

Pengaruh Panas terhadap Aliran Konveksi Bebas yang Melalui Sebuah Bola Berpori

Mohamad tafrikan, Basuki Widodo², Chairul Imron³

^{1,2,3}Program Studi Pascasarjana Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

¹kan1213201051@gmail.com, ²b_widodo@matematika.its.ac.id, ³imron-its@matematika.its.ac.id

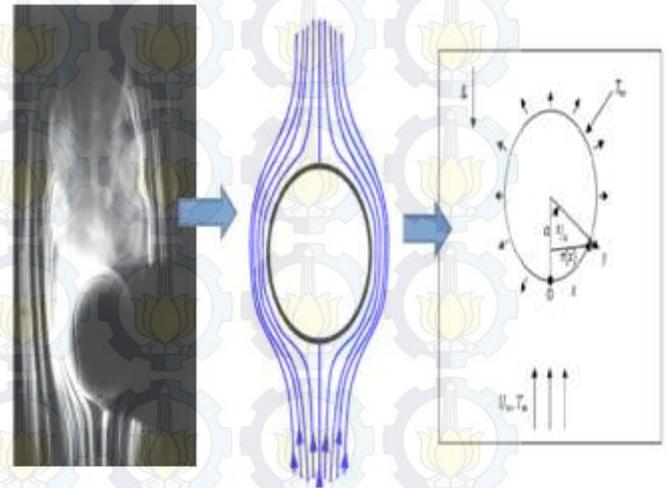
Abstrak — Permasalahan yang diamati dalam penelitian adalah pengaruh panas terhadap aliran konveksi bebas viskoelastik yang melalui bola berpori dengan penyelesaian secara numerik menggunakan metode beda hingga skema pusat. Pada aliran konveksi bebas dapat diuraikan persamaan kontinuitas, momentum, dan energi. Selanjutnya persamaan pembangun (*governing equation*) berdimensi yang terbentuk ditransformasi ke dalam persamaan non-dimensi dan ditransformasi lagi ke dalam bentuk persamaan non-similar. Berdasarkan hasil simulasi didapat pengaruh parameter viskoelastik (K), bilangan Prandtl (Pr) dan porositas (P) terhadap kecepatan aliran berbanding terbalik, sedangkan pengaruh parameter pembangkit panas atau *heat generation* (γ) berbanding lurus. Adapun pengaruh parameter viskoelastik (K) dan *heat generation* (γ) terhadap temperatur fluida berbanding lurus, sedangkan pengaruh bilangan Prandtl (Pr) dan porositas (P) terhadap temperatur fluida berbanding terbalik.

Kata Kunci — konveksi alir bebas, viskoelastik, bilangan prandtl, porositas, pembangkit panas, bola berpori.

I. PENDAHULUAN

Perpindahan panas secara konveksi merupakan perpindahan panas dari satu tempat ke tempat lain yang disebabkan oleh pergerakan fluida. Perpindahan panas tersebut dibagi menjadi dua yaitu konveksi bebas dan konveksi paksa. Kasim [5] menjelaskan konveksi bebas disebabkan oleh gaya apung (*buoyancy forces*) karena perbedaan temperatur pada fluida, sedangkan konveksi paksa terjadi ketika fluida dipaksa untuk mengalir di atas permukaan oleh sumber eksternal atau internal. Aliran konveksi bebas yang melewati permukaan sebuah bola berpori diilustrasikan pada Gambar 1.

Salah satu contoh dari kasus aliran konveksi bebas adalah proses pengambilan minyak bumi melalui pengeboran. Alat bor yang digunakan pada bagian ujungnya berbentuk lancip dengan ketahanan gesekan tertentu. Pada saat ujung bor mengenai minyak bumi, terjadilah gaya aliran ke atas yang menyebabkan aliran naik ke atas melewati permukaan ujung bor tersebut. Sehingga aliran tersebut dapat menyebabkan pembentukan kerak atau lapisan batas pada seluruh permukaan dari ujung alat bor.



Gambar 1. Model fisik aliran konveksi bebas yang melalui sebuah bola berpori

Oleh karena itu pada tesis ini, permasalahan yang diangkat adalah pengaruh panas aliran konveksi bebas fluida viskoelastik yang melewati permukaan sebuah bola berpori disekitar lapisan batas atau kerak. Penelitian tentang konveksi bebas atas sebuah bola telah banyak dilakukan karena banyak penerapannya dalam bidang teknik. Amin, dkk (2002) telah meneliti aliran konveksi campuran dari fluida viskos tak mampu-mampat (*incompressible*) yang melewati sebuah bola pejal dengan temperatur konstan dalam kondisi tunak (*steady*). Molla, dkk (2005) meneliti tentang aliran konveksi bebas magnet dinamis pada bola dengan pembangkitan panas menggunakan metode kotak Keller. Akhter dan Alim (2008) meneliti pengaruh radiasi pada aliran konveksi bebas yang melewati sebuah bola dengan fluks panas permukaan yang seragam. Kasim (2014) meneliti tentang aliran konveksi campuran dalam kondisi tunak (*steady*) dari fluida viskoelastik tak mampu-mampat (*incompressible*) yang melewati permukaan sebuah bola dengan penyelesaian numeric menggunakan metode kotak Keller.

Namun, permasalahan pengaruh panas pada aliran konveksi bebas dalam kondisi tunak (*steady*) dari fluida viskoelastik tak mampu-mampat (*incompressible*) belum banyak yang meneliti. Sehingga dalam penelitian ini, dianalisa pengaruh parameter viskoelastik (K), bilangan Prandtl (Pr), parameter *heat generation* (γ) dan parameter porositas (P)

terhadap kecepatan temperatur (f') dan profil temperatur (θ). Aliran fluida konveksi bebas yang mengalir pada suatu bola berpori membentuk suatu lapisan batas lingkaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dengan a merupakan jari – jari bola. Aliran lapisan batas konveksi bebas dalam kondisi tunak (*steady state*) merupakan model fisik dan sistem koordinat yang digunakan untuk mendapatkan solusi secara numerik dari suatu persamaan lapisan batas similar dengan menggunakan metode beda hingga skema pusat.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tipe Aliran Berdasarkan Kriteria Waktu

Menurut (Widodo, 2011), tipe aliran yang dicirikan berdasarkan perubahan waktu terhadap kecepatan dapat dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Aliran Tetap (*Steady Flow*)

Aliran tetap atau *steady flow*, yaitu aliran dimana kecepatan aliran tidak berubah terhadap waktu. Dalam kondisi ini, berlaku:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0$$

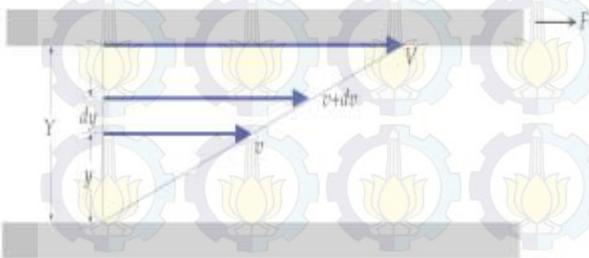
2. Aliran Tidak Tetap (*Unsteady State*)

Aliran tidak tetap atau *unsteady flow*, yaitu aliran dimana kecepatan aliran berubah menurut waktu. Dalam kondisi ini, berlaku:

$$\frac{\partial u}{\partial t} \neq 0$$

B. Viskositas

Viskositas dari suatu fluida merupakan besaran gesekan internal yang berlawanan arah dengan aliran fluida.



Sumber: www.foundationcoalition.org

Gambar 2 : Aliran fluida diantara dua pelat

Gambar 2 merupakan ilustrasi aliran fluida diantara dua pelat dengan luas A dan cukup besar sehingga pengaruh tepi diabaikan. Misalkan Y merupakan jarak dua pelat yang terisi dengan fluida. Pelat atas bergerak sejajar dengan pelat bawah dengan kecepatan v dan gaya F . Partikel fluida yang bersinggungan dengan pelat akan mengikutinya. Jika Y atau bahkan v tidak terlalu besar maka kecepatan fluida akan meningkat secara linear dengan jarak dari pelat tersebut. Gaya yang dihasilkan sebanding dengan luas pelat dan gradien kecepatan v/Y , secara matematika dapat dituliskan sebagai berikut.

$$F \propto A \frac{v}{Y} = \eta A \frac{v}{Y} \quad (1)$$

sedangkan tegangan geser (τ) dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\tau \equiv \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

dengan η merupakan viskositas dari fluida (Streeter, 1988).

C. Konveksi

Konveksi panas merupakan proses perpindahan energi dari permukaan ke fluida karena perbedaan temperatur antara permukaan dan fluida. Konveksi panas secara umum dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Konveksi bebas atau alamiah (*free convection*)

Konveksi bebas terjadi ketika sebuah benda ditempatkan dalam suatu fluida yang suhunya lebih tinggi atau lebih rendah daripada benda tersebut. Perbedaan suhu tersebut menyebabkan panas mengalir diantara fluida dan benda serta perubahan kerapatan (*density*) lapisan – lapisan fluida di dekat permukaan. Perbedaan kerapatan menyebabkan fluida yang lebih berat mengalir ke bawah dan fluida yang lebih ringan mengalir ke atas. Gerakan fluida tersebut hanya disebabkan oleh perbedaan kerapatan, diakibatkan oleh gradien suhu. Dalam hal ini, suhu yang lebih tinggi menyebabkan kerapatan semakin kecil, sehingga fluida akan mengalir ke atas yang disebabkan oleh gaya apung (*buoyancy force*). Sedangkan suhu yang lebih kecil menyebabkan kerapatan semakin besar, sehingga fluida akan mengalir ke bawah yang disebabkan oleh gaya tarik gravitasi. Koefisien perpindahan panas pada konveksi alamiah lebih kecil daripada konveksi paksa karena konveksi alamiah tidak disebabkan oleh gaya dari luar.

2. Konveksi paksa (*forced convection*)

Konveksi paksa (adveksi panas) merupakan pergerakan fluida yang disebabkan oleh gaya luar dan gaya apung diabaikan. Konveksi paksa biasanya digunakan untuk meningkatkan kecepatan perubahan panas. Contoh sederhana dari konveksi paksa seperti sistem kerja kipas angin yang mempercepat proses sirkulasi udara panas yang masuk kedalam makanan pada oven.

Perbandingan bilangan Grashof dan Reynolds (G_r/R_e^2) memberikan petunjuk kualitatif tentang pengaruh konveksi bebas maupun konveksi paksa. Dalam hal ini, jika perbandingan bilangan Grashof dan Reynolds mendekati 1 ($G_r/R_e^2 \cong 1$) maka pengaruh konveksi bebas dan konveksi paksa tidak dapat diabaikan.

D. Bilangan Non-Dimensi Grashof (G_r)

Bilangan Grashof merupakan perbandingan gaya apung terhadap gaya viskos dalam aliran fluida konveksi bebas atau alamiah. Secara matematik bilangan Grashof dinyatakan sebagai berikut.

$$G_r = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\mu} \quad (3)$$

dengan g adalah gaya gravitasi, β adalah koefisien muai panas, L adalah panjang karakteristik (tergantung bentuk media), μ adalah viskositas, T_s adalah temperatur permukaan benda, dan T_∞ adalah temperatur lingkungan (Kreith, 1994).

E. Bilangan Non-Dimensi Prandtl (P_r)

Bilangan Prandtl merupakan perbandingan antara viskositas kinematika terhadap difusivitas termal fluida. Viskositas kinematika (ν) atau (μ/ρ) disebut sebagai difusivitas molekular momentum karena merupakan ukuran kecepatan perpindahan momentum antara molekul – molekul. Difusivitas termal fluida (α) atau $(\rho k c_p)$ disebut sebagai difusivitas molekular panas karena berkaitan dengan ukuran perbandingan antara penerusan panas dan kapasitas penyimpanan energi molekul – molekul. Secara matematik bilangan Prandtl dinyatakan sebagai berikut.

$$P_r = \frac{\text{Viskositas Kinematika}}{\text{Difusivitas Termal}} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (4)$$

dengan μ adalah viskositas fluida, k adalah konduktivitas panas fluida, dan c_p adalah panas jenis pada tekanan konstan (Kreith, 1994)..

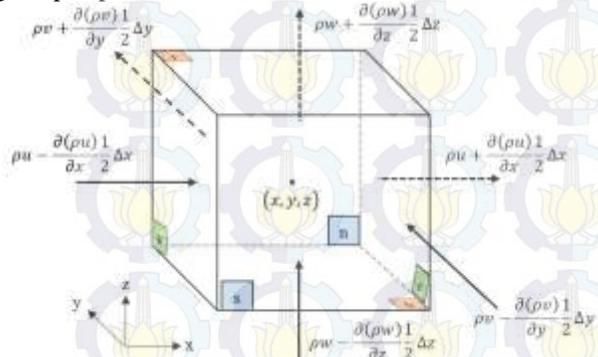
III. PEMBAHASAN

A. Pembangunan Model Matematika

Jika *control volume* digambarkan arah fluks massanya, maka dapat dituliskan persamaan sebagai berikut.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho V + \rho V A|_{out} - \rho V A|_{in} = 0 \quad (5)$$

dengan menggunakan Persamaan (5), massa pada permukaan yang dilalui fluida saat masuk (W) dan massa pada permukaan yang dilalui fluida saat keluar (E), yang berjarak $\frac{1}{2} \Delta x$ dari pusat elemen dinyatakan berturut-turut sebagai $\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \Delta x$ dan $\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \Delta x$. Dengan cara yang sama diperoleh suatu persamaan permukaan N, S, T dan B seperti yang tampak pada Gambar 3.



Gambar 3: Volume kendali pada aliran yang melalui bola berpori beserta fluks massanya.

Berdasarkan Persamaan (5), maka diperoleh suatu persamaan berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \Delta x \Delta y \Delta z + \rho(u_e - u_w) \Delta y \Delta z + \rho(v_n - v_s) \Delta x \Delta z + \rho(w_b - w_t) \Delta x \Delta y = 0 \quad (6)$$

dengan membagi Persamaan (6) oleh $\Delta x \Delta y \Delta z$, maka didapat :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\rho(u_e - u_w)}{\Delta x} + \frac{\rho(v_n - v_s)}{\Delta y} + \frac{\rho(w_b - w_t)}{\Delta z} = 0 \quad (7)$$

untuk $\Delta x \rightarrow 0, \Delta y \rightarrow 0, \Delta z \rightarrow 0$, dan ρ tak-mampu mampat (*incompressible*), maka diperoleh:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

karena dalam penelitian ini hanya pada arah lateral dan vertical yang dikaji, maka Persamaan (8) dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

atau dapat dinyatakan dalam bentuk notasi vektor sebagai berikut:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (10)$$

Karena dalam penelitian ini, media aliran berupa sebuah bola, maka Persamaan (10) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} (\bar{r} \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} (\bar{r} \bar{v}) = 0 \quad (11)$$

Kemudian, persamaan momentum berdimensi didapat sebagai berikut :

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} = \bar{v} \left[\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} \right] - \frac{k_0}{\rho} \left[\bar{u} \left(\frac{\partial^3 \bar{u}}{\partial \bar{x}^3 \bar{y}^2} \right) + \bar{v} \frac{\partial^3 \bar{u}}{\partial \bar{y}^3} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y} \partial \bar{x}} \right) + \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} \right) \right] + g\beta(\bar{T} - \bar{T}_\infty) \sin \left(\frac{\bar{x}}{a} \right) - \frac{\nu}{K^*} \bar{u} \quad (12)$$

Selanjutnya, didapat persamaan energi:

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} = \alpha \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} + Q_0(\bar{T} - \bar{T}_\infty) \quad (13)$$

Dengan kondisi batas:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} = \bar{v} = 0, \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} = -\frac{q_w}{k}, \quad \text{untuk } \bar{y} = 0 \\ \bar{u} = 0, \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} = 0, \quad \bar{T} = \bar{T}_\infty, \quad \text{untuk } \bar{y} \rightarrow \infty \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Persamaan (11) sampai (14) kemudian ditransformasikan ke dalam persamaan non-dimensi. Dengan variable non-dimensi sebagai berikut :

$$\left. \begin{aligned} \bar{v} &= \nu v a^{-1} Gr^{\frac{1}{4}} \\ \bar{u} &= \nu u a^{-1} Gr^{\frac{1}{2}} \\ \bar{x} &= ax \\ \bar{y} &= ay Gr^{\frac{1}{4}} \\ (\bar{T} - \bar{T}_\infty) &= \frac{\theta T_w a}{k} \\ \bar{r} &= ar \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (15) ke Persamaan (11) sampai (14), didapat persamaan kontinuitas sebagai berikut:

$$\frac{\partial(ru)}{\partial x} + \frac{\partial(rv)}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

dan persamaan momentum non-dimensi sebagai berikut:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \theta \sin x - K \left[u \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2} + v \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - Pu \quad (17)$$

dengan $P = \left(\frac{k}{g\beta T_w} \right)^{1/2} \frac{\nu}{K^*}$ merupakan parameter porositas.

Selanjutnya didapat persamaan energy non-dimensi sebagai berikut:

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \gamma \theta \quad (18)$$

dengan $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ dan $\gamma = \frac{a^2 Q_0}{\nu \rho c_p Gr^2}$ berturut-turut bilangan Prandtl dan parameter *heat generation*.

Selanjutnya mentransformasi persamaan non-dimensi ke dalam bentuk persamaan similar menggunakan *stream function* (Kasim, 2014), sehingga didapat persamaan momentum dan energi dalam bentuk similar sebagai berikut:

$$f'^2 - 2ff'' = f''' + \theta - K \left[2f'f''' - 2ff'''' - f''^2 \right] - Pf' \quad (19)$$

dan

$$-2f\theta' = \frac{1}{Pr}\theta'' + \gamma\theta \quad (20)$$

dengan $\frac{\partial f}{\partial y} = f'$, $\frac{\partial \theta}{\partial y} = \theta'$.

B. Proses Diskritisasi

Pada tahap ini menyelesaikan Persamaan (19) dan (20) dengan mendiskritisasi menggunakan metode beda hingga skema pusat. Selanjutnya dengan memisalkan: $t_1 = \frac{DK}{2}$, $t_2 = \frac{B-8DK}{4}$, $t_3 = 12DK - 2B$, $t_4 = 4B - 16DK$, dan $t_5 = \frac{2C+AP}{2}$, maka Persamaan (19) dapat ditulis menjadi:

$$\begin{aligned} t_1 f_{i+2} f_{i+1} - 4t_1 f_i f_{i+2} - t_1 f_{i+2} f_{i-1} + t_2 f_{i+1}^2 + t_3 f_i f_{i+1} - \\ \left(\frac{B}{2}\right) f_{i-1} f_{i+1} - t_1 f_{i-2} f_{i+1} + t_4 f_i^2 + t_3 f_i f_{i-1} - 4t_1 f_i f_{i-2} + \\ t_2 f_{i-1}^2 + t_1 f_{i-2} f_{i-1} + t_5 f_{i+1} - t_5 f_{i-1} + \left(\frac{C}{2}\right) f_{i-2} - \theta_i = \\ 0 \end{aligned} \quad (21)$$

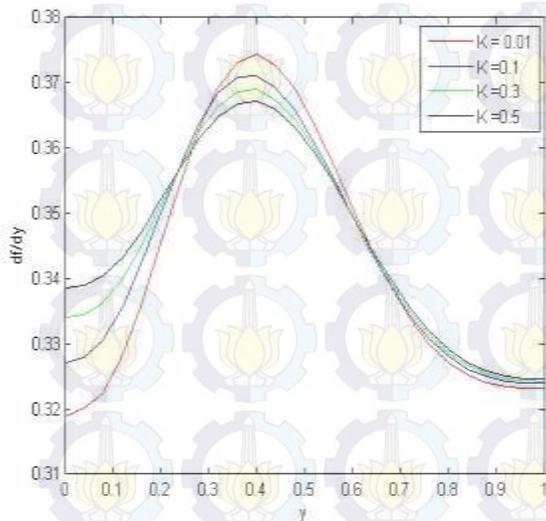
Selanjutnya Persamaan (20) berubah menjadi:

$$(Af_i - B1)\theta_{i-1} - (Af_i + B1)\theta_{i+1} + (2B1 - \gamma)\theta_i = 0 \quad (22)$$

C. Simulasi Numerik

Hasil dari simulasi ini berupa data yang akan dianalisa yang merepresentasikan solusi dari permasalahan. Adapun analisa grafik dijelaskan sebagai berikut:

a. Grafik profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai parameter $\gamma = 0.5, Pr = 1, P = 1$ dan viskoselastik (K) yang divariasi.

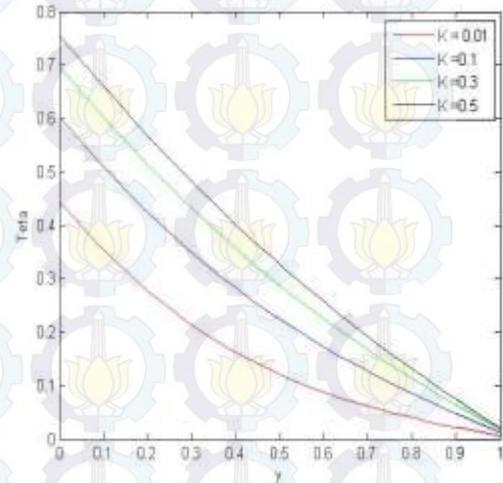


Gambar 4: Profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai parameter $\gamma = 0.5, Pr = 1, P = 10$ dan viskoselastik (K) yang divariasi.

Gambar 4 merupakan hasil *plotting* data profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai parameter $\gamma = 0.5, Pr = 1, P = 1$ dan viskoselastik (K) yang divariasi. Pada penjelasan sebelumnya, bahwa parameter viskoselastik (K) dinyatakan dengan $K = \frac{k_0}{\rho} \frac{Gr^{1/2}}{a^2}$, dan diperoleh interval $0.0166 \leq K \leq 0.527046$. Dari hasil simulasi terlihat bahwa semakin kecil nilai viskoselastik (K=0.01), artinya kekentalan fluida semakin rendah, maka kecepatan dari aliran tersebut semakin naik (grafik warna merah). Sebaliknya, ketika kekentalan fluida semakin besar (K=0.5), maka kecepatan dari aliran fluida semakin turun (grafik warna hitam).

Nilai K sangat bergantung dengan bilangan Grashof Gr yang merupakan perbandingan antara gaya apung dengan gaya viskos. Semakin besar bilangan Grashof mengakibatkan nilai K semakin besar, artinya kekentalan fluida semakin besar. Akibat semakin kental fluida menyebabkan gesekan antara dinding bola dengan fluida semakin besar dan pada akhirnya kecepatan fluida semakin turun. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai kekentalan dari suatu fluida berbanding terbalik terhadap kecepatan dari aliran yang mengalir melalui permukaan sebuah bola berpori.

b. Grafik profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai parameter $\gamma = 0.5, Pr = 1, P = 1$ dan viskoselastik (K) divariasi.

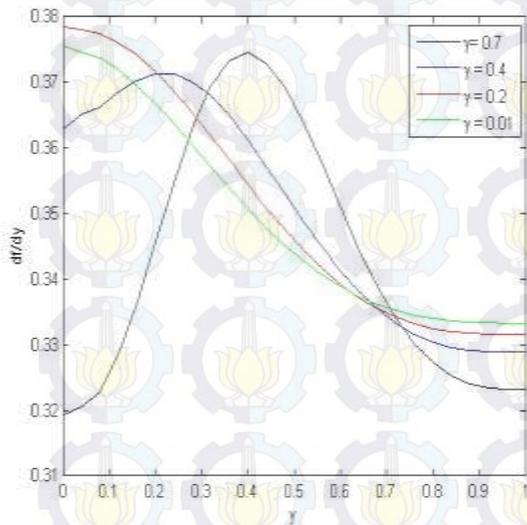


Gambar 5: Profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai parameter $\gamma = 0.5, Pr = 1, P = 1$, dan viskoselastik (K) divariasi.

Gambar 5 merupakan hasil *plotting* data profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai parameter $\gamma = 0.5, Pr = 1, P = 1$ dan viskoselastik (K) yang divariasi. Pada penjelasan sebelumnya, bahwa parameter viskoselastik (K) dinyatakan dengan $K = \frac{k_0}{\rho} \frac{Gr^{1/2}}{a^2}$, dan diperoleh interval $0.0166 \leq K \leq 0.527046$. Dari hasil simulasi terlihat bahwa semakin kecil nilai viskoselastik (K=0.01), artinya kekentalan fluida semakin rendah, maka temperatur dari aliran tersebut semakin turun (grafik warna merah). Begitu juga, ketika kekentalan fluida semakin besar (K=0.5), maka temperatur fluida semakin turun (grafik warna hitam).

Nilai K sangat bergantung dengan bilangan Grashof Gr yang merupakan perbandingan antara gaya apung dengan gaya viskos. Semakin besar bilangan Grashof mengakibatkan nilai K semakin besar, artinya kekentalan fluida semakin besar. Akibat semakin kental fluida menyebabkan gesekan antara dinding bola dengan fluida semakin besar dan pada akhirnya temperatur fluida semakin tinggi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai kekentalan dari suatu fluida berbanding lurus terhadap temperatur dari aliran yang mengalir melalui permukaan sebuah bola berpori.

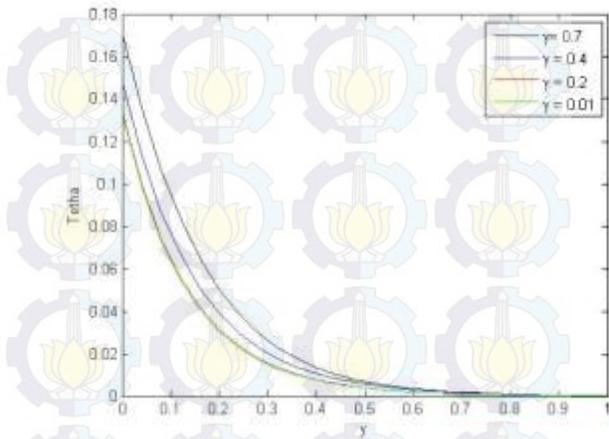
c. Grafik profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $Pr = 10$, $P = 0.1$, dan parameter *heat generator* (γ) yang divariasi.



Gambar 6: Profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $Pr = 10$, $P = 1$, dan parameter *heat generator* (γ) yang divariasi.

Gambar 6 merupakan hasil *plotting* data profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $Pr = 10$, $P = 0.1$, dan parameter *heat generator* (γ) yang divariasi. Pada penjelasan sebelumnya, parameter *heat generator* (γ) atau pembangkit panas dinyatakan dengan $\gamma = \frac{a^2 Q_0}{\nu \rho C_p Gr^2}$, dan diperoleh interval $0 \leq \gamma \leq 0.752923$. Nilai γ sangat dipengaruhi oleh nilai kalor awal Q_0 , semakin besar nilai Q_0 mengakibatkan nilai γ semakin besar. Parameter γ merupakan parameter pembangkit panas tambahan yang diberikan ke media yang dilewati fluida. Secara visual Gambar 6 terlihat bahwa parameter γ berbanding lurus dengan profil kecepatan fluida. Semakin kecil nilai pembangkit panas ($\gamma = 0.1$), maka kecepatan dari aliran tersebut semakin turun (grafik warna hijau). Kecepatan dari aliran tersebut semakin turun dikarenakan nilai kalor mula-mula Q_0 semakin kecil. Sebaliknya, apabila pembangkit panas semakin besar ($\gamma = 0.7$), maka kecepatan dari aliran fluida semakin naik (grafik warna hitam).

d. Grafik profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $Pr = 10$, $P = 1$ dan parameter *heat generator* (γ) yang divariasi.

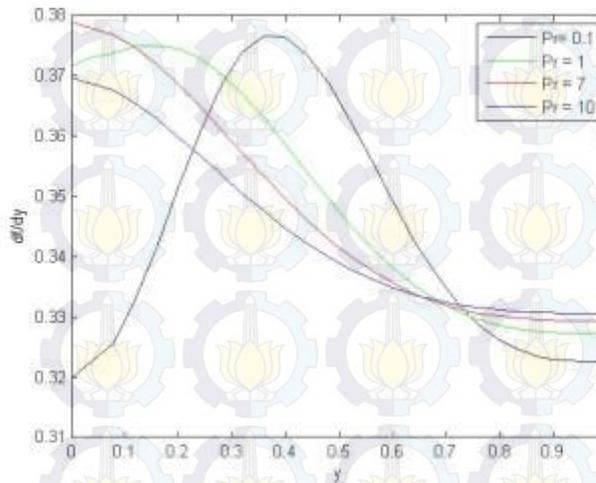


Gambar 7: Profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $Pr = 10$, $P = 1$ dan parameter *heat generation* (γ) yang divariasi.

Gambar 7 merupakan hasil *plotting* data profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $Pr = 10$, $P = 0.1$, dan parameter *heat generator* (γ) yang divariasi. Pada penjelasan sebelumnya, parameter *heat generator* (γ) atau pembangkit panas dinyatakan dengan $\gamma = \frac{a^2 Q_0}{\nu \rho C_p Gr^2}$, dan diperoleh interval $0 \leq \gamma \leq 0.752923$. Nilai γ

sangat dipengaruhi oleh nilai kalor awal Q_0 , semakin besar nilai Q_0 mengakibatkan nilai γ semakin besar. Parameter γ merupakan parameter pembangkit panas tambahan yang diberikan ke media yang dilewati fluida. Secara visual Gambar 7 terlihat bahwa parameter γ berbanding lurus dengan profil temperatur fluida. Semakin kecil nilai pembangkit panas ($\gamma = 0.1$), maka temperatur aliran tersebut semakin turun (grafik warna hijau). Temperatur dari aliran tersebut semakin turun dikarenakan nilai kalor mula-mula Q_0 semakin kecil. Begitu juga, apabila pembangkit panas semakin besar ($\gamma = 0.7$), maka temperatur dari aliran fluida semakin naik (grafik warna hitam). Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai parameter *heat generator* (γ) berbanding lurus terhadap temperatur aliran yang melalui permukaan bola berpori.

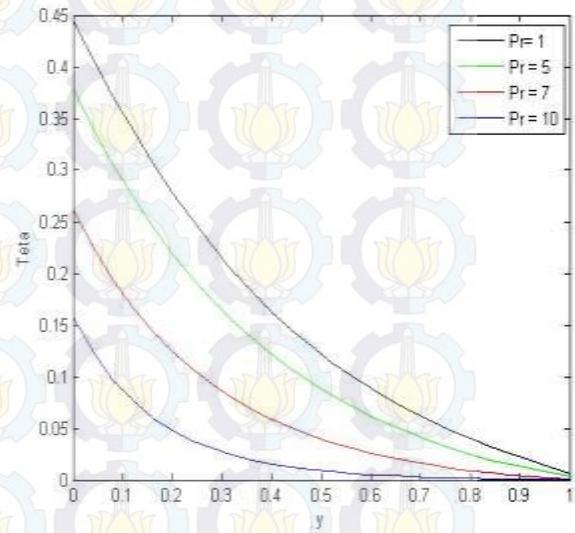
e. Grafik profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $P = 0.1$ dan parameter *bilangan Prandtl* (Pr) yang divariasi.



Gambar 8: Profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $P = 0.1$ dan parameter bilangan *Prandtl* (Pr) yang divariasi.

Gambar 8 merupakan hasil *plotting* data profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $P = 0.1$ dan parameter bilangan *Prandtl* (Pr) yang divariasi. Pada penjelasan sebelumnya, parameter bilangan *Prandtl* (Pr) atau distribusi panas dinyatakan dengan $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$, dan diperoleh interval $0.0175 \leq Pr \leq 12.5$. Nilai Pr sangat tergantung pada viskositas kinematik ν , viskositas kinematik merupakan ukuran kekentalan fluida. Nilai dari bilangan *Prandtl* (Pr) berbanding lurus dengan nilai viskositas kinematik ν . Artinya semakin besar nilai viskositas kinematik ν , maka semakin besar nilai bilangan *Prandtl*. Dari hasil simulasi terlihat bahwa semakin kecil nilai bilangan *Prandtl* yang diberikan ($Pr = 0.1$), mengakibatkan kecepatan dari aliran tersebut semakin naik (grafik warna hitam). Sebaliknya, apabila bilangan *Prandtl* yang diberikan semakin besar ($Pr = 10$), maka kecepatan dari aliran fluida menjadi turun (grafik warna biru). Ini diakibatkan nilai bilangan *Prandtl* yang tergantung pada nilai viskositas kinematik ν . Sehingga dapat disimpulkan bahwa parameter bilangan *Prandtl* (Pr) berbanding terbalik terhadap kecepatan aliran yang melalui permukaan bola berpori.

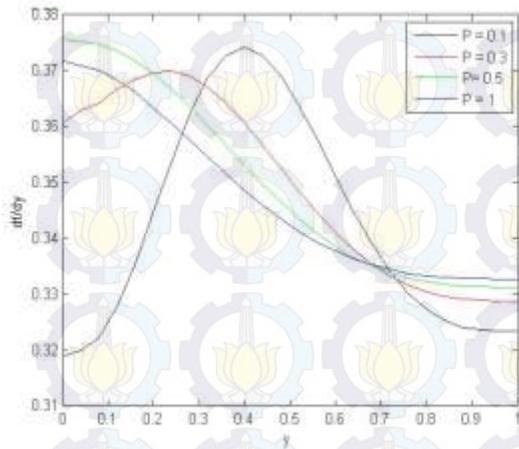
f. Grafik profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $P = 10$ dan parameter bilangan *Prandtl* (Pr) yang divariasi.



Gambar 9: Profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $P = 10$ dan parameter bilangan *Prandtl* (Pr) yang divariasi.

Gambar 9 merupakan hasil *plotting* data profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $\gamma = 0.5$, $P = 0.1$ dan parameter bilangan *Prandtl* (Pr) yang divariasi. Pada penjelasan sebelumnya, parameter bilangan *Prandtl* (Pr) atau distribusi panas dinyatakan dengan $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$, dan diperoleh interval $0.0175 \leq Pr \leq 12.5$. Nilai Pr sangat tergantung pada viskositas kinematik ν , viskositas kinematik merupakan ukuran kekentalan fluida. Nilai dari bilangan *Prandtl* (Pr) berbanding lurus dengan nilai viskositas kinematik ν . Artinya semakin besar nilai viskositas kinematik ν , maka semakin besar nilai bilangan *Prandtl*. Dari hasil simulasi terlihat bahwa semakin kecil nilai bilangan *Prandtl* yang diberikan ($Pr = 0.1$), mengakibatkan temperatur dari aliran tersebut semakin naik (grafik warna hitam). Sebaliknya, apabila bilangan *Prandtl* yang diberikan semakin besar ($Pr = 10$), maka temperatur dari aliran fluida menjadi turun (grafik warna biru). Ini diakibatkan nilai bilangan *Prandtl* yang tergantung pada nilai viskositas kinematik ν . Sehingga dapat disimpulkan bahwa parameter bilangan *Prandtl* (Pr) berbanding terbalik terhadap kecepatan aliran yang melalui permukaan bola berpori.

g. Grafik profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $Pr = 1$ dan parameter porositas (P) yang divariasi.

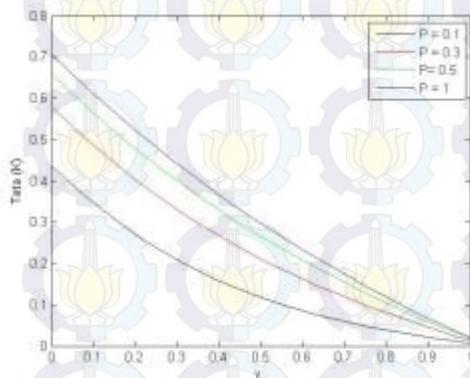


Gambar 10: Profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $Pr = 1$ dan parameter porositas (P) yang divariasi.

Gambar 10 merupakan hasil *plotting* data profil kecepatan fluida dengan pengaruh nilai $K = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $Pr = 1$ dan parameter porositas (P) yang divariasi. Pada penjelasan sebelumnya, parameter porositas (P) dinyatakan dengan $P = \frac{a^2}{Gr^2K^*}$, dan diperoleh interval $0.01 \leq P \leq 1$.

Hubungan antara besar nilai P dengan jari-jari bola a adalah berbanding lurus, artinya semakin besar jari-jari a akan mengakibatkan nilai porositas P semakin besar. Dari hasil simulasi terlihat bahwa semakin kecil nilai porositas bola ($P = 0.1$), mengakibatkan kecepatan dari aliran tersebut semakin naik (grafik warna hitam). Sebaliknya, apabila nilai porositas semakin besar ($P = 1$), maka kecepatan dari aliran fluida menjadi turun (grafik warna biru). Ini diakibatkan aliran fluida lebih cepat mengalir melalui permukaan bola yang berjari-jari kecil dibandingkan melalui jar-jari bola yang besar. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai parameter porositas (P) berbanding terbalik terhadap kecepatan aliran yang melalui permukaan bola berpori.

h. Grafik profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $Pr = 1$ dan parameter porositas (P) yang divariasi.



Gambar 11: Profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai parameter $K = 0.01$, $\gamma = 0.5$, $Pr = 1$, dan parameter porositas (P) yang divariasi.

Gambar 11 merupakan hasil *plotting* data profil temperatur fluida dengan pengaruh nilai $K = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $Pr = 1$ dan parameter porositas (P) yang divariasi. Pada penjelasan sebelumnya, parameter porositas (P) dinyatakan dengan $P = \frac{a^2}{Gr^2K^*}$, dan diperoleh interval $0.01 \leq P \leq 1$.

Hubungan antara besar nilai P dengan jari-jari bola a adalah berbanding lurus, artinya semakin besar jari-jari a akan mengakibatkan nilai porositas P semakin besar. Dari hasil simulasi terlihat bahwa semakin kecil nilai porositas bola ($P = 0.1$), mengakibatkan temperatur dari aliran tersebut semakin rendah (grafik warna hitam). Begitu juga, apabila nilai porositas semakin besar ($P = 1$), maka temperatur dari aliran fluida meningkat (grafik warna biru). Ini diakibatkan gesekan antara fluida dengan permukaan bola semakin besar apabila jari-jari bola semakin besar. Sehingga, apabila gesekan antara fluida dengan permukaan bola rendah mengakibatkan temperatur fluida turun. Dapat disimpulkan bahwa nilai parameter porositas berbanding lurus terhadap temperatur aliran yang melalui permukaan bola berpori.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian aliran konveksi bebas fluida viskoelastik yang melalui permukaan sebuah bola berpori yaitu:

1. Pengaruh nilai parameter pembangkit panas ($\gamma = 0.5$), bilangan Prandtl ($Pr = 1$), porositas ($P = 10$), dan viskoelastik yang divariasi ($K = 0.01, 0.2, 0.5, 1$) terhadap kecepatan aliran berbanding terbalik. Sedangkan pengaruh nilai parameter pembangkit panas ($\gamma = 0.5$), bilangan Prandtl ($Pr = 1$), porositas ($P = 0.1$), dan viskoelastik yang divariasi ($K = 0.01, 0.2, 0.5, 1$) terhadap temperatur aliran berbanding lurus. Adapun persamaan viskoelastik memenuhi $K = \frac{k_0 Gr^{1/2}}{\rho a^2}$, dengan interval: $0.0166 \leq K \leq 0.527046$.
2. Pengaruh nilai parameter viskositas ($K = 0.01$), bilangan Prandtl ($Pr = 10$), porositas ($P = 1$), dan pembangkit panas (*heat generator*) yang divariasi ($\gamma = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$) terhadap kecepatan aliran dan temperatur berbanding lurus. Adapun persamaan pembangkit panas memenuhi $\gamma = \frac{a^2 Q_0}{\nu c_p Gr^2}$, dengan interval: $0 \leq \gamma \leq 0.752923$.
3. Pengaruh nilai parameter viskositas ($K = 0.01$), porositas ($P = 0.1$), pembangkit panas ($\gamma = 0.5$), dan bilangan Prandtl ($Pr = 1, 5, 7, 10$) yang divariasi terhadap kecepatan aliran dan temperatur berbanding terbalik. Adapun persamaan dari bilangan Prandtl memenuhi $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$, dengan interval: $0.0175 \leq Pr \leq 12.5$.
4. Pengaruh nilai parameter viskositas ($K = 0.01$), pembangkit panas ($\gamma = 0.5$), bilangan Prandtl ($Pr = 1$), dan porositas yang divariasi ($P = 1, 4, 7, 10$) terhadap kecepatan aliran berbanding terbalik. Sedangkan pengaruh nilai viskositas

($K = 0.01$), pembangkit panas ($\gamma = 0.5$), bilangan Prandtl ($Pr = 1$), dan porositas yang divariasi ($P = 1, 4, 7, 10$) terhadap temperatur aliran berbanding lurus. Adapun persamaan porositas memenuhi $P = \frac{a^2}{Gr^2K^*}$, dengan interval: $0.01 \leq P \leq 1$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Amin, N., Nazar, R., dan Pop, I, (2002), "On The Mixed Convection Boundary-Layer Flow About A Solid Sphere With Constant Surface Temperature", The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 27, Number 2C.
- [2] Favre, M dan Tardu Sedat M, (2009), *Convective Heat Transfer*, Wiley. USA.
- [3] Genick, B.M, (2013), *Basics of Fluid Mechanics*. North Washtenaw. Chicago.
- [4] Hoffman, K.A & Chiang, S.T, (2000), *Computational Fluid Dynamics Volume I. A Publication of Engineering Education System, Wichita, Kansas. USA.*
- [5] Kasim, A.R.M, (2014), *Convective Boundary Flow of Viscoelastic Fluid*, Universitas Teknologi Malaysia, Malaysia.
- [6] Kreith, Frank, (1994), *Prinsip – prinsip Perpindahan Panas*, Erlangga. Jakarta.
- [7] Munson, Bruce, (2003), *Mekanika Fluida*, Edisi 4, Erlangga. Jakarta.
- [8] Nazar, R., Pop, I., Salleh., M.Z, (2010), "Mixed Convection Boundary Layer Flow about A Solid Sphere with Newtonian Heating", Arch. Mech, 62, 4, pp. 283-303, Warszawa.
- [9] Potter, M.C., Wiggert, D.C., dan Ramadan, B, (2008), *Mechanics of Fluids*, Global Engineering, United States of America.
- [10] Sleigh, Andrew, (2001), *An Introduction to Fluid Mechanics*. University of Leeds. England.
- [11] Streeter, Victor L dan Wylie, E. Benjamin, (1988), *Mekanika Fluida*. Edisi Delapan Jilid 1, Erlangga. Jakarta.
- [12] Widodo, B., Fatahillah, A., Rahayuningsih, T, (2011), "Mathematical Modelling and Numerical Solution of Iron Corrosion Problem Based on Condensation Chemical Properties", Australian Journal of Basic and Applied Sciences,5(1), pp. 79-86.