

## PENGGUNAAN PEMODELAN SUMBER PLASMA HELIUM PADA KEADAAN SETIMBANG UNTUK APLIKASI PLAK GIGI

Nandita Devira\*, Saktioto

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau

\*E-mail korespondensi: [deviranandita06@gmail.com](mailto:deviranandita06@gmail.com)

### ABSTRACT

Helium plasma source modelling was performed in order to obtain species density at balanced conditions under pressure of 1 atm. The software used in this modelling is matrix laboratory software (MATLAB). The equation used is a continuity equation that depends on the position and parameters of Arrhenius. Plasma temperatures used were 0.1 eV, 0.2 eV, 0.3 eV, and 0.5 eV. Species involved in a plasma consist of electrons, He, He<sup>+</sup>, He<sub>2</sub><sup>+</sup>, He\*, and He<sub>2</sub>\*. The modelling results showed that the density value of He species increases as temperature increases. It is noted that the obtained density of He ( $n_{He}$ ) when reaching a balanced condition at the temperature of  $T = 0.1, 0.2, 0.3,$  and  $0.5$  are  $3.0137 \times 10^{25}, 7.9506 \times 10^{26}, n_{He} = 1.6489 \times 10^{28},$  and  $7.1384 \times 10^{29}$ , respectively. This is because He is a noble gas that is monatomic and chemically inert. Thus resulting in stable plasma production and gaining an increase in density value. Plasma-charged species are the main media that cause the disinfection of microorganisms because they can break the hydrogen bond of the organic molecules that make up the dental plaque. So the influence of charged species when applied to dental plaque has more effective than that of neutral reactive species.

**Keywords:** Helium Plasma, Modelling, Density, Plasma Temperature, Dental Plaque.

### ABSTRAK

Pemodelan sumber plasma Helium dilakukan untuk memperoleh densitas spesies pada kondisi setimbang dalam tekanan 1 atm. Software yang digunakan dalam pemodelan ini yakni perangkat lunak Matriks Laboratory (MATLAB). Persamaan yang digunakan adalah persamaan kontinuitas yang bergantung posisi dan parameter Arrhenius. Temperatur plasma yang digunakan adalah 0.1 eV, 0.2 eV, 0.3 eV, dan 0.5 eV. Spesies yang terlibat dalam plasma terdiri dari elektron, He, He<sup>+</sup>, He<sub>2</sub><sup>+</sup>, He\*, dan He<sub>2</sub>\*. Hasil pemodelan menampilkan bahwa nilai densitas spesies He semakin besar seiring dengan kenaikan temperatur. Tercatat bahwa peroleh nilai densitas He saat mencapai kondisi setimbang pada temperatur  $T = 0.1$  eV;  $n_{He} = 3.0137 \times 10^{25}$ ,  $T = 0.2$  eV;  $n_{He} = 7.9506 \times 10^{26}$ ,  $T = 0.3$  eV;  $n_{He} = 1.6489 \times 10^{28}$ ,  $T = 0.5$  eV;  $n_{He} = 7.1384 \times 10^{29}$ . Hal ini disebabkan karena He merupakan gas mulia yang bersifat monatomik dan inert secara kimiawi. Sehingga menghasilkan produksi plasma yang stabil dan memperoleh kenaikan nilai densitas. Spesies bermuatan dalam plasma adalah media utama yang menyebabkan terjadinya desinfeksi pada mikroorganisme. Karena mereka dapat memutuskan ikatan hidrogen dari molekul organik penyusun plak gigi. Sehingga pengaruh spesies bermuatan ketika diaplikasikan untuk plak gigi memiliki peran yang lebih banyak dibandingkan spesies reaktif netral.

**Kata kunci:** Plasma Helium, Pemodelan, Densitas, Temperatur Plasma, Plak Gigi.

Diterima 12-11-2021 | Disetujui 19-03-2022 | Dipublikasi 31-03-2022

### PENDAHULUAN

Istilah plasma pertama kali diperkenalkan oleh Irving Langmuir (1881-1957) untuk menggambarkan bagian muatan-netral dari pelepasan gas. Plasma mengacu pada gas terionisasi penuh atau sebagian yang terdiri dari

elektron dan ion [1]. Plasma disebut sebagai materi keempat dari bentuk materi lainnya yaitu cair, gas, dan padat. Plasma dapat ditemukan keberadaannya di alam dan plasma buatan yang dapat dihasilkan secara eksperimen. Plasma dihasilkan menggunakan metode

diantaranya *dielectric barrier discharge*, *atmospheric pressure plasma jet*, jarum plasma, dan *pencil plasma*. Gas yang digunakan untuk menghasilkan plasma seperti Helium, Hidrogen, Argon, Nitrogen, Heliox (campuran antara gas Helium dengan Oksigen), dan udara.

Aplikasi plasma tekanan atmosfer pada bidang material, yakni polimerisasi plasma menggunakan metode *plasma enhanced-chemical vapor deposition* dan modifikasi permukaan material [2]. Aplikasi Plasma dalam bidang lingkungan yaitu dalam produksi ozon, Pembersihan gas polutan seperti gas nitrogen, belerang dioksida, pemurnian air dan pengolahan limbah industri [3]. Selain itu plasma dapat diaplikasikan dalam bidang kedokteran gigi untuk sterilisasi gigi dan pembersihan plak gigi [4].

Plak gigi merupakan kumpulan dari mikroorganisme yang berkembang biak membentuk suatu lapisan lunak dan melekat pada permukaan gigi, yang dapat menyebabkan gigi berlubang dan peradangan pada gusi atau gingivitis [5]. Pada tahun 2010, Lee melakukan penelitian pembersihan permukaan gigi dan dentin menggunakan plasma jet tekanan atmosfer dengan gas pembentuk plasma yakni Helium [6]. Penggunaan gas Helium dalam pembentukan plasma karena Helium merupakan gas mulia yang bersifat monatomik dan inert secara kimiawi. Sehingga menghasilkan produksi plasma yang stabil. Keunggulan Penggunaan Helium dibandingkan dengan gas lainnya yakni Helium dapat menginduksi ionisasi pada tegangan yang lebih rendah [7].

Penelitian ini memaparkan pemodelan sumber plasma Helium pada keadaan setimbang untuk aplikasi plak gigi. Keadaan setimbang plasma Helium akan ditinjau dari perolehan nilai densitas spesies terhadap posisi pada tekanan atmosfer. Nilai densitas spesies dapat dihitung menggunakan model kinetik kimia dengan persamaan dasar persamaan kontinuitas. Metode Runge-Kutta digunakan sebagai solusi penyelesaian persamaan kontinuitas bergantung posisi. Hal ini

dikarenakan metode yang diterapkan memiliki penyelesaian persamaan differensial dengan *truncation error* yang lebih kecil. *Software* yang digunakan dalam pemodelan sumber plasma Helium untuk mencapai kondisi setimbang yakni perangkat lunak *matriks laboratory* (MATLAB). Pada penelitian ini penulis menganalisis plasma Helium untuk aplikasi plak gigi yang ditinjau dari hubungan interaksi yang terjadi antara spesies plasma Helium dengan bakteri penyusun plak gigi. Spesies yang terlibat dalam plasma Helium berjumlah 6 spesies diantaranya elektron, ion Helium, ion Helium diatomik, Helium metastabil dan excimers Helium yang masing-masing spesies tersebar dalam 17 reaksi.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Plasma

Sebuah plasma yang dihasilkan dari pelepasan listrik bertegangan tinggi dalam gas, mengandung elektron, ion bebas, spesies reaktif, atom molekul tereksitasi dan foton UV energik [8]. Klasifikasi plasma dikelompokkan berdasarkan derajat ionisasi, keadaan setimbang dan temperatur plasma.

### Model Kinetik Plasma

Persamaan yang terdapat dalam model kinetik plasma terdiri dari persamaan kontinuitas spesies, persamaan Arrhenius, persamaan laju reaksi reaksi dan persamaan laju produksi reaksi per satuan volume untuk setiap spesies.

#### *Persamaan Kontinuitas Spesies*

Nilai densitas spesies diperoleh dengan menyelesaikan persamaan kontinuitas ditinjau terhadap posisi menggunakan metode pendekatan Runge-Kutta:

$$\frac{dn}{dx} = S \quad (1)$$

dimana perubahan densitas terhadap posisi pada kondisi setimbang bergantung pada laju produksi spesies per satuan volume (S).

**Tabel 1.** Data reaksi plasma helium.

Reaksi	Laju Reaksi	Energi (eV)	Referensi
$e + He \rightarrow He^+ + e + e$	$1.5 \times 10^{-9} T_e^{0.6} e^{-24.6/T_e}$	0	[9]
$He^+ + e + e \rightarrow He + e$	$7.0 \times 10^{-27} T_e^{-4.5}$	24.6	[10]
$e + He^* \rightarrow 2e + He^+$	$4.661 \times 10^{-16} T_e^{0.6} e^{-4.78/T_e}$	4.78	[11]
$e + e + He^+ \rightarrow He^* + e$	$6.0 \times 10^{-20} T_e^{-4.0}$	0	[9]
$e + He_2^* \rightarrow 2e + He_2^+$	$9.75 \times 10^{-10} T_e^{0.71} e^{-3.94/T_e}$	3.4	[12]
$e + e + He_2^+ \rightarrow He_2^* + e$	$3.0 \times 10^{-32} T_e^{-4.0}$	0	[9]
$e + He_2^+ \rightarrow He_2^*$	$1.5 \times 10^{-16}$	0	[9]
$2He^* \rightarrow He_2^+ + e$	$2.03 \times 10^{-9} (T_g/300)^{0.5}$	0	[13]
$e + He \rightarrow He^* + e$	$2.308 \times 10^{-10} T_e^{0.31} e^{-2.297 \times 10^5 / T_e}$	19.8	[14]
$e + He^* \rightarrow He + e$	$1.099 \times 10^{-11} T_e^{0.31}$	0.0	[14]
$e + He \rightarrow He^+ + 2e$	$2.584 \times 10^{-12} T_e^{0.68} e^{-2.854092 \times 10^5 / T_e}$	24.6	[14]
Data reaksi balik tidak tersedia	-	-	-
$e + He^* \rightarrow He^+ + 2e$	$4.661 \times 10^{-10} T_e^{0.6} e^{-5.546 \times 10^4 / T_e}$	4.78	[14]
Data reaksi balik tidak tersedia	-	-	-
$He^+ + He + e \rightarrow He^* + He$	$2.5 \times 10^{-29} T_e^{-1.5}$	19.8	[10]
Data reaksi balik tidak tersedia	-	-	-
$He^* + He^* \rightarrow He^+ + He + e$	$2.7 \times 10^{-10}$	15	[14]
Data reaksi balik tidak tersedia	-	-	-
$He_2^+ + e + e \rightarrow He^* + He + e$	$3.0 \times 10^{-27} T_e^{-4.5}$	19.8	[10]
Data reaksi balik tidak tersedia	-	-	-
$2e + He_2^+ \rightarrow e + He^*$	$6.186 \times 10^{-39} T_e^{-4.4}$	0	[12]
Data reaksi balik tidak tersedia	-	-	-
$e + He^+ \rightarrow He^*$	$6.76 \times 10^{-7} T_e^{-0.5}$	0	[9]
Data reaksi balik tidak tersedia	-	-	-

*Persamaan Arrhenius*

Persamaan Arrhenius digunakan untuk menggambarkan konstanta laju ( $k_j$ ) sebagai fungsi temperatur yang dapat ditulis seperti persamaan berikut.

$$\langle k_j \rangle = \alpha_j \left( \frac{T_{(reaksi)}}{300} \right)^{\beta_j} \exp \left( \frac{-\gamma_j}{T_{(reaksi)}} \right) \quad (2)$$

$T_{(reaksi)} = T_e$  di mana  $T_e$  adalah suhu elektron, sebaliknya jika  $T_{(reaksi)} = T_i$  di mana  $T_i$  adalah suhu tertinggi reaktan. Beta ( $\beta$ ) merupakan eksponen suhu dalam faktor pra-eksponensial. Gamma ( $\gamma$ ) adalah energi aktivasi untuk reaksi dalam K. Alfa ( $\alpha$ ) memiliki dimensi yang sama dengan k (koefisien laju reaksi). Konstanta laju reaksi pada suhu tertentu memungkinkan laju reaksi dihitung jika diketahui densitas spesies.

### Persamaan Laju Reaksi

Untuk menentukan nilai laju reaksi maju dan laju reaksi balik digunakan persamaan:

$$R_f = k_f (n_A)^a (n_B)^b \quad (3)$$

$$R_r = k_r (n_C)^c (n_D)^d \quad (4)$$

dimana A, B, C dan D merupakan spesies yang terdapat dalam reaksi dan n adalah densitas spesies. Jumlah molekul dari masing-masing pereaksi dan hasil reaksi disimbolkan dengan a, b, c, dan d.

### Persamaan Laju Produksi Spesies

Laju produksi spesies per satuan volume untuk setiap reaksi dapat dihitung pada Persamaan:

$$S = (M_r - N_f)(R_f - R_r) \quad (5)$$

Dimana  $M_r$  dan  $N_f$  merupakan jumlah molekul spesies hasil reaksi dan pereaksi.

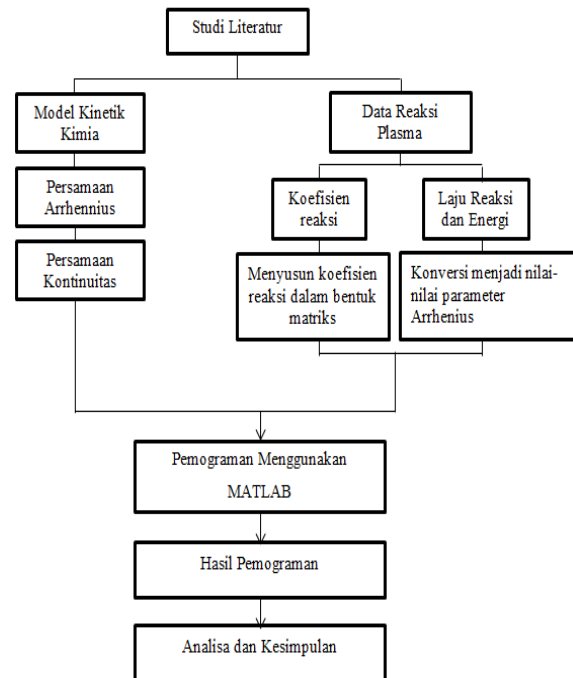
### Kimia Plasma

Reaksi kimia yang terdapat dalam plasma Helium dan laju reaksi nya ditunjukkan pada Tabel 1.

### METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara komputasi menggunakan *software* MATLAB R2016. Data reaksi plasma Helium diperoleh dari berbagai referensi yang tertera pada Tabel 1. Terdapat 17 data reaksi plasma Helium yang berisikan nilai laju reaksi dan energi yang dihasilkan dari reaksi. Spesies yang terlibat dalam plasma Helium yakni, elektron, Helium (He), ion Helium ( $\text{He}^+$ ), ion Helium diatomik ( $\text{He}_2^+$ ), atom Helium metastabil ( $\text{He}^*$ ) dan excimers Helium ( $\text{He}_2^*$ ). Data reaksi ini digunakan untuk menentukan nilai densitas

plasma Helium pada kondisi setimbang yang ditinjau terhadap posisi. Pemodelan ini dibuat dalam program format M-file yang terdiri dari 4 program diantaranya program data utama dan program data masukan. Program data utama diberi nama thequilb.m dan dlndt.m untuk program data masukan diberi nama phycon.m dan thdata.m.



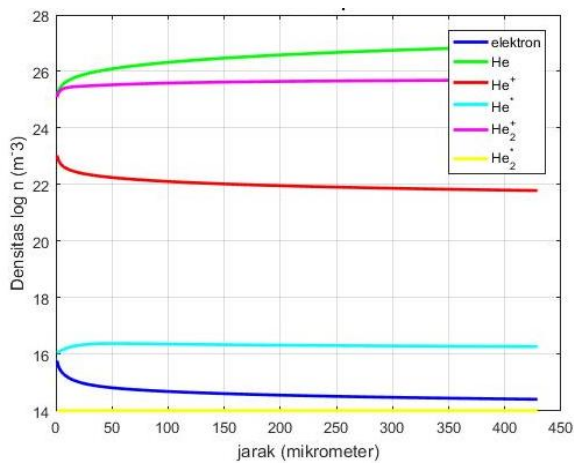
Gambar 1. Diagram alir penelitian.

Pada M-File phycon.m berisikan parameter fisika yang digunakan. Program M-File thdata.m berisikan koefisien reaksi, parameter Arrhenius ( $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$ ) dan nilai-nilai input yang tertera pada Tabel 2. Nilai parameter Arrhenius diperoleh dari nilai laju reaksi dari referensi yang dikonversikan menjadi nilai-nilai dari  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$ . M-File dlndt.m adalah program data utama yang digunakan untuk penyelesaian matematika dari Persamaan 5. Program M-File thequilb.m digunakan untuk mencari nilai densitas dari masing-masing spesies plasma Helium pada keadaan setimbang. Program ini akan melakukan iterasi sampai berada dalam kondisi setimbang dan memplot grafik perubahan densitas spesies Helium, grafik proses iterasi dan grafik masing-masing spesies plasma Helium.

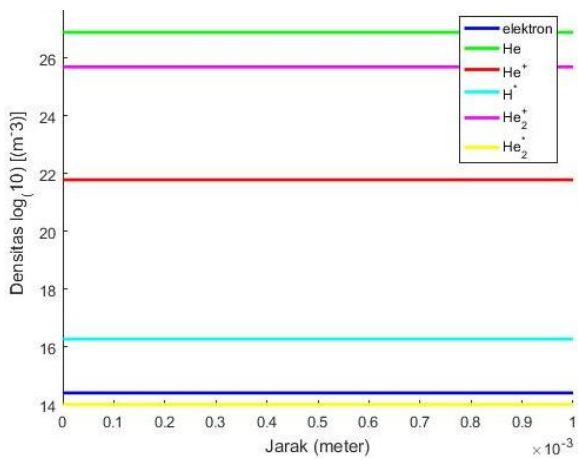
**Tabel 2.** Daftar nilai input.

Parameter	Spesies					
	Elektron	He	He <sup>+</sup>	He <sup>*</sup>	He <sub>2</sub> <sup>+</sup>	He <sub>2</sub> <sup>*</sup>
Nilai awal densitas (m <sup>-3</sup> )	1 × 10 <sup>17</sup>	1 × 10 <sup>24</sup>	1 × 10 <sup>24</sup>	1 × 10 <sup>16</sup>	1 × 10 <sup>24</sup>	1 × 10 <sup>14</sup>
Nomor massa (amu)	0	4,0026	4,00026	4,00026	8,00052	8,00052
Muatan (e)	-1	0	1	0	1	0
Temperatur (eV)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Tekanan (N/m <sup>2</sup> )	1 × 10 <sup>5</sup>					
Interval jarak (m)	1 × 10 <sup>-6</sup> – 1 × 10 <sup>-3</sup>					

**HASIL DAN PEMBAHASAN**



(a)



(b)

**Gambar 2.** Hasil pemodelan plasma perubahan densitas plasma Helium pada: (a) temperatur 2 eV dan (b) kesetimbangan 1 atm.

Hasil pemodelan plasma Helium untuk menentukan nilai densitas masing-masing

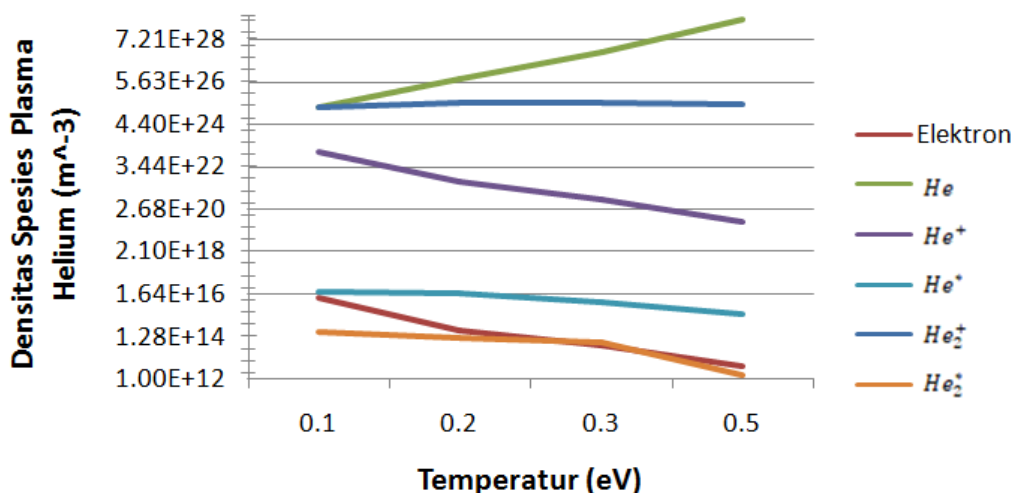
spesies ditunjukkan pada Gambar 2 (a) dan (b). Pada pemodelan ini, temperatur spesies dalam plasma Helium yang digunakan yakni 0.1 eV, 0.2 eV, 0.3 eV, dan 0.5 eV. Gambar a menunjukkan grafik perubahan densitas spesies plasma Helium pada temperatur 0.2 eV. Pada Gambar 2 (a) terlihat bahwa spesies Helium tereksitasi tidak mengalami perubahan nilai densitas selama proses iterasi berlangsung. Hal yang mempengaruhi terjadinya perubahan densitas spesies plasma Helium yaitu nilai masukan parameter Arrhenius, alfa, beta, dan gamma. Gambar 2 (b) menunjukkan grafik densitas spesies helium pada kesetimbangan termodinamik 1 atm. Spesies plasma Helium mencapai kondisi setimbang pada iterasi ke 429 dengan selisih densitas spesies sebesar 0.001. Sehingga diperoleh titik posisi kesetimbangan plasma Helium berada pada jarak  $4.29 \times 10^{-4}$  m sampai  $10^{-3}$  m.

Hasil pemodelan densitas plasma helium pada kondisi setimbang dengan variasi temperatur ditunjukkan pada Gambar 3. Terlihat bahwa spesies Helium mengalami kenaikan nilai densitas seiring dengan bertambah temperatur. Hal ini disebabkan karena Helium merupakan gas mulia yang bersifat monatomik dan inert secara kimiawi. Sehingga menghasilkan produksi plasma yang stabil dan memperoleh kenaikan nilai densitas seiring dengan pertambahan temperatur. Spesies plasma Helium yang mengalami penurunan nilai densitas jika temperatur

plasma dinaikkan yakni, elektron, ion Helium ( $\text{He}^+$ ), ion Helium diatomik ( $\text{He}_2^+$ ), atom Helium metastabil ( $\text{He}^*$ ) dan excimers Helium ( $\text{He}_2^*$ ). Nilai parameter Arrhenius menjadi salah satu faktor yang menyebabkan besar atau kecilnya nilai densitas spesies jika temperatur divariasikan. Densitas spesies plasma akan bernilai besar jika,  $\alpha >$ ,  $\beta >$ , dan  $\gamma <$ . Sebaliknya densitas spesies plasma akan bernilai kecil jika,  $\alpha <$ ,  $\beta <$ , dan  $\gamma >$ .

Pemodelan menentukan nilai densitas plasma pada keadaan setimbang dengan temperatur yang divariasikan mengalami perbedaan dalam mendapatkan posisi kesetimbangan. Pada temperatur 0.1 eV atau 1160 K kondisi setimbang spesies plasma

berada pada iterasi ke-230. Pada temperatur 0.2 eV atau 2320 K kondisi setimbang spesies plasma berada pada iterasi ke-429. Pada temperatur 0.3 eV atau 3480 K kondisi setimbang spesies plasma berada pada iterasi ke-473. Pada temperatur 0.5 eV atau 5800 K kondisi setimbang spesies plasma berada pada iterasi ke-476. Perbedaan temperatur akan mempengaruhi laju reaksi spesies plasma, sehingga perolehan nilai reaksi maju dan reaksi balik akan berbeda. Semakin besar temperatur akan membuat tumbukan antar spesies semakin cepat. Hal ini yang mempengaruhi nilai densitas spesies plasma Helium dan perbedaan posisi kesetimbangan plasma Helium.



Gambar 3. Perubahan nilai densitas plasma Helium dengan variasi temperatur.

### Analisis Hubungan Spesies Plasma Helium terhadap Aplikasi Plak Gigi

Plak gigi merupakan kumpulan dari mikroorganisme yang berkembang biak membentuk suatu lapisan lunak dan melekat pada permukaan gigi. Plak gigi tersusun atas kumpulan mikroba dan matriks polimer yang berasal dari bakteri *S. Mutan*. Plak gigi terdiri dari kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dan fosfat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Plasma Helium digunakan untuk desinfeksi plak gigi. Pada plasma Helium terdapat spesies bermuatan diantaranya elektron, ion helium dan ion Helium diatomik serta spesies reaktif Helium dan spesies Helium yang tereksitasi. Elektron

dan ion dalam plasma merupakan media utama yang menyebabkan terjadinya desinfeksi pada mikroorganisme. Karena mereka dapat memutuskan ikatan hidrogen dari molekul organik penyusun plak gigi. Elektron memiliki fluks dan kedalaman penetrasi yang tinggi. Hal ini membuat elektron aktif dibawah lapisan air atau dalam cairan biologis lainnya yang menutupi permukaan jaringan hidup.

### KESIMPULAN

Nilai parameter Arrhenius menjadi salah satu faktor yang menyebabkan besar atau kecilnya nilai densitas spesies jika temperatur

divariasikan. Densitas spesies plasma akan bernilai besar jika  $\alpha >$ ,  $\beta >$ , dan  $\gamma <$ . Sebaliknya densitas spesies plasma akan bernilai kecil jika  $\alpha <$ ,  $\beta <$ , dan  $\gamma >$ . Spesies yang paling dominan dalam proses interaksi berlangsung yakni ion Helium, ion Helium diatomik dan elektron. Hal ini dikarenakan dalam proses interaksi yang terjadi spesies bermuatan dalam plasma memiliki peran lebih banyak daripada spesies netral dan spesies tereksitasi, disamping dengan menggunakan jenis gas yang dipakai untuk menghasilkan plasma.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Universitas Riau yang telah mendukung penyelesaian penelitian ini di Laboratorium Plasma dan Fotonik Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam, Universitas Riau, Pekanbaru atas bantuan finansial dan fasilitas yang diberikan.

### REFERENSI

1. Piel, A. (2017). *Plasma physics: an introduction to laboratory, space, and fusion plasmas*. Berlin: Springer.
2. Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R., & Van der Mullen, J. (2002). Gas discharge plasmas and their applications. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **57**(4), 609–658.
3. Weltmann, K. D., Kolb, J. F., Holub, M., Uhrlandt, D., Šimek, M., Ostrikov, K., Hamaguchi, S., Cvelbar, U., Černák, M., Locke, B., Fridman, A., & Becker, K. (2019). The future for plasma science and technology. *Plasma Processes and Polymers*, **16**(1), 1800118.
4. Singh, S., Chandra, R., Tripathi, S., Rahman, H., Tripathi, P., Jain, A., & Gupta, P. (2014). The bright future of dentistry with cold plasma—review. *J Dent Med Sci*, **13**, 6–13.
5. Wiradona, I., Widjanarko, B., & Syamsulhuda, B. M. (2013). Pengaruh perilaku menggosok gigi terhadap plak gigi pada siswa kelas IV dan V di SDN Wilayah Kecamatan Gajahmungkur Semarang. *Jurnal Promosi Kesehatan Indonesia*, **8**(1), 59–68.
6. Lee, H. W., Nam, S. H., Mohamed, A. A. H., Kim, G. C., & Lee, J. K. (2010). Atmospheric pressure plasma jet composed of three electrodes: application to tooth bleaching. *Plasma Processes and Polymers*, **7**(3-4), 274–280.
7. Jawaid, P., Rehman, M. U., Zhao, Q. L., Takeda, K., Ishikawa, K., Hori, M., Shimizu, T., & Kondo, T. (2016). Helium-based cold atmospheric plasma-induced reactive oxygen species-mediated apoptotic pathway attenuated by platinum nanoparticles. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, **20**(9), 1737–1748.
8. Sladek, R. E., Stoffels, E., Walraven, R., Tielbeek, P. J., & Koolhoven, R. A. (2004). Plasma treatment of dental cavities: a feasibility study. *IEEE Transactions on plasma science*, **32**(4), 1540–1543.
9. Murakami, T., Niemi, K., Gans, T., O'Connell, D., & Graham, W. G. (2012). Chemical kinetics and reactive species in atmospheric pressure helium–oxygen plasmas with humid-air impurities. *Plasma Sources Science and Technology*, **22**(1), 015003.
10. Petrova, T. B., Petrov, G. M., Boris, D. R., & Walton, S. G. (2017). Non-equilibrium steady-state kinetics of He-air atmospheric pressure plasmas. *Physics of Plasmas*, **24**(1), 013501.

11. Liu, Y., Tan, Z., Chen, X., Li, X., Wang, X., Zhang, H., & Pan, J. (2018). An investigation of the control of electron energy in the atmospheric-pressure helium plasma jet. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **46**(8), 2865-2880.
12. Wang, L., Zheng, Y., & Jia, S. (2016). Numerical study of the interaction of a helium atmospheric pressure plasma jet with a dielectric material. *Physics of Plasmas*, **23**(10), 103504.
13. Liu, D. X., Bruggeman, P., Iza, F., Rong, M. Z., & Kong, M. G. (2010). Global model of low-temperature atmospheric-pressure He+ H<sub>2</sub>O plasmas. *Plasma Sources Science and Technology*, **19**(2), 025018.
14. Yuan, X., & Raja, L. L. (2003). Computational study of capacitively coupled high-pressure glow discharges in helium. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **31**(4), 495-503.



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