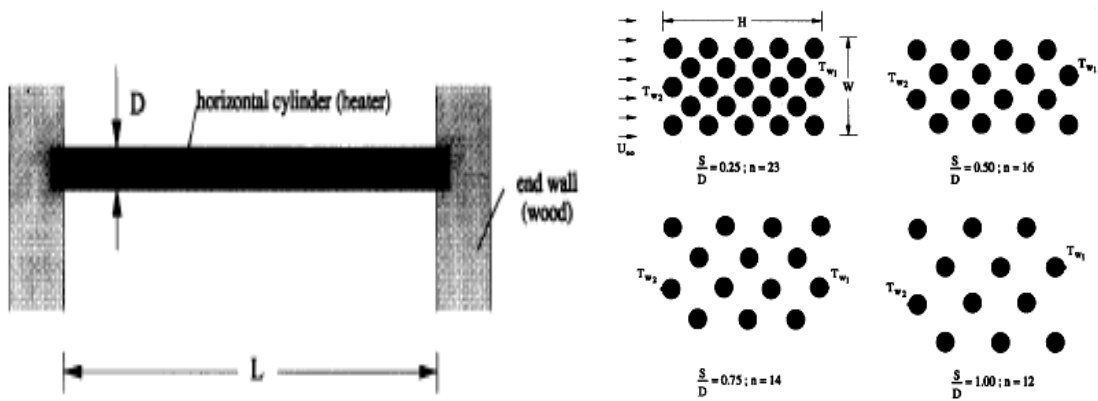
Gambar 1. Susunan tabung sebaris

terjadi perpindahan panas maksimum pada silinder ketiga untuk semua variasi bilangan Reynolds. Sementara untuk konfigurasi spasi 1.2 x 1.2 diperoleh simpulan bahwa karakteristik perpindahan panas di silinder 1 sangat rendah. Meskipun perilaku bilangan Nusselt lokal cukup berbeda, tetapi ternyata bilangan Nusselt rerata untuk seluruh berkas silinder tidak terpengaruh secara bermakna oleh variasi spasi silinder.

Kays dan London (1993) meneliti berkas tabung sirkular dengan susunan berseling dengan tiga variasi S_L (jarak tabung arah longitudinal) dan menghasilkan hubungan antara faktor gesek dan j_H (koefisien perpindahan panas tanpa dimensi). Hubungan tersebut menunjukkan bahwa j_H menurun pada peningkatan S_L dan bilangan Reynolds. Dilaporkan juga, bahwa tabung sirkular dengan variasi sirip kontinyu (datar) mengalami penurunan j_H tajam pada Reynolds rendah.

G. Stanescu, A.J. Fowler dan A. Bejan (1995) mengkaji lebar celah optimal untuk berkas silinder susunan berseling (diamond) dalam aliran lintang konveksi paksa. Studi ini diterapkan pada susunan silinder dengan volume tetap dengan panjang berkas silinder searah aliran udara (H) adalah 6.2 x diameter silinder (D) dan bilangan Reynolds berbasis kecepatan aliran bebas dan diameter silinder $Re_D = 50 - 4000$. Dilakukan empat variasi jarak silinder (S/D) berturut-turut 0.25 dengan jumlah silinder 23, 0.50 dengan jumlah silinder 16, 0.75 dengan jumlah silinder 14 dan 1.00 dengan 12 silinder. Harga spasi optimum yang diperoleh dari pendekatan eksperimental dan numerik untuk menghasilkan konduktansi termal maksimum dinyatakan dalam korelasi

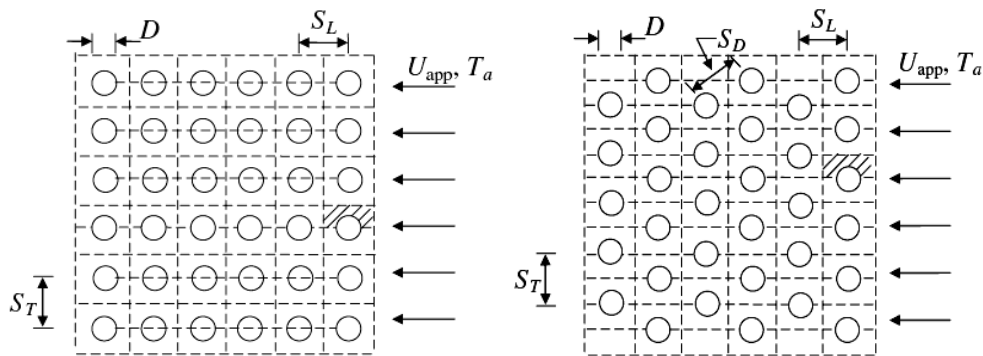
$$\left(\frac{S}{D}\right)_{opt} \cong 2.2 Pr^{-0.13} \left(\frac{D}{H}\right)^{-0.4} Re_D^{-0.3}$$



Gambar 2. Seksi uji berkas tabung

E.Buyruk, M.W. Johnson dan I Owen (1997) melakukan studi eksperimental dan numerikal pada tabung sirkular dalam aliran menyilang dan bilangan Reynolds 120 - 390, serta ratio Grashof - Reynolds kuadrat $0.036 < Gr/Re^2 < 0.558$. Teknik komputasional menggunakan formulasi '*stream function - vorticity*', persamaan Navier-Stokes untuk aliran inkompresibel keadaan tunak dan persamaan energi disertai teknik over relaksasi Gauss-Seidel.

W.A.Khan, J.R. Culham and M.M. Yovanovich (2006) memajukan model analitik untuk perpindahan panas konveksi dari suatu berkas tabung susunan sebaris dan berseling. Model yang lebih komprehensif ini dimajukan untuk memverifikasi berbagai hasil penelitian sebelumnya. Bilangan Reynolds didasarkan pada kecepatan maksimum udara melalui celah dalam berkas tabung dan panjang karakteristik diameter tabung ditetapkan pada $10^3 - 10^5$. Pembatas geometri dalam penyusunan model ini adalah *pitch* arah longitudinal (S_L/D) dan *pitch* arah transversal (S_T/D) masing-masing pada 1.25 hingga 3.0. Model skema dari kedua susunan berkas tabung tersebut diberikan dalam Gambar 3. Model analitik ini ternyata bersesuaian dengan hasil peneliti sebelumnya (Zhukauskas dan Ulinskas) yang menggunakan pendekatan eksperimental.



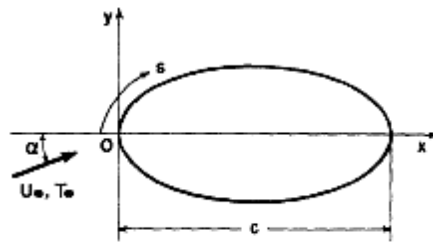
Gambar 3. Skema susunan berkas silinder sebaris dan berseling

3. Tabung eliptik

G.B.Schubauer (1939), meneliti distribusi tekanan aliran udara bilangan Reynolds 21,400 hingga 139,000 melintasi silinder eliptik dengan panjang sumbu mayor 11.78 inci dan sumbu minor 3.98 inci (aspek rasio = 3).

Terukazu OTA, Shinya AIBA, Tsunehiko TSURUTA dan Masaaki KAGA (1983) melakukan eksperimental mengkaji perilaku konveksi paksa pada silinder eliptik dengan rasio sumbu 1:2 pada bilangan Reynolds 5000 - 90000 dan sudut serang α . Bilangan Reynolds dalam penelitian ini berbasiskan pada panjang sumbu major (*major axis*). Karena sumbu major tersebut adalah 50 mm maka kecepatan aliran udara bebas merentang dari 1.4 m/s hingga 27 m/s. Konfigurasi aliran dan sistem koordinat penelitian disajikan dalam Gambar 4. berikut ini. Eksperimen ini memberi informasi

bahwa bilangan Nusselt untuk silinder eliptik lebih besar daripada silinder sirkular dengan perimeter yang sama.



Gambar 4. Konfigurasi aliran dan sistem koordinat.

Terukazu OTA, Hideya NISHIYAMA dan Yukiyasu TAOKA (1983) melanjutkan penelitian diatas dengan silinder eliptik yang mempunyai rasio sumbu 1:3 pada bilangan Reynolds 8000 hingga 79000 dan sudut serang antar 0° hingga 90° terhadap sumbu major. Bilangan Reynolds diatas bersesuaian dengan kecepatan udara di hilir yang seragam pada 2 m/s hingga 22m/s. Intensitas turbulensi aliran udara $\sqrt{(u'^2/U_\infty^2)}$ sebesar 0.007. Sementara itu 'blockage ratio' bervariasi antar 0.07 pada $\alpha = 0^\circ$ dan 0.20 pada $\alpha = 90^\circ$. Pengaruh dinding terowongan angin terhadap karakteristik perpindahan panas dan perilaku aliran fluida tidak diamati. Diperoleh hasil, bahwa pada $\alpha = 0^\circ$ pengaruh bilangan Reynolds terhadap bilangan Nusselt lokal tidak cukup signifikan kecuali pada daerah *leading* dan *trailing edge* hingga $l_s/c_l = 0.6$ dimana terjadi separasi.

A. Kondjoyan dan J.D. Daudin (1994) mengkaji pengaruh intensitas turbulensi aliran bebas terhadap perpindahan panas dan massa pada permukaan silinder sirkular berdiameter 0.1 m dan eliptik dengan panjang sumbu major (a) 0.2 m dan rasio sumbu ('aspect ratio') 4:1 dalam aliran lintang. Pada pengujian ini dipergunakan kecepatan udara bebas 0.5 – 50 m/s dan intensitas turbulensi 1.5 – 40 %. Dari penelitian ini dimajukan persamaan untuk menaksir harga bilangan Nusselt untuk silinder lingkaran dan eliptik pada $3000 < Re < 40000$ dan $Tu = 1 - 45\%$

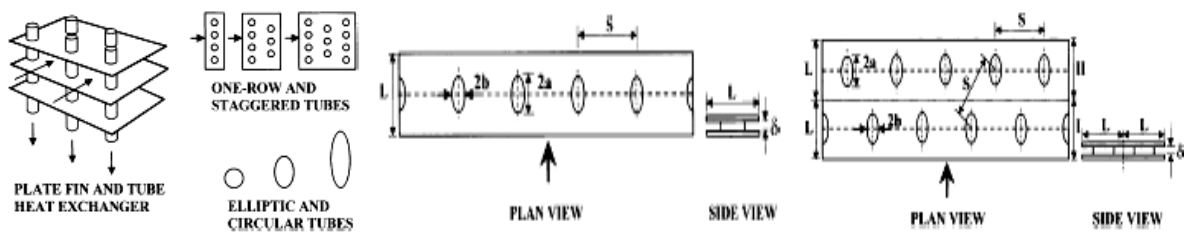
$$\begin{aligned} \text{Nu (atau Sh)} &= (1.07 + 0.015 Tu) \sqrt{(Re)} \quad 0.63 Re^{0.5} && \text{untuk silinder sirkular, dan} \\ \text{Nu (atau Sh)} &= (1.07 + 0.015 Tu) \sqrt{(Re)} \quad 0.55 Re^{0.5} && \text{untuk silinder eliptik.} \end{aligned}$$

Khusus untuk silinder eliptik harga diameter ekuivalen tergantung pada aspect ratio seperti dalam relasi berikut ini.

Aspect Ratio (a/b)	2	3	4	5
Diameter ekuivalen/ Sumbu major (d_{eq}/a)	0.77	0.71	0.68	0.67

J.H. Choi dan S.J.Lee (2000) mengkaji pengaruh celah antara landasan (pelat datar) dan silinder pada aliran melintasi silinder sirkular dan eliptik dengan rasio sumbu 2 dalam aliran turbulen. Terjadi interaksi antara lapisan batas yang berasal dari pelat datar dan silinder. Bilangan Reynolds aliran didasarkan pada sumbu minor dan dipertahankan pada 14000 dengan kecepatan udara 10 m/s. Lebar celah divariasikan 0.0 hingga 2.0 diameter silinder sirkular atau sumbu minor silinder eliptik. Diperoleh hasil koefisien drag silinder eliptik hanya 0.5 silinder sirkular, sementara koefisien angkat tidak menunjukkan perbedaan yang bermakna.

Sergio M. Saboya dan Francisco E.M. Saboya (2000) melakukan eksperimen pada susunan berkas tabung eliptik satu dan dua baris pada penukar panas pelat dan tabung untuk mengkaji perpindahan massa sublimasi naftalena pada bilangan Reynolds 150 - 1300. Karakteristik geometri penukar panas pelat dan tabung yang diuji disajikan dalam Gambar 5 berikut ini.



Gambar 5. Karakteristik geometri penukar panas pelat dan tabung satu dan dua baris.

Dari eksperimen ini diperoleh simpulan bahwa tidak ada perbedaan karakteristik perpindahan massa antara silinder eliptik dan silinder sirkular pada konfigurasi baris tunggal dan $S/2b = 2.50$. Pada eksentrisitas 0.5 diperoleh simpulan bahwa makin besar jarak antar silinder justru terjadi penurunan karakteristik perpindahan massa.

R.S. Matos, J.V.C.Vargas, T.A. Laursen dan F.E.M. Saboya (2001) melanjutkan seri studi di atas dengan melakukan studi optimasi dan perbandingan perpindahan panas dari tabung sirkular dan eliptik tersusun berseling 'segitiga sama sisi' dalam konveksi paksa. Studi numerik ini dilakukan untuk bilangan Reynolds 300 – 800 dengan panjang karakteristik 'swept length' (L) dari volume yang sudah tertentu dan tetap. Diperoleh simpulan bahwa pada bilangan Reynolds rendah perubahan lebar celah yang lebih besar daripada sumbu minor tidak memberikan pengaruh terhadap konduktansi termal. Disimpulkan juga penurunan eksentrisitas menghasilkan peningkatan konduktansi termal.

R.S. Matos, J.V.C.Vargas, T.A. Laursen dan A. Bejan (2003) melanjutkan penelitian terdahulu dengan mengkaji jarak optimal tabung sirkular dan eliptik yang bersirip tersusun berseling dengan volume tetap dan konfigurasi segitiga samasisi serta lebar celah antar tabung maksimum $S/2b=1.5$. Eksentrisitas (e) tabung pada studi ini ditetapkan = 1, 0.6, 0.5 dan 0.4, sementara bilangan Reynolds berbasis pada panjang array ($Re_L = 852, 1065, 2840, 5680$ dan 8520). Studi optimasi ini menghasilkan konduktansi maksimum pada $S/2b = 0.25$ dan $e = 0.5-0.6$. Disimpulkan juga bahwa konduktansi tabung bersirip 20% lebih besar daripada tabung tanpa sirip.

W.A. Khan, J.R. Culham dan M.M. Yovanovich (2005) melakukan studi analitik perpindahan panas pada silinder eliptik dalam kondisi isofluks dan isothermal. Pembatas pada analisis ini dinyatakan dalam 'axis ratio' (\square) rasio antara panjang sumbu minor dan major yang masing-masing berharga $\square \rightarrow 0$ untuk pelat datar berhingga dan $\square \rightarrow 1$ untuk silinder lingkaran. Dari studi ini dimajukan dua persamaan untuk bilangan Nusselt rerata pada tabung eliptik dengan sebarang \square , masing-masing dengan kasus suhu permukaan dan fluks permukaan seragam. Disimpulkan juga bahwa koefisien perpindahan panas kondisi isofluks lebih besar 6% daripada kondisi isothermal.

Zhihua Li, Jane Davidson dan Susan Mantell (2006) melakukan simulasi numerik medan aliran dan perpindahan panas dari silinder eliptik dan lentikular dalam aliran lintang. Dalam simulasi ini dipilih 'aspect ratio' (\square_{\square}) untuk silinder eliptik dan lentikular 0.3, 0.5 dan 0.8 dengan bilangan Reynolds 500–10000 serta asumsi suhu permukaan seragam. Diperoleh hasil bahwa silinder eliptik dengan $\square_{\square} = 0.5$ berhasil mengurangi penurunan tekanan hingga 30-40 % dibandingkan dengan silinder lingkaran. Disimpulkan juga bahwa bilangan Nusselt untuk silinder eliptik dan lentikular dengan $\square_{\square} = 0.3$ dan 0.5 lebih kecil 15-35% bila dibandingkan dengan silinder lingkaran.

Zakir Faruquee, et al (2007) melakukan kajian numerik dengan perangkat lunak Fluent untuk pengaruh rasio sumbu pada aliran laminer sekitar silinder eliptik dengan axis ratio 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.75 dan 1 (silinder lingkaran). Sumbu major silinder eliptik dipasang searah dengan arah aliran fluida. Bilangan Reynolds didasarkan pada diameter hidraulik ditetapkan 40 merujuk kepada bilangan Reynolds kritis yang diperoleh dari berbagai penelitian terdahulu. Dari studi ini dihasilkan pendekatan koefisien drag yang kuadratik terhadap axis ratio.

4. Kesimpulan

1. Tidak ada keseragaman diantara para peneliti dalam menetapkan panjang karakteristik berkas tabung yang menjadi objek kajian.
2. Berkas tabung dengan susunan berseling menghasilkan unjuk kerja yang lebih baik daripada susunan sebaris.
3. Tabung eliptik menghasilkan perpindahan panas yang lebih baik daripada tabung sirkular untuk diameter ekuivalen yang sama.
4. Perlu studi optimasi lebih lanjut pada berkas pipa eliptik dengan variasi *aspect ratio*, sudut serang dan konfigurasi serta kondisi operasi yang sesuai dengan aplikasi penukar panas kompak dalam industri.
5. Perlu dilakukan studi proses manufaktur penukar panas kompak dengan tabung eliptik untuk aplikasi industri.

Daftar Pustaka

- AIBA, Shinya, Hajime TSUCHIDA and Terukazu OTA, 1980, *Heat Transfer Around a Tube in a Bank*, Bulletin of the JSME, Vol.23, No.181, pp 1163-1170.
- AIBA, Shinya, Hajime TSUCHIDA and Terukazu OTA, 1981, *Heat Transfer Around a Tube in a Bank*, Bulletin of the JSME, Vol.24, No.188, pp 380-387.
- AIBA, Shinya, Hajime TSUCHIDA and Terukazu OTA, 1982, *Heat Transfer Around a Tube in In-line Tube Banks*, Bulletin of the JSME, Vol.25, No.204, pp 919-926.
- AIBA, Shinya, Hajime TSUCHIDA and Terukazu OTA, 1982, *Heat Transfer Around Tubes in Staggered Tube Banks*, Bulletin of the JSME, Vol.25, No.204, pp 927-933.
- Brevoort, M.J. and A.N. Tifford, 1942, *An Experimental Investigation of Flow Across Tube Banks*, Wartime Report NACA.
- Buyruk, E., M.W. Johnson and I Owen, 1998, *Numerical and experimental study of flow and heat transfer around a tube in cross-flow at low Reynolds number*, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.19, pp 223-232.
- Choi, J.H., and S.J.Lee, 2000, *Ground effect of Flow around an elliptic cylinder in a turbulent boundary layer*, Journal of Fluids and Structures, Vol.14, pp 697-709.
- Khan, W.A., J.R. Culham and M.M. Yovanovich, 2004, *Fluid Flow and Heat Transfer from a Cylinder Between Parallel Planes*, Journal of Thermophysycs and Heat Transfer, Vol.18, No.3, pp 395-404.
- Khan, W.A., J.R. Culham and M.M. Yovanovich, 2005, *Fluid Flow Around and Heat Transfer from Elliptical Cylinders: Analytical Approach*, Journal of Thermophysycs and Heat Transfer, Vol.19, No.2, pp 178-185.
- Khan, W.A., J.R. Culham and M.M. Yovanovich, 2006, *Analytical Model for Convection Heat Transfer from Tube Banks*, Journal of Thermophysycs and Heat Transfer, Vol.20, No.4, pp 720-720.
- Kondjoyan, A and J.D. Daudin, 1995, *Effects of free stream turbulence intensity on heat and mass transfer at the surface of a circular and elliptical cylinder, axis ratio 4*, International Journal Heat Mass Transfer, Vol.38, No.10, pp 1735-1749.
- Matos, R.S., J.V.C.Vargas, T.A. Laursen and F.E.M. Saboya, 2001, *Optimization study and heat transfer comparison of staggered circular and elliptic tubes in forced convection*, International Journal Heat and Mass Transfer, Vol.44, No.2, pp 3953-3961.
- Matos, R.S., J.V.C.Vargas, T.A. Laursen and A. Bejan, 2004, *Optimally staggered finned circular and elliptic tubes in forced convection*, International Journal Heat and Mass Transfer, Vol.47, pp 1347-1359.
- OTA, Terukazu, Shinya AIBA, Tsunehiko TSURUTA and Masaaki KAGA, 1983, *Forced Convection Heat Transfer from an Elliptic Cylinder of Axis Ratio 1:2*, Bulletin of the JSME, Vol.26, No.212, pp 262-267.
- OTA, Terukazu, Hideya NISHIYAMA and Yukiyasu TAOKA, 1984, *Heat Transfer and flow around an elliptic cylinder*, International Journal Heat Mass Transfer, Vol.27, No.10, pp 1771-1779.

- Saboya, Sergio M. and Francisco E.M. Saboya, 2001, *Experiments on elliptic sections in one- and two-row arrangements of plate fin and tube heat exchangers*, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 24, pp 67-75.
- Schubauer, G.B., 1939, *Air Flow in The Boundary Layer of an Elliptic Cylinder*, Report No.652 NACA.
- Stanescu, G., A.J. Fowler and A. Bejan, 1996, *The optimal spacing of cylinders in free-stream cross-flow forced*, International Journal Heat Mass Transfer, Vol.39, No.2, pp 311-317.
- Zakir Faruquee, David S-K. Ting, Amir Fartaj, Ronald M. Barron and Rupp Carriveau, 2007, *The effect of axis ratio on laminar fluid flow around an elliptical cylinder*, Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.28, pp 1178-1189.
- Zhao, Xiangwei, 1995, "Performance of Single Row Heat Exchanger at Low In-Tube Flow Rates", Hiroshima University, Thesis.
- Zhihua Li, Jane Davidson and Susan Mantell, 2005, *Numerical Simulation of Flow Field and Heat Transfer of Streamlined Cylinders in Crossflow*, Proceeding of HT2005, ASME Summer Heat Transfer Conference.