

# MAGNETOHIDRODINAMIKA FLUIDA MIKROPOLAR PADA LAPISAN BATAS MELEWATI PELAT DATAR YANG DIPENGARUHI KONVEKSI CAMPURAN

*(Micropolar Fluid Magnetohydrodynamics at The Boundary Layer Through Flat Plate Under The Effect of Mixture Convection)*

Jason Otniel Dharmanta<sup>1)</sup>, Basuki Widodo<sup>2\*)</sup>, Dieky Adzkiya<sup>3)</sup>, Chairul Imron<sup>4)</sup>

<sup>1,2,3,4)</sup>Departemen Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Keputih Sukolilo, Surabaya

e-mail: jason.dharmanta@gmail.com, b\_widodo@matematika.its.ac.id\*, dieky@matematika.its.ac.id, imron-its@matematika.its.ac.id

\*penulis korespondensi

**Abstract.** This study considers about the magnetohydrodynamics of micropolar fluids in the boundary layer passing through a flat plate which is affected by mixed convection. The governing equations are obtained from the continuity, momentum, energy equations, and Maxwell's equation. The micropolar fluid passes through the flat plate, flowing from the below. The obtained dimensional equations are then transformed into non-dimensional equations using non-dimensional variables, then transformed into similarity equations. The similarity equations can be introduced using stream functions, that produce non-linear partial differential equations. The equations are then solved by Keller-Box method. The numerical results obtained are in the form of temperature and fluid velocity profiles with variations in magnetic parameters, micropolar parameters, porosity parameters and Prandtl numbers. The numerical simulation results show that the greater the magnetic parameter ( $M$ ), the micropolar parameter ( $K$ ) and the porosity parameter ( $\phi$ ), respectively, then the speed decreases but the temperature increases. However, the variation of the Prandtl numbers ( $Pr$ ) does not affect the speed. The greater the Prandtl number, the lower the temperature.

**Keywords:** Flat plate, Keller-Box, magnetohydrodynamics, micropolar fluid

## 1. Pendahuluan

Bidang teknik dan industri semakin maju, beriringan dengan zaman yang juga semakin berkembang. Kedua bidang ini kerap menggunakan fluida berwujud cairan (*liquid*). Dalam bidang industri, fluida antara lain digunakan sebagai bahan pembuatan lilin, plastik, cairan pelumas pada sistem pelumasan dan masih banyak lainnya [24].

Magnetohidrodinamika (MHD) merupakan cabang ilmu yang mempelajari aliran fluida yang bisa menghantarkan arus listrik yang diakibatkan adanya pengaruh dari medan magnet [18]. Dalam beberapa tahun terakhir, MHD mulai sering diteliti. Penggunaan MHD pada bidang teknologi terbilang cukup luas, antara lain pada pengeboran minyak dan PLTU. Pada pengeboran minyak di persekitaran antara pipa bor dan dinding tanah, simulasi aliran lumpur yang akurat merupakan hal yang penting sekali untuk efisiensi transportasi pada *stek rock drill*, penurunan tekanan gesekan mengevaluasi dan variasi

tekanan dalam lumpur di dalam sumur bor. Efisiensi yang mencapai 30% pada PLTU bisa didapat dari adanya kombinasi MHD pada PLTU. Selain itu medan magnet bisa digunakan pula untuk mengendalikan operasi aliran, misalnya saat cairan yang keluar mengandung listrik dan terionisasi [23]. MHD banyak diteliti pula pada berbagai benda, antara lain pelat datar [5,14,19,27], bola teriris [4], silinder [11,12,15]. Beberapa benda yang diteliti tersebut ada yang berpori, misalnya seperti yang diteliti oleh [6,7]. Pada penelitian ini, benda yang diteliti adalah pelat datar berpori.

Fluida merupakan zat yang jika terkena tegangan geser, betapapun kecilnya tegangan geser itu, maka akan berubah bentuk secara terus-menerus (kontinu) [24]. Fluida dibagi menjadi dua: fluida non-Newtonian dan fluida Newtonian. Fluida non-Newtonian adalah fluida yang tidak tahan terhadap temperatur, tegangan geser dan gradien kecepatan. Fluida mikropolar, atau yang kerap pula disebut fluida mikrokutub, merupakan salah satu contoh fluida non-Newtonian [18]. Fluida mikropolar adalah fluida yang bisa melakukan mikrorotasi dengan dirinya sendiri dan mempunyai struktur mikro. Fluida mikropolar merupakan salah satu contoh fluida non-Newtonian yang kerap dijumpai dalam permasalahan nyata. Fluida mikropolar mempunyai potensi untuk diterapkan pada bidang teknik karena sifatnya. Karenanya penelitian fluida mikropolar menarik untuk dikembangkan. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian terkait fluida mikropolar dengan MHD mulai sering dijumpai.

Penelitian terdahulu mengenai fluida mikropolar antara lain dilakukan oleh [2,9,10,17,18,20,22,26]. Misalnya [18], melakukan penelitian pada fluida mikropolar dengan konveksi paksa. Aliran yang diteliti adalah aliran tak-tunak (*unsteady*). Benda yang diteliti adalah bola berpori. Metode yang digunakan adalah Keller-Box. Parameter yang dikaji adalah parameter magnetik, parameter mikropolar, parameter porositas dan bilangan Prandtl.

Kendati demikian masih perlu dilakukan pengembangan lebih lanjut pada fluida mikropolar. Penelitian ini mengkaji pengaruh parameter magnetik, parameter mikropolar, parameter porositas dan bilangan Prandtl terhadap profil kurva kecepatan dan kurva temperatur. Ada beberapa cara yang pernah dipakai untuk melakukan penyelesaian, misalnya metode Keller-Box [1,25], metode Runge-Kutta [8,13] dan metode elemen hingga [21]. Adapun penyelesaian numerik pada penelitian ini dicari menggunakan metode Keller-Box, yang merupakan metode beda hingga implisit dan stabil tanpa syarat [3]. Dengan demikian diharapkan penelitian ini bisa memberikan sumbangsih untuk bidang teknik, industri maupun lainnya.

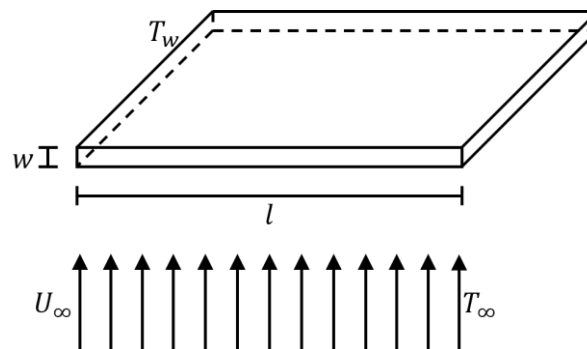
## 2. Metodologi

Langkah-langkah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Studi literatur
2. Pembentukan persamaan pembangun dimensional
3. Transformasi persamaan pembangun dimensional ke bentuk non-dimensional
4. Mengubah persamaan pembangun non-dimensional ke dalam persamaan similaritas
5. Penyelesaian numerik
6. Simulasi
7. Analisis hasil dan pembahasan
8. Penyusunan paper

## 3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian dilakukan di titik stagnasi  $x = 0$ . Fluida mengalir dari bawah ke atas melawan arah gravitasi. Suhu sebelum melalui pelat adalah  $T_\infty$  dengan kecepatan aliran  $U_\infty$ , sedangkan suhu fluida saat melalui pelat adalah  $T_w$  (Gambar 1)..



Gambar 1. Sketsa aliran fluida melewati pelat datar

### 3.1 Persamaan Pembangun Dimensional

Persamaan pembangun model terdiri atas persamaan kontinuitas, persamaan momentum dan persamaan energi, yang masing-masing dibangun dari hukum kekekalan massa, hukum Newton kedua dan hukum termodinamika pertama. Berikut ini persamaan pembangun berdimensi yang didapat.

Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Persamaan momentum sumbu- $x$

$$\rho \left( \underline{u} \frac{\partial \underline{u}}{\partial \underline{x}} + \underline{v} \frac{\partial \underline{u}}{\partial \underline{y}} \right) = - \frac{\partial p}{\partial \underline{x}} + (\mu + \kappa) \left( \frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial \underline{x}^2} + \frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial \underline{y}^2} \right) - \sigma \underline{u} B_0^2 - \frac{\mu}{K^*} \underline{u} \quad (2)$$

Persamaan momentum sumbu- $y$

$$\rho \left( \underline{u} \frac{\partial \underline{v}}{\partial \underline{x}} + \underline{v} \frac{\partial \underline{v}}{\partial \underline{y}} \right) = - \frac{\partial p}{\partial \underline{y}} + (\mu + \kappa) \left( \frac{\partial^2 \underline{v}}{\partial \underline{x}^2} + \frac{\partial^2 \underline{v}}{\partial \underline{y}^2} \right) - \sigma \underline{v} B_0^2 - \frac{\mu}{K^*} \underline{v} \quad (3)$$

Persamaan energi

$$\underline{u} \frac{\partial T}{\partial \underline{x}} + \underline{v} \frac{\partial T}{\partial \underline{y}} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial \underline{x}^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \underline{y}^2} \right) \quad (4)$$

Dengan kondisi batas berdimensi sebagai berikut.

$$t < 0 : \underline{u} = \underline{v} = 0, \underline{T} = T_\infty \quad \text{untuk setiap } \underline{x}, \underline{y}$$

$$t \geq 0 : \underline{u} = \underline{v} = 0, \underline{T} = T_w(x) \quad \text{saat } \underline{y} = 0$$

$$\underline{u} = \underline{u}_\infty(x), \underline{T} = T_\infty \quad \text{saat } \underline{y} \rightarrow \infty$$

Serta  $u$  adalah komponen kecepatan fluida pada sumbu- $x$ ,  $v$  adalah komponen kecepatan fluida pada sumbu- $y$ ,  $x$  adalah koordinat arah gerak permukaan,  $y$  adalah koordinat arah normal terhadap gerak permukaan,  $p$  adalah tekanan fluida,  $\mu$  adalah viskositas dinamik,  $\kappa$  adalah vorteks,  $\sigma$  adalah konduktivitas listrik fluida,  $B_0$  adalah vektor medan magnet,  $K^*$  adalah permeabilitas,  $T$  adalah temperatur,  $\alpha = \frac{c}{\rho c_p}$  adalah difusivitas termal,  $c$  adalah konduktivitas termal,  $\rho$  adalah massa jenis dan  $c_p$  adalah panas jenis. Adapun tanda bar ( $\underline{\quad}$ ) menunjukkan bahwa variabel tersebut berupa variabel dimensional.

### 3.2 Persamaan Pembangun Non-dimensional

Persamaan pembangun dimensional yang didapat selanjutnya ditransformasikan ke dalam bentuk non-dimensional [16] menggunakan variabel non-dimensional berikut:

$$x = \frac{\underline{x}}{l}; y = Re^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\underline{y}}{l} \right); u = \frac{\underline{u}}{U_\infty}; v = Re^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\underline{v}}{U_\infty} \right); T = \frac{T - T_\infty}{T_w(x) - T_\infty}; p = \frac{\underline{p}}{\rho U_\infty^2} \quad (5)$$

dan parameter non-dimensional berikut:

$$Re = \frac{U_\infty l}{\nu}; \nu = \frac{\mu}{\rho}; M = \frac{\sigma B_0^2 l}{\rho U_\infty}; Pr = \frac{\nu}{\alpha}; \phi = \frac{l \mu}{\rho U_\infty K^*}; K = \frac{\kappa}{\mu} \quad (6)$$

dengan  $Re$  adalah bilangan Reynolds,  $\nu$  adalah viskositas kinematik,  $M$  adalah parameter magnetik,  $Pr$  adalah bilangan Prandtl,  $\phi$  adalah parameter porositas dan  $K$  adalah parameter mikropolar.

Kemudian dilakukan substitusi persamaan (5) dan (6) ke persamaan (1) sampai (4), sehingga didapat persamaan pembangun tak berdimensi berikut.

Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

Persamaan momentum sumbu-x

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{(1+K)}{Re} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (1+K) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - (M + \phi)u \quad (8)$$

Persamaan momentum sumbu-y

$$\begin{aligned} & \frac{1}{Re} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (9) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left[ \frac{1}{Re} (1+K) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + (1+K) \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - (M + \phi)v \right] \end{aligned}$$

Persamaan energi

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (10)$$

Dengan kondisi batas tak berdimensi berikut.

$$t < 0 : u = v = 0, T = 0 \quad \text{untuk setiap } x, y$$

$$t \geq 0 : u = v = 0, T = 1 \quad \text{saat } y = 0$$

$$u = u_e(x), T = 0 \quad \text{saat } y \rightarrow \infty$$

### 3.3 Pendekatan Lapisan Batas

Persamaan pembangun non-dimensional yang didapat tidak mudah diselesaikan. Karenanya dibutuhkan konsep teori lapisan batas. Pada pendekatan lapisan batas, nilai  $Re \rightarrow \infty$ , akibatnya  $\frac{1}{Re} \rightarrow 0$ , sehingga didapat persamaan pembangun non-dimensional yang baru berikut ini.

Persamaan kontinuitas

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

Persamaan momentum

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = u_e \frac{\partial u_e}{\partial x} + (1+K) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - (M + \phi)(u - u_e) \quad (12)$$

Persamaan energi

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (13)$$

### 3.4 Persamaan Similaritas

Guna menyelesaikan persamaan (11) sampai (13), ketiga persamaan tersebut mesti diubah terlebih dahulu ke dalam bentuk persamaan similaritas dengan fungsi alir (*stream function*) (Potter, 2011) berikut. Fungsi alir kerap pula disebut fungsi arus.

$$\psi = xf(x, \eta), T = \theta(x, \eta), \eta = y \quad (14)$$

Dengan  $\psi$  merupakan fungsi alir yang didefinisikan sebagai berikut.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \text{ dan } v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (15)$$

Dengan menggunakan persamaan (14) dan (15), fungsi alir untuk model matematika pada sistem akan didapat. Persamaan (14) dan (15) disubstitusikan ke persamaan (11) sampai (13), sehingga didapat persamaan similaritas berikut.

Persamaan momentum

$$(f')^2 - ff'' = 1 + (1 + K)f''' - (M + \phi)(f' - 1) \quad (16)$$

Persamaan energi

$$-Prf\theta' = \theta'' \quad (17)$$

Dengan kondisi batas berikut.

$$t < 0 : f = f' = 0, \theta = 0 \quad \text{untuk setiap } x, \eta$$

$$t \geq 0 : f = f' = 0, \theta = 1 \quad \text{saat } \eta = 0$$

$$f = f' = 1, \theta = 0 \quad \text{saat } \eta \rightarrow \infty$$

Serta  $\frac{\partial f}{\partial \eta} = f'$  dan  $\frac{\partial \theta}{\partial \eta} = \theta'$ .

### 3.5 Penyelesaian Numerik

Penyelesaian numerik yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode Keller-Box. Berikut adalah langkah-langkahnya.

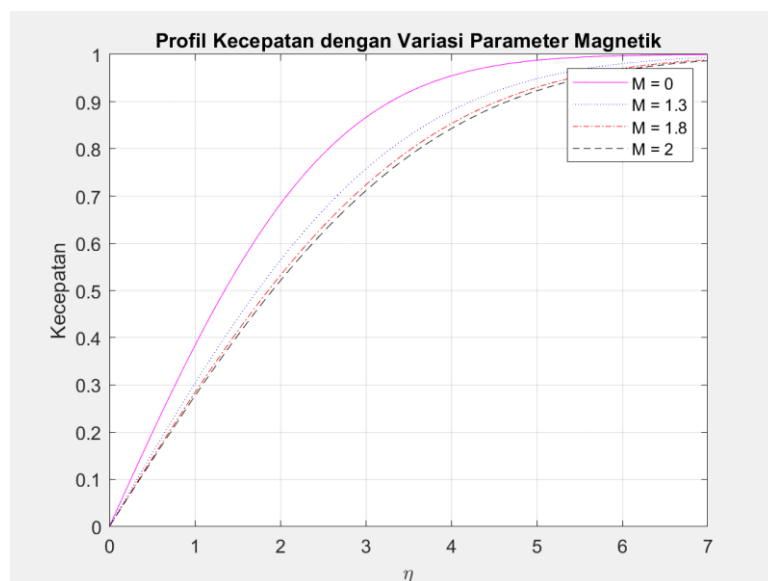
1. Mengubah persamaan diferensial orde tinggi menjadi persamaan diferensial orde satu dengan cara menyelaraskan notasi.

2. Mendiskritkan persamaan orde satu dengan metode beda hingga Keller-Box.
3. Melinierkan persamaan yang telah didiskritkan menggunakan metode Newton.
4. Membentuk matriks tridiagonal dengan menggunakan teknik eliminasi blok, kemudian menyelesaikan persamaan linier tersebut.

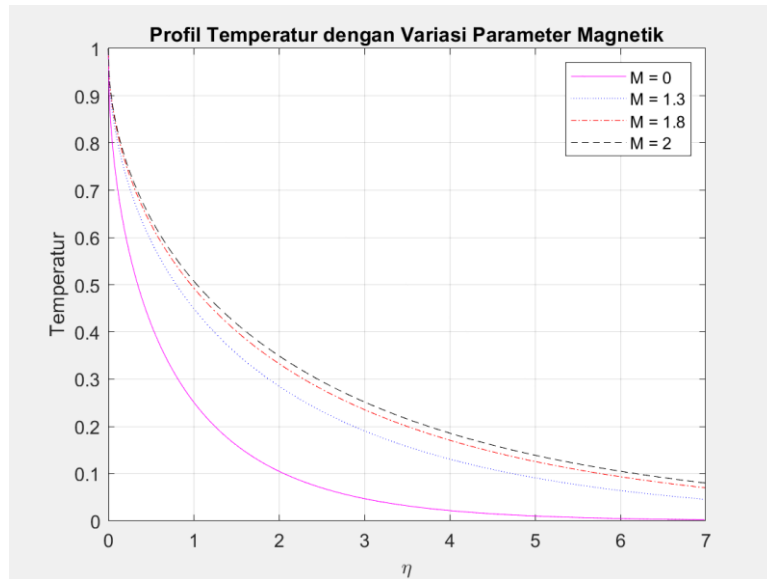
### 3.6 Analisis dan Pembahasan

Hasil numerik yang didapat lalu disimulasikan pada MATLAB dengan memberi input berupa variasi parameter magnetik ( $M$ ), parameter mikropolar ( $K$ ), parameter porositas ( $\phi$ ) dan bilangan Prandtl ( $Pr$ ), lantas dilakukan analisis terhadap profil kecepatan ( $f'$ ) dan profil temperatur ( $\theta$ ).

Untuk parameter magnetik, variasi parameter magnetik yang digunakan adalah 0, 1.3, 1.8, 2. Nilai parameter lain yang digunakan adalah  $K = 1$ ,  $\phi = 1$  dan  $Pr = 1$ . Dari Gambar 2 tampak bahwa semakin besar parameter magnetik maka kecepatan fluida semakin menurun, dan dari Gambar 3 tampak bahwa semakin besar parameter magnetik maka temperatur fluida semakin meningkat.

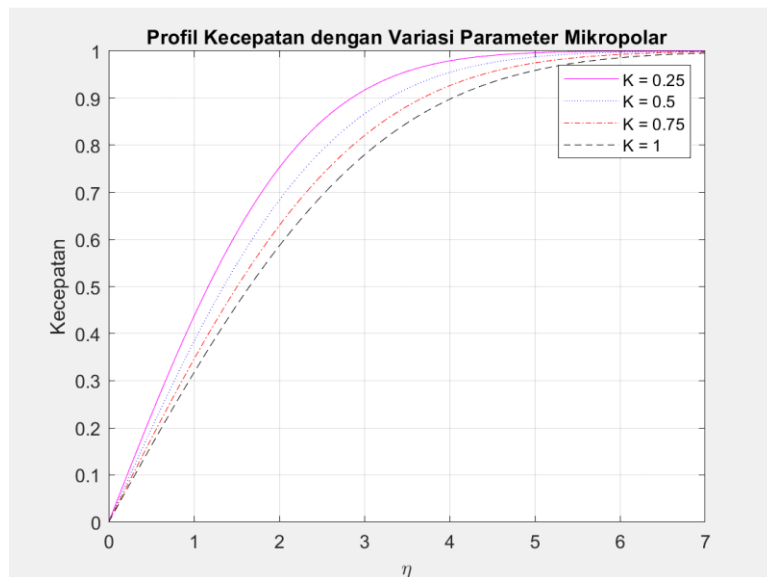


Gambar 2. Profil kecepatan dengan variasi parameter magnetik



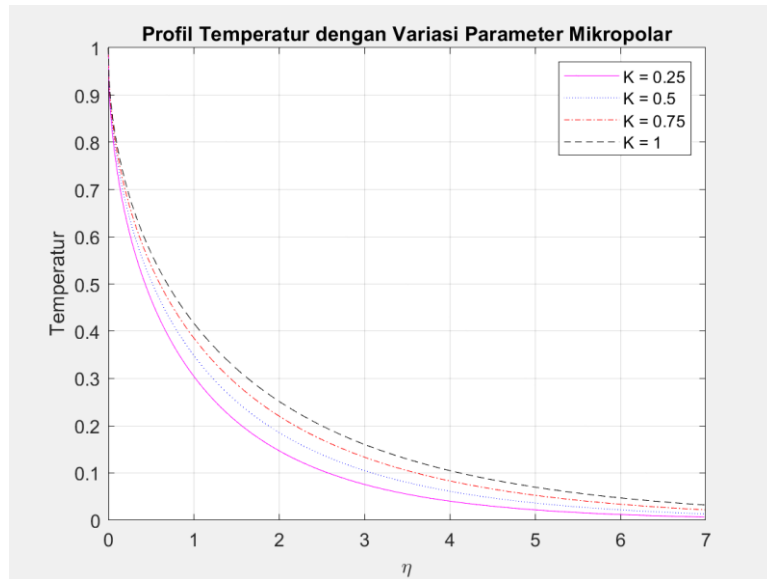
Gambar 3. Profil temperatur dengan variasi parameter magnetik

Untuk parameter mikropolar, variasi parameter mikropolar yang digunakan adalah 0.25, 0.5, 0.75, 1. Nilai parameter lain yang digunakan adalah  $M = 1$ ,  $\phi = 1$  dan  $Pr = 1Pr = 1$ . Dari Gambar 4 tampak bahwa semakin besar parameter mikropolar maka kecepatan fluida semakin menurun, dan dari Gambar 5 tampak bahwa semakin besar parameter mikropolar maka temperatur fluida semakin meningkat.



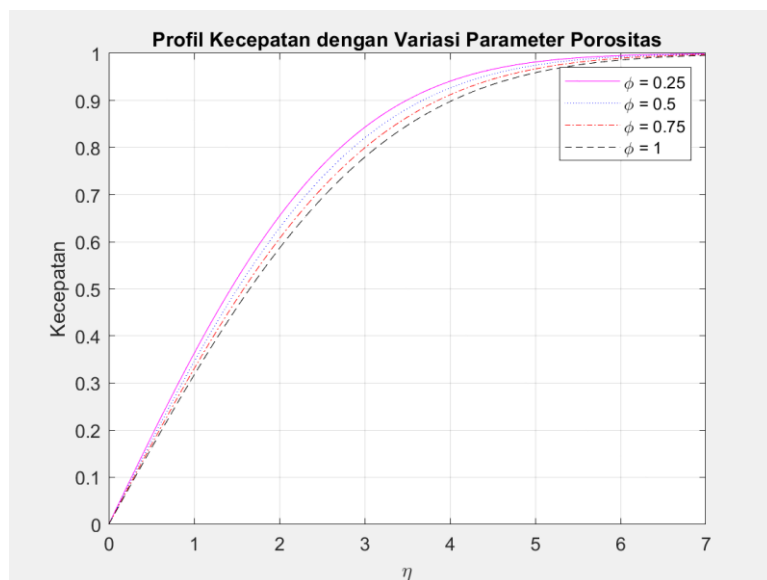
Gambar 4. Profil kecepatan dengan variasi parameter mikropolar



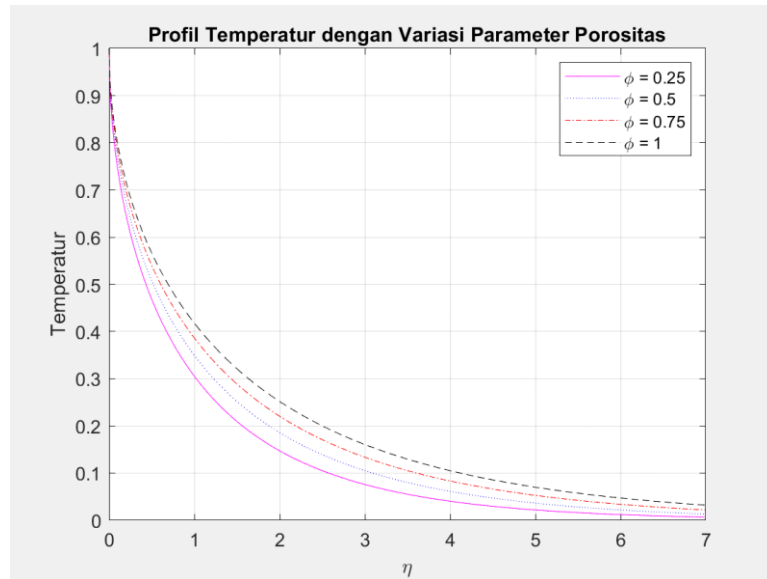


Gambar 5. Profil temperatur dengan variasi parameter mikropolar

Untuk parameter porositas, variasi parameter porositas yang digunakan adalah 0.25, 0.5, 0.75, 1. Nilai parameter lain yang digunakan adalah  $M = 1$ ,  $K = 1$  dan  $Pr = 1$ . Dari Gambar 6 tampak bahwa semakin besar parameter porositas maka kecepatan fluida semakin menurun, dan dari Gambar 7 tampak bahwa semakin besar parameter porositas maka temperatur fluida semakin meningkat.

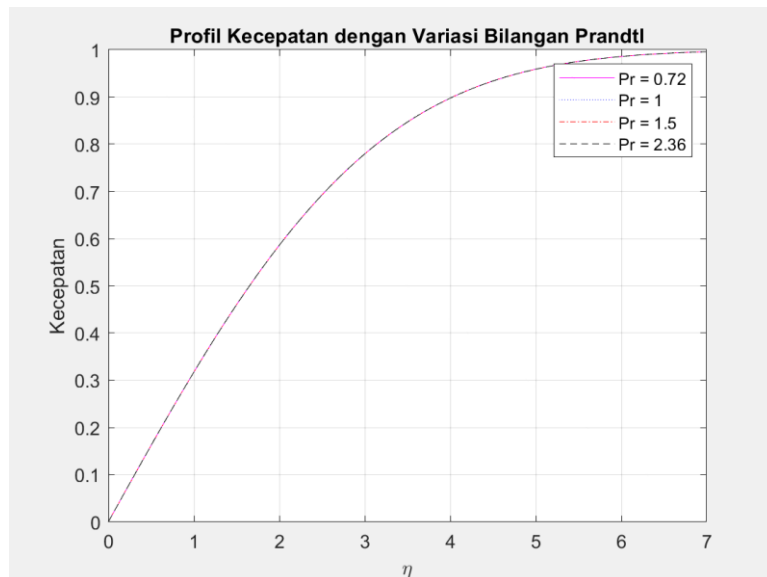


Gambar 6. Profil kecepatan dengan variasi parameter porositas

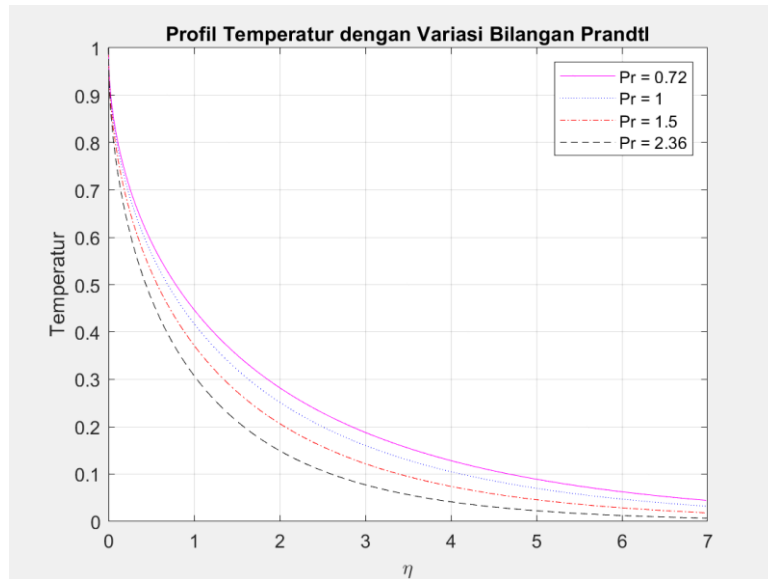


Gambar 7. Profil temperatur dengan variasi parameter porositas

Untuk bilangan Prandtl, variasi bilangan Prandtl yang digunakan adalah 0.72, 1, 1.5, 2.36. Nilai parameter lain yang digunakan antara lain  $M = 1$ ,  $K = 1$  dan  $\phi = 1$ . Dari Gambar 8 tampak bahwa pemberian variasi bilangan Prandtl tak mempengaruhi kecepatan aliran fluida, dan dari Gambar 9 tampak bahwa semakin besar bilangan Prandtl maka temperatur fluida semakin menurun.



Gambar 8. Profil kecepatan dengan variasi bilangan Prandtl



Gambar 9. Profil temperatur dengan variasi bilangan *Prandtl*

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisis yang dilakukan, didapat kesimpulan berikut.

1. Penyelesaian model matematika dari magnetohidrodinamika fluida mikropolar pada lapisan batas melewati pelat datar yang dipengaruhi konveksi campuran didapat dengan metode Keller-Box. Persamaan similaritas yang didapat lalu dibentuk menjadi persamaan orde pertama, lalu didiskritkan dengan metode beda hingga, lalu dilinierkan dengan metode Newton dan hasil pelinieran tersebut diselesaikan dengan teknik eliminasi blok.
2. Berdasarkan hasil simulasi numerik, dapat disimpulkan bahwa semakin besar parameter magnetik ( $M$ ), parameter mikropolar ( $K$ ) dan parameter porositas ( $\phi$ ) maka kecepatannya semakin menurun, sedangkan pemberian variasi bilangan Prandtl ( $Pr$ ) tidak mempengaruhi kecepatan aliran fluida mikropolar.
3. Berdasarkan hasil simulasi numerik, disimpulkan bahwa semakin besar parameter magnetik ( $M$ ), parameter mikropolar ( $K$ ) dan parameter porositas ( $\phi$ ) maka temperaturnya semakin meningkat, sedangkan semakin besar bilangan Prandtl ( $Pr$ ) maka temperaturnya semakin menurun.

#### Ucapan Terima Kasih

Karya ilmiah ini ditulis berdasarkan hasil penelitian yang didukung oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi/Badan Riset dan Inovasi Nasional Republik Indonesia (KEMENDIKBUDRISTEK-RI) dengan Surat Perjanjian Pendanaan

nomor 008/E5/PG.02.00.PT/2022, 16 Maret 2022, dan Direktorat Riset dan Pengembangan Masyarakat (Direktorat Riset dan Pengabdian kepada Masyarakat/DRPM), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya-Jawa Timur, Indonesia dengan Surat Perjanjian Pendanaan nomor 1503/PKS/ITS/2022, 17 Maret 2022. Oleh karena itu kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada KEMENDIKBUDRISTEK-RI dan DRPM-ITS yang telah memberikan kesempatan untuk mempresentasikan makalah ini dalam Seminar Nasional Matematika, Geometri, Statistika, dan Komputasi 2022 (SeNa-MaGeStiK).

## Daftar Pustaka

- [1] Bhat, A., Katagi, N. N., (2020), Micropolar Fluid Flow Between a Non-porous Disk and a Porous Disk with Slip: Keller-Box Solution, Author Links Open Overlay Panel, *Ain Shams Engineering Journal* **11**, 149 – 159, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.07.006>
- [2] Bilal, M., Saeed, A., Gul, T., Kumam, W., Mukhtar S., Kumam, P., (2022), Parametric Simulation of Micropolar Fluid with Thermal Radiation Across a Porous Stretching Surface, *Scientific Reports* **12**, 2542 – 2553, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06458-3>
- [3] Chapra, S. C., Canale, R. P., (2010), *Numerical Methods for Engineers, Sixth Edition*, McGraw-Hill, New York
- [4] Eviloka, T., (2021), *Analisis Aliran Konveksi Campuran Fluida Viskoelastik Melewati Bola Teriris yang Dipengaruhi Medan Magnet*, Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [5] Ferdows, M., Liu, D., (2018), Natural Convective Flow of a Magneto-micropolar Fluid Along a Vertical Plate, *Propulsion and Power Research* **7**, 43 – 51, <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2018.01.005>
- [6] Ferdows, M., Shamshuddin, M. D., Zaimi, K., (2020), Dissipative-Radiative Micropolar Fluid Transport in a Non-Darcy Porous Medium with Cross-Diffusion Effects, *CFD Letters* **12**, 70 – 89, <https://doi.org/10.37934/cfdl.12.7.7089>
- [7] Jamil, M., Ahmed, A., (2020), New Traveling Wave Solutions of MHD Micropolar Fluid in Porous Medium, *Journal of the Egyptian Mathematical Society* **28**, 23 - 44, <https://doi.org/10.1186/s42787-020-00085-5>
- [8] Koriko, O. K., Animasaun, I. L., (2017), New Similarity Solution of Micropolar Fluid Flow Problem Over an UHSPR in the Presence of Quartic Kind of Autocatalytic Chemical Reaction, *Frontiers in Heat and Mass Transfer* **8**, 26 – 38,

<https://doi.org/10.5098/hmt.8.26>

- [9] Kumalasari, C. J., (2018), *Aliran Fluida Magnetohidrodinamik Mikroktub yang melalui Bola Berpori Dipengaruhi oleh Konveksi Campuran dan Medan Magnet*, Tesis Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [10] Li, P., Duraihem, F. Z., Awan, A. U., Al-Zubaidi, A., Abbas, N., Ahmad, D., (2022), Heat Transfer of Hybrid Nanomaterials Base Maxwell Micropolar Fluid Flow Over an Exponentially Stretching Surface, *Nanomaterials* **12**, 1207 – 1213, <https://doi.org/10.3390/nano12071207>
- [11] Maurya, D. K., Deo, S., Khanukaeva, D. Y., (2020), Analysis of Stokes Flow of Micropolar Fluid Through a Porous Cylinder, *Mathematical Methods in the Applied Sciences* **5**, 281 – 293, <https://doi.org/10.22541/au.159767833.38840439>
- [12] Mayagrafinda, I., (2021), *Analisis Kecepatan dan Temperatur di Sekitar Titik Stagnasi Terendah pada Magnetohidrodinamika Fluida Nano yang Melalui Silinder Berpori*, Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [13] Mirgolbabaee, H., Ledari, S. T., Ganji, D. D., (2018), Semi-analytical Investigation on Micropolar Fluid Flow and Heat Transfer in a Permeable Channel Using AGM, *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences* **24**, 213 – 222, <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2017.01.002>
- [14] Nabwey, H. A., Rashad, A. M., Mahdy, A. E. N., Shaaban, S. M., (2022), Thermal Conductivity and Thermophoretic Impacts of Micropolar Fluid Flow by a Horizontal Absorbent Isothermal Porous Wall with Heat Source/Sink, *Mathematics* **10**, 1514 – 1522, <https://doi.org/10.3390/math10091514>
- [15] Nagaraju, G., Matta, A., Shilpa, S., (2019), Second Law Analysis of Magnetized Micropolar Fluid on Horizontal Inner Rotating Cylinder with Chemical Reaction and Cross Diffusions Effects, *Asian Research Publishing Network (ARPN) Journal of Engineering and Applied Sciences* **14**, 3073 – 3081, [https://doi.org/17.2019/jeas\\_0919\\_7907](https://doi.org/17.2019/jeas_0919_7907)
- [16] Potter, M. C., Wiggert, D. C., (2011), *Schaum's Outline Mekanika Fluida*, Penerbit Erlangga, Jakarta
- [17] Pratomo, R. V., (2017), *Magnetohidrodinamik yang Tak Tunak pada Lapisan Batas yang Mengalir Melalui Bola di dalam Fluida Mikroktub di Bawah Pengaruh Medan Magnet*, Tesis Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [18] Putri, R. O., (2018), *Magnetohidrodinamik Tak Tunak dengan Konveksi Paksa pada Fluida Micropolar yang Melalui Bola Berpori*, Tugas Akhir Institut Teknologi

Sepuluh Nopember, Surabaya

- [19] Sahaya, R., (2016), *Aliran Fluida Magnetohidrodinamik Viskoelastis Tersuspensi yang Melewati Pelat Datar*, Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [20] Shah, Z., Kumam, P., Dawar, A., Alzahrani, E. O., Thounthong, P., (2019), Study of the Couple Stress Convective Micropolar Fluid Flow in a Hall MHD Generator System, *Frontiers in Physics* **7**, 171 – 182, <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00171>
- [21] Shamshuddin, M. D., Thumma, T., (2019), Numerical Study of a Dissipative Micropolar Fluid Flow Past an Inclined Porous Plate with Heat Source/Sink, *Propulsion and Power Research* **8**, 56 – 68, <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2019.01.001>
- [22] Tassaddiq, A., (2021), Impact of Cattaneo-Christov Heat Flux Model on MHD Hybrid Nano-micropolar Fluid Flow and Heat Transfer with Viscous and Joule Dissipation Effects, *Scientific Reports* **11**, 67 – 77, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77419-x>
- [23] Utama, M. S. D., (2017), *Magnetohidrodinamik Tak Tunak pada Konveksi Campuran yang Mengalir Melalui Bola Teriris dalam Fluida Kental di Bawah Pengaruh Medan Magnet*, Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [24] Widodo, B., (2012), *Pemodelan Matematika*, ITSPress, Surabaya
- [25] Yasin, S. H. M., Mohamed, M. K. A., Ismail, Z., Widodo, B., Salleh, M. Z., (2021), Numerical Method Approach for Magnetohydrodynamic Radiative Ferrofluid Flows Over a Solid Sphere Surface, *Thermal Science* **25**, 379 – 385, <https://doi.org/10.2298/TSCI21S2379M>
- [26] Yasmin, A., Ali, K., Ashraf, M., (2020), Study of Heat and Mass Transfer in MHD Flow of Micropolar Fluid over a Curved Stretching Sheet, *Scientific Reports* **10**, 4581 – 4590, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61439-8>
- [27] Zainal, F. D., (2016), *Aliran Tak Tunak Konveksi Campuran Pada Fluida Kental Magnetohydrodynamics (MHD) yang Melewati Pelat Datar*, Tesis Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya