

## Aliran Lapisan Sempadan Olakan Bebas Terhadap Silinder Bulat Mengufuk dengan Pemanasan Newtonan (Free Convection Boundary Layer Flow over a Horizontal Circular Cylinder with Newtonian Heating)

MOHD ZUKI SALLEH & ROSLINDA NAZAR\*

### ABSTRAK

*Penyelesaian berangka bagi masalah aliran lapisan sempadan olakan bebas mantap terhadap silinder bulat mengufuk yang dijanakan oleh pemanasan Newtonan, iaitu pemindahan haba dari permukaan berkadar langsung dengan suhu permukaan setempat, dipertimbangkan. Persamaan lapisan sempadan terjelma diselesaikan secara berangka dengan suatu skim berangka beza terhingga tersirat yang dikenali sebagai kaedah kotak Keller. Penyelesaian berangka diperoleh bagi pekali geseran kulit, pekali pemindahan haba setempat, suhu dinding serta profil halaju dan suhu. Ciri-ciri aliran dan pemindahan haba bagi suatu julat nilai nombor Prandtl yang besar dianalisis dan dibincangkan.*

*Kata kunci: Lapisan sempadan; olakan bebas; pemanasan Newtonan; silinder bulat mengufuk*

### ABSTRACT

*The numerical solution of steady free convection boundary layer flow over a horizontal circular cylinder, generated by Newtonian heating in which the heat transfer from the surface is proportional to the local surface temperature, is considered. The transformed boundary layer equations are solved numerically using an implicit finite-difference numerical scheme known as the Keller-box method. Numerical solutions are obtained for the skin friction coefficient, local heat transfer coefficient, wall temperature as well as the velocity and temperature profiles. The features of the flow and heat transfer characteristics for large range of values of the Prandtl number are analyzed and discussed.*

*Keywords: Boundary layer; free convection; horizontal circular cylinder; Newtonian heating*

### PENGENALAN

Masalah aliran lapisan sempadan olakan bebas terhadap silinder bulat mengufuk memainkan peranan penting dalam pelbagai aktiviti perindustrian dan kejuruteraan masa kini. Masalah aliran lapisan sempadan olakan bebas terhadap silinder mengufuk dengan suhu permukaan malar dalam bendalir likat telah dikaji oleh Merkin (1976). Beliau merupakan penyelidik pertama yang berjaya memperolehi penyelesaian tepat bagi masalah ini. Beliau menggunakan kaedah kembangan siri Görtler dan Blasius, berserta kaedah kamiran dan skim beza terhingga. Daripada kajian tersebut, persamaan penuh lapisan sempadan telah diselesaikan bermula dari titik genangan bawah  $x = 0$  sehingga  $x = \pi$  dan didapati tiada titik pemisahan berlaku sehingga  $x = \pi$ . Berdasarkan kajian Merkin (1976), Nazar et al. (2002a) telah mempertimbangkan masalah tersebut dalam bendalir mikropolar. Merkin dan Pop (1988) pula mengkaji masalah aliran lapisan sempadan olakan bebas terhadap silinder bulat mengufuk dengan fluks haba permukaan malar dalam bendalir likat. Berdasarkan kajian tersebut juga, Nazar et al. (2002b) telah mempertimbangkan kajian dalam bendalir mikropolar.

Ramai penyelidik lain juga telah membuat kajian lanjutan tentang teori dan penggunaan aliran lapisan

sempadan terhadap silinder bulat mengufuk sama ada dalam bendalir likat atau medium berliang seperti Ingham (1978), Huang dan Chen (1983), Fand et al. (1986), Kumari dan Nath (1989), Yih (2000) dan Molla et al. (2005). Semua kajian di atas mempertimbangkan syarat sempadan sama ada suhu permukaan malar (SPM) atau fluks haba permukaan malar (FHM).

Seterusnya, Merkin (1994) memperkenalkan suatu syarat sempadan yang dikenali sebagai pemanasan Newtonan, dengan pemindahan haba daripada permukaan berkadar langsung dengan suhu permukaan setempat, atau dikenali juga sebagai aliran olakan konjugat. Antara penyelidik yang telah mempertimbangkan masalah aliran lapisan sempadan olakan dengan menggunakan syarat sempadan pemanasan Newtonan adalah seperti Merkin (1994), Lesnic et al. (1999, 2000, 2004), Pop et al. (2000) dan Chaudhary dan Jain (2006, 2007). Terkini, Salleh et al. (2009) mengkaji aliran lapisan sempadan olakan paksa terhadap titik genangan hadapan dengan pemanasan Newtonan.

Kajian ini mempertimbangkan aliran lapisan sempadan olakan bebas terhadap silinder bulat mengufuk dengan pemanasan Newtonan. Setakat ini, bagi kes pemanasan Newtonan belum ada kajian dibuat dalam pemasalahan

ini, jadi segala keputusan yang diperoleh adalah baru dan asli.

KAEDAH KAJIAN

Pertimbangkan aliran mantap dua matra dan silinder bulat mengufuk yang mempunyai jejari  $a$ , yang dipanaskan dengan mempertimbangkan syarat sempadan pemanasan Newtonan (PN) dan dimasukkan ke dalam suatu bendalir likat dan tak termampat dengan suhu sekitaran  $T_\infty$ , seperti dalam Rajah 1 (gambar rajah bermatra). Berdasarkan penghampiran lapisan sempadan, persamaan-persamaan menakluk tak bermatra adalah seperti berikut (Merkin 1976; Merkin & Pop 1988; Nazar et al. 2002a, 2002b):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \tag{1}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \theta \sin x, \tag{2}$$

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}, \tag{3}$$

yang tertakluk kepada syarat sempadan (Merkin 1994):

$$u = v = 0, \frac{\partial \theta}{\partial y} = -1 - \theta \text{ (PN) atau } \theta = 1 \text{ (SPM)}$$

$$\text{atau } \frac{\partial \theta}{\partial y} = -1 \text{ (FHM) pada } y = 0, \tag{4a}$$

$$u \rightarrow 0, \theta \rightarrow 0 \text{ apabila } y \rightarrow \infty, \tag{4b}$$

dengan  $u$  dan  $v$  masing-masing merupakan komponen halaju dalam arah  $x$  dan  $y$ ,  $\theta$  adalah suhu tak bermatra dan  $Pr$  adalah nombor Prandtl. Bagi menyelesaikan persamaan menakluk tak bermatra (1) – (3) dengan syarat sempadan (4), maka diperkenalkan pemboleh ubah berikut:

$$\psi = x f(x, y), \theta = \theta(x, y), \tag{5}$$

dengan  $\psi$  ialah fungsi strim dan ditakrifkan sebagai:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \tag{6}$$

Daripada takrif fungsi strim (6), persamaan (1) dipenuhi. Seterusnya, dengan menggantikan persamaan (5) dan (6) ke dalam persamaan (2) dan (3), diperoleh:

$$\frac{\partial^3 f}{\partial y^3} + f \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 + \frac{\sin x}{x} \theta = x \left( \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} - \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right), \tag{7}$$

$$\frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + f \frac{\partial \theta}{\partial y} = x \left( \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right), \tag{8}$$

dan syarat sempadan (4) dijelmakan menjadi:

$$f = \frac{\partial f}{\partial y} = 0, \frac{\partial \theta}{\partial y} = -1 - \theta \text{ (PN) atau } \theta = 1 \text{ (SPM)}$$

$$\text{atau } \frac{\partial \theta}{\partial y} = -1 \text{ (FHM) pada } y = 0, \tag{9a}$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} \rightarrow 0, \theta \rightarrow 0 \text{ apabila } y \rightarrow \infty. \tag{9b}$$

Pada titik genangan bawah bagi silinder,  $x \approx 0$ , persamaan (7) dan (8) terturun kepada persamaan pembezaan biasa seperti berikut:

$$f''' + f f'' - f^2 + \theta = 0. \tag{10}$$

$$\frac{1}{Pr} \theta'' + f \theta' = 0. \tag{11}$$

yang tertakluk kepada syarat sempadan

$$f(0) = f'(0) = 0, \theta'(0) = -1 - \theta(0) \text{ (PN)}$$

$$\text{atau } \theta(0) = 1 \text{ (SPM) atau } \theta'(0) = -1 \text{ (FHM) pada } y = 0, \tag{12a}$$

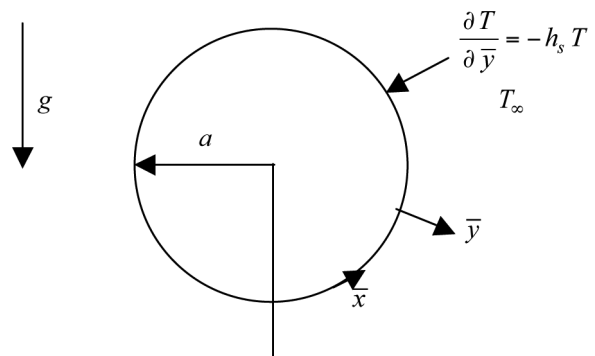
$$f' \rightarrow 0, \theta \rightarrow 0 \text{ apabila } y \rightarrow \infty. \tag{12b}$$

dengan tandaan ( ' ) merujuk kepada pembezaan terhadap  $y$ .

Dalam kajian ini, kuantiti fizikal yang diminati ialah nilai pekali geseran kulit setempat,  $C_f$ , dan suhu dinding silinder,  $\theta_w(x)$  tak bermatra yang diberikan sebagai berikut (untuk kes PN):

$$C_f = x \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(x, 0), \tag{13}$$

$$\theta_w = \theta(x, 0) = -1 - \frac{\partial \theta}{\partial y}(x, 0) \tag{14}$$



RAJAH 1. Model fizikal dan sistem koordinat ( $T$  suhu bendalir bermatra dan  $h_s$  parameter pemindahan haba)

HASIL DAN PERBINCANGAN

Penyelesaian bagi persamaan (7) dan (8) tertakluk kepada syarat sempadan (9) diselesaikan secara berangka menggunakan kaedah kotak Keller, seperti yang dicadangkan oleh Na (1979) dan Cebeci dan Bradshaw (1988). Secara ringkas, penyelesaiannya melibatkan empat langkah seperti berikut:

1. Menurunkan sistem persamaan (7) dan (8) tertakluk kepada syarat sempadan (9) dalam bentuk sistem peringkat pertama;
2. Menulis persamaan beza menggunakan beza pusatan;
3. Melinearkan persamaan aljabar yang terhasil menggunakan kaedah Newton, dan kemudian menulisnya dalam bentuk vektor-matriks;
4. Seterusnya, selesaikan sistem linear tersebut menggunakan teknik penghapusan blok tiga penjuru.

Untuk penerangan lebih lengkap, sila rujuk Ishak et al. (2008a, b) dan Salleh et al. (2008).

Bagi menentusahkan keberkesanan kaedah yang digunakan, perbandingan nilai pekali pemindahan haba  $-\theta'(0)$  dan suhu dinding  $\theta(0)$  dilakukan. Jadual 1 dan 2 masing-masing mewakili perbandingan  $-\theta'(0)$  dan  $\theta(0)$  apabila  $Pr = 1$ , bagi kes SPM dan FHM. Berdasarkan pada keputusan dalam kedua-dua jadual tersebut, didapati nilai  $-\theta'(0)$  dan  $\theta(0)$  masing-masing bagi kajian ini adalah hampir sama dengan nilai yang diperoleh oleh Merkin (1976) dan

JADUAL 1. Perbandingan nilai  $-\theta'(0)$  bagi nilai  $Pr=1$  (kes SPM)

$x$	Merkin (1976)	$-\theta'(0)$ Nazar et al. (2002a)	Nilai kini
0	0.4214	0.4214	0.4214
$\pi/6$	0.4161	0.4161	0.4162
$\pi/3$	0.4007	0.4005	0.4006
$\pi/2$	0.3745	0.3741	0.3744
$2\pi/6$	0.3364	0.3355	0.3360
$5\pi/6$	0.2825	0.2811	0.2817
$\pi$	0.1945	0.1916	0.1939

JADUAL 2. Perbandingan nilai  $\theta(0)$  bagi nilai  $Pr=1$  (kes FHM)

$x$	Merkin dan Pop (1980)	$\theta(0)$ Nazar et al. (2002b)	Nilai kini
0.0	1.996	1.996	1.9967
0.4	2.005	2.004	2.0038
0.8	2.026	2.026	2.0254
1.2	2.064	2.065	2.0632
1.6	2.120	2.123	2.1203
2.0	2.202	2.262	2.2027
2.4	2.322	2.329	2.3226
2.6	2.403	2.413	2.4048
3.0	2.660	2.681	2.6633
$\pi$	2.824	2.848	2.8286

Nazar et al. (2002a) bagi kes SPM dan Merkin dan Pop (1988) dan Nazar et al. (2002b) bagi kes FHM. Merkin (1976) dan Merkin dan Pop (1988) menyelesaikan masalah ini dengan menggunakan kaedah pengembangan siri Gortler dan Blasius, seiring dengan kaedah kamiran dan skim beza terhingga. Keputusan ini menunjukkan perbandingan yang amat baik dan penulis berpendapat bahawa kaedah kotak Keller ini amat sesuai digunakan bagi menyelesaikan masalah lain, terutamanya masalah dengan pemanasan Newtonan yang dipertimbangkan dalam kajian ini.

Jadual 3 menunjukkan nilai bagi  $f''(0)$  dan  $\theta(0)$  pada titik genangan bawah silinder,  $x \approx 0$ , dengan nilai  $Pr$  berbeza, iaitu  $Pr = 0.5, 1, 2, 3, 7$ , dan  $10$  bagi masalah dengan pemanasan Newtonan. Jadual 3 menunjukkan apabila  $Pr$  semakin meningkat, kedua-dua nilai  $f''(0)$  dan  $\theta(0)$  semakin menyusut.

JADUAL 3. Nilai  $f''(0)$  dan  $\theta(0)$  bagi nilai  $Pr$  berbeza di titik genangan bawah silinder,  $x \approx 0$  (kes PN)

$Pr$	$f''(0)$	$\theta(0)$
0.5	26.7182	92.1980
1	11.8646	35.4701
2	5.7903	15.7803
3	3.9856	10.5357
7	2.0174	5.2797
10	1.5711	4.2031

Didapati bahawa apabila nilai  $Pr$  meningkat, nilai pekali pemindahan haba  $-\theta'(0)$  bagi ke SPM juga meningkat manakala suhu dinding  $\theta(0)$  menurun bagi kes FHM. Sebaliknya bagi kes PN, peningkatan dalam  $Pr$  menyebabkan kedua-dua nilai  $-\theta'(0)$  dan  $\theta(0)$  menurun. Ini menunjukkan yang keputusan bagi kes PN agak menyerupai kes FHM tetapi berbeza dengan kes SPM.

Nilai bagi pekali geseran kulit setempat,  $C_f$  dan suhu dinding silinder,  $\theta_w(x)$  terhadap  $x$  masing-masing ditunjukkan dalam Jadual 4 dan 5. Berdasarkan Jadual 4 dan 5, didapati bahawa semakin meningkat nilai  $Pr$ , kedua-dua nilai  $C_f$  dan  $\theta_w(x)$  semakin menyusut. Perhatikan, nilai suhu dinding silinder,  $\theta_w(x)$  adalah rendah pada titik genangan bawah silinder,  $x \approx 0$  berbanding pada titik genangan atas,  $x \approx \pi$ . Ini adalah kerana, pada  $x \approx 0$  suhu silinder hampir sama dengan suhu bendalir, manakala, pada  $x \approx \pi$  terdapat perbezaan suhu yang ketara antara silinder dan bendalir. Perhatikan juga, nilai pekali geseran kulit setempat,  $C_f$  pada titik genangan bawah silinder,  $x \approx 0$  adalah sifar. Ini kerana tegasan ricih permukaan pada titik ini amat kecil sehingga boleh diabaikan. Tetapi, apabila  $x \approx \frac{2\pi}{3}$  untuk semua nilai  $Pr$ , nilai  $C_f$  mencapai nilai maksimum disebabkan nilai tegasan ricih permukaan adalah tinggi. Pada titik ini, syarat tak gelincir berlaku pada zarah-zarah bendalir di permukaan silinder. Bagi nilai  $Pr = 3, 7$  dan  $10$ , apabila  $x \approx \pi$ , nilai  $C_f$  adalah rendah kerana

JADUAL 4. Nilai pekali geseran kulit setempat,  $C_f$  bagi nilai Pr berbeza (kes PN)

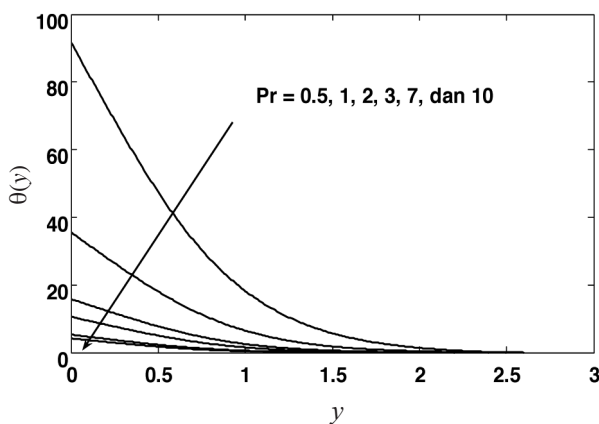
Pr $x$	0.5	1	2	3	7	10
0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.2	7.9868	3.8196	1.8120	1.2069	0.5539	0.4107
0.4	16.6524	7.8662	3.7180	2.4685	1.1274	0.8327
0.6	25.1724	11.8125	5.5706	3.6917	1.6752	1.2380
0.8	33.2341	15.5246	7.3081	4.8366	2.1902	1.6136
1.0	40.5905	18.8931	8.8795	5.8697	2.6472	1.9500
1.2	47.0239	21.8198	10.2387	6.7607	3.0402	2.2614
1.4	52.3377	24.2158	11.3437	7.4822	3.3892	2.5668
1.6	56.3528	25.9997	12.1885	8.0643	3.7414	2.7653
1.8		27.1247	12.8021	8.5068	3.9306	2.8905
2.0		27.8233	13.0828	8.7040	3.9829	2.9262
2.2			12.9547	8.6119	3.9028	2.8576
2.4			12.3722	8.2068	3.6700	2.6697
2.6			11.2754	7.4438	3.2730	2.3716
2.8				6.2848	2.7040	1.9430
3.0				4.6538	1.9105	1.3297
$\pi$				3.0327	1.1238	0.8935

JADUAL 5. Nilai suhu dinding silinder,  $\theta_w(x)$  bagi nilai Pr berbeza (kes PN)

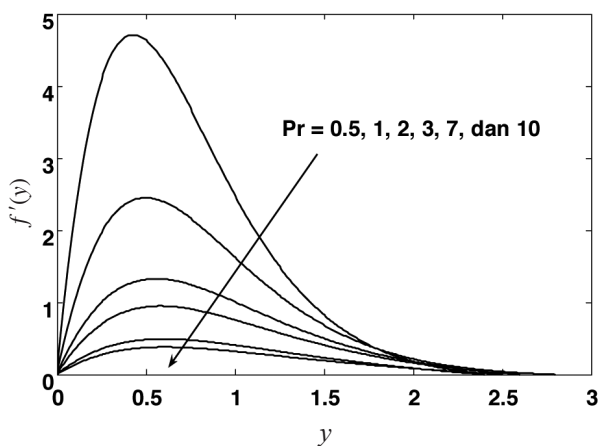
Pr $x$	0.5	1	2	3	7	10
0.0	92.1980	35.4701	15.7803	10.5357	5.2797	4.2031
0.2	159.4341	66.7307	28.6953	18.5161	8.5126	6.4054
0.4	170.5716	70.3188	30.0835	19.3250	8.7665	6.5759
0.6	177.2429	72.5069	30.9394	19.8302	8.9426	6.7057
0.8	182.5088	74.2966	31.6574	20.2625	9.0962	6.8247
1.0	187.3062	75.9937	32.3556	20.6914	9.2658	6.9464
1.2	192.0712	77.7426	33.0914	21.1513	9.4583	7.0751
1.4	197.0742	79.6376	33.9043	21.6661	9.6695	7.1621
1.6	202.5302	81.7605	34.8158	22.2339	9.8346	7.2756
1.8		84.1810	35.7973	22.8211	10.0280	7.1183
2.0		86.6247	36.8822	23.4726	10.2800	7.6010
2.2			38.1580	24.2536	10.6076	7.8399
2.4			39.7388	25.2398	11.0214	8.1420
2.6			41.6979	26.4616	11.5603	8.5456
2.8				28.1462	12.3238	9.1302
3.0				30.9209	13.6268	10.1572
$\pi$				34.4438	15.4970	11.1974

pada keadaan ini, zarah-zarah bendalir mencapai aliran gelora. Daripada pengiraan berangka juga masing-masing menunjukkan bahawa titik pemisahan lapisan sempadan berlaku pada titik  $x_p = 2.1350$  bagi  $Pr = 1$  dan  $x_p = 2.6050$  bagi  $Pr = 2$ . Fakta bagi kes PN ini sama sekali berlawanan dengan kes SPM dan FHM yang menyatakan bahawa tiada titik pemisahan berlaku sehingga  $x \approx \pi$  bagi semua nilai  $Pr$ .

Rajah 2 dan 3 masing-masing menggambarkan profil suhu dan halaju bagi beberapa nilai  $Pr = 1, 2, 3, 7$ , dan  $10$  pada titik genangan bawah silinder,  $x \approx 0$ . Berdasarkan Rajah 2, didapati bahawa apabila nombor Prandtl  $Pr$  semakin meningkat, profil suhu semakin menyusut dan juga ketebalan lapisan sempadan terma turut menyusut. Ini kerana apabila  $Pr$  meningkat, resapan terma menyusut menyebabkan kebolehpayaan pemindahan tenaga berkurang dan seterusnya menyebabkan suhu berkurangan. Bagi  $Pr$  besar ( $Pr \gg 1$ ) bendalir mempunyai kekonduksian terma yang kecil, maka lapisan sempadan halaju lebih tebal daripada lapisan sempadan terma. Berdasarkan Rajah 3 pula, apabila nilai  $Pr$  meningkat didapati bahawa ketebalan lapisan sempadan halaju semakin menyusut. Ini kerana apabila  $Pr$  meningkat, kelikatan juga meningkat dan ini memperlahankan halaju aliran. Secara amnya, jika  $Pr$  kecil



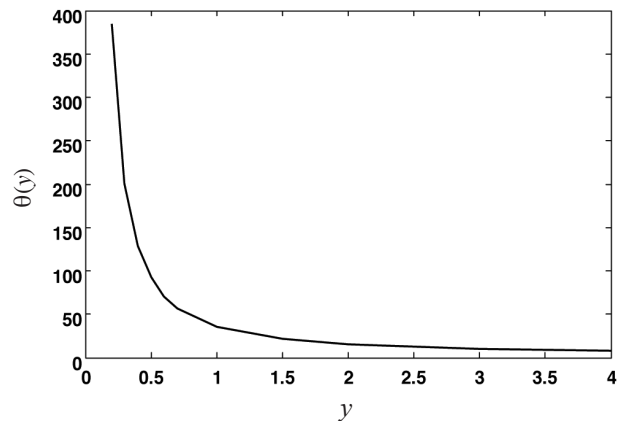
RAJAH 2. Profil suhu,  $\theta(y)$  bagi beberapa nilai  $Pr$  (kes PN)



RAJAH 3. Profil halaju,  $f'(y)$  bagi beberapa nilai  $Pr$  (kes PN)

( $Pr \ll 1$ ) bendalir mempunyai kekonduksian terma yang tinggi, maka ketebalan lapisan sempadan halaju kurang daripada ketebalan lapisan sempadan terma.

Rajah 4 menggambarkan variasi suhu dinding,  $\theta(x, 0)$  terhadap beberapa nilai  $Pr$  dan kedudukan garis bagi nilai kritikal  $Pr$ ,  $Pr_k \approx 0.0769$ , yang memberikan penyelesaian menjadi tak terbatas. Rajah tersebut menunjukkan bahawa nilai  $\theta(x, 0)$  semakin bertambah besar apabila nilai  $Pr$  menghampiri nilai  $Pr_k \approx 0.0769$  dan juga menunjukkan nilai  $\theta(x, 0) < 0$  apabila  $Pr < Pr_k$ .



RAJAH 4. Variasi suhu dinding  $\theta(x, 0)$  terhadap  $Pr$

## KESIMPULAN

Dalam kajian ini, masalah aliran lapisan sempadan olakan bebas mantap terhadap silinder bulat mengufuk yang dijanakan oleh pemanasan Newtonian telah dikaji. Secara amnya bagi kes suhu permukaan malar (SPM), semakin meningkat nilai  $Pr$  didapati nilai suhu semakin meningkat, sedangkan bagi kes fluks haba permukaan malar (FHM) semakin meningkat nilai  $Pr$  didapati nilai suhu semakin menyusut.

Bagi kes pemanasan Newtonian (PN), kesimpulan yang boleh dibuat adalah semakin meningkat  $Pr$  didapati:

1. kesemua nilai  $C_f$ ,  $\theta_w(x)$ ,  $f''(0)$  dan  $\theta(0)$  menyusut.
2. di titik genangan bawah silinder,  $x \approx 0$ , kedua-dua profil suhu dan halaju semakin menyusut.

## PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan terhadap bantuan kewangan daripada UKM (geran universiti penyelidikan UKM-GUP-BTT-07-25-174) dan UMP (geran penyelidikan RDU 090308).

## RUJUKAN

- Cebeci, T. & Bradshaw, P. 1988. *Physical and Computational Aspects of Convective Heat Transfer*. New York: Springer.
- Chaudhary, R.C. & Preeti Jain. 2006. Unsteady free convection boundary-layer flow past an impulsively started vertical surface with Newtonian heating. *Romanian Journal of Physics* 51: 911-925.

- Chaudhary, R.C. & Preeti Jain. 2007. An exact solution to unsteady free convection boundary-layer flow past an impulsively started vertical surface with Newtonian heating. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 80(5): 954-960.
- Fand, R.M., Steinberger, T.E. & Cheng, P. 1986. Natural convection heat transfer from a horizontal cylinder embedded in a porous medium. *International Journal of Heat Mass Transfer* 29(1): 119-133.
- Huang, M.J. & Chen, C.K. 1983. Laminar free convection over a horizontal circular cylinder with blowing and suction. *Chinese Institute of Engineers* 6(4): 209-217.
- Ingham, D.B. 1978. Free convection boundary layer on an isothermal horizontal cylinder. *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)* 29: 871-883.
- Ishak, A., Nazar, R. & Pop, I. 2008a. Local similarity solutions for laminar boundary layer flow along a moving cylinder in a parallel stream. In *Lecture Notes in Computer Science (LNCS/LNAI)*, D. Kapur (ed.) 5081: 224-235.
- Ishak, A., Nazar, R. & Pop, I. 2008b. Post-stagnation-point boundary layer flow and mixed convection heat transfer over a vertical, linearly stretching sheet. *Archives of Mechanics* 60(4): 283-302.
- Kumari, M. & Nath, G. 1989. Unsteady mixed convection with double diffusion over a horizontal cylinder and a sphere within a porous medium. *Wärme- und Stoff übertragung* 24: 103-109.
- Lesnic, D., Ingham, D.B. & Pop, I. 1999. Free convection boundary layer flow along a vertical surface in a porous medium with Newtonian heating. *International Journal of Heat Mass Transfer* 42: 2621-2627.
- Lesnic, D., Ingham, D.B. & Pop, I. 2000. Free convection from a horizontal surface in a porous medium with Newtonian heating. *Journal of Porous Media* 3(3): 227-235.
- Lesnic, D., Ingham, D.B., Pop, I. & Storr, C. 2004. Free convection boundary-layer flow above a nearly horizontal surface in a porous medium with Newtonian heating. *Heat and Mass Transfer* 40: 665-672.
- Merkin, J.H. 1976. Free convection boundary layer on an isothermal horizontal cylinder. *ASME/AIChE Heat Transfer Conference*. August 9-11. St. Louis, USA.
- Merkin, J.H. & Pop, I. 1988. A note on the free convection boundary layer on a horizontal cylinder with constant heat flux. *Wärme- und Stoff übertragung* 22: 79-81.
- Merkin, J.H. 1994. Natural convection boundary-layer flow on a vertical surface with Newtonian heating. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 15(5): 392-398.
- Molla, M.M., Hossain, M.A. & Gorla, R.S.R. 2005. Natural convection flow from an isothermal horizontal circular cylinder with temperature dependent viscosity. *Heat and Mass Transfer* 41: 594-598.
- Na, T.Y. 1979. *Computational Methods in Engineering Boundary Value Problem*. New York: Academic Press.
- Nazar, R., Amin, N. & Pop, I. 2002a. Free convection boundary layer on an isothermal horizontal circular cylinder in a micropolar fluid. *Proceedings of Twelfth International Heat Transfer Conference*, 18-23 August 2002. Paris: Elsevier. 2: 525-530.
- Nazar, R., Amin, N. & Pop, I. 2002b. Free convection boundary layer on horizontal circular cylinder with constant heat flux in a micropolar fluid. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering* 7: 409-431.
- Pop, I., Lesnic, D. & Ingham, D.B. 2000. Asymptotic solutions for the free convection boundary-layer flow along a vertical surface in a porous medium with Newtonian heating. *Hybrid Methods in Engineering* 2: 31-40.
- Salleh, M.Z., Ahmad, S., & Nazar, R. 2008. Numerical solutions of the forced convection boundary layer flow at a forward stagnation point. *European Journal of Scientific Research* 19(4): 644-653.
- Salleh, M.Z., Nazar, R. & Pop, I. 2009. Forced convection boundary layer flow at a forward stagnation point with Newtonian heating. *Chemical Engineering Communications* 196: 987-996.
- Yih, K.A. 2000. Effect of blowing/suction on MHD-natural convection over a horizontal cylinder: UWT or UHF. *Acta Mechanica* 144: 17-27.

Mohd Zuki Salleh  
Fakulti Sains dan Teknologi Industri  
Universiti Malaysia Pahang  
Lebuhraya Tun Abdul Razak  
26300 UMP Kuantan  
Pahang, Malaysia

Roslinda Nazar\*  
Pusat Pengajian Sains Matematik  
Fakulti Sains dan Teknologi  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 UKM Bangi  
Selangor, Malaysia

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: rmn@ukm.my

Diserahkan: 13 Ogos 2009  
Diterima: 26 Oktober 2009