

Simulasi 1D Pengaruh Tekanan Terhadap Densitas Elektron pada Plasma Argon DC Bias Discharge

Muhammad Ghufron, E. E. Yunata, dan T. Aizawa

Abstract—Telah dilakukan simulasi 1D plasma Argon dengan menggunakan pembangkit DC Bias. Simulasi dilakukan menggunakan *software* Comsol Multiphysics dimana pada simulasi asumsi suhu dijaga konstan 400K dan tekanan rendah dibawah 80 Pa. Simulasi dilakukan untuk mengetahui distribusi plasma Argon di dalam *chamber* ketika generator DC Bias diaplikasikan pada gas netral Argon di dalam *chamber*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi densitas plasma (n_e , n_i) tertinggi diketahui terletak sangat dekat dengan elektroda negatif dan semakin mengecil secara eksponensial menuju ground. Hal ini di dukung juga dari distribusi temperatur elektron (T_e) yang memiliki tren yang sama. Pada variasi tekanan diketahui bahwa dengan menaikkan tekanan gas di dalam *chamber* mampu menaikkan densitas plasma secara linear.

Kata Kunci— Comsol Multiphysics, Plasma, Plasma Argon dan DC Bias Discharge.

I. PENDAHULUAN

PLASMA dikenal sebagai fase keempat setelah fase padat, fase cair dan fase gas dengan keadaan partikelnya bergerak secara acak dan memiliki muatan tertentu namun secara keseluruhan bersifat netral (quasi netral)[1]. Penggunaan plasma dewasa ini sudah sangat luas terutama dalam dunia industri, kesehatan, sains dan teknologi. Plasma yang ditemukan secara tidak sengaja oleh Langmuir pada tahun 1928 untuk menyatakan tentang atom gas yang terionisasi [2] saat ini telah digunakan secara luas. untuk dekontaminasi dan desinfektan [3] serta pengerasan (*hardening*) lewat proses plasma nitriding [4], ashing material [5] dan proses etching [6].

Penggunaan plasma secara luas sangat menarik perhatian peneliti terutama karena plasma memiliki beberapa keuntungan diantaranya memiliki presisi yang sangat baik, membutuhkan energi yang relatif kecil, proses bisa dilakukan dalam skala besar dan sistem yang relatif mudah serta sederhana dalam pengontrolan.

Paper dikirim tanggal 29 November 2016. Penelitian ini terselenggara atas kerjasama ASMAT, UB dengan Shibaura Institute of Technology.

Muhammad Ghufron adalah dosen jurusan Fisika, FMIPA Universitas Brawijaya; email mghufron@ub.ac.id

E. E Yunata adalah mahasiswa doctoral di Jurusan Fisika, Shibaura Institute of Technology, Tokyo, Jepang

T. Aizawa adalah Profesor di Jurusan Fisika, Shibaura Institute of Technology, Tokyo, Jepang.

Bagaimanapun plasma memiliki sifat dan karakter yang khas sehingga perlu pemahaman lebih baik tentang sifat plasma untuk penggunaan yang lebih efektif dan efisien.

Simulasi merupakan salah satu cara yang bisa digunakan untuk lebih memahami karakteristik plasma di dalam *chamber* yang sangat sulit untuk diamati dengan alat yang ada secara kontinyu dan *real time*. Pada penelitian ini simulasi model 1 dimensi asimetris digunakan untuk memodelkan keadaan plasma di dalam *chamber* dengan memberikan tegangan DC Bias (Tegangan negatif) sementara gas Argon (Ar) dialirkan ke dalam *chamber* dengan tekanan di bawah 80 Pa. Penelitian ini difokuskan pada pengamatan karakteristik plasma di dalam ruang plasma yang mengamati distribusi densitas jumlah elektron, densitas jumlah ion, temperatur elektron dan sebaran potensial listrik menggunakan simulasi *software* Comsol Multiphysics. Pemilihan model 1D asimetris diperuntukkan agar mempermudah perhitungan dan penyederhanaan keadaan di dalam sistem plasma.

II. DASAR TEORI

Ionisasi gas dipercaya sebagai langkah awal untuk membentuk plasma sehingga telah banyak hal yang telah dilakukan untuk membangkitkan plasma dengan memberikan energi kepada elektron bebas untuk menciptakan ionisasi lewat tumbukan. Pembangkitan plasma yang telah banyak dilakukan misalnya memberikan tegangan tinggi frekuensi radio (RF) [7], frekuensi gelombang mikro (ECR) [8] dan menggunakan tegangan tinggi DC [9]. Elektron bebas di dalam ruang plasma meskipun dengan jumlah yang sangat sedikit akan menjadi awalan untuk menghasilkan plasma. Ketika di dalam ruang tersebut terdapat medan listrik luar dengan cara memberikan beda potensial tinggi kepada electrode maka elektron bebas mula-mula akan bergerak dipercepat menuju potensial yang lebih positif. Dalam perjalanannya elektron akan menumbuk gas argon yang bersifat netral. Adanya tumbukan elektron dengan atom gas argon akan menghasilkan ionisasi bila energi yang di transfer sebesar 14.8 eV atau atom gas argon akan berada pada keadaan eksitasi bila menyerap energi sebesar 11.2 eV berdasarkan data pada NIST. Ionisasi gas argon akan menghasilkan elektron baru yang disebut dengan elektron sekunder. Elektron sekunder akan memiliki energi kinetik dan akan menginisiasi adanya ionisasi lanjutan.

Densitas jumlah elektron dan energi rata-rata elektron diperoleh lewat perhitungan dari solusi persamaan *drift diffusion elektron* dan energi rata-rata.

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_{\varepsilon}) + \nabla \cdot [-(\mu_{\varepsilon} \mathbf{E})n_{\varepsilon} - \mathbf{D}_{\varepsilon} \cdot \nabla n_{\varepsilon}] = K_{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_{\varepsilon}) + \nabla \cdot [-(\mu_{\varepsilon} \mathbf{E})n_{\varepsilon} - \mathbf{D}_{\varepsilon} \cdot \nabla n_{\varepsilon}] + \mathbf{E} \cdot [-(\mu_{\varepsilon} \mathbf{E})n_{\varepsilon} - \mathbf{D}_{\varepsilon} \cdot \nabla n_{\varepsilon}] = K_{\varepsilon} \quad (2)$$

Pada persamaan 1 diketahui bahwa n_{ε} , μ_{ε} , \mathbf{E} , \mathbf{D}_{ε} dan K_{ε} berturut-turut adalah densitas jumlah elektron (m^{-3}), mobilitas elektron baik skalar maupun tensor ($\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$), medan listrik luar (V/m), difusivitas elektron baik skalar maupun tensor (m^2/s) dan laju densitas elektron ($1/\text{m}^3\cdot\text{s}$). Suku kedua dari persamaan 1 merujuk pada pergerakan elektron akibat pengaruh medan listrik dari luar dan suku ketiga persamaan 1 merujuk pada difusi elektron dari konsentrasi tinggi ke rendah. Sedangkan pada persamaan 2, n_{ε} adalah densitas energi elektron ($\text{V}\cdot\text{m}^{-3}$), μ_{ε} menyatakan mobilitas energi elektron ($\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$), \mathbf{D}_{ε} menyatakan difusivitas energi elektron (m^2/s), dan K_{ε} adalah energi yang hilang akibat tumbukan tidak elastis ($\text{V}/\text{m}^3\cdot\text{s}$). Hubungan distribusi energi elektron dengan difusivitas bisa diperoleh dalam persamaan berikut:

$$\mathbf{D}_{\varepsilon} = \mu_{\varepsilon} T_{\varepsilon}, \mu_{\varepsilon} = \left(\frac{2}{3}\right) \mu_{\varepsilon}, \mathbf{D}_{\varepsilon} = \mu_{\varepsilon} T_{\varepsilon} \quad (3)$$

Diman T_{ε} merupakan temperatur elektron (V) yang berhubungan dengan energi elektron. Sedangkan rata-rata energi elektron bisa diperoleh melalui hubungan:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{n_{\varepsilon}}{n_{\varepsilon}}, \text{ dan} \quad (4)$$

$$T_{\varepsilon} = \left(\frac{2}{3}\right) \bar{\varepsilon} \quad (5)$$

Elektron yang akan diperoleh merupakan jumlah elektron primer dan elektron sekunder dimana jumlah elektron sekunder jauh lebih banyak hasil dari rekasi ionisasi di dalam plasma. Hal ini terkait dengan banyaknya tumbukan sehingga K_{ε} bisa diketahui melalui persamaan:

$$K_{\varepsilon} = \sum_{j=1}^L x_j y_j N_n n_{\varepsilon} \quad (6)$$

Dimana L merupakan jumlah total reaksi ionisasi, x_j adalah fraksi mol spesies pada reaksi ke- j , y_j koefisien laju reaksi ke- j (m^3/s), and N_n is the densitas jumlah total gas yang netral ($1/\text{m}^3$). Laju total energi yang hilang akibat adanya tumbukan dapat dihitung melalui persamaan:

$$K_{\varepsilon} = \sum_{j=1}^M x_j y_j N_n n_{\varepsilon} \Delta \varepsilon_j \quad (7)$$

Dimana $\Delta \varepsilon_j$ menyatakan energi yang hilang pada reaksi j (V). k_j dapat dihitung dari data *cross-section* sebagai integral :

$$y_j = \gamma \int_0^{\infty} \varepsilon \sigma_k(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (8)$$

Disini $\gamma = (2q/m_e)^{1/2} (C^{1/2}/kg^{1/2})$, m_e menyatakan massa elektron (kg), ε adalah energi (V), $\sigma_k(\varepsilon)$ *cross section* tumbukan (m^2), dan $f(\varepsilon)$ fungsi distribusi energi elektron.

Spesies selain elektron sebagai produk lain ionisasi dapat dicari dengan menghitung solusi dari persamaan:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(w_k) + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)w_k = \nabla \cdot \mathbf{j}_k + R_k \quad (9)$$

Untuk setiap fraksi massa. Medan listrik bisa diperoleh dari persamaan:

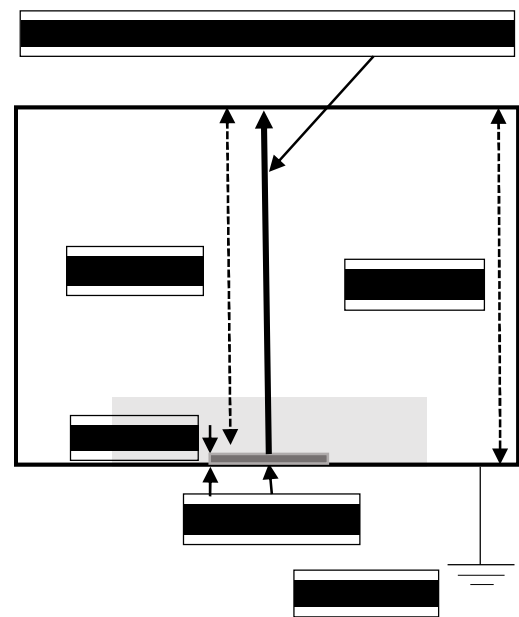
$$-\nabla \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V = \rho \quad (10)$$

Densitas muatan listrik (C/m^3) akan dihitung otomatis sesuai dengan reaksi kimia dari setiap spesies dengan persamaan [9]:

$$\rho = q \left(\sum_{k=1}^N Z_k n_k - n_{\varepsilon} \right) \quad (11)$$

III. MODEL EKSPERIMEN

Gambar 1. menunjukkan tampang lintang model yang akan digunakan pada simulasi. Model yang digunakan adalah model 1 dimensi asimetris untuk penyederhanaan persoalan. Model terdiri dari dua konduktor dimana konduktor bagian dalam diberi tegangan DC bias dan konduktor luar dibumikan (*ground*). Pengukuran dilakukan pada permukaan katode ($r = 0,2 \text{ cm}$) hingga dinding bagian atas ($r = 5$



Gambar 1. Model plasma argon dengan sumber DC Bias

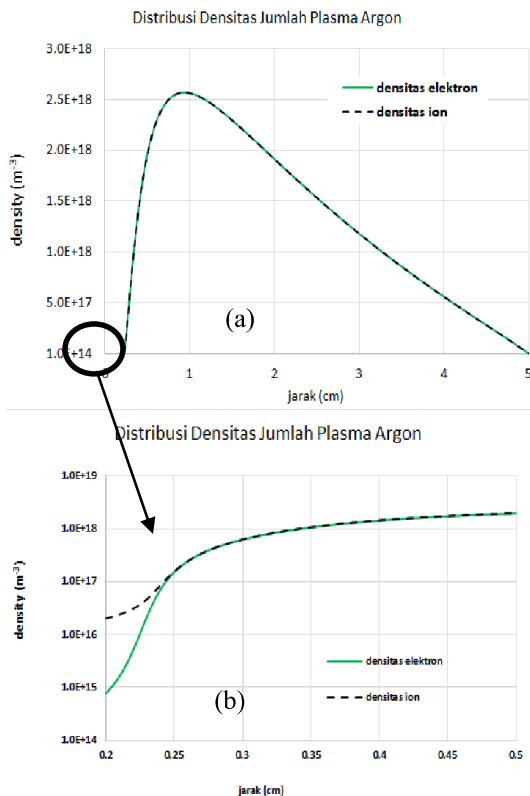
cm).

Simulasi dilakukan dengan asumsi terdapat elektron bebas (sekitar 10^9) dengan energi rendah di dalam ruang

plasma. Pergerakan plasma di dalam ruang plasma dianggap sebagai gas ideal. Syarat batas yang diberikan pada sistem plasma pada simulasi ini adalah temperatur gas di dalam ruang plasma di jaga tetap pada suhu 400K, semua bagian dinding luar konduktor dibumikan sehingga tegangan dinding 0 volt. Elektron akan bergerak menuju dinding dan akan kehilangan semua energinya saat mencapai dinding. Ion Ar^+ yang menuju dinding dan katode akan menyerap elektron dan berubah menjadi gas argon netral. Atom gas Argon terkeksitasi bila menumbuk dinding akan kehilangan energinya dan kembali menjadi atom gas Argon. Plasma yang dihasilkan lewat reaksi ionisasi secara keseluruhan netral (*quasi neutral*) dan tidak ada emisi termal di dinding.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Plasma merupakan suatu zat yang sangat kompleks karena melibatkan interaksi zat di dalamnya yaitu ion, elektron dan gas netral yang bergerak dan saling berinteraksi satu dengan yang lain. Elektron dapat saling bertumbukan secara elastis sempurna dan bisa bertumbukan lenting sebagian dengan melibatkan transfer energi. Tumbukan juga melibatkan adanya transfer muatan dan semua ini terjadi di bawah pengaruh medan listrik luar. Nilai-nilai yang direpresentasikan pada hasil simulasi merupakan nilai "rata-rata" dari distribusi masing-masing parameter secara makroskopik karena nilai sebenarnya selalu

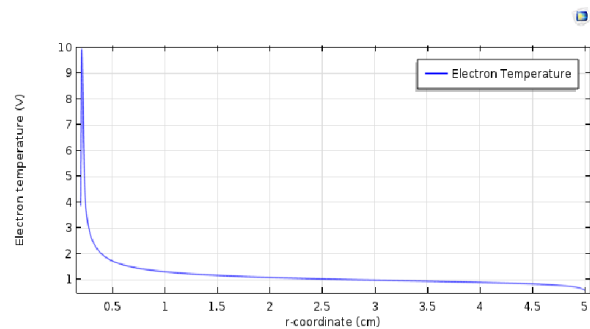


Gambar 2. Distribusi densitas jumlah ion dan elektron sebagai fungsi jarak di dalam ruang plasma pada akhir simulasi ($t = 0,1$ s)

berubah-ubah terhadap waktu dan jarak serta interaksi spesies plasma di dalamnya.

Argon sebagai gas mulia merupakan gas inert. Jumlah elektron bebas (*primary elektron*) di dalam ruang plasma di berikan $1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ dengan energi rata-rata 4 eV. Secara total gas di dalam plasma adalah netral. Angka ini merupakan nilai yang kecil dan tidak akan menyebabkan adanya ionisasi gas sebelum diberikan tegangan. Adapun spesies dari plasma Argon terdiri dari elektron, ion Ar^+ , atom Argon tereksitasi (Ars) dan atom Argon.

Gambar 2 merupakan hasil simulasi 1 dimensi yaitu grafik densitas jumlah ion dan elektron di dalam ruang plasma pada arah seperti pada Gambar 1. Hasil simulasi ini diperoleh pada tekanan gas Argon 70 Pa dan tegangan yang diberikan sebesar 400 V. Tampak bahwa elektron dan ion tidak dalam keadaan homogen di dalam ruang plasma dan justru terlihat seperti grafik sinusoidal. Densitas ion dan elektron pada permukaan katode memiliki orde 15 dan 17. Densitas jumlah ini naik signifikan sampai mencapai nilai tertinggi pada orde 18 dan kemudian turun perlahan hingga pada dinding konduktor luar mencapai orde 15 lagi. Densitas jumlah elektron dan ion memiliki distribusi dominan di dekat katode yang menandakan di daerah ini terjadi reaksi ionisasi paling banyak. Bagian menarik dari grafik ini adalah adanya densitas jumlah ion yang lebih

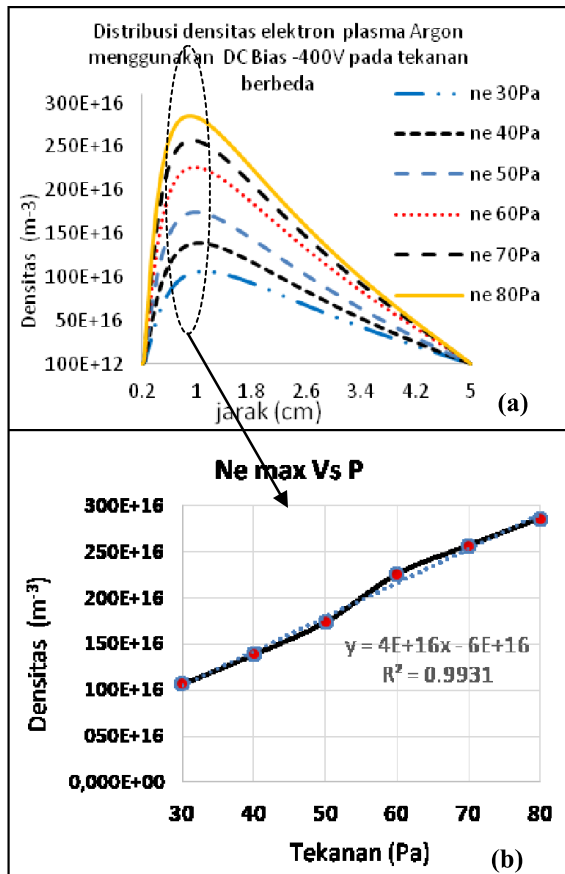


Gambar 3. Temperatur Elektron sebagai fungsi jarak pada akhir simulasi ($t = 0,1$ s)

besar di dekat katode dibanding dengan densitas jumlah elektron. Hal ini terjadi karena setelah reaksi ionisasi di dekat katode yang menghasilkan ion dan elektron sekunder maka ion Ar^+ yang dihasilkan akan tertarik secara kuat menuju katode dan sebaliknya elektron akan bergerak menjauhi katode akibat gaya tolakan elektrostatis. Adanya gerakan saling berlawanan ini menyebabkan daerah ini memiliki densitas elektron dan ion yang berbeda. Pada daerah yang lebih jauh dari katode elektron dan ion memiliki nilai densitas jumlah yang sama. Hal ini membuktikan adanya kenetralan di dalam sistem plasma (*quasi neutral*).

Ketika tegangan tinggi diberikan pada elektroda, elektron merespon dengan melakukan akselerasi menuju tegangan yang tinggi (kutub positif) dari kutub negatif. Elektron yang terlepas dari kutub negatif ini merubah energi potensial yang ada menjadi energi kinetik. Energi kinetik elektron berkorespondensi dengan temperatur elektron yang bisa dilihat pada **gambar 3** dimana temperatur elektron naik sangat signifikan di dekat kutub negative (katode) dan setelah itu menurun secara

signifikan. Hal ini dapat dijelaskan sebagai mana berikut, elektron-elektron yang terlepas meningkat energi kinetiknya karena merubah energi potensial menjadi energi kinetik, namun dalam perjalanan menuju anoda elektron-elektron tersebut menumbuk atom-atom gas Argon. Tumbukan elektron yang lenting sebagian akan memberikan sejumlah energinya pada atom atau ion yang ditumbuknya dan dapat menimbulkan reaksi. Reaksi ini dapat menimbulkan atom Ar tereksitasi (Ar^{*}) dan bisa pula terionisasi (Ar⁺) Berikut ini adalah



Gambar 4. (a) Plot densitas elektron dan (b) plot nilai densitas maksimum pada variasi tekanan gas di akhir simulasi ($t = 0.1$ s).

tabel tumbukan antara elektron dengan atom dan ion serta tumbukan antar atom Ar dan Atom Argon tereksitasi. Bila dilihat secara detail pada gambar 4 dapat diketahui bahwa energi elektron turun dari -10 eV hingga 1,8 eV pada jarak sekitar 0,5 cm.

Gambar 4 menunjukkan bahwa pada tekanan 30 Pa sampai dengan 80 Pa, plasma dapat dihasilkan dengan baik terlihat dari karakter grafik densitas elektron yang mirip satu dengan yang lainnya dengan perbedaan pada tingginya densitas elektron. Pada tekanan 80 Pa (warna grafik kuning emas) densitas elektron memiliki nilai tertinggi secara umum dan turun nilainya dengan turunnya tekanan hingga pada 30 Pa (warna biru gelap). Begitu juga dengan nilai puncak densitas elektron yang dapat dilihat pada gambar 4b dimana puncak N_e naik secara konsisten dengan naiknya tekanan dan terlihat adanya hubungan kelinearan yang sangat kuat (koefisien

korelasi 0,9931). Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Tekanan gas yang diberikan pada ruang plasma memiliki kesebandingan dengan jumlah gas yang ada di dalam ruang plasma. Meskipun nilai elektron bebas pada awalnya adalah sama pada setiap tekanan namun ketika terjadi plasma atau proses ionisasi gas, jumlah gas yang lebih banyak akan menghasilkan ionisasi gas yang semakin banyak pula dan tentu saja elektron yang dihasilkan semakin banyak.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah plasma Argon dapat dibangkitkan dengan menggunakan tegangan DC Bias sebesar 400 V pada suhu rendah 400K. Plasma terbentuk sangat dekat dengan kutub negatif (sekitar 0,2-0,7 cm) yang ditunjukkan adanya densitas jumlah elektron dan ion yang tinggi. Peningkatan tekanan gas di dalam chamber akan menaikkan jumlah gas dan menyebabkan plasma yang terbentuk semakin besar secara linear.

REFERENCES

- [1] Goebel, D. M and Ira Katz, *Fundamental of Electric Propulsion : Ion and Hall Thruster*. JPL Space Science and Technology Series : NASA. March. 2008. pp. 37-304
- [2] Langmuir, I. *Oscillations in ionized gases*. Proc. Nat. Acad. Sci. U.S., vol. 14, p. 628. 1928.
- [3] Scholtz, N., Jarmila P., Hana S., Josef K., *A tool for decontamination and disinfection*. Biotechnology Advances. Vol 33, pp. 1108-1119. 2014.
- [4] Kapczinski, M.P., Carlos Gil., Eder J.K., Carlos A.S., *Surface Modification of Titanium by Plasma Nitriding*. Material Research. Vol. 6 pp. 265-271. 2003.
- [5] Yi, Heon Chen., Tae Whan Kim., Keun-Ho Kim., Woo Seung Kang., Ji Hyun Kim., Soon Kook Hong. *Atmospheric Pressure Plasma Ashing for Display Manufacturing*. Japanese Journal of Applied Physics. Vol. 47 No. 8S2. 2008
- [6] E.E. Yunata and T. Aizawa., *Micro-texturing into DLC/diamond coated molds and dies via high density oxygen plasma etching*. Manufacturing Review. Pp. 1-7. 2015.
- [7] Sohbatzadeh, Farshad., et al., *Characterization of diamond-like carbon thin film synthesized by RF atmospheric pressure plasma Ar/CH₄ jet*. Superlattices and Microstructures. Vol. 89 pp. 231-241.
- [8] Bolshakov, et al., *High-rate growth of single crystal diamond in microwave plasma in CH₄/H₂ and CH₄/H₂/Ar gas mixtures in presence of intensive soot formation*. Diamond and Related Materials. Vol. 62. Pp. 49-57
- [9] Yan, Xiao.et. Al., *Removal of p-chlorophenol in mist by DC corona discharge plasma*. Chemical Engineering Journal. Vol. 245. pp. 41-46. 2014.
- [10] G.J.M. Hagelaar and L.C. Pitchford, "Solving the Boltzmann Equation to Obtain Elektron Transport Coefficients and Rate Coefficients for Fluid Models," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 14, pp. 722-733, 2005