

Visualisasi Distribusi Densitas (ρ) Plasma di dalam Tokamak Melalui Persamaan Magnetohidrodinamika Menggunakan Kode BOUT++

Koddam Rukadi Lubis^{1*}, Cecilia Yanuarief¹

¹ Program Studi Fisika, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga, Jl. Marsda Adisucipto 519739, Indonesia

*E-mail: koddam.rukadi@gmail.com

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk memvisualisasikan distribusi densitas plasma di dalam tokamak. Pengambilan data variasi densitas plasma 4 dimensi dilakukan menggunakan kode BOUT++ melalui persamaan magnetohidrodinamika (MHD) dengan variasi waktu $t=30 \mu\text{s}$, $t=40 \mu\text{s}$ dan $t=50 \mu\text{s}$. Data variasi densitas plasma 4 dimensi dikonversi menjadi data variasi densitas plasma 2 dimensi dan ditampilkan dalam bentuk grafik 2 dimensi dan 3 dimensi menggunakan Matlab. Hasil visualisasi grafik menunjukkan bahwa variasi densitas plasma berubah dari waktu ke waktu dan selalu mengarah pada kondisi stabil pada $t=50 \mu\text{s}$.

Kata Kunci: Densitas Plasma, Kode BOUT++, Magnetohidrodinamika, Tokamak

ABSTRACT

This study aims to visualize the distribution of plasma density in the tokamak. Data collection for 4-dimensional plasma density variation was carried out using the BOUT++ code through the magnetohydrodynamic (MHD) equation with time variations $t=30 \text{ s}$, $t=40 \text{ s}$ and $t=50 \text{ s}$. The 4-dimensional plasma density variation data was converted into 2-dimensional plasma density variation data and displayed in the form of 2-dimensional and 3-dimensional graphs using Matlab. The result of graphic visualization shows that the variation of plasma density changes from time to time and always leads to a stable condition at $t=50 \text{ s}$.

Keywords: Plasma Density, BOUT++ Code, Magnetohydrodynamics, Tokamak

Pendahuluan

Sumber energi terbesar yang digunakan manusia saat ini berasal dari energi fosil. Setelah terjadinya krisis energi yang pernah mencapai puncaknya pada dekade 1970-an, ketersediaan energi fosil terus berkurang, khususnya minyak bumi. Minyak bumi menyumbang sekitar 45% dari seluruh energi yang dihasilkan di seluruh dunia, serta merupakan bahan bakar yang memenuhi 96% kebutuhan sektor transportasi dunia [1], [2]. Pada tahun 2050, penduduk dunia mengalami pertumbuhan yang pesat yaitu sebesar lebih dari 9 milyar jiwa dengan perkiraan rentang antara 8 – 10,5 milyar jiwa [3], [4]. Perkiraan pertumbuhan jumlah penduduk tersebut akan menyebabkan peningkatan besar dalam konsumsi energi fosil [5]. Oleh karena itu, inovasi untuk menemukan sumber energi alternatif terus dilakukan oleh para ilmuwan di seluruh dunia salah satunya menggunakan energi nuklir berbasis reaksi fusi [6]–[10].

Reaksi fusi merupakan peristiwa penggabungan dua atau lebih inti atom sebagai bahan bakar membentuk inti atom yang lebih berat [11]. Bahan bakar reaksi fusi yang digunakan dalam reaksi fusi adalah dua inti atom gas hidrogen yakni deuterium dan tritium [12]–[14]. Bahan bakar fusi nuklir sangat berlimpah keberadaannya di bumi. Deuterium dapat diperoleh dari air laut dengan komposisi perbandingan 1 dari setiap 6700 atom, sedangkan tritium dapat diproduksi melalui iradiasi litium [15]–[19]. Melimpahnya sumber bahan bakar reaksi fusi serta keuntungan dari penggunaannya yang dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama, membuat para ilmuwan nuklir dunia begitu antusias untuk terus mengembangkan penelitian.

Penelitian pengembangan reaktor nuklir berbasis reaksi fusi yang sedang dilakukan adalah dengan memanfaatkan teknologi plasma di dalam reaktor Tokamak [20], [21]. Untuk mendapatkan kondisi plasma, bahan bakar reaksi fusi yaitu deuterium dan tritium dipanaskan hingga suhu yang sangat tinggi mencapai lebih dari 100 juta derajat celcius yang dikontrol menggunakan medan magnet yang kuat [14], [20], [22], [23]. Setelah terbentuk plasma bahan bakar, proses selanjutnya adalah penggabungan plasma-plasma bahan bakar sehingga terbentuk inti helium dan neutron dengan sebagian kecil massa diubah menjadi energi nuklir fusi [24]. Distribusi plasma bahan bakar di dalam Tokamak tersebut dianalisis menggunakan persamaan magnetohidrodinamika (MHD).

Persamaan MHD digunakan untuk menganalisis pergerakan gelombang dan plasma di dalam pengaruh medan magnet [25], [26]. Persamaan MHD merupakan penggabungan persamaan Navier-Stokes dan Maxwell melalui gaya Lorentz dan hukum Ohm sehingga persamaan ini dapat digunakan untuk menghitung dinamika aliran plasma [27], [28]. Persamaan MHD yang digunakan sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla \rho - \rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla \rho - \gamma \rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \nabla p \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (4)$$

dengan ρ sebagai densitas (kg/m^3), t sebagai waktu (μs), \mathbf{v} sebagai kecepatan m/s , Turunan parsial $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ mengacu kepada perubahan densitas terhadap waktu dalam satu ruang, p adalah tekanan (*pascal*), \mathbf{B} adalah medan magnet (*Tesla*) yang bekerja pada persamaan konservasi momentum sesuai dengan fluida dengan tiga gaya yang berinteraksi, yakni gradien tekanan ∇p , gaya magnet $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, dan gaya inersia $\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$. Dalam menggambarkan dinamika aliran plasma

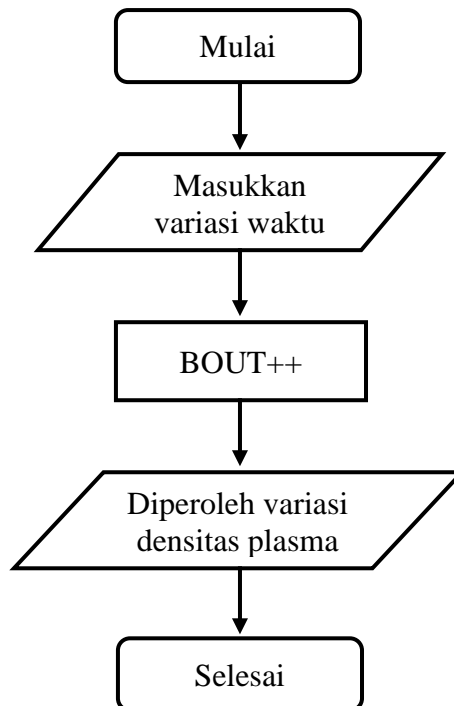
menggunakan persamaan MHD tersebut secara lebih lanjut dilakukan dengan melakukan simulasi menggunakan kode BOUT++.

Kode BOUT++ merupakan kode modular yang mensimulasikan persamaan fluida 3 dimensi dalam koordinat lengkung [29]. Kode BOUT++ ditujukan untuk mensimulasikan *Edge Localized Modes* (ELMs) plasma dalam geometri titik-x pada Tokamak [30], [31]. Kode ini mampu mensimulasikan berbagai model fluida bermagnet dan tidak termagnetisasi serta melibatkan sejumlah medan skalar dan vektor yang berubah-ubah dalam berbagai geometri [29]. Oleh karena itu, kode BOUT++ dapat digunakan untuk memvisualisasikan aliran plasma di dalam tokamak dengan parameter fisis berupa densitas.

Metode Penelitian

Prosedur dalam simulasi kode BOUT++ untuk menentukan nilai distribusi densitas plasma di dalam tokamak diawali dengan pengambilan data variasi densitas yang diperoleh atau diunduh dari server BOUT++ laboratorium plasma dan fusi, *Prince of Songkla University*, Thailand menggunakan *software TeamViewer*. Tahap pertama dalam pengambilan data variasi densitas adalah masuk ke dalam kode BOUT++ dengan terlebih dahulu memasukkan *username* dan *password* yang telah ditentukan kedalam menu *partner id.* pada menu utama *TeamViewer*. Setelah masuk ke dalam kode BOUT++, tahap berikutnya adalah membuka *terminal* pada *folder* tempat aplikasi BOUT++ tersimpan. Pada *terminal* BOUT++, dilakukan tahap simulasi efek densitas pada plasma melalui persamaan MHD sesuai dengan variasi waktu yang ditentukan yaitu $t=30 \mu\text{s}$, $t=40 \mu\text{s}$ dan $t=50 \mu\text{s}$.

Setelah data variasi densitas diperoleh, selanjutnya data variasi densitas akan ditampilkan oleh *terminal* program BOUT++ yang dijalankan dengan jumlah data sebanyak variasi waktu yang telah ditentukan. Selain untuk menampilkan data variasi densitas, proses ini juga bertujuan untuk merekam semua data simulasi yang dijalankan oleh kode BOUT++ yang akan disimpan ke dalam *file log* sebagai referensi pada pengambilan data variasi densitas berikutnya. Prosedur pengambilan data variasi densitas tersebut dapat dilihat dalam diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 1.

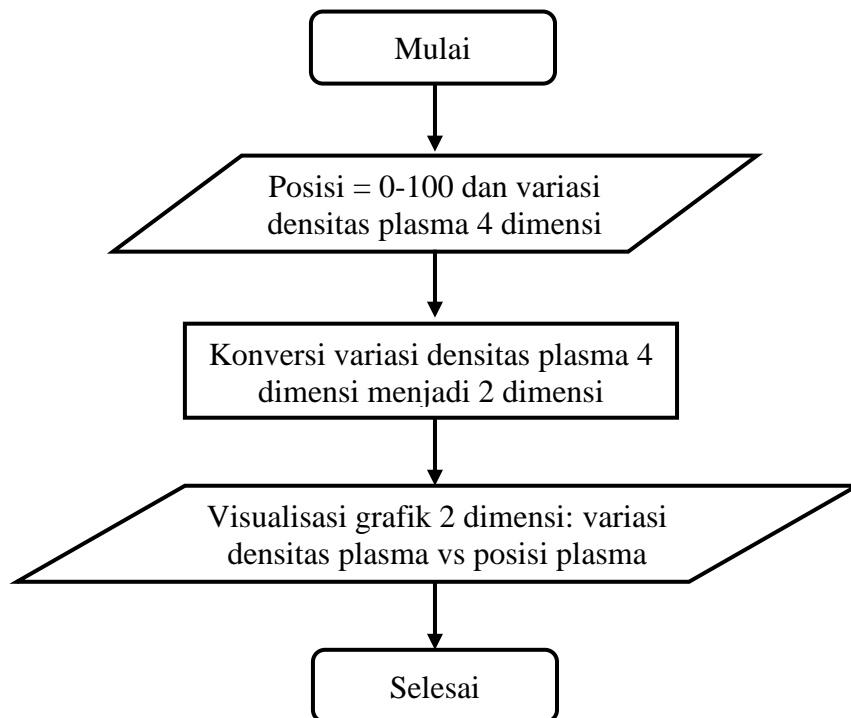


Gambar 1. Diagram alir pengambilan data variasi densitas plasma dengan kode BOUT++

Data variasi densitas plasma dari terminal BOUT++ masih berupa data kuantitatif yang jumlahnya banyak dan belum dapat dianalisis, sehingga perlu diolah kedalam visualisasi grafik. Grafik divisualisasikan dalam bentuk dua dimensi yang menghubungkan variasi densitas plasma terhadap posisi plasma di dalam Tokamak. Proses visualisasi grafik variasi densitas plasma terhadap posisi plasma di dalam Tokamak dilakukan dengan menggunakan *software* matlab 2017b dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Input data variasi densitas plasma untuk diproses pada matlab melalui perintah `<ncdisp('BOUT.dmp.30.nc')>`. `<ncdisp('BOUT.dmp.30.nc')>`. Data variasi densitas plasma masih dalam bentuk 4 dimensi.
2. Membaca data variasi densitas plasma 4 dimensi melalui perintah `<ncread('BOUT.dmp.30.nc','density')>`.
3. Mengubah data variasi densitas plasma 4 dimensi menjadi bentuk 2 dimensi melalui perintah `<dd=reshape(d,68,131,31)>`. `<dd=reshape(d,68,132,31)>` sehingga data variasi densitas plasma lebih mudah dianalisis.
4. Menampilkan grafik 2 dimensi melalui perintah `<plot(dd(:,end))>`. `<plot(dd(:,end))>`.

Prosedur visualisasi grafik variasi densitas plasma terhadap posisi plasma di dalam Tokamak tersebut dapat dilihat dalam diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 2.

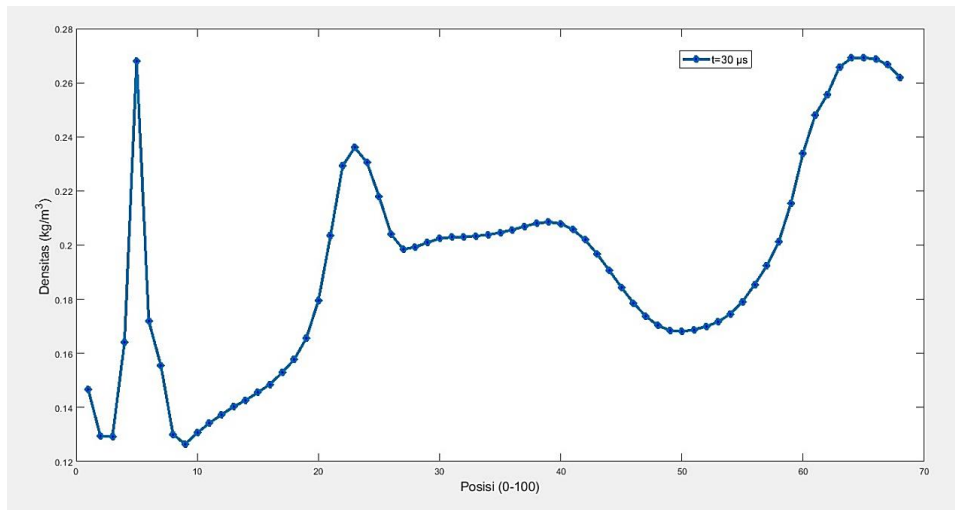


Gambar 2. Diagram alir visualisasi grafik variasi densitas plasma terhadap posisi plasma

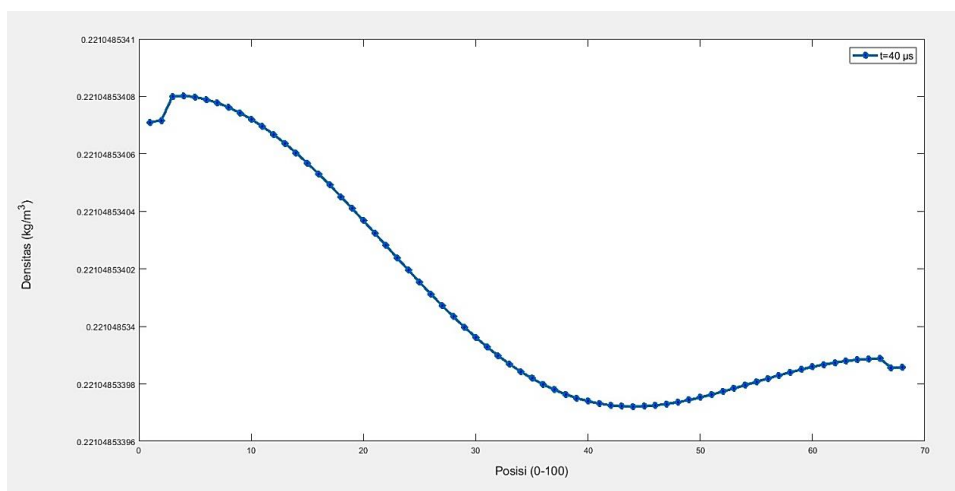
Hasil dan Pembahasan

Hasil visualisasi Grafik 2 dimensi variasi densitas plasma terhadap posisi plasma di dalam Tokamak ditunjukkan pada Gambar 3.

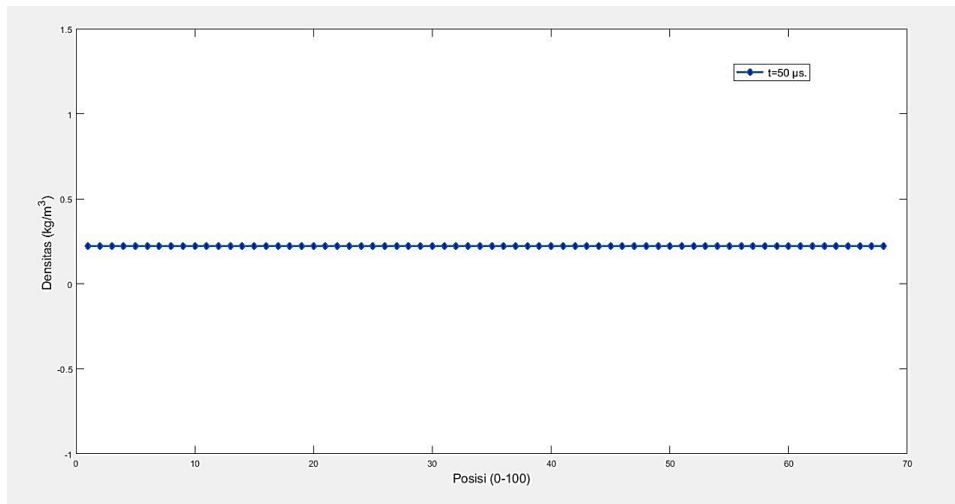
a.



b.



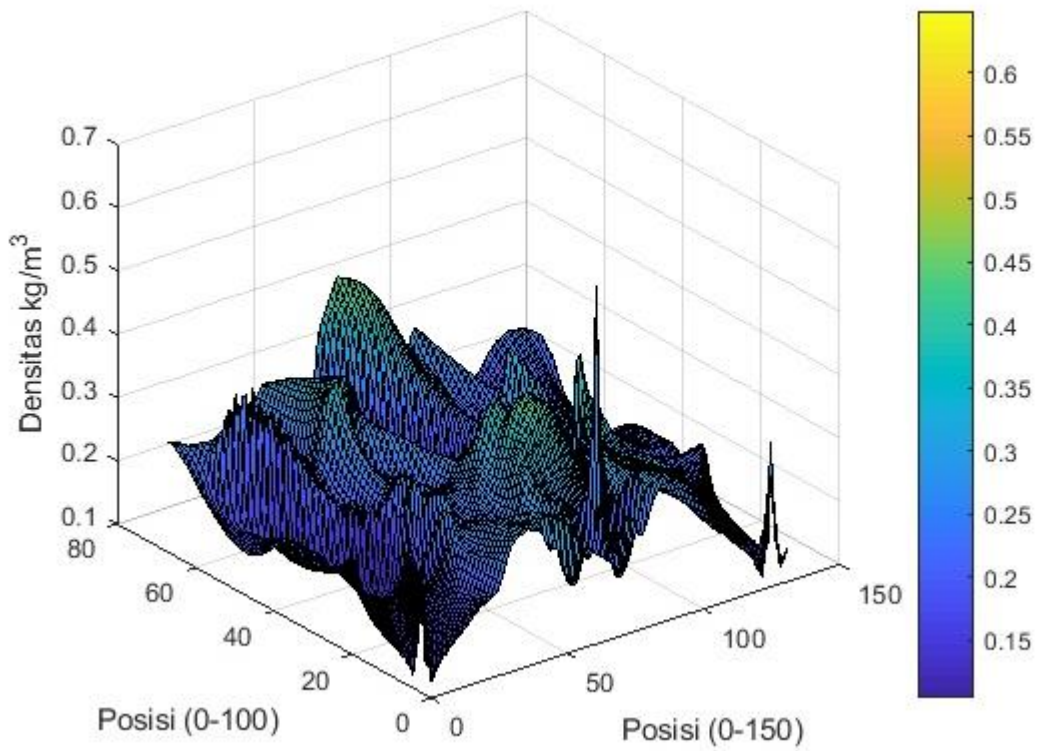
c.



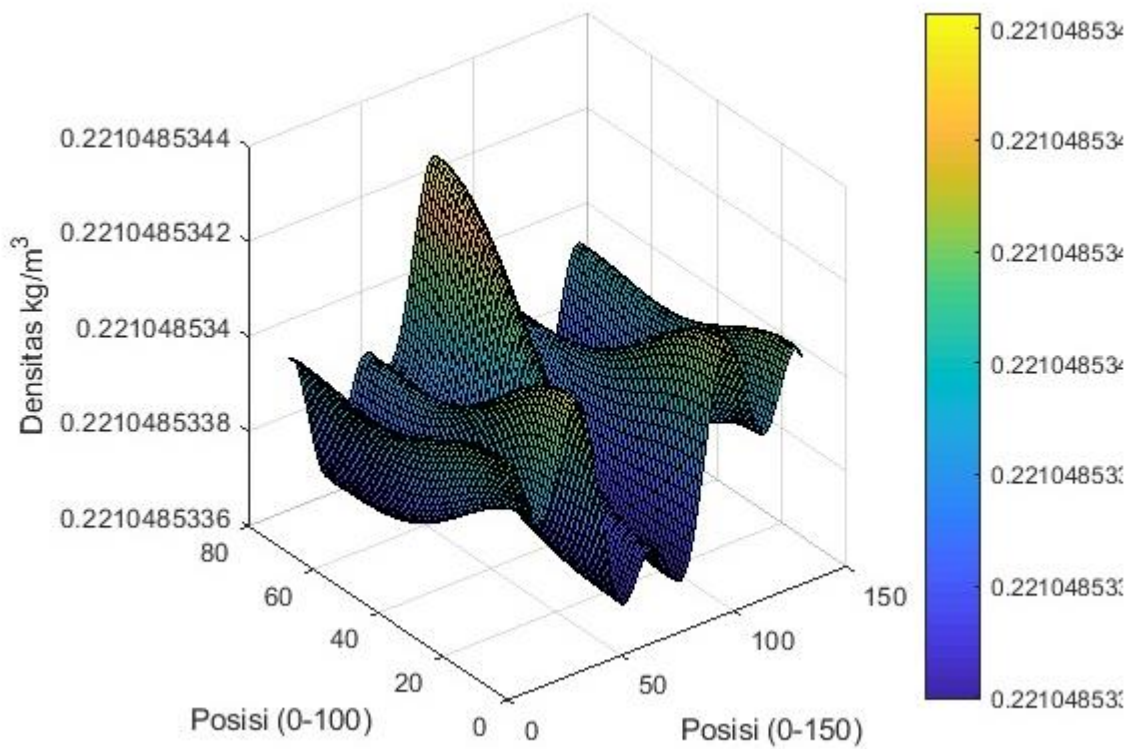
Gambar 3. Visualisasi grafik 2 dimensi variasi densitas plasma terhadap posisi plasma pada saat (a) $t = 30 \mu s$, (b) $t = 40 \mu s$ dan (c) $t = 50 \mu s$

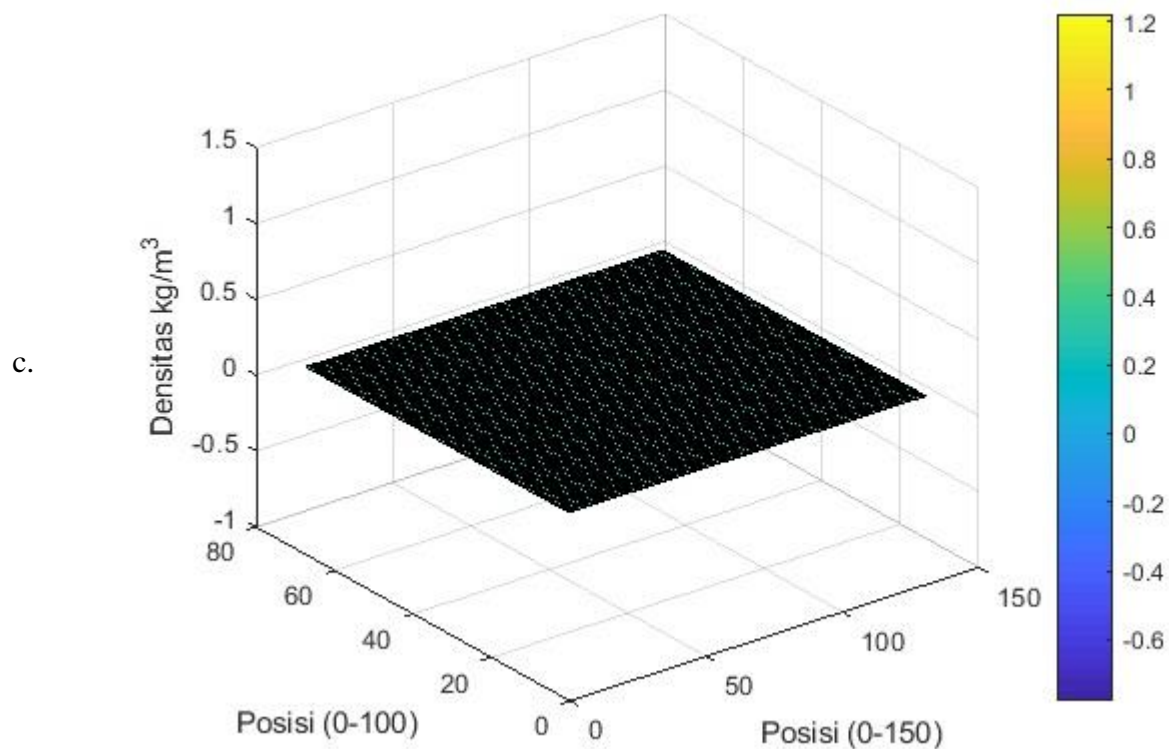
Hasil visualisasi Grafik 3 dimensi variasi densitas plasma terhadap posisi plasma di dalam Tokamak ditunjukkan pada Gambar 4.

a.



b.





Gambar 4. Visualisasi grafik 3 dimensi variasi densitas plasma terhadap posisi plasma pada saat (a) $t = 30 \mu s$, (b) $t = 40 \mu s$ dan (c) $t = 50 \mu s$.

Gambar 3(a) dan 4(a) dengan waktu $t = 30 \mu s$ dan posisi sebesar 100. Posisi merepresentasikan keberadaan suatu titik terhadap titik lainnya yang menghasilkan suatu lintasan plasma di dalam tokamak yang berbentuk lengkung seperti donat. Perpindahan posisi dapat dituliskan sebagai $\Delta r = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$. \hat{i} , \hat{j} dan \hat{k} adalah vektor satuan dalam arah x , y dan z . Dari gambar 3(a), nilai variasi densitas plasma terdeteksi pada posisi 1-70 dengan distribusi densitas plasma yang fluktuatif. Kondisi fluktuatif tersebut disebabkan oleh suhu ruang di dalam tokamak yang belum merata pada awal saat deuterium dan tritium mulai bergerak di dalam tokamak. Selain dipengaruhi oleh faktor suhu, kondisi tersebut juga dipengaruhi oleh faktor arus plasma dan medan magnet yang masih belum stabil.

Gambar 3(b) dan 4(b) dengan waktu $t = 40 \mu s$ dan posisi sebesar 100 menunjukkan visualisasi distribusi variasi densitas plasma di dalam tokamak dengan hasil visualisasi grafik yang lebih homogen. Perubahan homogenitas densitas plasma tersebut disebabkan oleh suhu ruang di dalam tokamak mulai merata ketika deuterium dan tritium bergerak selama $t = 40 \mu s$. Namun faktor arus plasma dan medan magnet masih belum stabil.

Gambar 3(c) dan 4(c) dengan waktu $t = 50 \mu s$ dan posisi sebesar 100 menunjukkan visualisasi distribusi variasi densitas plasma di dalam tokamak dengan hasil visualisasi grafik yang paling homogen. Kondisi homogen tersebut dikarenakan suhu ruang di dalam tokamak telah terdistribusi merata dengan nilai densitas plasma sebesar $0,221048 (kg/m^3)$. Dari hasil variasi waktu $t = 30 \mu s$, $t = 40 \mu s$ dan $t = 50 \mu s$ menunjukkan bahwa distribusi densitas plasma di dalam tokamak akan semakin homogen seiring dengan bertambahnya waktu dan menjadi konstan setelah $t=50 \mu s$. Homogenitas nilai densitas plasma di dalam tokamak ini

memberikan peluang tumbukan atau reaksi fusi yang sama besar antar plasma deuterium dan tritium.

Jika ditinjau dari persamaan MHD saat terjadi kesetimbangan statis atau homogenitas, gaya magnet $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ menyeimbangkan gradient tekanan ∇p , sehingga membatasi plasma. Gaya inersia $\rho \frac{\partial v}{\partial t}$ merupakan hasil kali antara densitas dengan percepatan plasma. Pengaruh kecepatan pada plasma adalah semakin besar kecepatan diberikan, maka semakin tinggi laju pencapaian reaksi fusi yang dihasilkan dan tentunya melepaskan lebih banyak energi. Oleh karena itu, kemungkinan tumbukan dan energi yang dihasilkan semakin besar.

Kesimpulan dan Saran

Distribusi densitas plasma di dalam tokamak telah berhasil divisualisasikan menggunakan variasi waktu $t = 30 \mu s$, $t = 40 \mu s$ dan $t = 50 \mu s$ dan posisi 0-100. Hasil visualisasi grafik menunjukkan bahwa variasi densitas plasma berubah dari waktu ke waktu dan selalu mengarah pada kondisi stabil mulai $t = 50 \mu s$ dengan nilai densitas plasma sebesar $0,221048 (kg/m^3)$.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada Pusat Riset Plasma dan Tokamak *Prince of Songkla University*, Thailand atas akses data kode BOUT++.

Daftar Rujukan

- [1] L. Parinduri dan T. Parinduri, "Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan," JET (Journal Electr. Technol., vol. 5, no. 2, hal. 88–92, 2020.
- [2] E. Liun dan Sunardi, "Perbandingan Harga Energi Dari Sumber Energi Baru Terbarukan Dan Fosil," J. Pengemb. Energi Nukl., vol. 16, no. March, hal. 119–130, 2014.
- [3] N. Kusuma, "Hubungan Antara Metode dan Lama Pemakaian dengan Keluhan Kesehatan Subyektif pada Akseptor," J. Berk. Epidemiol., vol. 4, no. 2, hal. 164–175, 2016.
- [4] I. Prasetyani dan D. Widiyanto, "Strategi Menghadapi Ketahanan Pangan (Dilihat Dari Kebutuhan Dan Ketersediaan Pangan) Penduduk Indonesia di Masa Mendatang (Tahun 2015-2040)," UGM J., vol. 10, no. 2, hal. 227–235, 2015.
- [5] Y. Afriyanti, H. Sasana, dan G. Jalunggono, "Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Konsumsi Energi Terbarukan di Indonesia," Dir. J. Econ., vol. 2, no. 3, hal. 865–884, 2018.
- [6] I. Kholiq, "Pemanfaatan Energi Alternatif sebagai Energi Terbarukan untuk mendukung Substitusi BBM," J. IPTEK, vol. 19, no. 2, hal. 75–91, 2015.
- [7] Sunardi, D. H. Salimy, E. Liun, dan S. M. Lumbanraja, "Energi Nuklir sebagai Sumber Energi Panas Alternatif pada Kilang Minyak," J. Pengemb. Energi Nukl., vol. 14, no. March, hal. 85–94, 2012.
- [8] J. M. Pearce, "Limitations of nuclear power as a sustainable energy source," Sustainability, vol. 4, no. 6, hal. 1173–1187, 2012.
- [9] F. I. T. Petrescu et al., "Environmental Protection through Nuclear Energy," vol. 13, no. 9, hal. 941–946, 2016.
- [10] T. Hamacher, M. Huber, J. Dorfner, K. Schaber, dan A. M. Bradshaw, "Nuclear fusion and renewable energy forms: Are they compatible?," Fusion Eng. Des., vol. 88, no. 6, hal. 657–660, 2013.
- [11] K. Miyamoto, Plasma physics for nuclear fusion. 1980.
- [12] J. E. T. Team, "Fusion energy production from a deuterium-tritium plasma in the JET tokamak," Nucl. Fusion, vol. 32, no. 2, hal. 187–203, 1992.
- [13] R. J. Hawryluk, "Results from deuterium-tritium tokamak confinement experiments," Rev. Mod. Phys., vol. 70, no. 2, hal. 537–587, Apr 1998.
- [14] J. D. Strachan et al., "Fusion power production from TFTR plasmas fueled with deuterium and tritium," Phys. Rev. Lett., vol. 72, no. 22, hal. 3526–3529, 1994.
- [15] R. Uemura, Y. Matsui, K. Yoshimura, H. Motoyama, dan N. Yoshida, "Evidence of deuterium excess in water vapor as an indicator of ocean surface conditions," J. Geophys. Res. Atmos., vol. 113, no. 19, hal. 1–10, 2008.

- [16] R. Uemura, N. Yoshida, N. Kurita, M. Nakawo, dan O. Watanabe, "An observation-based method for reconstructing ocean surface changes using a 340,000-year deuterium excess from the Dome Fuji ice core, Antarctica," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, no. 13, hal. 2–5, 2004.
- [17] R. Dierckx, "Direct tritium production measurement in irradiated lithium," *Nucl. Instruments Methods*, vol. 107, no. 2, hal. 397–398, 1973.
- [18] T. Hoshino et al., "Development of advanced tritium breeding material with added lithium for ITER-TBM," *J. Nucl. Mater.*, vol. 417, no. 1, hal. 684–687, 2011.
- [19] R. L. Macklin dan H. E. Banta, "Tritium Production from Lithium by Deuteron Bombardment," *Phys. Rev.*, vol. 97, no. 3, hal. 753–757, Feb 1955.
- [20] R. J. BICKERTON, J. W. CONNOR, dan J. B. TAYLOR, "Diffusion Driven Plasma Currents and Bootstrap Tokamak," *Nat. Phys. Sci.*, vol. 229, no. 4, hal. 110–112, 1971.
- [21] V. S. Mukhovatov dan V. D. Shafranov, "Plasma equilibrium in a Tokamak," *Nucl. Fusion*, vol. 11, no. 6, hal. 605–633, 1971.
- [22] G. Taylor, J. D. Strachan, R. V Budny, dan D. R. Ernst, "Fusion Heating in a Deuterium-Tritium Tokamak Plasma," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 15, hal. 2722–2725, Apr 1996.
- [23] E. F. Jaeger et al., "Simulation of high-power electromagnetic wave heating in the ITER burning plasma," *Phys. Plasmas*, vol. 15, no. 7, hal. 72513, Jul 2008.
- [24] A. Pospieszczyk, G. Chevalier, Y. Hirooka, R. W. Conn, R. Doerner, dan L. Schmitz, "Helium line emission measurements in PISCES-B as a tool for Te-profile determinations in tokamak boundary plasmas," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 72, no. 2, hal. 207–223, 1992.
- [25] O. A. Bég, L. Sim, J. Zueco, dan R. Bhargava, "Numerical study of magnetohydrodynamic viscous plasma flow in rotating porous media with Hall currents and inclined magnetic field influence," *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, vol. 15, no. 2, hal. 345–359, 2010.
- [26] A. J. Webster, "Magnetohydrodynamic tokamak plasma edge stability," *Nucl. Fusion*, vol. 52, no. 11, hal. 114023, 2012.
- [27] D. Arsénio, S. Ibrahim, dan N. Masmoudi, "A Derivation of the Magnetohydrodynamic System from Navier–Stokes–Maxwell Systems," *Arch. Ration. Mech. Anal.*, vol. 216, no. 3, hal. 767–812, 2015.
- [28] R. J. Thompson dan T. M. Moeller, "A Maxwell formulation for the equations of a plasma," *Phys. Plasmas*, vol. 19, no. 1, hal. 10702, Jan 2012.
- [29] B. D. Dudson, M. V Umansky, X. Q. Xu, P. B. Snyder, dan H. R. Wilson, "BOUT++: A framework for parallel plasma fluid simulations," *Comput. Phys. Commun.*, vol. 180, no. 9, hal. 1467–1480, 2009.
- [30] B. D. Dudson et al., "BOUT++: Recent and current developments," *J. Plasma Phys.*, vol. 81, no. 1, hal. 365810104, 2015.
- [31] X. Q. Xu et al., "Simulations of tokamak boundary plasma turbulence transport in setting the divertor heat flux width," *Nucl. Fusion*, vol. 59, no. 12, hal. 126039, 2019.