

Analisis Pengaruh Aliran Turbulen Terhadap Karakteristik Lapisan Batas pada Pelat Datar Panas

Umar Faruk dan Kamiran

Matematika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: kamiran@matematika.its.ac.id

Abstrak—Penelitian mengenai aliran di sekitar pelat datar terus dilakukan sampai sekarang. Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar efek negatif aliran terhadap suatu benda. Namun, pada kehidupan sehari-hari seringkali ditemukan adanya pelat panas yang diberi aliran fluida sehingga perlu adanya analisis tentang pengaruh panas tersebut terhadap karakteristik lapisan batas yang terbentuk. Dalam penelitian ini, persamaan lapisan batas dilakukan analisis secara numerik dengan menggunakan metode beda hingga besar pengaruh perpindahan panas terhadap karakteristik lapisan batas akibat aliran turbulen. Kemudian persamaan diskritisasi numerik disimulasikan dengan menggunakan program Matlab 7.8 dan konstanta-konstanta, yaitu $g = 9,82 \text{ m/s}^2$, $L = 25$, $Pr = 9,4$, dan $v = 0,0013 \text{ m}^2/\text{s}$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kecepatan air dalam lapisan batas mengalami fluktuasi yang diakibatkan oleh terjadinya turbulensi. Namun, temperatur air dalam lapisan batas mengalami penurunan.

Kata Kunci—Aliran turbulen, Karakteristik lapisan batas, Perpindahan panas.

I. PENDAHULUAN

PERKEMBANGAN ilmu mekanika fluida dari waktu ke waktu semakin pesat. Di tengah perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, studi tentang modifikasi lapisan batas adalah salah satu studi yang sangat bermanfaat untuk dikembangkan. Penelitian tentang modifikasi lapisan batas diarahkan untuk dapat mengurangi efek negatif yang ditimbulkan oleh aliran fluida yang melewati permukaan $\{em \text{ body}\}$ pada suatu peralatan guna mengoptimalkan kinerjanya, dan beberapa penerapannya antara lain pada pesawat terbang, kereta api, kereta listrik, kapal selam, kapal laut, mobil, dan sebagainya [1].

Akibat sifat kental dari fluida, timbul gaya kental/viskos di sekitar daerah dekat permukaan pelat. Daerah aliran dekat permukaan pelat yang masih dipengaruhi oleh gaya viskositas disebut daerah lapisan batas. Semakin jauh dari permukaan pelat (arah sumbu-y) semakin kecil pengaruh gaya viskos sehingga kecepatan alir menjadi semakin besar. Dan makin jauh dari tepi depan pelat (arah sumbu-x) semakin besar pengaruh gaya viskos sehingga daerah lapisan batas akan menjadi lebih lebar [2].

Pada lapisan batas terdapat tiga daerah aliran. Pada permukaan terbentuk lapisan batas laminar tetapi pada jarak tertentu dari tepi depan mulai terjadi proses transisi hingga

aliran menjadi turbulen. Perubahan daerah lapisan batas ini tidak lepas dari pengaruh gaya viskos. Semakin besar gaya viskos makin besar gangguan-gangguan pada aliran fluida sehingga arah kecepatan tidak lagi searah tetapi menjadi acak ke sebarang arah. Profil kecepatan laminar mendekati bentuk parabola sedangkan profil turbulen pada bagian dekat permukaan hampir mendekati garis lurus [2].

Terjadinya lapisan batas seperti yang dijelaskan di atas tidak memperhatikan adanya perpindahan panas, sedangkan dalam kehidupan sehari-hari sering ditemukan adanya pelat panas yang dialiri oleh fluida. Sehingga penting untuk dilakukan penelitian tentang hal tersebut. Namun, dalam penelitian ini hanya dilakukan analisis secara numerik besar pengaruh perpindahan panas yang terjadi terhadap profil kecepatan dan distribusi panas lapisan batas akibat aliran turbulen pada pelat datar.

II. DASAR TEORI

A. Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya, dengan menggunakan media penghantar berupa fluida (baik cairan maupun gas) karena perbedaan suhu di antara keduanya (benda-fluida). Dalam kehidupan sehari-hari, terdapat dua macam konveksi, yaitu:

Konveksi Alami

Perpindahan panas konveksi alami adalah perpindahan panas yang disebabkan oleh beda suhu dan beda rapat saja dan tidak ada tenaga dari luar yang mendorongnya. Konveksi alamiah dapat terjadi karena ada arus yang mengalir akibat gaya apung, sedangkan gaya apung terjadi karena ada perbedaan densitas fluida tanpa dipengaruhi gaya dari luar sistem. Perbedaan densitas fluida terjadi karena adanya gradien suhu pada fluida. Contoh konveksi alamiah antara lain aliran fluida yang melintasi radiator panas.

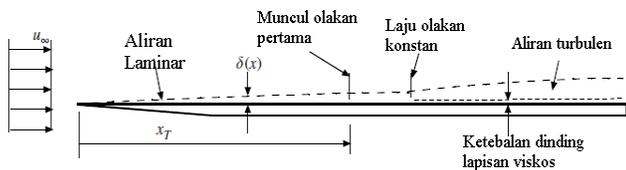
Konveksi Paksa

Konveksi paksa adalah perpindahan panas aliran gas atau cairan yang disebabkan adanya tenaga dari luar. Konveksi paksa dapat pula terjadi karena arus fluida yang terjadi digerakkan oleh suatu peralatan mekanik (contoh : pompa, pengaduk), jadi arus fluida tidak hanya tergantung pada perbedaan densitas. Contoh perpindahan panas secara

konveksi paksa adalah pelat panas dihembus udara dengan kipas/blower [3].

B. Lapisan Batas

Lapisan batas adalah lapisan tipis pada *solid surface* yang terbatas pada daerah yang sangat sempit dekat dengan permukaan kontur dimana kecepatan fluida tidak *uniform* sebagai pengaruh dari gaya viskos yang muncul akibat adanya viskositas. Gambar 1 memperlihatkan suatu fluida itu mengalir dengan distribusi kecepatan yang sama atau *uniform* u_∞ dimana ketika melewati suatu *solid surface* aliran tersebut mengalami distribusi kecepatan yang berbeda yang dipengaruhi oleh adanya permukaan padat. Distribusi kecepatan ini dimulai dari titik di permukaan padat tersebut, dimana aliran fluida tersebut mempunyai kecepatan nol kemudian semakin besar ketika menjauhi permukaan dari bodi tersebut. Pengaruh tegangan geser akan hilang pada posisi tertentu dan kecepatan fluida mencapai nilai kecepatan fluida *nonviscous* ($u = 0,99u_\infty$) dan posisi tersebut merupakan batas daerah *viscous* (lapisan batas) dengan bagian *nonviscous*. Jarak yang diukur dari permukaan padat arah normal hingga posisi tersebut disebut dengan tebal lapisan batas.



Gambar. 1. Struktur Lapisan Batas.

C. Aliran Laminar dan Turbulen

Aliran laminar dan turbulen ini dibedakan berdasarkan pada karakteristik internal aliran. Umumnya klasifikasi ini bergantung pada gangguan-gangguan yang dapat dialami oleh suatu aliran yang mempengaruhi gerak dari partikel-partikel fluida tersebut. Apabila aliran mempunyai kecepatan relatif rendah atau fluidanya sangat *viscous*, gangguan yang mungkin dialami oleh medan aliran akibat getaran, ketidakteraturan permukaan batas dan sebagainya, relatif lebih cepat teredam oleh viskositas fluida tersebut dan aliran fluida tersebut disebut aliran laminar. Fluida dapat dianggap bergerak dalam bentuk lapisan-lapisan dengan pertukaran molekuler yang hanya terjadi diantara lapisan-lapisan yang berbatasan untuk kondisi tersebut. Gangguan yang timbul semakin besar hingga tercapai kondisi peralihan pada kecepatan aliran yang bertambah besar atau efek viskositas yang berkurang. Terlampauinya kondisi peralihan menyebabkan sebagian gangguan tersebut menjadi semakin kuat, dimana partikel bergerak secara fluktuasi atau acak dan terjadi percampuran gerak partikel antara lapisan-lapisan yang berbatasan. kondisi aliran yang demikian disebut dengan aliran turbulen.

Perbedaan yang mendasar antara aliran laminar dan turbulen adalah bahwa gerak olakan / acak pada aliran turbulen jauh lebih efektif dalam pengangkutan massa serta momentum fluidanya daripada gerak molekulernya. Tidak ada hubungan yang bisa dipastikan secara teoritis antara medan tekanan dan kecepatan rata-rata pada aliran turbulen sehingga pada analisa aliran turbulen dilakukan dengan pendekatan setengah empiris. Kondisi

aliran yang laminar dan turbulen ini dapat dinyatakan dengan bilangan Rayleigh [1].

Tebal lapisan batas terdiri atas lapisan batas kecepatan dan lapisan batas termal. Tebal lapisan batas kecepatan (δ) adalah jarak yang diukur dari permukaan benda sampai suatu titik dimana efek viskositas sudah tidak berpengaruh lagi. Tebal lapisan batas termal (δ_T) adalah jarak yang diukur dari permukaan benda sampai suatu titik dimana efek perpindahan panas sudah tidak berpengaruh. Ketebalan lapisan batas termal diukur dengan menggunakan persamaan berikut [4].

$$\delta_T = L \cdot 3,93 \text{Pr}^{-1/2} (0,952 + \text{Pr})^{1/4} \text{Gr}^{-1/4}$$

D. Persamaan Lapisan Batas

Persamaan lapisan batas pada fluida (air) yang melewati pelat datar merupakan aliran yang inkompresibel. Pada keadaan tak-tunak *unsteady* persamaan lapisan batas adalah sebagai berikut:

Persamaan kontinuitas berdimensi

$$\frac{\partial}{\partial x^*} (\bar{\rho}^* \bar{u}^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (\bar{\rho}^* \bar{v}^*) = 0$$

Persamaan momentum arah sumbu-x berdimensi

$$\bar{u}^* \frac{\partial \bar{u}^*}{\partial x^*} + \bar{v}^* \frac{\partial \bar{u}^*}{\partial y^*} = \nu \frac{\partial^2 \bar{u}^*}{\partial y^{*2}}$$

Persamaan energi berdimensi

$$\bar{u}^* \frac{\partial \bar{T}^*}{\partial x^*} + \bar{v}^* \frac{\partial \bar{T}^*}{\partial y^*} = \frac{\bar{k}}{\rho^* c_p} \frac{\partial^2 \bar{T}^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\nu}{c_p} \frac{\partial^2 \bar{u}^*}{\partial y^{*2}}$$

D. Bilangan Grashof dan Bilangan Rayleigh

Bilangan Grashof dituliskan sebagai

$$\text{Gr} = \frac{\beta \cdot g \cdot (T_w - T_\infty)}{\nu^2}$$

Sedangkan bilangan Rayleigh dirumuskan sebagai

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} = \frac{\beta \cdot g \cdot (T_w - T_\infty) L^3 \text{Pr}}{\nu^2}$$

Sedangkan bilangan Prandtl adalah perbandingan antara viskositas kinematik dengan difusivitas panas. Bilangan ini dinyatakan dengan persamaan berikut

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{k}$$

dengan

$$c_p = 4,195$$

$$\mu = 1,31$$

$$k = 0,585$$

Sehingga didapat $\text{Pr} = 9,4$.

III. PENYELESAIAN NUMERIK

Untuk menyelesaikan persamaan lapisan batas, diperlukan variabel referensi untuk mengubah persamaan berdimensi menjadi persamaan tak berdimensi. Adapun variabel referensi tak berdimensi tersebut adalah sebagai berikut:

- $x = \frac{x^*}{LG}$; $\bar{T} = \frac{T^*}{T_w - T_\infty}$
- $y = \frac{y^*}{w}$; $G = \frac{g v^2 L}{\beta_{ref} (T_w - T_\infty) w^4}$
- $\bar{u} = \frac{u^* w^2}{v LG}$; $\beta_{ref} = \frac{1}{T_f}$
- $\bar{v} = \frac{v^* w}{v}$; $\beta^* = \frac{\beta}{\beta_{ref}}$
- $\rho = \frac{\rho^*}{\rho_\infty}$

Dengan mensubstitusikan variabel tersebut ke persamaan berdimensi didapatkan persamaan lapisan batas tak berdimensi sebagai berikut:

- Persamaan kontinuitas tak berdimensi

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

- Persamaan momentum tak berdimensi

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2}$$

- Persamaan energi tak berdimensi

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \frac{1}{\nu Pr} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} + \frac{v LG}{c_p w^2 (T_w - T_\infty)} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2}$$

Selanjutnya persamaan lapisan batas yang tak berdimensi tersebut dilakukan diskritisasi dengan metode beda hingga sehingga menghasilkan sebagai berikut:

- Diskritisasi persamaan kontinuitas

$$\bar{v}_{i,j} = \bar{v}_{i,j-1} + \left(\frac{\Delta y}{2 \Delta x} \right) (\bar{u}_{i,j} - \bar{u}_{i-1,j} - \bar{u}_{i,j-1} + \bar{u}_{i-1,j-1})$$

- Diskritisasi persamaan momentum

$$\left(\frac{\bar{v}_{i,j}}{2 \Delta y} - \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) \bar{u}_{i,j-1} + \left(\frac{\bar{u}_{i,j}}{\Delta x} + \frac{2}{(\Delta y)^2} \right) \bar{u}_{i,j} + \left(\frac{\bar{v}_{i,j}}{2 \Delta y} - \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) \bar{u}_{i,j+1} = \left(\frac{\bar{u}_{i,j}}{\Delta x} \right) \bar{u}_{i-1,j}$$

- Diskritisasi persamaan energi

$$\left(-\frac{\bar{v}_{i,j}}{2 \Delta y} - \frac{1}{\nu Pr (\Delta y)^2} \right) \bar{T}_{i,j-1} + \left(\frac{\bar{u}_{i,j}}{\Delta x} + \frac{2}{\nu Pr (\Delta y)^2} \right) \bar{T}_{i,j} + \left(\frac{\bar{v}_{i,j}}{2 \Delta y} - \frac{1}{\nu Pr (\Delta y)^2} \right) \bar{T}_{i,j+1} = \left(\frac{\bar{u}_{i,j}}{\Delta x} \right) \bar{T}_{i-1,j} + \frac{v LG}{c_p w^2 (T_w - T_\infty)} \left(\frac{\bar{u}_{i,j+1} - 2 \bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} \right)$$

Syarat awal dan syarat batas dari model diperlukan dalam simulasi numerik pada Matlab. Pada Tugas Akhir ini, diasumsikan bahwa aliran air mempunyai syarat awal *steady state*, yaitu pada saat t=0. Syarat awal dan syarat batas pada penelitian ini adalah syarat Dirichlet yaitu sebagai berikut:

- $\bar{u}(x,0,t) = \bar{v}(x,0,t) = 0$
dan $\bar{T}(x,0,t) = T_w(x,t)$
- $\bar{u}(x,y,0) = \bar{v}(x,y,0) = 40$ dan $\bar{T}(x,y,0) = 0$

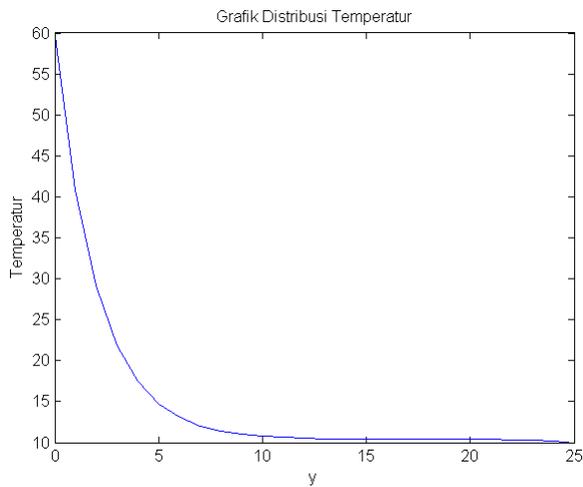
IV. SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Konstanta-konstanta yang digunakan dalam simulasi adalah sebagai berikut:

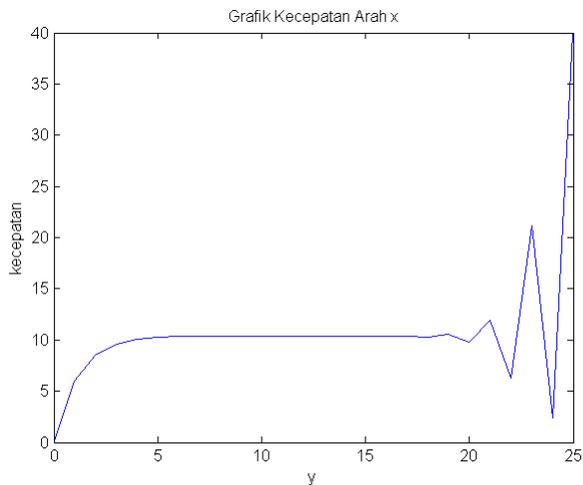
- $L = 25$
- $Pr = 9,4$
- $\nu = 0,0013$
- $n = 25$
- $w = 0,01$

Gambar 2 menunjukkan hasil simulasi untuk temperatur pelat 60 dan temperatur fluida pada daerah arus bebas 10 yang merupakan profil temperatur air. Temperatur air dalam lapisan batas semakin menurun dari 60 (pada permukaan pelat) menjadi 10 (pada lapisan batas). Hal ini terjadi karena pada lapisan batas tidak terjadi perpindahan panas, sehingga temperatur air dalam lapisan batas sama dengan temperatur arus bebas.

Gambar 3 menunjukkan profil kecepatan air hasil penelitian dengan temperatur pelat 60 dan temperatur air pada daerah arus bebas 10. Gambar tersebut menunjukkan bahwa kecepatan air (dalam lapisan batas) pada saat y=0 sampai dengan y=25. Pada saat menyentuh dinding pelat (y=0), kecepatan arah sumbu-x adalah 0 (u=0). Kemudian nilai u meningkat secara bertahap dimulai dari y=1 (u=6.0191) sampai dengan y=13 (u=10.3809). Karena pada aliran turbulen terjadi olakan yang besar sehingga kecepatan mengalami fluktuasi (naik-turun), yaitu pada y=14 sampai dengan y=24 dan berakhir dengan u=40 pada y=25 (kecepatan aliran bebas).

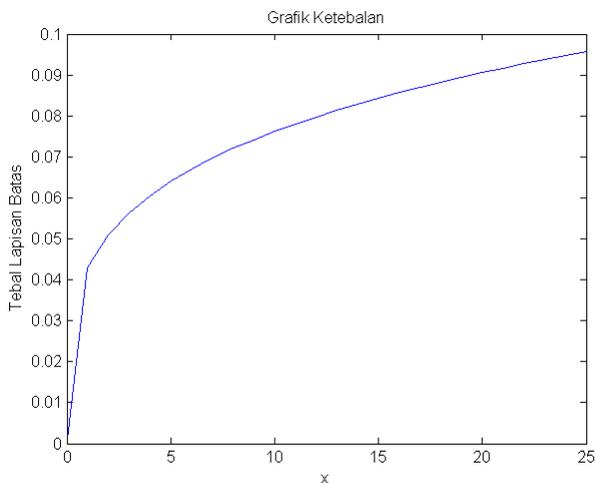


Gambar. 2. Profil Temperatur Lapisan Batas Hasil Penelitian.



Gambar 3: Profil Kecepatan Air Hasil Penelitian.

Gambar 4 menunjukkan bahwa tebal lapisan batas yang terus meningkat dari nol pada saat $x=0$ sampai dengan ketebalan yang mencapai 0.0958 pada $x=25$.



Gambar. 4. Profil Tebal Lapisan Batas Air Hasil Penelitian.

VI. PENUTUP

A. Kesimpulan

- Semakin jauh dari permukaan pelat (arah sumbu-y), temperatur dalam lapisan batas mengalami penurunan.
- Kecepatan yang cenderung meningkat dapat mengalami fluktuasi yang diakibatkan oleh adanya turbulensi.
- Semakin jauh dari ujung pelat, ketebalan lapisan batas bertambah besar.

B. Saran

- Untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan penelitian obyek benda yang lain misalnya bola, pipa, di antara dua pelat sejajar, dan lain sebagainya.
- Dapat dikembangkan penelitian untuk temperatur yang tidak konstan di sepanjang pelat agar lebih mendekati kondisi di lapangan.
- Dapat dikembangkan penelitian untuk aliran turbulen yang kompressibel.
- Untuk semua saran penelitian tersebut dapat diselesaikan dengan metode numerik yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pamungkas, D.C. (2009), *Studi Eksperimental Tentang Karakteristik Aliran Fluida Melintasi Silinder Teriris Tipe-I Didekat Pelat Datar Untuk Lapisan Batas Laminar dan Turbulen*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Tugas Akhir S1 Jurusan Teknik Mesin.
- [2] Rachmat, D.B. (1991), *Perpindahan Panas II*, Program DUE-Like Jurusan Fisika FMIPA-ITS, Surabaya.
- [3] Hartono, R. (2008), *Penukar Panas*, Modul, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- [4] Holman, J. (1995), *Perpindahan Kalor*, Edisi ke Enam. Diterjemahkan Oleh Ir. E. Jasjfi, M.Sc, Erlangga, Jakarta.