

PENENTUAN DENSITAS SPESIES PLASMA HIDROGEN PADA KESETIMBANGAN TERMODINAMIK TEKANAN ATMOSFIR MENGGUNAKAN MATLAB

Reeky Fardinata, Saktioto

Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,

Universitas Riau Kampus Bina Widya

Jl. Prof. Muchtar Lutfi Pekanbaru, 28293, Indonesia

*E-mail korespondensi: reekyfardi@gmail.com

ABSTRACT

Thermal equilibrium hydrogen plasma at atmospheric pressure were simulated using the software matrix laboratory (MATLAB). Runge Kutta method numerical method as a settlement of differensial model equations of chemical kibeetik with the arrhenius equation approach and continuity equations so that the equilibrium density values for each species were obtained. Equilibrium hydrogen plasma at atmospheric pressure and density rate review every reaction involved. Parameter of ionizing $n_{H^+}/n_{H_2} \approx 0,2$ and disosiasi $n_{H^+}/n_{H_2} \approx 1$ as a reference equilibrium plasma. Equilibrium plasma is found in time interval $10^{-6} - 10^{-3}$ s thermal hydrogen plasmas with temperatures of 1 eV. The density of hydrogen plasma thermal equilibrium overall are in the interval of $10^{14} m^{-3} - 10^{20} m^{-3}$. The reaction rate of each species varies based on the type of collision and rate of change of species.

Keywords: Plasma hydrogen thermal, Simulation, Equilibrium, The reaction rate

ABSTRAK

Kesetimbangan plasma hidrogen termal pada tekanan atmosfer disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matrix Laboratory (MATLAB). Metode numerik Runge Kutta sebagai langkah penyelesaian persamaan differensial dari model kibeetik kimia dengan pendekatan persamaan arrhenius dan persamaan kontinuitas sehingga nilai densitas kesetimbangan untuk setiap spesies diperoleh. Kesetimbangan plasma hidrogen pada tekanan atmosfer meninjau kerapatan spesies hidrogen serta laju dari setiap reaksi yang terlibat. Parameter ionisasi $n_{H^+}/n_{H_2} \approx 0,2$ dan disosiasi $n_{H^+}/n_{H_2} \approx 1$ sebagai acuan kesetimbangan plasma. Kesetimbangan plasma didapati dalam interval waktu $10^{-6} - 10^{-3}$ s dengan temperatur plasma hidrogen termal sebesar 1 eV. Densitas kesetimbangan plasma hidrogen termal keseluruhan berada dalam interval $10^{14} m^{-3} - 10^{20} m^{-3}$. Laju reaksi dari setiap spesies bervariasi berdasarkan jenis tumbukan dan laju perubahan spesies

Kata kunci: Plasma Hidrogen Termal, Simulasi, Kesetimbangan, densitas, laju reaksi

Diterima 30-08-2019 | Disetujui 30-09-2019 | Dipublikasi 31-10-2019

PENDAHULUAN

Spesies plasma terdiri dari spesies atomik, molekul, ion dan elektron. Spesies plasma ditinjau untuk menentukan kesetimbangan dalam plasma. Plasma hidrogen tekanan atmosfer pada penelitian, meninjau beberapa spesies yang terdiri dari elektron, H, H₂, H⁺, H⁻ dan H₂⁺. Spesies-spesies tersebut akan

saling bertumbukan di dalam system hingga mencapai kondisi setimbang. Tumbukan antar spesies - spesies tersebut disebabkan oleh beberapa faktor salah satunya adalah temperatur. Tumbukan yang terjadi antar spesies yang semakin banyak akan mempengaruhi jumlah densitas setiap spesies hidrogen. Gas hidrogen dimanfaatkan dalam plasma diantaranya adalah teknologi *micro*

plasma[8], pencegah korosi[2] plasma *etching* [1], pemanfaatan bidang medis[10] dan pendeteksi tingkat keasaman lingkungan [9]. Plasma hidrogen pada tekanan atmosfer dapat dianalisa dengan meninjau kesetimbangan densitas spesies yang terdapat pada plasma.

TINJAUAN PUSTAKA

Plasma merupakan percampuran kuasi netral dari elektron, radikal, ion positif dan ion negatif. Kondisi kuasi netral merupakan daerah dimana terdapat kerapatan ion (n_i) yang hampir sama dengan kerapatan elektron (n_e) sehingga dapat dikatakan $n_i \approx n_e \approx n$, dengan n menyatakan kerapatan secara umum yang disebut kerapatan plasma.

Temperatur Plasma dinyatakan dalam satuan eV dengan mengkonversi satuan kelvin.

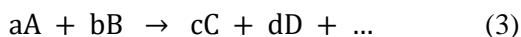
$$k (K) \equiv eT (e) \quad (1)$$

Persamaan kontinuitas tanpa dimensi digunakan sebagai model kinetik kimia hidrogen

$$\frac{\partial n}{\partial t} = S \quad (2)$$

Persamaan 2 menyatakan perubahan densitas terhadap waktu hanya bergantung pada laju produksi spesies per satuan volume (S).

Suatu reaksi dapat dinyatakan oleh persamaan berikut [3]:



Sedangkan, laju reaksi maju diberikan oleh:

$$R_f = k_f (n_A)^a (n_B)^b \quad (4)$$

Laju reaksi balik diberikan oleh :

$$R_r = k_r (n_C)^c (n_D)^d \dots \quad (5)$$

Persamaan Arrhenius modifikasi didefinisikan untuk memperjelas kebergantungan faktor pra-eksponensial pada suhu [3]. Persamaan Arrhenius modifikasi dapat ditulis dalam bentuk

$$k = \left(\frac{T}{T_0}\right) \exp\left(\frac{-E_a}{T}\right) \quad (6)$$

Konstanta A , E_a , dan T_0 dalam persamaan (5), merupakan parameter Arrhenius, yang nilainya bergantung pada hasil eksperimen.

Laju produksi spesies C persatuan volume untuk setiap reaksi dalam persamaan reaksi (5), diberikan oleh:

$$S_C = (R_f \times c) - (R_r \times 0) \quad (7)$$

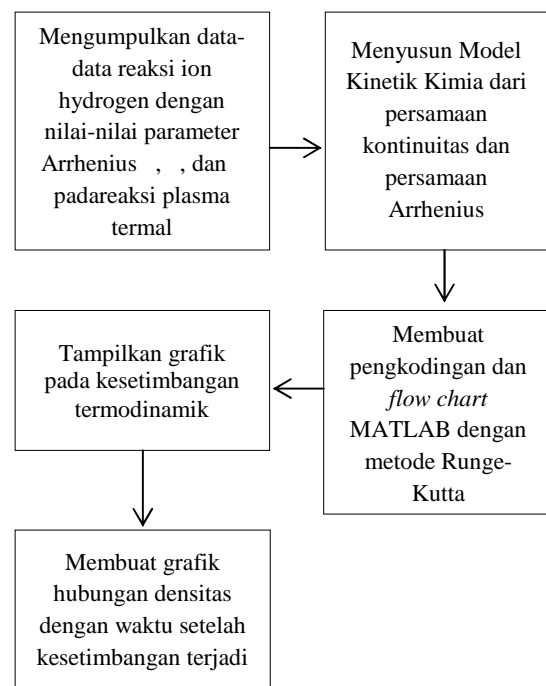
Secara umum, laju produksi spesies per satuan volume untuk setiap reaksi dapat dihitung menurut persamaan berikut:

$$S = (M_r - N_f)(R_f - R_r) \quad (8)$$

Dimana M_r dan N_f berturut turut adalah jumlah molekul spesies hasil reaksi dan pereaksi [3].

METODE PENELITIAN

Gambar 1. dapat dilihat proses keseluruhan dari penelitian hingga akhir



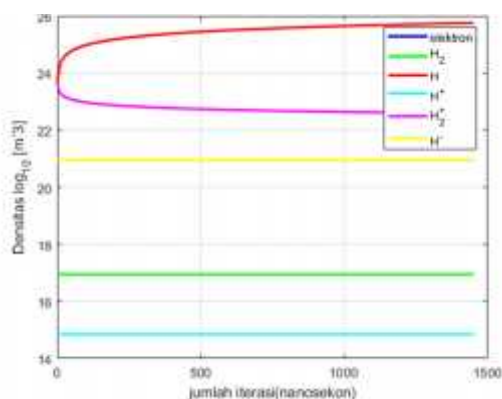
Gambar 1. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

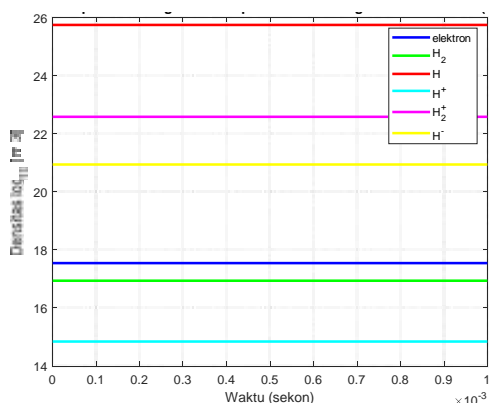
Spesies plasma hidrogen termal mengalami kesetimbangan pada saat $1,451 \times 10^{-6}$ s. Densitas spesies hidrogen yang signifikan dialami oleh spesies hidrogen monoatomik (H) dan spesies ion positif hidrogen atomik (H^+) yang mengalami penurunan sepanjang waktu tumbukan. Gambar 2 menunjukkan perubahan densitas spesies saat mencapai kondisi setimbang.

Tabel 1. Reaksi spesies hidrogen termal

No. Reaksi	Reaksi	α ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	β	γ (K)
1	$\text{H} + \text{e}^- \rightarrow \text{H}^+ + \text{e}^- + \text{e}^-$	$1,14 \times 10^{-15}$	0,21	169000
2	$\text{H}^+ + \text{e}^- + \text{e}^- \rightarrow \text{H} + \text{e}^-$	$7,08 \times 10^{27}$	-4,5	0
3	$\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$6,3 \times 10^5$	0,5	4000
4	$\text{H}_2 + \text{H} \rightarrow \text{H} + \text{H}_2$	$6,3 \times 10^5$	0,5	4000
5	$\text{H}_2 + \text{H} \rightarrow \text{H} + \text{H} + \text{H}$	$4,49 \times 10^{-14}$	-0,1	52530
6	$\text{H} + \text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$8,8 \times 10^{-45}$	0	0
7	$\text{H}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H} + \text{H}_2$	$1,43 \times 10^{-12}$	-0,7	52530
8	$\text{H} + \text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}_2$	$2,8 \times 10^{-43}$	-0,6	0
9	$\text{H}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{H} + \text{H} + \text{e}^-$	$1,91 \times 10^{-1}$	1,0	116045
10	$\text{H}_2^+ + \text{H}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}_2$	$6,07 \times 10^{-34}$	-2,5	0
11	$\text{H}^+ + \text{H}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$6,07 \times 10^{-34}$	-2,5	0
12	$\text{H} + \text{H}_2^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{H} + \text{H}_2$	$1,66 \times 10^{-35}$	-2,5	0
13	$\text{H}^+ + \text{H} + \text{e}^- \rightarrow \text{H} + \text{H}$	$1,66 \times 10^{-35}$	-2,5	0
14	$\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}^+ + \text{H} + \text{e}^-$	$6,5 \times 10^3$	-3,8	159000
15	$\text{H}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2^+ + \text{e}^- + \text{e}^-$	$9,53 \times 10^{-19}$	0,9	145000
16	$\text{H}^- + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{e}^-$	$7,83 \times 10^2$	0	0
17	$\text{H}^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{H} + \text{H}$	$1,3 \times 10^6$	-0,5	0



Gambar 2. Perubahan densitas spesies plasma.



Gambar 3. Densitas spesies hidrogen termal pada kesetimbangan termodinamik (1 atm).

Waktu kesetimbangan plasma terjadi dalam rentang waktu $10^{-6} - 10^{-3}$ s [2].

Kesetimbangan plasma diperlihatkan oleh gambar 2.

Tabel 2. Densitas spesies hidrogen termal pada kesetimbangan termodinamik.

No	Spesies	Densitas spesies dalam Log10 (m^{-3})
1	Elektron	17.5471
2	H2	16.9440
3	H	25.7517
4	H ⁺	14.8471
5	H ²⁺	22.5804
6	H ⁻	20.9461

Tabel 2. menyajikan nilai kesetimbangan densitas spesies plasma hidrogen termal. Nilai densitas kesetimbangan elektron yang berhasil dicatat oleh matlab adalah $3.5245 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$. Elektron dalam penelitian ini telah memenuhi karakteristik plasma sehingga elektron dianggap bergerak bebas dan tanpa mengalami gangguan medan dari luar. Densitas elektron yang diperoleh masih dalam kategori yang sesuai dengan karakteristik plasma laboratorium yaitu tidak melebihi 10^5 sampai 10^{15} m^{-3} dengan rentang suhu 11604 Kelvin [2].

Spesies hidrogen hidrogen diatomik (H_2) dan hidrogen monoatomik (H) yang disebabkan oleh proses disosiasi dapat dianalisa dengan membandingkan kedua

spesies tersebut ($nH/nH_2 \approx 1$) [6]. Spesies ion plasma hidrogen dihasilkan dari proses ionisasi pada saat reaksi, produksi spesies ion plasma H^+ dan H_2^+ sama-sama dihasilkan oleh spesies atom hidrogen, oleh karena kedua spesies ini dihasilkan proses yang sama, maka dapat dibuat perbandingan antara kedua spesies ion positif ini. $nH^+/nH_2^+ \approx 0,2$ parameter perbandingan menunjukkan bahwa produksi spesies ion plasma dari proses ionisasi dan disosiasi ion terhadap spesies molekul hidrogen telah memenuhi tingkat ionisasi pada plasma [6].

Tabel 3. Nilai laju reaksi spesies hidrogen

No.	Reaksi	Laju Reaksi ($m^{-3} s^{-1}$)
1	$H + e^- \rightarrow H^+ + e^- + e^-$	$2,313 \times 10^{22}$
2	$H^+ + e^- + e^- \rightarrow H + e^-$	$1,138 \times 10^{72}$
3	$H + H_2 \rightarrow H_2 + H$	$1,377 \times 10^{49}$
4	$H_2 + H \rightarrow H + H_2$	$1,377 \times 10^{49}$
5	$H_2 + H \rightarrow H + H + H$	$1,672 \times 10^{27}$
6	$H + H + H \rightarrow H_2 + H$	$1,188 \times 10^{31}$
7	$H_2 + H_2 \rightarrow H + H + H_2$	$9,251 \times 10^{18}$
8	$H + H + H_2 \rightarrow H_2 + H_2$	$9,464 \times 10^{22}$
9	$H_2 + e^- \rightarrow H + H + e^-$	$1,039 \times 10^{31}$
10	$H_2^+ + H_2 + e^- \rightarrow H_2 + H_2$	$1,785 \times 10^{18}$
11	$H^+ + H_2 + e^- \rightarrow H_2 + H$	$7,691 \times 10^{19}$
12	$H + H_2^+ + e^- \rightarrow H + H_2$	$3,135 \times 10^{25}$
13	$H^+ + H + e^- \rightarrow H + H$	$1,351 \times 10^{27}$
14	$H + H \rightarrow H^+ + H + e^-$	$1,922 \times 10^{49}$
15	$H_2 + e^- \rightarrow H_2^+ + e^- + e^-$	$2,967 \times 10^{12}$
16	$H^+ + H \rightarrow H_2 + e^-$	$3,108 \times 10^{43}$
17	$H^+ + H^- \rightarrow H + H$	$5,594 \times 10^{42}$

Nilai laju reaksi ditunjukkan oleh tabel 3, dengan nilai reaksi tertinggi adalah reaksi rekombinasi (reaksi 2) $1,138 \times 10^{72} m^{-3} s^{-1}$, laju reaksi terkecil dicapai oleh ionisasi (reaksi 16), yaitu $2,967 \times 10^{12} m^{-3} s^{-1}$. Laju reaksi ionisasi plasma hidrogen termal lebih rendah dibandingkan dengan laju rekombinasi. Plasma hidrogen termal bergantung pada temperatur elektron yang nilainya hampir sama dengan temperatur spesies lainnya [5].

KESIMPULAN

Kesetimbangan plasma hidrogen termal mencapai kestabilan $1,451 \times 10^{-6}$ s dan berlangsung selama $10^{-6} - 10^{-3}$ s. Densitas dari masing-masing spesies elektron, H, H_2 , H^+ , H_2^+ dan H^- berturut-turut adalah $10^{17,5471} m^{-3}$, $10^{16,9440} m^{-3}$, $10^{25,7517} m^{-3}$, $10^{14,8471} m^{-3}$, $10^{22,5804} m^{-3}$ dan $10^{20,9461} m^{-3}$. Parameter ionisasi plasma diperoleh $nH^+/nH_2^+ \approx 0,2$ dan parameter disosiasi adalah $n/nH_2 \approx 1$. Kesetimbangan dalam plasma akan meningkatkan disosiasi dan berlangsung secara cepat dan dalam fraksi yang kecil. Laju reaksi tertinggi adalah reaksi rekombinasi (reaksi 2) $1,138 \times 10^{72} m^{-3} s^{-1}$, laju reaksi terkecil dicapai oleh ionisasi (reaksi 16), yaitu $2,967 \times 10^{12} m^{-3} s^{-1}$.

REFERENSI

1. Germaschewski, K. *et al.* (2016) 'The Plasma Simulation Code: A modern particle-in-cell code with patch-based load-balancing', *Journal of Computational Physics*. Elsevier Inc., 318, pp. 305–326. doi: 10.1016/j.jcp.2016.05.013.
2. Inui, H. *et al.* (2010). *Measurement of Hydrogen Radical Density and Its Impact on Reduction of Copper Oxide in Atmospheric-Pressure Remote Plasma Using H₂ and Ar Mixture Gases*. *Applied Physics Express* 3, 126101.
3. Ismail, F. D. *et al.* (2011) 'Optik Thermodynamic equilibrium for nitrogen species discharge: Comparison with global model', *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. Elsevier GmbH., 122(5), pp. 455–458. doi: 10.1016/j.ijleo.2010.03.006.
4. J. Henriques, N. *et al.*, (2011). *Microwave plasma torches driven by surface wave applied for hydrogen production*. *Hydrogen Energy*. 36:345-354.
5. J. Jolly and J.-P. Booth. (2005). *Atomic hydrogen densities in capacitively coupled very high frequency plasmas in H₂: Effect of excitation frequency*. *J. Appl. Phys.* 97, 103305 (6pp).

6. M. Sode, *et al.* (2013). 'Ion chemistry in H₂-Ar low temperature plasmas', 063302. doi: 10.1063/1.4817526
7. Narendra Singh. *et al.* (2018). *Characterization of hot dense plasma with plasma parameters*. Radiation Physics and Chemistry 146, 105-114.
8. Parigger, C. G. *et al.* (2014) 'Spectrochimica Acta Part B Asymmetric hydrogen beta electron density diagnostics of laser-induced plasma', *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. Elsevier B.V., 99(September 2013), pp. 28–33. doi: 10.1016/j.sab.2014.06.013.
9. Rauscher, H. *et al.* (2010). *Plasma Technology for Hyperfunctional Surfaces*. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
10. Rossi, F. *et al.* (2008). *Use of a low-pressure plasma discharge for the decontamination and sterilization of medical devices*. Pure Applied Chemistry Vol. 80, No. 9, 1939–1951



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