

PEMODELAN GENERATOR PLASMA HIDROGEN FREKUENSI GELOMBANG MIKRO TEKANAN ATMOSFIR

Reeky Fardinata*, Saktioto, Rakhmawati Farma

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau

*E-mail korespondensi: reekyfardi@gmail.com

ABSTRACT

The model used in this work is a two-dimensional fluid plasma model coupled with Maxwell equations at atmospheric pressure. The model was created by applying different plasma torch parameters using the finite element approach. Three separate stages of the numerical modeling were used to show how the increase in electron density increases with time. It may be inferred from the molecular ion distribution features that the torch's quartz tube's port, which is larger than the tube's center, is where the molecular ions are primarily disseminated. Reduced pressure and the calculated distance from the port to the center of the quartz tube result in a drop in the density ratio of molecular ions to electrons. The research on microwave plasma properties revealed that atmospheric pressure is important for modeling and developing plasma sources, particularly for the conversion of carbon dioxide.

Keywords: Atmospheric Pressure, Electron Density, Energy, Modeling, Plasma Microwave.

ABSTRAK

Model yang digunakan dalam pekerjaan ini adalah model plasma fluida dua dimensi yang digabungkan dengan persamaan Maxwell pada tekanan atmosfer. Model dibuat dengan menerapkan parameter obor plasma yang berbeda menggunakan pendekatan elemen hingga. Tiga tahap terpisah dari pemodelan numerik digunakan untuk menunjukkan bagaimana peningkatan kerapatan elektron meningkat seiring waktu. Ini dapat disimpulkan dari fitur distribusi ion molekuler bahwa port tabung kuarsa obor, yang lebih besar dari pusat tabung, adalah tempat ion molekuler terutama disebarluaskan. Tekanan yang berkurang dan jarak yang dihitung dari pelabuhan ke pusat tabung kuarsa menghasilkan penurunan rasio kerapatan ion molekuler terhadap elektron. Penelitian tentang sifat plasma gelombang mikro mengungkapkan bahwa tekanan atmosfer penting untuk pemodelan dan pengembangan sumber plasma, terutama untuk konversi karbon dioksida.

Kata kunci: Tekanan Atmosfir, Densitas Elektron, Energi, Pemodelan, Plasma Gelombang Mikro.

Diterima 11-11-2022 | Disetujui 09-06-2023 | Dipublikasi 30-11-2023

PENDAHULUAN

Aplikasi untuk teknologi plasma meliputi pengolahan bahan [1], pembersihan volume gas [2], penciptaan sumber ion [3], dan pencahayaan plasma [4,5]. Fakta bahwa sumber plasma dapat menghasilkan densitas tinggi dan kerapatan fluks foton dan radikal dalam produk berbasis plasma menjelaskan keberhasilan teknologi plasma.

Gelombang mikro menghasilkan efisiensi energi yang sangat baik, mereka memiliki

kualitas unik yang telah menarik lebih banyak perhatian pada pandu gelombang berbasis plasma selama sepuluh tahun terakhir. Karena plasma yang dibuat biasanya memiliki nilai kepadatan tinggi tanpa perlu menyerap banyak daya, gelombang mikro memiliki banyak sifat induktif. Frekuensi gelombang mikro 2,45 GHz dapat membantu pemecahan karbon dioksida dan pembentukan hidrogen, yang merupakan komponen bahan bakar di bawah tekanan atmosfer [6,7].

Studi numerik plasma gelombang mikro atau *microwave induced plasmas* telah membantu pengembangan eksperimental sehingga menguntungkan kemajuan penelitian plasma berbasis gelombang mikro [8-12]. Teknik yang sangat penting untuk melakukan pemodelan plasma adalah dinamika plasma, termodinamika, reaksi kimia, kesetimbangan, dan efek elektromagnetik [13-15].

Studi pemodelan adalah solusi praktis untuk masalah yang dihadapi. Model yang akurat sangat diperlukan untuk memahami dan mengadaptasi plasma hidrogen sebelum melakukan penyelidikan eksperimental kuantitatif untuk konsentrasi atom H. Pemodelan plasma hidrogen oleh gelombang mikro lebih banyak dalam pengembangannya dibandingkan penelitian yang dilakukan [16].

TINJAUAN PUSTAKA

Persamaan Model Plasma

Vektor medan listrik, koefisien difusi elektron, dan mobilitas elektron berdampak pada kerapatan elektron dan energi kerapatan elektron selama proses difusi-konveksi plasma dan reaksi plasma. Persamaan (1) dan (2) menggambarkan variasi kerapatan elektron terhadap waktu dan ruang, sedangkan Persamaan (3) dan (4) menjelaskan variasi energi kerapatan elektron melintasi ruang dan waktu. Persamaan menggambarkan bagaimana rumus drift-menggunakan dapat digunakan untuk mewakili laju perubahan kerapatan elektron:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + (u \cdot \nabla)n_e + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e \quad (1)$$

$$\Gamma_e = -(-\mu_e \cdot E)n_e - D_e \cdot \nabla n_e \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(n_e) + \nabla \cdot \Gamma_e + E \cdot \Gamma_e = R_e - (u \cdot \nabla)n_e \quad (3)$$

$$\Gamma_e = -(-\mu_e \cdot E)n_e - D_e \cdot \nabla n_e \quad (4)$$

Simbol n_e , μ_e , n_e , μ_e , dan u masing-masing mewakili kerapatan elektron, perpindahan elektron, kerapatan energi elektron, transfer energi elektron, dan vektor kecepatan fluida. Simbol Γ_e dan Γ_e , masing-masing mewakili fluks elektron dan fluks energi elektron. Simbol D_e menunjukkan koefisien difusi elektron, D_e untuk difusivitas energi elektron, R_e dan R_e masing-masing mewakili ekspresi laju elektron

dan keuntungan atau kerugian energi sebagai akibat dari tumbukan tidak meminjamkan [17].

Persamaan Fluida

Persamaan (5) dan (6) merupakan, kontinuitas massa dan persamaan Navier-Stokes yang digunakan untuk menentukan aliran gas dalam tabung kuarsa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \nabla [\mu(\nabla u + (\nabla u)T) - 2\mu(\nabla \cdot u)\mathbf{I}] + F \quad (6)$$

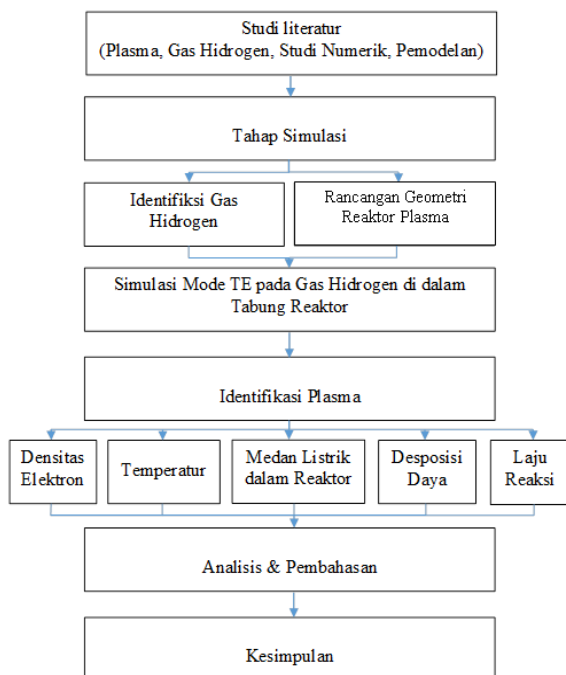
$$F = \frac{\mu_0}{2} R_e (\sigma E \times H^*) \quad (7)$$

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuantitatif dengan alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari gelas ukuran 500 ml, pH meter digital, TDS/EC meter, multimeter digital, kabel penjeit buaya, wadah akrilik ukuran $12 \times 5 \times 7$ (cm), blender. Tekanan, densitas massa, viskositas dinamis, dan satuan tensor masing-masing diwakili oleh simbol p , ρ , μ , dan \mathbf{I} [18]. F adalah persamaan

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\sigma_k \nabla T) + Q_{el} + Q_w \quad (8)$$

Simbol C_p , σ_k , Q_{el} , dan Q_w mewakili kapasitas panas spesifik, konduktivitas termal, perolehan energi akibat tumbukan elastis antara partikel berat dan elektron, dan pelepasan panas karena tumbukan non-elektronik.

METODE PENELITIAN



Gambar 1. Prosedur penelitian.

Metode dalam penelitian ini, menggunakan aproksimasi fluida yang digunakan untuk menggabungkan persamaan Boltzmann dengan persamaan Maxwell guna menghitung densitas partikel bermuatan, temperatur elektron, dan

gaya Lorentz, di mana H^* adalah konjugat kompleks dari H .

Perpindahan Panas

Temperatur gabungan T diambil dari spesies berat, termasuk ion dan atom netral yang dinyatakan sebagai temperatur umum. Tingkat perubahan energi partikel berat dijelaskan oleh Persamaan (8):

medan elektromagnetik. Persamaan Boltzmann merujuk pada perubahan persamaan distribusi kecepatan ion $f(r, v, t)$ dengan waktu, dimana v adalah kecepatan, r adalah posisi, dan t adalah waktu. Fungsi distribusi energi elektron dimasukkan ke dalam persamaan Boltzmann untuk menyelesaikan koefisien transpor elektron.

Reaksi Plasma

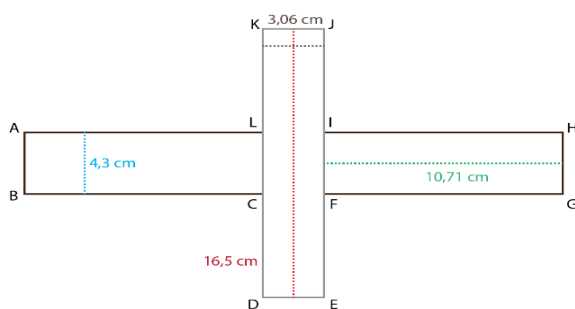
Plasma direpresentasikan sebagai fluida yang terdiri dari elektron, ion dan atomik. Reaksi plasma yang terlibat meliputi: eksitasi, ionisasi, elastik, super elastik, ionisasi, *association mutual*, dan netralisasi (lihat pada Tabel 1).

Desain Reaktor Plasma

Model reaktor yang dikembangkan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2. Pemandu gelombang persegi panjang memiliki ukuran penampang $AB = 4,3$ cm, $IH = 10,71$ cm, dan diameter tabung 3,06 cm pada bidang xy . Tabung kuarsa tertutup dalam sangkar logam silinder yang dirancang untuk menjadi konduktor listrik yang ideal untuk mencegah kebocoran gelombang mikro. Suhu gas awal adalah 11604 K, kerapatan elektron awal adalah 10^{16} m^{-3} , energi elektron rata-rata asli adalah 2,67 eV, dan potensial pertama adalah 0 V. Tekanan di dalam tabung kuarsa adalah 1 atm.

Tabel 1. Reaksi plasma hidrogen [18-22].

| Reaksi | Tumbukan | Parameter |
|---|--------------------|---|
| $e + H \rightarrow e + H$ | Elastik | $M_r = 54,869 \times 10^{-5}$ |
| $e + H \rightarrow e + e + H^+$ | Ionisasi | $\Delta E = 13,61 \text{ eV}$ |
| $e + H_2 \rightarrow e + H + H$ | Eksitasi | $\Delta E = 13 \text{ eV}$ |
| $e + H_2 \rightarrow e + H_2$ | Elastik | $M_r = 27,4348 \times 10^{-5}$ |
| $e + H_2 \rightarrow e + e + H_2^+$ | Ionisasi | $\Delta E = 15,4 \text{ eV}$ |
| $e + H_2 \rightarrow e + H_2 \text{ (rot)}$ | Eksitasi | $\Delta E = 4.3928 \times 10^{-2} \text{ eV}$ |
| $e + H_2 \rightarrow e + H_2 \text{ (V1)}$ | Eksitasi | $\Delta E = 0,516 \times 10^{-2} \text{ eV}$ |
| $e + H_2 \rightarrow e + H + H$ | Eksitasi | $\Delta E = 13 \text{ eV}$ |
| $H + H^- \rightarrow H_2$ | Asosiasi | $K^f = 1,8 \times 10^{-9} \text{ (m}^3/\text{s.mol)}$ |
| $H^+ + H^- \rightarrow H_2 + e$ | Netralisasi mutual | $K^f = 4 \times 10^{-7} \text{ (m}^3/\text{s.mol)}$ |



Gambar 2. Desain reaktor plasma.

Kepadatan partikel bermuatan, suhu elektron, dan medan elektromagnetik dihitung dalam penelitian ini menggunakan pendekatan fluida untuk menggabungkan persamaan Boltzmann dengan persamaan Maxwell.

Persamaan Boltzmann, di mana v adalah kecepatan, r adalah lokasi, dan t adalah waktu, menggambarkan perubahan dalam persamaan distribusi kecepatan untuk ion $f(r, v, t)$ terhadap waktu. Persamaan ini dimodifikasi untuk memasukkan fungsi distribusi energi elektron untuk menemukan koefisien transpor elektron.

Kondisi Batas

Kondisi batas diperlukan untuk membatasi kejadian dalam plasma saat disimulasikan agar tidak terlalu jauh dari yang seharusnya. Kondisi batas untuk simulasi generator plasma gelombang mikro ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kondisi batas.

| Boundary | Plasma |
|------------------------|--|
| BA, BC, FG, AL, IH, GH | $n \times E = 0$ |
| GH | P_{in} |
| KJ | $-n \cdot \Gamma_e = 0 \quad -n \cdot \Gamma_\Delta = 0 \quad nJ_k = 0 \quad n \cdot \epsilon_0 \epsilon_{rp} E = 0$ |
| DE | $-n \cdot \Gamma_e = 0 \quad -n \cdot \Gamma_\Delta = 0 \quad nJ_k = 0 \quad n \cdot \epsilon_0 \epsilon_{rp} E = 0$ |
| DK, EJ | $-n \cdot q = 0 \quad -n \cdot q = 0 \quad V = 0$ |
| KJ | u_{in} |
| DE | P_0 |
| DK, EJ | $u = 0$ |
| KJ | $T = T_0$ |
| DE | $-n \cdot q = q_0, q_0 = h(T_{ext} - T)$ |
| DEDK, EJ | $-n \cdot q = 0$ |

HASIL DAN PEMBAHASAN

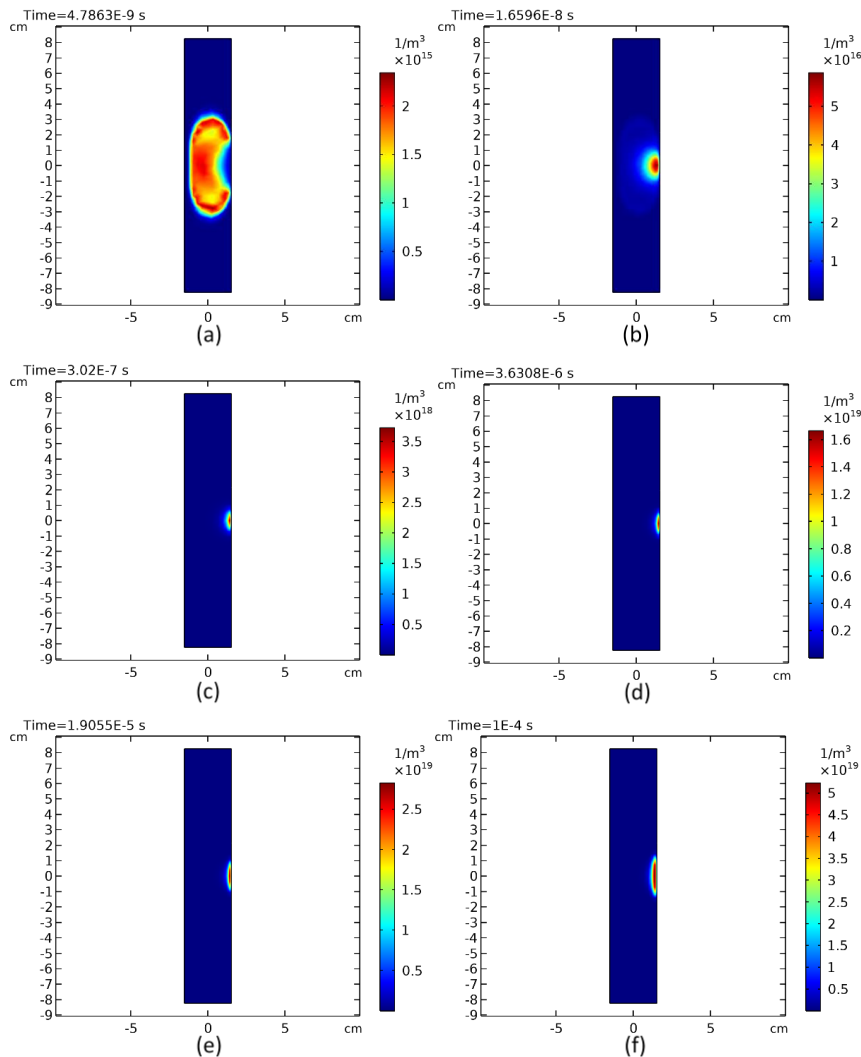
Kerapatan Elektron

Profil distribusi spasial elektron dalam tabung diilustrasikan pada Gambar 3. Rentang

waktu analisis diambil dari 0 s hingga 10^{-4} s, dimana kerapatan elektron meningkat dari kondisi awal 10^{12} m^{-3} menjadi $5,24 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ untuk nilai maksimum.

Kerapatan elektron di situs plasma memiliki distribusi yang dekat dengan Gaussian, yaitu menuju pusat area, kerapatan elektron rata-rata

yang ditentukan dari model diperoleh dengan mengintegrasikan distribusi radial kerapatan elektron di atas penampang tabung.

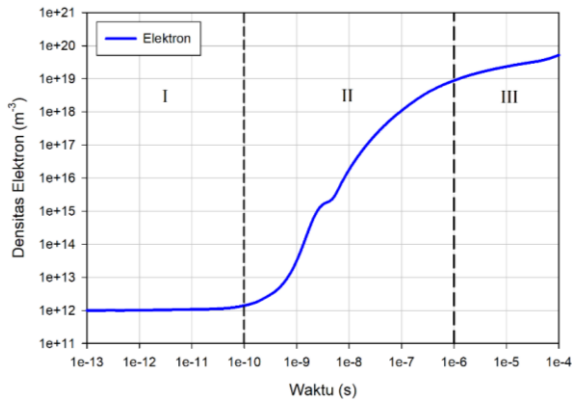


Gambar 3. Profil distribusi densitas elektron (m^{-3}) dalam tabung pada sumbu xy (a) 10^{-9} s, (b) 10^{-8} s, (c) 10^{-7} s, (d) 10^{-6} s, (e) 10^{-5} s, dan (f) 10^{-4} s.

Peningkatan kerapatan elektron disebabkan karena elektron 1000 – 10.000 kali lebih ringan dari partikel berat (ion) sehingga elektron dapat memperoleh energi lebih dari medan elektromagnetik yang diberikan. Elektron yang dipercepat oleh medan elektromagnetik mentransfer energinya ke ion melalui tumbukan, dan dipercepat dalam medan yang diciptakan oleh gelombang mikro menggunakan pergeseran fase tumbukan. Frekuensi tumbukan meningkat dari 88,5 menjadi 93,2 GHz, menyebabkan elektron terganggu dalam perilaku kolektifnya sehingga energi dapat ditransfer dalam plasma. Rapat

elektron mulai mengalami kesetimbangan setelah berada pada rentang waktu 10^{-6} s, dimana rapat elektron tetap pada 10^{19} m^{-3} .

Tren pertumbuhan kerapatan elektron dalam tabung kuarsa dapat dibagi menjadi tiga tahap selama proses eksitasi (lihat Gambar 4). Tahap pertama dari proses eksitasi adalah pada awal tumbukan, yaitu pada $10^{-13} - 10^{-11}$ s. Fase awal ini disebabkan karena adanya penghalang potensial dalam plasma, gangguan dari faktor eksternal dapat diblokir atau ditekan, sehingga memungkinkan keseimbangan internal.



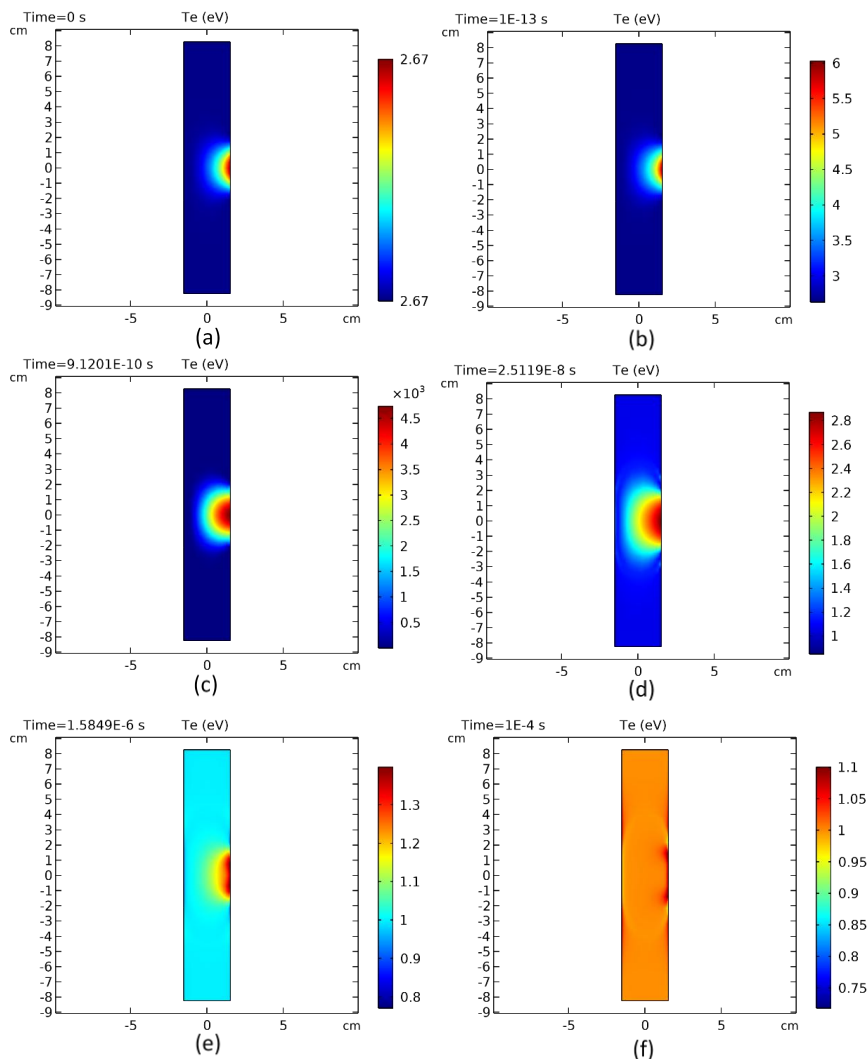
Gambar 4. Perubahan densitas elektron terhadap waktu di dalam plasma.

Tahap kedua dari proses eksitasi menunjukkan bahwa energi yang cukup telah terakumulasi untuk mengganggu keseimbangan internal plasma, yang menyebabkan tumbukan yang relatif kuat (terutama tumbukan tidak

elastis) dalam plasma, yang mengarah pada pertumbuhan kerapatan elektron yang cepat.

Peristiwa ini meningkatkan kerapatan elektron secara cepat dalam waktu singkat yang berdampak pada peningkatan kerapatan elektron menuju kondisi kritis. Di wilayah ini kerapatan elektron ($8,01 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$), pada rezim non-tumbukan mengalami efek *avalanche* (longsoran) elektron [23], fase ini menandai penyerapan energi secara penuh yang dapat mereduksi radiasi yang tidak diinginkan [24].

Kerapatan elektron kemudian memasuki fase ketiga, yang menghasilkan amplop plasma menjadi lebih tebal dan lebih tebal. Kondisi ini merupakan densitas kritis ($9 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$; $t = 10^{-6} \text{ s}$), mengakibatkan area plasma menyempit dan bergerak mendekati dinding tabung.



Gambar 5. Profil distribusi temperatur elektron dalam tabung pada sumbu xy (a) 0 s, (b) 10^{-13} s, (c) 10^{-10} s, (d) 10^{-8} s, (e) 10^{-6} s, dan (f) 10^{-4} s.

Distribusi Temperatur Elektron

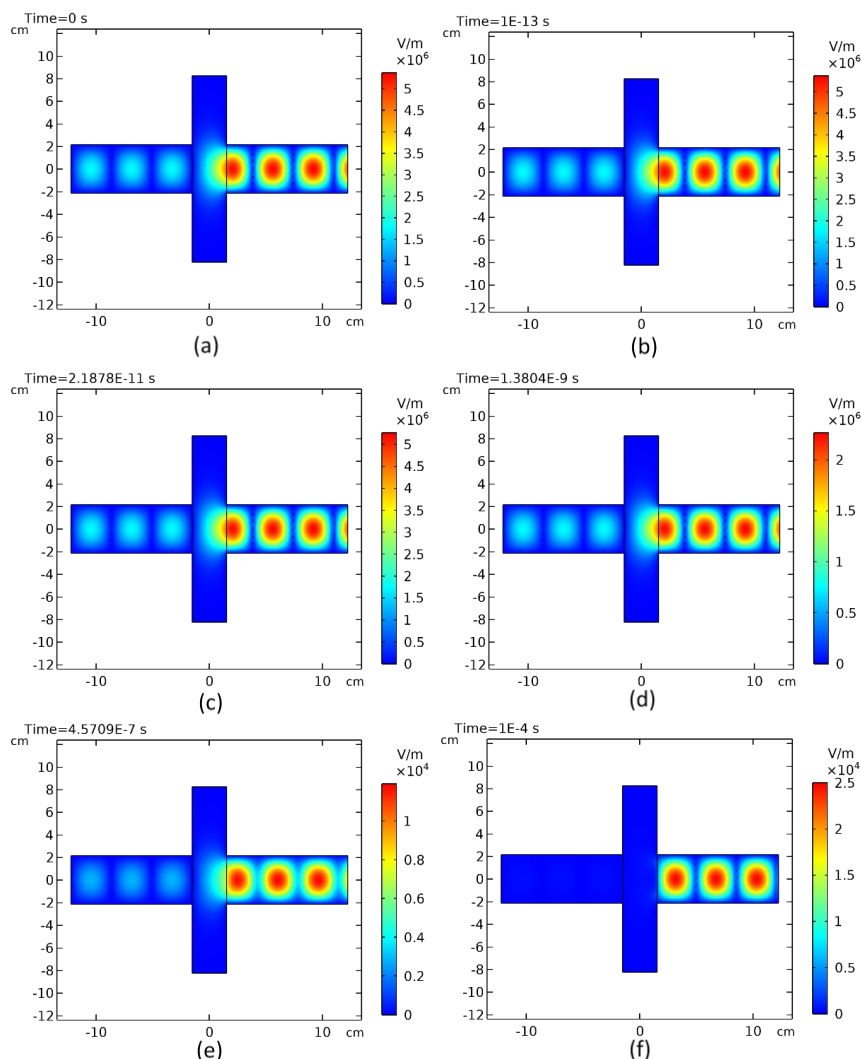
Temperatur elektron (T_e) adalah besaran yang menyatakan energi elektron dimana medan listrik akan memberikan energi elektron untuk melakukan tumbukan. Temperatur elektron awal yang sangat tinggi kemudian meluruh dengan cepat dan terjadi pada waktu $4,79 \times 10^{-9}$ s dengan nilai 51,06 eV, akhirnya nilai akhir temperatur elektron adalah 1,1 eV (12.764,4 Kelvin) (lihat Gambar 5).

Nilai temperatur elektron yang tinggi menunjukkan bahwa reaksi yang terjadi dapat menghasilkan sejumlah besar radikal netral yang memiliki sifat kimia aktif, dan dalam aplikasinya banyak digunakan dalam sterilisasi medis dan modifikasi bahan. Perubahan nilai suhu elektron disebabkan karena plasma akan

berusaha mencapai kesetimbangan termalnya, namun dalam hal ini plasma gelombang mikro memiliki tingkat ketidakseimbangan yang tinggi ($T_e > T_{\text{gas}}$) [25].

Profil Distribusi Medan Listrik

Medan listrik yang bergerak menuju tabung akan mencapai nilai kritis (E_c), sehingga gas hidrogen akan terionisasi menghasilkan plasma. Medan listrik yang besar akan meningkatkan proses ionisasi. Gambar 6 menunjukkan profil distribusi medan listrik terkonsentrasi di pusat pandu gelombang, medan listrik yang sangat kuat ada di dinding dekat ujung hubung singkat dengan nilai awal $5,38 \times 10^6$ V/m, di mana nilai puncak intensitas medan muncul di daerah oval tengah.

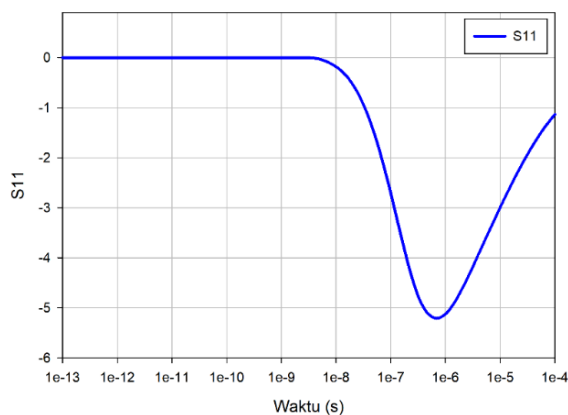


Gambar 6. Profil distribusi medan listrik dalam reaktor plasma pada sumbu xy (a) 0 s, (b) 10^{-13} s, (c) 10^{-11} s, (d) 10^{-9} s, (e) 10^{-7} s, and (f) 10^{-4} s.

Amplitudo intensitas medan listrik akan meluruh di sepanjang kedua sisi pandu gelombang. Densitas elektron di sisi tengah akan sangat tinggi dibandingkan di tempat lain, dengan peningkatan kerapatan elektron, modul medan listrik di plasma akan mengalami pelemahan sebesar $1,18 \times 10^4$ V/m. Medan listrik mengalami pelemahan karena setelah kerapatan elektron mencapai atau melebihi nilai ambang batas, frekuensi plasma elektron ($\omega_{pe} = 2,78 \times 10^{10}$) akan lebih besar dari frekuensi sudut ($\omega = 2,45 \times 10^9$) juga dapat menyerap daya di daerah dengan kerapatan elektron tertinggi. Peristiwa ini mengarah ke bagian real negatif dari permitivitas plasma yaitu:

$$[\epsilon_{pr} = 1 - \omega_{pe}^2 / (\omega^2 + \nu_m^2) < 0] \quad (9)$$

Elektron dengan suhu yang cukup tinggi akan mudah bertumbukan, tereksitasi, terionisasi, dan sebagainya ketika energi ditransfer ke elektron yang kemudian meningkatkan kerapatan elektron, suhu elektron, dan partikel berat. Peristiwa ini ditandai dengan nilai S_{11} yang mulai mengecil, dan mencapai nilai minimal -5,21 dB, yang menunjukkan bahwa plasma hanya memantulkan 31,5% energi yang masuk. Densitas elektron kemudian meningkat ke besaran kritis, sehingga sifat dielektrik plasma berubah dan mempersulit energi untuk merambat, sehingga energi yang masuk akan dipantulkan sebesar 74,6%.



Gambar 7. Grafik nilai perubahan parameter S_{11} .

Parameter S_{11} digunakan untuk menggambarkan transfer daya dari medan listrik ke plasma. Hasil perhitungan S_{11} yang ditunjukkan pada Gambar 6 menjelaskan hubungan antara besaran daya yang diserap oleh plasma [26].

KESIMPULAN

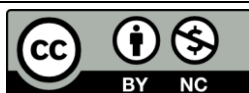
Penelitian ini menghasilkan kesimpulan dari bentuk pandu gelombang persegi panjang dan menganalisis eksitasi plasma hidrogen gelombang mikro pada tekanan atmosfer. Metode aproksimasi fluida diterapkan di sini untuk menyelesaikan persamaan transpor elektron. Beberapa parameter penting, seperti medan listrik, kerapatan elektron, suhu elektron, dan parameter hamburan S_{11} , diperoleh. Simulasi ini menyatakan bahwa permitivitas menjadi negatif ketika kerapatan elektron plasma melebihi nilai batas pada tahap kedua. Konduktivitas yang lebih tinggi yang dihasilkan memungkinkan pelepasan pandu gelombang koaksial dengan dinding logam eksternal, dan gelombang permukaan kemudian merambat dan memicu daerah yang sebelumnya tidak tereksitasi di kedua ujung plasma, dan meningkatkan kerapatan elektron secara konsisten. Peningkatan kerapatan elektron plasma dapat dibagi menjadi tiga tahap. Tahap pertama, energi yang menuju plasma terhalang oleh potensial kesetimbangan yang berakibat kerapatan elektron tetap tidak berubah dan terganggu oleh faktor eksternal dalam skala waktu yang singkat. Tahap kedua, terjadi efek longoran, dan kerapatan elektron meningkat pesat hingga melebihi nilai batasnya. Pada tahap ketiga, peningkatan kerapatan elektron meningkatkan kemampuan yang membuat plasma tahan gelombang mikro dan akhirnya mencapai keseimbangan dinamis yang mendukung pertumbuhan kerapatan elektron.

REFERENSI

1. Samal, S. (2017). Thermal plasma technology: The prospective future in

- material processing. *Journal of cleaner production*, **142**, 3131–3150.
2. Bahri, M., & Haghghat, F. (2014). Plasma-Based Indoor Air Cleaning Technologies: The State of the Art-Review. *CLEAN–Soil, Air, Water*, **42**(12), 1667–1680.
 3. Guć, M., Reszke, E., Cegłowski, M., & Schroeder, G. (2020). Construction of Plasma Ion Sources to be Applied in Analysis of Small Organic Compounds Using Mass Spectrometry. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **40**, 235–260.
 4. Da Silva, C. L., Sonnenfeld, R. G., Edens, H. E., Krehbiel, P. R., Quick, M. G., & Koshak, W. J. (2019). The plasma nature of lightning channels and the resulting nonlinear resistance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **124**(16), 9442–9463.
 5. Menéndez, J. A., Juárez-Pérez, E. J., Ruisánchez, E., Bermúdez, J. M., & Arenillas, A. (2011). Ball lightning plasma and plasma arc formation during the microwave heating of carbons. *Carbon*, **49**(1), 346–349.
 6. Rincón, R., Marinas, A., Muñoz, J., Melero, C., & Calzada, M. D. (2016). Experimental research on ethanol-chemistry decomposition routes in a microwave plasma torch for hydrogen production. *Chemical Engineering Journal*, **284**, 1117–1126.
 7. Wali, W. A. (2020). Carbon dioxide conversion control based on microwave plasma technology. *2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, 1–4.
 8. Chen, Z., Yin, Z., Chen, M., Hong, L., Xia, G., Hu, Y., ... & Kudryavtsev, A. A. (2014). Self-consistent fluid modeling and simulation on a pulsed microwave atmospheric-pressure argon plasma jet. *Journal of Applied Physics*, **116**(15).
 9. Baeva, M., Andrasch, M., Ehlbeck, J., Weltmann, K. D., & Loffhagen, D. (2014). Study of the spatiotemporal evolution of microwave plasma in argon. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **42**(10), 2774–2775.
 10. Nowakowska, H., Jasiński, M., & Mizeraczyk, J. (2013). Modelling of discharge in a high-flow microwave plasma source (MPS). *The European Physical Journal D*, **67**, 1–8.
 11. Nowakowska, H., Jasinski, M., Debicki, P. S., & Mizeraczyk, J. (2011). Numerical analysis and optimization of power coupling efficiency in waveguide-based microwave plasma source. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **39**(10), 1935–1942.
 12. Yang, Y., Hua, W., & Guo, S. Y. (2014). Numerical study on microwave-sustained argon discharge under atmospheric pressure. *Physics of Plasmas*, **21**(4).
 13. Arcese, E., Rogier, F., & Boeuf, J. P. (2017). Plasma fluid modeling of microwave streamers: Approximations and accuracy. *Physics of Plasmas*, **24**(11).
 14. Gudmundsson, J. T., Kawamura, E., & Lieberman, M. A. (2013). A benchmark study of a capacitively coupled oxygen discharge of the oopd1 particle-in-cell Monte Carlo code. *Plasma Sources Science and Technology*, **22**(3), 035011.
 15. Miotk, R., Jasiński, M., & Mizeraczyk, J. (2018). Electromagnetic optimisation of a 2.45 GHz microwave plasma source operated at atmospheric pressure and designed for hydrogen production. *Plasma Sources Science and Technology*, **27**(3), 035011.
 16. Mizeraczyk, J., Jasiński, M., Nowakowska, H., & Dors, M. (2012). Studies of atmospheric-pressure microwave plasmas used for gas processing. *Nukleonika*, **57**, 241–247.
 17. Wu, Z., Liang, R., Nagatsu, M., & Chang, X. (2016). The Characteristics of Columniform Surface Wave Plasma Excited Around a Quartz Rod by 2.45 GHz

- Microwaves. *Plasma Science and Technology*, **18**(10), 987.
18. Morgan. (2022). *Morgan database*. Diakses pada 29 Agustus 2022, URL: www.lxcat.net.
 19. Biagi. (2022). *Biagi database*. Diakses pada 29 Agustus 2022, URL: www.lxcat.net.
 20. Triniti. (2022). *Triniti database*. Diakses pada 29 Agustus 2022, URL: www.lxcat.net.
 21. Itikawa. (2022). *Itikawa database*. Diakses pada 29 Agustus 2022, URL: www.lxcat.net.
 22. Lebedev, Y. A., & Epshtein, I. L. (1995). Simulation of microwave plasma in hydrogen. *Journal-Moscow Physical Society*, **5**, 103–120.
 23. Zhigang, L. I., Zhongcai, Y. U. A. N., Jiachun, W. A. N. G., & Jiaming, S. H. I. (2017). Simulation of propagation of the HPM in the low-pressure argon plasma. *Plasma Science and Technology*, **20**(2), 025401.
 24. Meindl, A., Loehle, S., Kistner, I., Schulz, A., & Fasoulas, S. (2019). Two-Photon Induced Polarization Spectroscopy for Atomic Oxygen in Atmospheric Plasma and Xenon. *AIAA Scitech 2019 Forum*, 1506.
 25. Georgieva, V., Berthelot, A., Silva, T., Kolev, S., Graef, W., Britun, N., ... & Delplancke-Ogletree, M. P. (2017). Understanding microwave surface-wave sustained plasmas at intermediate pressure by 2D modeling and experiments. *Plasma processes and polymers*, **14**(4-5), 1600185.
 26. Nowakowska, H., Jasinski, M., Debicki, P. S., & Mizeraczyk, J. (2011). Numerical analysis and optimization of power coupling efficiency in waveguide-based microwave plasma source. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **39**(10), 1935–1942.



Artikel ini menggunakan lisensi
[Creative Commons Attribution
 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)