

Pengaruh Posisi Pipa Segi Empat dalam Aliran Fluida Terhadap Perpindahan Panas

Kaprawi

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik UNSRI, Palembang

E-mail: kaprawis@yahoo.com

ABSTRAK

Sebuah pipa berpenampang segi empat dipasang melintang dalam aliran fluida viskos yang bertemperatur lebih tinggi. Posisi pipa dalam aliran yaitu salah satu bidang pipa tegak lurus dengan datangnya aliran, salah satu sudut pipa diarahkan dengan datangnya aliran dan sudut pipa yang lebih besar atau lebih kecil dari 90° diarahkan dengan datangnya aliran. Melalui studi numerik dengan Metode Volume Hingga, didapatkan bahwa posisi pipa dengan salah satu sudut segi empatnya diarahkan ke datangnya aliran mempunyai perpindahan panas lebih baik dibanding dengan pipa yang mana salah satu dindingnya dipasang tegak lurus dengan aliran. Semakin besar sudut pipa yang diarahkan ke aliran maka semakin besar perpindahan panasnya, dan sebaliknya. Setiap perubahan sudut pipa segi empat 15° akan membuat perubahan perpindahan panas sekitar 1,5%.

Kata kunci: *Fluid velocity, rectangular pipe, flow, heat transfer, finite volume method.*

ABSTRACT

A rectangular pipe is placed perpendicularly to viscous fluid flow which has higher temperature. The positions of a rectangular pipe in the flow are one of the rectangular wall placed perpendicularly to the flow, one of the corner of rectangular pipe placed to the direction of coming flow and one of the corner with angle of less or greater than 90° placed to the direction of coming flow. With numerical study by using Finite Volume Method, is obtained that the position of pipe in which one of the corner directed to the coming flow has good heat transfer when compared with rectangular pipe of which one of the rectangular side directed perpendicularly to the coming flow. More the angle of corner will give more the heat transfer and vice versa. Every variation of 15° of wall angle of pipe makes the variation of heat transfer approximately 1.5%.

Keywords: *Fluid velocity, rectangular pipe, flow, heat transfer, finite volume method.*

PENDAHULUAN

Pada sebagian besar alat penukar panas (*heat exchanger*), pipa (*tube*) penukar panas berbentuk bulat yang mana pipa bentuk ini banyak tersedia di pasaran. Bentuk-bentuk pipa lain yang tidak bulat yang dapat dijumpai pada *heat exchanger* seperti bentuk *ellip* dan memanjang ber-radius. *Heat exchanger* dengan *tube* segi empat sudah digunakan diantaranya untuk menyerap panas dari gas buang *engine*, yang mana media penyerap adalah air. Selanjutnya, *tube* segi empat ini dikembangkan lagi kemampuan pertukaran panasnya dengan memasang sirip (*studs*) pada bagian dalam. *Tube* yang telah dipelajari di atas adalah bentuk segi empat yang mana sisi-sisinya saling tegak lurus. Untuk *tube* berpenampang segi empat yang mana sudut-sudutnya tidak saling tegak lurus belum dijumpai dalam *heat exchanger*. Walaupun demikian, bentuk

tersebut sangat penting untuk ditinjau mengenai karakteristik aliran dan perpindahan panasnya. Untuk perpindahan panas pada pipa bulat, telah banyak diuraikan dalam banyak literature yang lain.

Untuk pipa bulat, penempatan posisi pipa bulat dalam aliran sebagai penukar panas tidak sulit. Akan tetapi, untuk pipa segi empat maka posisi dalam aliran harus sedemikian agar proses perpindahan panas berjalan dengan baik. Posisi pipa segi empat ada beberapa macam, dapat dipasang dengan posisi yang membuat salah satu bidangnya tegak lurus terhadap datangnya aliran, dan dapat pula dipasang dengan sudut pertemuan bidang pipa diarahkan pada datangnya aliran. Pipa segi empat dapat berupa keempat sisi bidang (dinding) saling tegak lurus, serta dapat tidak saling tegak lurus atau sudut-sudutnya tidak sama dan dapat pula segi empat yang mana sisi-sisinya tidak sama panjang.

Melihat berbagai bentuk dari penampang pipa segi empat maka banyak sekali kemungkinan geometri dan posisi pipa segi empat terhadap datangnya aliran. Oleh karena itu perlu diberikan suatu studi tentang beberapa bentuk posisi pipa segi empat tersebut terhadap perpindahan panasnya apabila fluida mengalir di sekelilingnya. Pipa segi empat yang dipelajari dalam tulisan ini adalah pipa segi empat sama sisi yang mana saling tegak lurus, dan pipa segi empat sama sisi tetapi dua sudutnya sama besar (bentuk jajaran genjang). Pipa tersebut dipasang dalam aliran yang mana salah satu sudutnya diarahkan dengan datang aliran yang menabraknya dan salah satu sisi diarahkan dengan aliran secara tegak lurus (Gambar 1). Selain itu diberikan juga pengaruh perubahan sudut segi empat terhadap perpindahan panasnya.

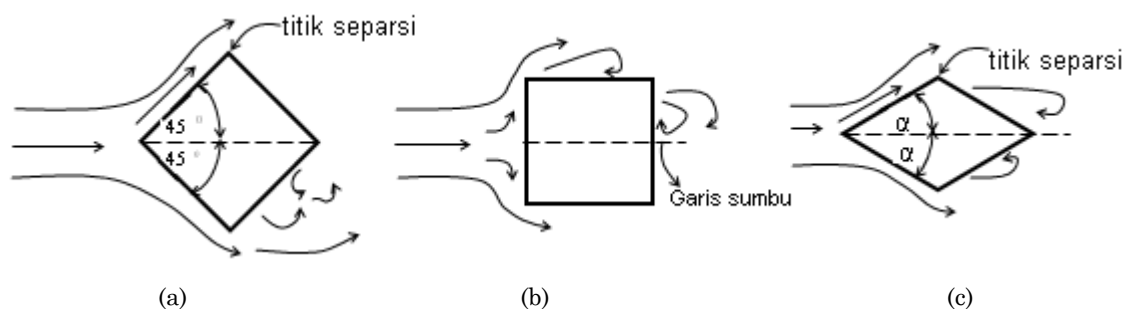
Sebuah pipa berpenampang segi empat sama sisi yang mana saling tegak diarahkan pada datangnya aliran maka bentuknya terhadap arah aliran terdiri dari dua bidang miring yang simetris terhadap garis horizontal yang membelah sudutnya. Dengan demikian sudut antara datangnya aliran dengan bidangnya adalah 45° . Apabila salah satu sisi dari penampang dipasang tegak lurus dengan aliran maka aliran akan menyebar vertikal ke atas dan ke bawah searah bidangnya dan titik stagnasi terletak pada tengah dinding pipa.

Studi ini dilakukan secara numerik untuk mengetahui besar perpindahan panas terhadap pipa segi empat seperti yang telah diterangkan di atas. Penyelesaian persamaan lapisan batas hidrodinamik dan lapisan batas termal akan memberikan karakteristik hidrodinamik yang berkaitan erat dengan karakteristik termal dari aliran di sekitar pipa segi empat.

METODE PENELITIAN

Pipa Segi Empat

Sebuah pipa berpenampang segi empat, dengan panjang pipa diasumsikan tak berhingga, dapat dipasang melintang terhadap aliran pada beberapa posisi seperti ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Posisi Pipa Segi Empat dalam Aliran

Pipa segi empat dengan lebar semua dindingnya sama atau dengan penampang segi empat sama sisi dan keempat sudutnya sama besar dapat dipasang dengan sudut kearah datangnya aliran (Gambar 1a), atau salah satu bidangnya tegak lurus dengan aliran (Gambar 1b). Sedangkan segi empat yang mana kedua sudutnya sama besar dan dengan membentuk segi empat jajaran genjang dipasang dalam aliran dapat dilihat pada Gambar 1c. Bila salah satu sudut segi empatnya dipasang ke arah datangnya aliran maka pipa akan simetris terhadap garis sumbu horizontal, sehingga dapat dipelajari hanya satu bagian saja, katakan bagian atas. Di atas bidang mulai dari titik separasi aliran sampai ke bagian belakang, terjadi aliran balik atau *vortex*. Daerah di atas bidang ini disebut daerah mati yang mana perpindahan panas di daerah ini tidak dapat dinyatakan dengan formulasi matematik. Perpindahan panas yang dapat dianalisa secara matematik adalah pada dinding di depan titik separasi. Apabila salah satu dindingnya diarahkan tegak lurus dengan datangnya aliran maka aliran akan menyebar ke atas dan ke bawah serta titik stagnasi terletak pada tengah sisi dari bidang. Apabila dua sudut dari segi empat lebih kecil dari 45° maka bentuk penampang adalah seperti ditunjukkan oleh Gambar 1c. Sebaliknya sudut ini dapat lebih besar dari 45° . Apabila dinding ini diamati maka hal tersebut merupakan dinding/bidang miring atau bidang tegak lurus. Karakteristik hidrodinamik dan termal aliran dinyatakan dengan persamaan lapisan batas hidrodinamik dan termal. Dalam studi ini pipa segi empat dengan konfigurasi seperti Gambar 1 adalah yang akan kita pelajari. Khusus untuk $\alpha = 90^\circ$ maka konfigurasi pipa seperti Gambar 1b.

Persamaan Lapisan Batas Hidrodinamik

Persamaan lapisan batas aliran pada dinding miring diberikan oleh persamaan momentum aliran yang merupakan profil kecepatan apabila diselesaikan. Persamaan tersebut untuk dua dimensi dan dalam koordinat *Cartesius* adalah sebagai berikut [1]:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

dan persamaan kontinuitas :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{2}$$

u dan v adalah kecepatan masing-masing dalam arah x dan y . Gradien tekanan dalam persamaan (1) dapat digantikan dengan:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = U \frac{dU}{dx} \tag{3}$$

$U(x)$ adalah kecepatan aliran jauh dari dinding. Untuk aliran pada dinding miring dengan sudut kemiringan $\alpha = \beta\pi/2$ ditunjukkan oleh Gambar 2, maka $U(x)$ diberikan dalam bentuk *power-law* berikut berikut [2]:

$$U(x) = Cx^m \tag{4}$$

dengan $\beta = \frac{2m}{1+m}$

dimana, m : *Falkner-Skan power-law parameter*.

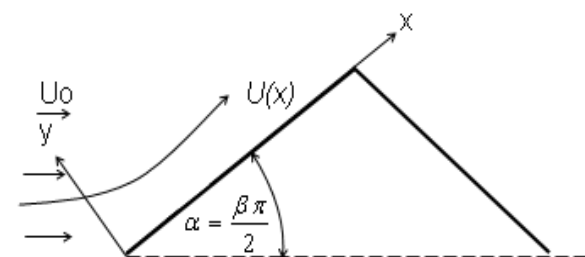
Dari persamaan (4), bila $m = 0$ maka dinding adalah datar dan $U(x) = C$. Untuk aliran pada dinding datar maka $U(x) = U_o$ yang mana U_o adalah kecepatan aliran datang, sehingga $C = U_o$. Bila $x = 0$, $U(x=0) = 0$ akan tetapi harus $U(x=0) = U_o$. Oleh karena itu agar profil kecepatan memenuhi Persamaan (4) maka:

$$U(x) = U_o(1+x^+)^m \tag{5}$$

Bentuk tak-berdimensi dari (5) adalah:

$$U_e^+ = \frac{U(x)}{U_o} = (1+x^+)^m \tag{6}$$

U_e^+ pada Persamaan (6) adalah variabel kecepatan tak berdimensi arah x jauh dari dinding. Dalam hal ini $x^+ = x/L$ dimana L adalah panjang bidang miring arah x (Gambar 2). Persamaan lapisan batas dinormalisasi dengan variabel tak-berdimensi dalam bentuk sebagai berikut [3]:



Gambar 2. Penampang atas Pipa Segi Empat

$$y^+ = \frac{y}{L} \sqrt{R_e}, u^+ = \frac{u}{U_o}, R_e = \frac{U_o L}{\nu}, v^+ = \frac{v}{U_o} \sqrt{R_e}, \tag{7}$$

$$p^+ = \frac{p}{\rho U_o^2}$$

Dengan menggunakan variabel tersebut maka persamaan (1) menjadi [3]:

$$u^+ \frac{\partial u^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial u^+}{\partial y^+} = U_e^+ \frac{dU_e^+}{dx^+} + \frac{\partial^2 u^+}{\partial y^{+2}} \tag{8}$$

dan persamaan kontinuitas (2) menjadi:

$$\frac{\partial u^+}{\partial x^+} + \frac{\partial v^+}{\partial y^+} = 0 \tag{9}$$

dan dengan kondisi batas sebagai berikut:

$$\begin{aligned} u^+ = v^+ = 0 & \text{ pada dinding, } y^+ = 0 \\ u^+ = U_e^+ & \text{ jauh dari dinding, } y^+ = \infty \\ u^+ = 1 & \text{ pada } x^+ = 0 \end{aligned}$$

Persamaan Lapisan Batas Termal

Persamaan lapisan batas termal diberikan berikut ini [1]:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \tag{10}$$

dimana:

T = Temperatur fluida
 λ = Difusivitas termal fluida

T dinormalisasi dengan variabel temperatur tak-berdimensi sebagai berikut [1]:

$$T^+ = \frac{T - T_s}{T_\infty - T_s} \tag{11}$$

dimana:

T_∞ = Temperatur fluida jauh dari dinding pipa
 T_s = Temperatur dinding pipa

Dengan demikian maka persamaan (10) menjadi [1]:

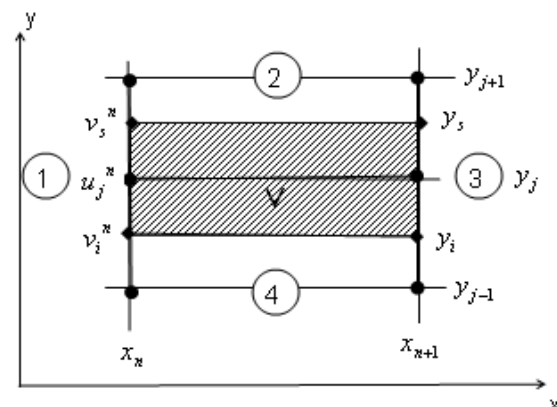
$$u^+ \frac{\partial T^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial T^+}{\partial y^+} = \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 T^+}{\partial y^{+2}} \tag{12}$$

dimana:

Pr = Bilangan Prandtl

Kondisi batas:

$$\begin{aligned} T^+ = 0 & \text{ pada dinding, } y^+ = 0 \\ T^+ = 1 & \text{ jauh dari dinding, } y^+ = \infty \\ T^+ = 1 & \text{ pada } x^+ = 0 \end{aligned}$$



Gambar 3. Volume Elementer

Metode Penyelesaian Persamaan

Persamaan (8), (9) dan (12) akan diselesaikan dengan Metode Volume Hingga. Metode ini dikembangkan oleh Patankar dan Spalding [4]. Untuk ringkasnya, metode ini, langkah pertama adalah mengintegrasikan persamaan pada suatu volume elementer V (Gambar 3). Persamaan kontinuitas (9) dikalikan dengan u^+ menjadi:

$$u^+ \frac{\partial u^+}{\partial x^+} + u^+ \frac{\partial v^+}{\partial y^+} = 0 \tag{13}$$

Tambahkan persamaan (13) dengan persamaan (8) dan didapatkan:

$$\frac{\partial(u^+u^+)}{\partial x^+} + \frac{\partial(u^+v^+)}{\partial y^+} = S + \frac{\partial^2 u^+}{\partial y^{+2}} \tag{14}$$

dengan $S = U_e^+ \frac{dU_e^+}{dx^+}$

Persamaan (14) diintegrasikan pada elemen **V** dan untuk menyederhanakan penulisan super skrip + dihilangkan maka didapatkan:

$$\int_{y_i}^{y_s} [uu]_{x_n}^{x_{n+1}} dy + \int_{x_n}^{x_{n+1}} [uv]_{y_j}^{y_s} dx = \iint_V S dx dy + \int_{x_n}^{x_{n+1}} \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]_{y_i}^{y_s} dx$$

Setelah diintegrasikan maka didapatkan:

$$(u_j^{n+1}u_j^* - u_j^n u_j^n)(y_s - y_i) + (v_s^n u_s^{n+1} - v_i^n u_i^{n+1})\Delta x = S\Delta x(y_s - y_i) + \frac{u_{j+1}^{n+1} - u_j^{n+1}}{y_{j+1} - y_j}\Delta x - \frac{u_j^{n+1} - u_{j-1}^{n+1}}{y_j - y_{j-1}}\Delta x \tag{15}$$

u_j^* diberikan dari persamaan kontinuitas agar bagian dari persamaan tersebut linier. Setelah disusun maka persamaan diskretisasi lapisan batas dapat ditulis sebagai:

$$a_j^n u_{j-1}^{n+1} + b_j^n u_j^{n+1} + c_j^n u_{j+1}^{n+1} = d_j^n \tag{16}$$

dengan $a, b, c,$ dan d adalah koefisien persamaan dan kecepatan vertikal dihitung dengan persamaan kontinuitas:

$$v_{j+1}^{n+1} = v_j^{n+1} - \frac{\Delta y^+}{\Delta x^+} (u_j^{n+1} - u_{j-1}^{n+1}) \tag{17}$$

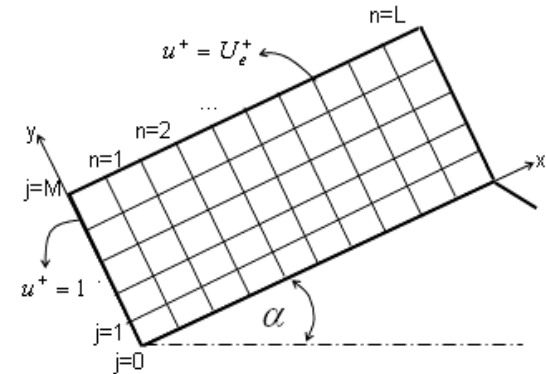
Metode penyelesaian persamaan (12) dilakukan dengan metode yang sama seperti di atas dan setelah pengintegralan didapatkan sebagai berikut:

$$e_j^n T_{j-1}^{n+1} + f_j^n T_j^{n+1} + g_j^n T_{j+1}^{n+1} = h_j^n \tag{18}$$

Koefisien persamaan e, f, g dan h adalah identik dengan koefisien a, b, c dan d yang telah didapatkan

di atas, namun ada komponen T^+ yang menggantikan sebagian u^+ .

Penyelesaian Persamaan Diskretisasi



Gambar 4. Diskretisasi Bidang

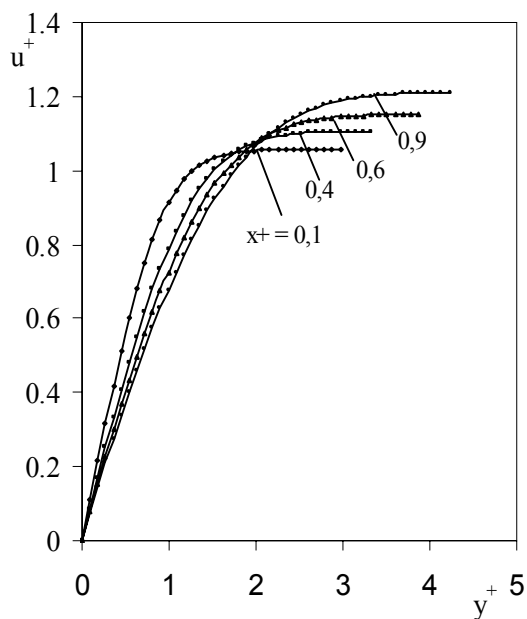
Gambar 4 menunjukkan kisi numerik dimana (n, j) adalah *mesh point*. *Mesh point* diberi nomor dengan n naik secara progresif dalam arah tangensial yang dimulai dari $n = 0$ pada pangkal bidang sampai dengan $n = L$. Subskrip j naik secara progresif dalam arah radial dengan $j = 0, 1, 2, \dots, M$ dihitung mulai dari dinding pipa.

Persamaan diskretisasi (16) dan (18) dimana variabel dengan subskrip $n+1$ menyatakan variabel tak-diketahui yaitu variabel yang ingin dihitung, sedangkan subskrip n menyatakan variabel yang diketahui. Persamaan-persamaan tersebut membentuk matrik tridiagonal pada koefisiennya dan oleh karena itu persamaan tersebut diselesaikan dengan metode *Choleski*. u^+ dan v^+ dalam koefisien-koefisien persamaan yang bersubskrip n pada awalnya adalah nilai u^+ dan v^+ pada kondisi batas $x^+ = 0$. Mulai dari $n = 0$ dan digunakan persamaan (16) dengan $j = 1, 2, 3, \dots, M-1$ maka didapatkan sejumlah $M-1$ persamaan aljabar linier. Koefisien persamaan tersebut membentuk matrik tiga-diagonal. Dari persamaan ini dihitung $u_{j=1}^{+1}, u_{j=2}^{+1}, \dots, u_{j=M-1}^{+1}$ dengan menggunakan nilai $u_{j=1}^{+0}, u_{j=2}^{+0}, \dots, u_{j=M-1}^{+0}$ yaitu kecepatan pada kondisi batas pada $x = 0$. u_j^{+1} yang telah didapat ini digunakan untuk menghitung komponen kecepatan vertikal $v_1^{+1}, v_2^{+1}, \dots, v_{M-1}^{+1}$ dengan persamaan (17). Kemudian sama halnya dengan persamaan (18), kita hitung $T_1^{+1}, T_2^{+1}, T_3^{+1}, T_4^{+1}, \dots, T_{M-1}^{+1}$. Selanjutnya untuk $n = 1$, dapat dihitung $u_1^{+2}, u_2^{+2}, u_3^{+2}, \dots, u_{M-1}^{+2}$ dengan (16), kemudian hitung $v_1^{+2}, v_2^{+2}, \dots, v_{M-1}^{+2}$ dengan (17) dan $T_1^{+2}, T_2^{+2}, T_3^{+2}, T_4^{+2}, \dots, T_{M-1}^{+2}$ dihitung dengan prosedur yang sama seperti di atas. Perhitungan dilanjutkan sampai dengan $n = L$ yaitu: u_j^{+L}, v_j^{+L} dan T_j^{+L} , dengan $j =$

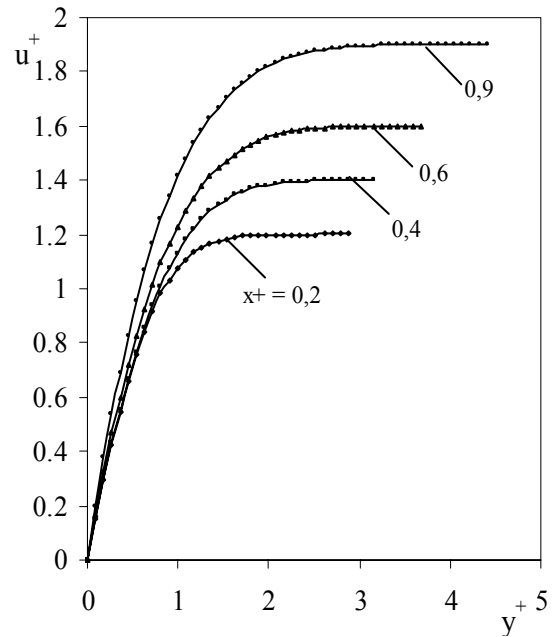
1, 2, ..., $M-1$. Dalam perhitungan ini, diambil jumlah titik masing-masing $M = 50$ dan $L = 100$.

HASIL DAN ANALISA

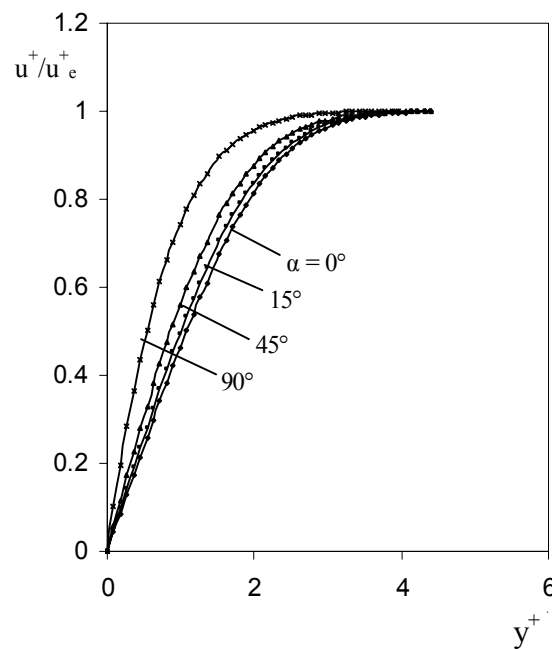
Perhitungan numerik dilakukan untuk $0 \leq m \leq 1$ atau $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Gambar 5 diberikan sebagai contoh hasil numerik. Gambar ini menunjukkan pengaruh profil kecepatan sepanjang dinding pipa untuk $\alpha = 45^\circ$. Pada dinding dekat sisi masuk aliran atau x yang kecil, kemiringan profil linier dalam daerah laminar sub-layer adalah lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa pada kecepatan yang berjarak sama dari dinding pipa, kecepatan akan lebih tinggi pada daerah yang semakin dekat dengan sisi masuk. Sebaliknya pada daerah yang jauh dari dinding, kecepatan pada daerah sisi masuk lebih kecil. Kecepatan jauh dari dinding merupakan kondisi batas dan bentuknya seperti diberikan persamaan (6) dan untuk $x^+ = 0,9$ maka kecepatan mencapai 1,2 kali lebih besar dari kecepatan masuk. Tebal lapisan batas semakin besar bila semakin menjauhi dari sisi masuk (x semakin naik). Perpotongan profil kecepatan terjadi pada jarak $y^+ \approx 2$ dan hal ini berarti terdapat kecepatan yang sama pada daerah tersebut. Daerah perpotongan ini akan bergeser posisinya dan akan hilang pada $\alpha = 90^\circ$, seperti ditunjukkan oleh Gambar 6. Untuk $\alpha = 90^\circ$, kecepatan semakin naik dengan kenaikan x . Pada $x^+ = 0,4$ kecepatan mencapai 1,4 kali lebih besar dari kecepatan masuk. Tebal lapisan batas menurun dengan kenaikan kemiringan dinding. Sesungguhnya, untuk $\alpha = 90^\circ$ dinding pipa menjadi tegak lurus aliran dan titik stagnasi terletak pada tengah dinding sehingga lapisan batas terjadi mulai dari tengah dinding sampai dengan ujung dinding saja.



Gambar 5. Profil Kecepatan ($\alpha = 45^\circ$)



Gambar 6. Profil Kecepatan ($\alpha = 90^\circ$)



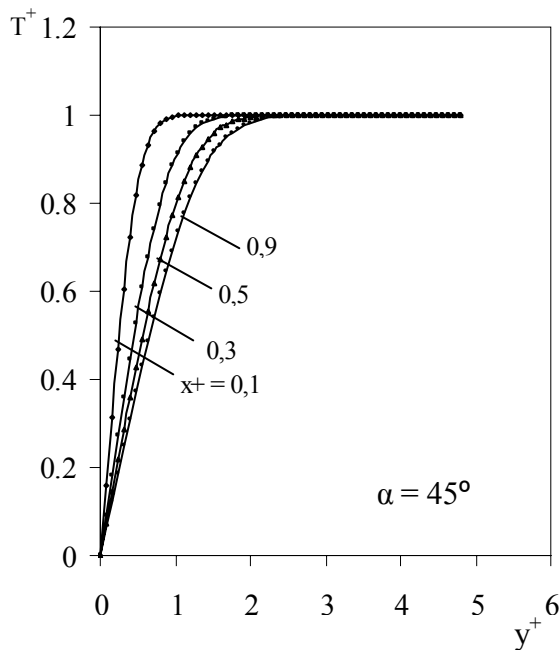
Gambar 7. Profil Kecepatan ($x^+=0,9$)

Gambar 7 menunjukkan profil kecepatan pada $x^+ = 0,9$ untuk beberapa sudut kemiringan. Kecepatan dinormalisir terhadap kecepatan aliran exterior atau kecepatan jauh dari dinding, u_e^+ . Dapat diamati dari gambar bahwa untuk $\alpha = 0^\circ$, hal ini berarti bidang menjadi datar dan profil kecepatannya adalah profil kecepatan aliran pada bidang datar. Bentuk profil berbeda satu sama lain, Semakin naik α maka semakin jelas perbedaannya. Profil kecepatan linier yang dekat dengan dinding, semakin naik kemiringannya bila α semakin naik dan komponen kecepatan linier ini terjadi pada daerah y yang lebih besar untuk α yang lebih kecil.

Koefisien hambat, C_D diberikan dalam Tabel 1 yang menunjukkan besarnya hambatan akibat gesekan untuk kemiringan dinding untuk beberapa kemiringan dinding pipa. Dari Tabel dapat dilihat bahwa C_D naik dengan kenaikan α dari 30° ke 85° dan turun bila α mencapai 90° . Koefisien hambat maksimum terjadi pada $\alpha = 85^\circ$. Bila sudut $60^\circ < \alpha < 90^\circ$, pipa segi empat dengan keempat sisinya sama panjang dan simetris terhadap sumbu horizontal tidak bisa direalisasikan geometri pipa tersebut.

Tabel 1. Koefisien hambat

$\alpha(^\circ)$	Re	$C_D = 4 Re^{-1/2} \int_0^1 \left(\frac{\partial u^+}{\partial y^+} \right)_{y=0} dx^+$	$\alpha(^\circ)$	Re	C_D
30	500	0,1698	80	500	0,3305
	1000	0,1342		1000	0,2337
45	500	0,2092	85	500	0,3322
	1000	0,1479		1000	0,2349
60	500	0,2756	90	500	0,1796
	1000	0,1949		1000	0,1270
75	500	0,2867			
	1000	0,2027			

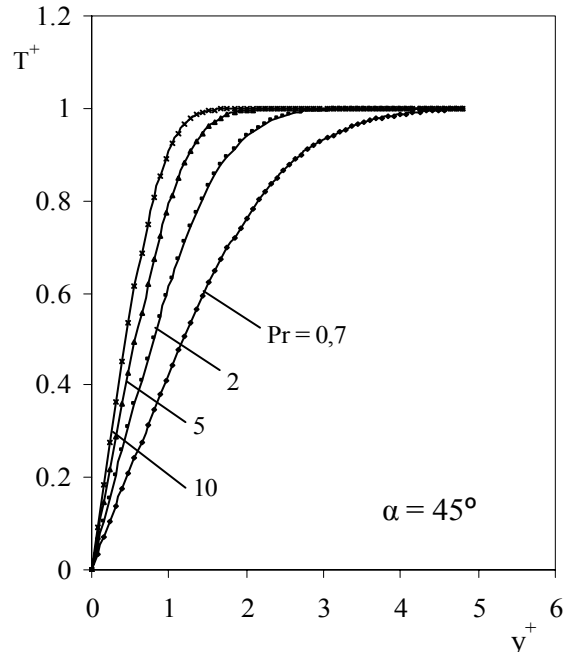


Gambar 8.. Temperatur (Pr = 5)

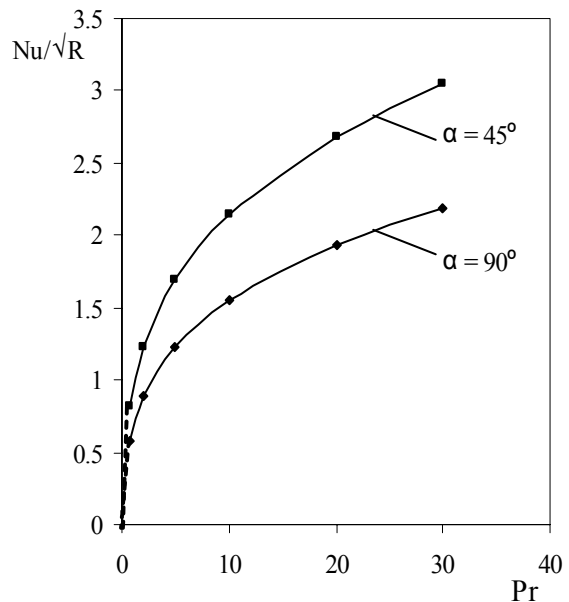
Gambar 8 menerangkan profil temperatur aliran pada beberapa nilai x untuk kemiringan $\alpha = 45^\circ$ dengan $Pr = 5$ (liquid). Pada gambar ini ditunjukkan bahwa profil temperatur sebagian besar berubah secara linier dari dinding pipa. Pada jarak yang sama dari dinding (y yang sama) didapatkan bahwa semakin x naik maka akan semakin turun temperaturnya. Tebal lapisan batas termal naik seiring dengan bertambahnya x .

Gradien temperatur pada dinding semakin naik pada daerah sisi masuk dan hal ini menunjukkan perpindahan panas akan lebih besar apabila tebal lapisan batas mengecil dan sebaliknya. Perpindahan

panas semakin naik apabila angka *Prandtl* semakin naik, hal ini ditunjukkan oleh Gambar 9 pada daerah $x^+ = 0,5$. Perbedaan temperatur adalah signifikan apabila angka *Pr* kecil pada y yang sama. Profil temperatur identik dengan profil kecepatan sehingga dapat dikatakan bahwa temperatur semakin turun apabila α semakin kecil dan sebaliknya.



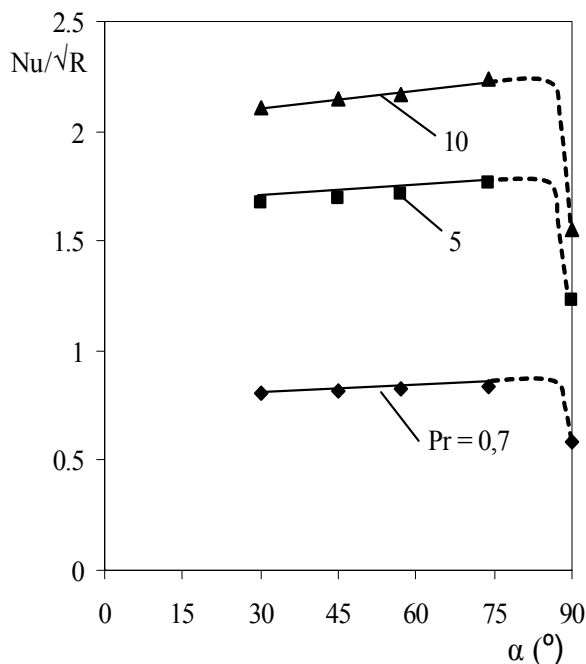
Gambar 9. Temperatur ($x^+ = 0,5$)



Gambar 10. Variasi Nu dengan Pr

Perpindahan panas yang dinyatakan dengan angka *Nusselt* rata-rata yang diberikan oleh Gambar 10 untuk $\alpha = 45^\circ$ dan 90° , yaitu pipa segi empat yang mana bidangnya saling tegak lurus dengan posisi pipa dalam aliran fluida seperti Gambar 1a dan 1b. Untuk $\alpha = 90^\circ$, angka *Nusselt* dihitung mulai pada x^+

= 0 sampai 0,5. Dari gambar dapat dilihat bahwa perbedaan perpindahan panasnya sangat signifikan. Pada angka *Prandtl* yang sama perpindahan panas pipa dengan $\alpha = 45^\circ$ lebih besar. Luasan penampang perpindahan panas pada pipa dipasang 45° adalah dua kali lebih besar untuk dari $\alpha = 90^\circ$. Untuk pipa dipasang yang mana salah satu penampangnya dipasang pada posisi tegak lurus aliran ($\alpha = 90^\circ$) maka aliran fluida akan mengenai hanya satu sisi saja sehingga arah aliran akan terbagi dua yaitu ke bagian atas dan bawah. Hal ini akan membuat sumbu simetris terletak pada tengah sisi bidang pipa.



Gambar 11. Variasi Nu dengan α

Gambar 11 menunjukkan pengaruh angka *Nusselt* rata-rata terhadap kemiringan dinding pipa. Pada gambar tersebut hanya diberikan beberapa sudut kemiringan dinding pipa. Garis putus-putus menunjukkan pipa segi empat yang sulit direalisasikan kenyataannya karena pipa cenderung menuju ke bentuk garis lurus arak vertikal dan lebar arah sumbu (arah horizontal menjadi sangat tipis). Dari gambar tersebut didapatkan bahwa besarnya perpindahan panas bergerak secara linier dengan sudut kemiringan dan kenaikannya tidak begitu signifikan khususnya untuk angka *Pr* yang rendah. Semakin naik kemiringan dinding maka semakin naik pula perpindahan panasnya dan sebaliknya. Kenaikan perpindahan panas sekitar 1,5%.

KESIMPULAN

Posisi pipa segi empat terhadap aliran mempunyai pengaruh terhadap perpindahan panasnya. Posisi pipa dengan salah satu sudut segi empatnya

diarahkan ke datangnya aliran mempunyai perpindahan panas lebih baik dibandingkan dengan pipa yang mana salah satu dindingnya dipasang tegak lurus dengan aliran.

Variasi kedua sudut dinding segi empat dengan lebar dinding yang sama mempengaruhi besar perpindahan panasnya, semakin naik sudutnya maka semakin naik secara linier perpindahan panasnya dan sebaliknya. Setiap perubahan sudut kemiringan 15° maka perubahan perpindahan panas sekitar 1,5%. Batasan yang dapat direalisasikan sebaiknya untuk pipa segi empat dengan geometri $45^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$.

DAFTAR PUSTAKA

1. Frank P. Incorpera, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley & Son, Singapore, 2005.
2. F. White, *Viscous Fluid Flow*, Mc Graw-Hill, Singapore, 1984.
3. Jian-Zhong Xu and Wen-Sheng Yu, *On the Slightly Reduced Navier-Stokes Equations*, Journal of Fluids Engineering, Vol.119, No. 1, 1997.
4. SV. Patankar and D.B Spalding, *A calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Tridimensional Parabolic Flow*, Int. Journal Heat Mass Transfer, Vol. 15, 1972.