

Karakterisasi reaktor plasma lucutan berpenghalang dielektrik berkonfigurasi elektroda spiral-silinder dengan sumber udara bebas

Istiqomah , Muhammad Nur dan Fajar Arianto

Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

E-mail: istiqomah@st.fisika.undip.ac.id

ABSTRACT

A research about characteristics of the plasma reactor dielectric barrier discharge gas filling the air. Plasma reactor in this research was prepared by component an electrode in the form of copper wire wrapped with a number of turns as much as 72 coil and coil diameter 25,05 mm, pyrex tube with a length of 30 cm, a diameter of 3 cm, and a thickness of 2,45 mm as a dielectric barrier, and the outer electrode in the form of cooper sheet the loaking the pyrex tube. This characterization is done by the air stream into the reactor without sample. Input voltage variation used 0,2-1,4 kV at intervals rise of 0,2 kV and the air flow rate 1-10 L/min with intervals increase of 1 L/min. The results of the characterization of current and voltage is obtained, the greater the measured current with increasing voltage and air flow rate given. The result of the characterization can be used to calculate the value of the charge carrier mobility, and the charge carrier mobility values obtained on the air flow rate 1-8 L/min increased along with the increase in air flow rate. Mobility values in the lowest obtained by air flow rate 2 L/min and the highest air flow rate 8 L/min at $2,59 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{Vs}$ and $6,08 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{Vs}$. In addition, there are also ozone measured from the reactor stuffing free air, and obtained the maximum ozone concentration in the air flow rate of 10 L/min at 191,698 ppm.

Keywords: the plasma dielectric barrier discharge, ozone, mobility of the charge carriers

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian mengenai karakteristik reaktor plasma lucutan berpenghalang dielektrik gas isian udara. Reaktor plasma dalam penelitian ini disusun oleh komponen elektroda dalam berupa lilitan kawat tembaga dengan jumlah lilitan sebanyak 72 lilitan dan diameter lilitan 25,05 mm, tabung pyrex dengan panjang 30 cm, diameter 3 cm, dan tebal 2,45 mm sebagai penghalang dielektrik, dan elektroda luar berupa lembaran tembaga yang diselubungkan pada tabung pyrex. Karakterisasi ini dilakukan dengan mengalirkan udara ke dalam reaktor tanpa sampel. Variasi tegangan masukan yang digunakan 0,2-1,4 kV dengan interval kenaikan 0,2 kV dan laju aliran udara 1-10 L/menit dengan interval kenaikan 1 L/menit. Hasil dari karakterisasi arus dan tegangan didapatkan, arus yang terukur semakin besar dengan bertambahnya tegangan dan laju aliran udara yang diberikan. Hasil dari karakterisasi tersebut bisa digunakan untuk menghitung nilai mobilitas pembawa muatan, dan diperoleh nilai mobilitas pembawa muatan pada laju aliran udara 1-8 L/menit mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan laju alir udara. Nilai mobilitas terendah didapat pada laju aliran udara 2 L/menit dan tertinggi pada laju aliran udara 8 L/menit sebesar $2,59 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{Vs}$ dan $6,08 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{Vs}$. Di samping itu juga terdapat ozon yang terukur dari reaktor gas isian udara bebas, dan didapat konsentrasi ozon maksimum pada laju aliran udara 10 L/menit sebesar 191,698 ppm.

Kata kunci: plasma lucutan berpenghalang dielektrik, ozon, mobilitas pembawa muatan.

PENDAHULUAN

Dewasa ini, teknologi plasma mulai diaplikasikan pada banyak bidang, di antaranya bidang industri, kedokteran, biomedis, kecantikan, dan pertanian [1]. Ada beberapa macam teknik pembangkitan plasma, salah

satunya adalah dengan menghadapkan dua elektroda bertegangan listrik di udara bebas. Udara adalah isolator, materi yang tidak dapat menghantarkan listrik, namun bila antara kedua elektroda itu diberi listrik tegangan tinggi, maka sifat konduktor akan muncul pada udara tersebut karena

terjadinya ionisasi [2]. Lucutan plasma dapat dihasilkan dari reaktor dengan geometri, bahan elektroda, dan gas kerja yang berbeda serta variasi tekanan udara.

Dari penelitian sebelumnya, plasma bertekanan rendah dan plasma bertekanan atmosfer dapat menghasilkan *Reactive Oxygen Spesies* (ROS) pada permukaan polimer alami dan sintesis yang dikenainya akibat kehadiran ion positif, elektron, spesies metastabil, atom reaktif, dan molekul, serta foton dalam plasma. Terbentuknya *Reactive Oxygen Spesies* (ROS) ini menyebabkan permukaan dari polimer mengalami perubahan sifat aslinya akibat elektron yang tidak berpasangan cepat bereaksi dengan lapisan polimer untuk membentuk ikatan kimia permanen. Tetapi, dalam kelompok ROS yang mengandung atom O ini terdapat senyawa yang bukan radikal bebas seperti ozon (O_3).

Ozon adalah senyawa penting yang ditemukan di dalam udara tercemar. Konsentrasi ozon tinggi terdapat di stratosfer, ozon sangat menguntungkan, yaitu untuk menyaring radiasi ultraviolet yang berbahaya dari matahari [3]. Ozon adalah pengoksidasi yang kuat terdiri dari molekul oksigen yang dapat menggantikan kloron sehingga digunakan untuk mengolah air limbah, penghilang bau, desinfektan, polusi udara, sterilisasi alat medis dan dapat menghilangkan kuman. Ozon dapat dibangkitkan dengan menggunakan radiasi ultraviolet, reaksi *optochemical* dan *dielectric barrier discharge* (DBD) [4].

Penggunaan *dielectric barrier discharge* (DBD) untuk menghasilkan ozon telah diteliti dengan gas masukan Oksigen. Diperoleh hasil konsentrasi ozon semakin meningkat dengan kenaikan tegangan dan waktu ozonisasi, serta semakin berkurang dengan semakin besarnya debit aliran gas [5]. Selain itu karakterisasi reaktor pembangkit ozon dengan *dielectric barrier discharge* (DBD) juga telah dilakukan dengan sumber masukan udara bebas [4].

Hasil dari penelitian-penelitian tersebut mendorong penulis untuk melakukan penelitian karakterisasi reaktor menggunakan reaktor

plasma lucutan berpenghalang dielektrik yang dimodifikasi dengan geometri elektroda berbentuk spiral-silinder dengan lapisan penghalang dielektrik, serta menyelubungkan selang silikon pada kawat tembaga sebagai tempat keluarnya plasma. Gas isian yang digunakan adalah udara bebas. Udara yang dilewatkan pada plasma akan menghasilkan senyawa ROS, yaitu ozon. Dari sifat tersebut memunculkan hipotesis akan diperoleh besarnya konsentrasi ozon dan karakteristik dari reaktor plasma lucutan berpenghalang dielektrik. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan karakteristik arus terhadap tegangan, nilai mobilitas pembawa muatan, dan konsentrasi ozon yang dihasilkan oleh reaktor.

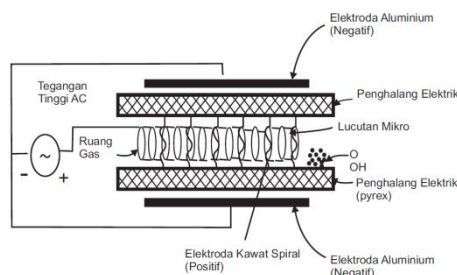
DASAR TEORI

Plasma

Plasma merupakan daerah reaksi tumbukan elektron yang sangat signifikan untuk terjadi. Plasma dapat terjadi ketika temperatur atau energi suatu gas dinaikkan sehingga memungkinkan atom-atom gas terionisasi akan membuat gas tersebut melepaskan elektron-elektronnya yang pada keadaan normal mengelilingi inti [6]. Plasma dibuat dengan memanfaatkan tegangan listrik, yaitu dengan menghadapkan dua elektroda di udara bebas. Udara adalah isolator, materi yang tidak menghantarkan listrik, namun, apabila kedua elektroda tersebut diberikan tegangan listrik yang cukup tinggi (<10 kV), maka sifat konduktor akan muncul pada udara tersebut. Bersamaan dengan itu pula maka tegangan listrik mulai mengalir (*electrical discharge*) yang fenomena ini disebut dengan *electrical breakdown*. Semakin besar tegangan listrik yang diberikan pada elektroda, maka semakin besar ion dan elektron bebas yang terbentuk [7].

Reaktor plasma lucutan berpenghalang dielektrik

Lucutan berpenghalang dielektrik sering disebut lucutan plasma senyap yang dapat digunakan untuk menghasilkan *non-equilibrium* plasma tekanan atmosfer. Lucutan plasma berpenghalang dielektrik (*Dielectric Barrier Discharge*) merupakan sistem tertutup. Lucutan plasma ini dihasilkan pada celah di antara dua elektroda, yaitu elektroda dalam sebagai elektroda aktif dan elektroda luar sebagai elektroda pasif. Di antara kedua elektroda tersebut terdapat bahan isolator sebagai penghalang (*barrier*). Bila kedua elektroda ini diberi tegangan listrik, maka akan menghasilkan medan listrik yang tidak homogen [8]. Sistem reaktor plasma senyap dengan penghalang dielektrik ini dapat ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Sistem reaktor plasma dengan penghalang dielektrik [9]

Pada Gambar 1 elektron-elektron akan bergerak menuju elektroda aktif dan menumbuk atom atau partikel di antara celah elektroda yang akan mengakibatkan atom dan ion menjadi bermuatan positif [10]. Ketika gas berada pada pengaruh medan listrik yang mampu menimbulkan pergerakan molekul gas, elektron yang memiliki energi tinggi akan memberikan energinya pada molekul gas melalui tumbukan, eksitasi molekul, tangkapan elektron, disosiasi, dan ionisasi. Selain itu, terdapat produk lain yang dihasilkan dari gas yang dilewatkan pada plasma yaitu, terbentuknya radikal bebas, *Reactive Oxygen Species* (ROS) atau dapat disebut dengan spesies oksigen reaktif.

Ozon

Ozon adalah komponen udara yang terjadi secara alami, sebagai hasil reaksi antara sinar ultraviolet dari matahari dengan lapisan atas atmosfer bumi membentuk lapisan pelindung yang menyelimuti bumi. Ozon juga dapat dibangkitkan menggunakan reaktor plasma untuk keperluan tertentu. Ozon terdiri dari 3 atom oksigen dan mempunyai rumus kimia O_3 . Molekul ozon bersifat tidak stabil dengan masa hidup sangat pendek sebelum kembali menjadi oksigen.

Ozon dapat diproduksi menggunakan dua elektroda yang diberi tegangan tinggi dengan gas masukan di antara elektroda berupa gas oksigen murni atau udara bebas. Di antara kedua elektroda tersebut dilindungi oleh bahan dielektrik agar dapat menghindari terjadinya lucutan *arc*. Adapun faktor-faktor yang dapat mempengaruhi pembentukan ozon pada umumnya adalah tegangan, bahan dielektrik, tekanan, sistem konfigurasi dari reaktor plasma, dan gas masukan dalam reaktor plasma. Pembentukan ozon melibatkan mekanisme ionisasi dan rekombinasi baik secara disosiasi maupun asosiasi.

Mobilitas rerata pembawa muatan

Mobilitas merupakan kecepatan yang diperoleh suatu ion yang bergerak saat melewati gas dalam setiap satuan medan listrik. Peristiwa terdapatnya arus ion di antara dua elektroda diawali pada daerah elektroda titik terdapat medan listrik yang kuat. Kuat medan listrik ini mempercepat partikel bermuatan terutama elektron sehingga terjadi ionisasi berantai karena tumbukan elektron [11].

Dengan menggunakan rumus Robinson termodifikasi [12], mobilitas rerata pembawa muatan dalam plasma yang dihasilkan oleh reaktor lucutan berpenghalang dielektrik dapat dihitung dengan persamaan-persamaan berikut:

$$I_s = \frac{2S\mu_{RT}\epsilon_t}{d^3} (V - V_i)^2 \quad (1)$$

$$\sqrt{I} = \sqrt{\frac{2S\mu_{RT}\epsilon_t}{d^3}} V \quad (2)$$

Dengan menuliskan,

$$C = \sqrt{\frac{2S\mu_{RT}\epsilon_t}{d^3}} \quad (3)$$

maka:

$$\mu_{RT} = \frac{C^2 d^3}{2S\epsilon_t} \quad (4)$$

dengan, I_s merupakan arus saturasi unipolar (mA), μ adalah nilai mobilitas ion ($\text{cm}^2/\text{Volt.s}$), ϵ_t adalah permitivitas total untuk 2 bahan dielektrik, V dan V_i adalah tegangan operasi dan tegangan ambang korona (Volt) [8]. C merupakan gradien yang didapatkan dari grafik linier karakteristik \sqrt{I} terhadap tegangan (V), $S = 2\pi r l$ adalah luas permukaan elektroda pasif (cm), r adalah jari-jari penghalang (*barrier*) (cm), l adalah diameter elektroda x jumlah lilitan (cm) dan d adalah jarak antar elektroda (cm).

METODE PENELITIAN

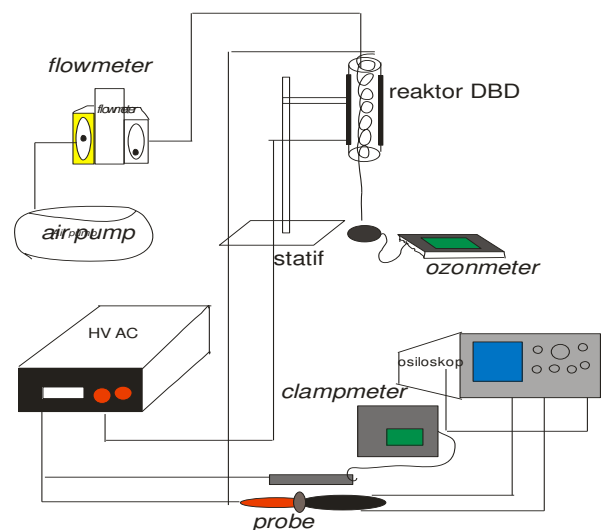
Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fisika Atom dan Nuklir, Divisi Fisika Plasma, Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro Semarang yang dilakukan pada September 2016–Januari 2017. Alat yang digunakan dalam pemelitian ini adalah reaktor plasma DBD, sumber tegangan tinggi AC, *clampmeter*, HV probe, osiloskop analog, *flowmeter*, selang silikon, statif, *airpump*, dan *ozonmeter*. Bahan yang digunakan yaitu udara bebas.

Reaktor DBD yang digunakan terbuat dari tabung *pyrex* panjang 30 cm (diameter 3 cm dan tebal 0,245 cm) dengan konfigurasi elektroda

spiral-silinder. Sebuah kawat tembaga diameter 1,52 mm dibuat lilitan (spiral) sebanyak 72 lilitan (diameter lilitan 2,505 cm) dan diletakkan di tengah tabung *pyrex* dengan sisanya dibiarkan lurus ke luar sisi tabung yang diselubungi selang silikon sepanjang 26 cm (diameter luar 3,8 mm dan diameter dalam 3 mm) yang berfungsi sebagai elektroda aktif (daya), sedangkan sisi yang lain terdapat selang PU sebagai sambungan untuk mengalirkan udara bebas. Elektroda luar berupa lembaran tembaga diselubungkan pada bagian dinding luar tabung *pyrex* sepanjang 25 cm dan diameter 3,027 cm sebagai elektroda pasif. Skema reaktor yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2. Adapun skema peralatan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Reaktor plasma lucutan berpenghalang dielektrik spiral-silinder.



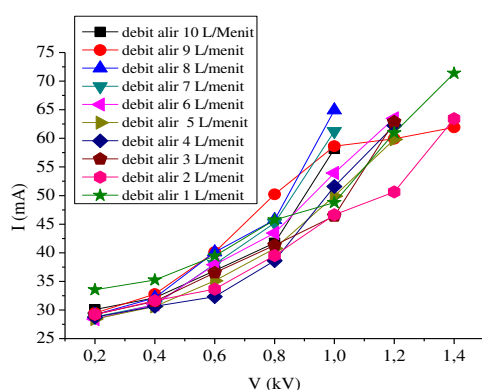
Gambar 3. Skema Peralatan Penelitian Penelitian dilakukan dengan mengkarakterisasi reaktor plasma antara arus terhadap fungsi tegangan dan konsentrasi ozon

terhadap fungsi tegangan. Karakterisasi dilakukan dengan mengalirkan udara bebas ke dalam reaktor dan memberi variasi pada tegangan masukan (0,2-1,4 kV), kemudian mengamati arus dan konsentrasi ozon yang dihasilkan reaktor. Dari karakterisasi arus terhadap tegangan dapat dicari nilai mobilitas pembawa muatan dengan menggunakan Persamaan (4).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Arus (I) – Tegangan (V)

Pada penelitian ini tegangan yang digunakan untuk membangkitkan plasma pada reaktor plasma lucutan berpenghalang dielektrik antara 0,2 kV sampai 1,4 kV dengan menaikkan tegangan setiap 0,2 kV dan variasi laju aliran udara yang digunakan 1 Liter/menit sampai 10 Liter/menit. Karakterisasi reaktor plasma lucutan berpenghalang dielektrik ini bertujuan untuk mengetahui daerah kerja reaktor, mengetahui tegangan awal munculnya arus sebagai tanda adanya lucutan, dan tegangan awal untuk mengetahui munculnya plasma hasil rekombinasi. Karakteristik arus dan tegangan hasil pengukuran pada reaktor plasma ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik karakteristik arus sebagai fungsi tegangan

Gambar 4 menunjukkan bahwa arus listrik yang dihasilkan reaktor plasma lucutan berpenghalang dielektrik meningkat seiring

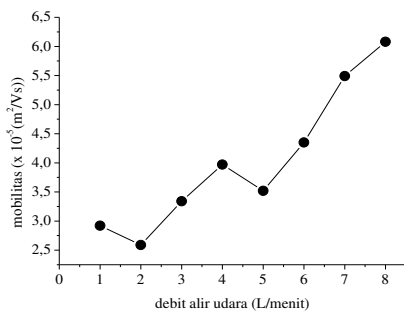
dengan kenaikan tegangan dan penambahan laju aliran udara bebas. Peningkatan arus yang sebanding dengan besar tegangan dikarenakan peran pelipatgandaan elektron dalam pembentukan lucutan plasma. Elektron tersebut bergerak dari elektroda aktif (elektroda dalam) yang terakumulasi pada bahan dielektrik yang melindungi elektroda pasif (elektroda luar) pada waktu yang bersamaan. Arus terjadi karena perubahan muatan listrik pada reaktor karena perubahan waktu. Hal tersebut menyebabkan perpindahan muatan dari satu elektroda dan menambahkannya ke elektroda yang lain. Medan listrik di antara kedua elektroda tersebut akan mempercepat elektron sehingga partikel menumbuk partikel yang lainnya. Semakin besar tegangan yang diberikan, medan listrik yang muncul juga semakin besar. Pada setiap tumbukan elektron sebagian besar energi elektron dipindahkan ke atom yang ditumbuk, sehingga mengakibatkan elektron pada atom yang ditumbuk menjadi tereksitasi.

Mobilitas pembawa muatan

Sebuah pembawa muatan yang berada di dalam medan listrik akan bergerak karena mendapatkan gaya elektrostatis. Partikel pembawa muatan dalam sebuah materi ketika diberi medan listrik akan bergerak dengan kecepatan rerata yang disebut kecepatan hanyut (*drift velocity*). Besarnya kecepatan tersebut sebanding dengan besarnya medan listrik dan nilai mobilitas [13]. Secara umum nilai mobilitas dipengaruhi oleh besar medan listrik, jumlah molekul gas, dan temperatur. Pada penelitian ini faktor yang mempengaruhi adalah medan listrik lucutan plasma menimbulkan medan listrik yang tidak seragam karena konfigurasi elektrodanya.

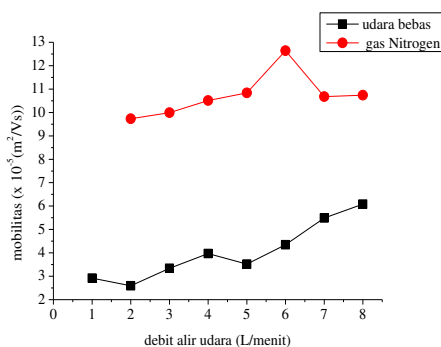
Gambar 5 menunjukkan grafik mobilitas pembawa muatan udara sebagai fungsi debit aliran udara. Terlihat bahwa semakin besar debit alir udara yang masuk ke reaktor, maka semakin tinggi pula nilai

mobilitas pembawa muatan yang bergerak melewati medan listrik. Meskipun pada laju alir 2 Liter/menit dan 5 Liter/menit mengalami penurunan, namun pada laju aliran selanjutnya nilai mobilitas semakin naik. Hal ini terjadi karena perbedaan nilai gradien (C) dari grafik linier $I^{1/2}$ dengan V . Nilai C bergantung pada arus saturasi ion pada tegangan tertentu, semakin besar nilai arus saturasi semakin besar pula nilai gradien C .



Gambar 5. Grafik hubungan nilai mobilitas dengan debit alir udara

Penelitian serupa juga dilakukan Febry (2017) menggunakan modifikasi reaktor yang sama, namun dengan sumber isian gas nitrogen. Gambar 6 menunjukkan mobilitas kedua reaktor dengan sumber isian berbeda. Dari grafik dapat dilihat bahwa nilai mobilitas dengan menggunakan isian gas Nitrogen lebih besar dibandingkan dengan menggunakan udara bebas pada debit alir gas yang sama.

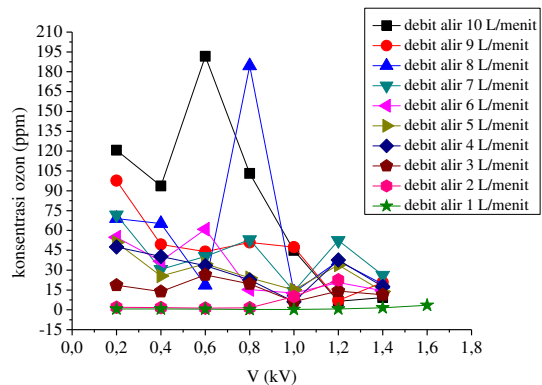


Gambar 6. Grafik perbandingan mobilitas terhadap debit alir gas dengan sumber gas nitrogen dan udara bebas

Karakteristik konsentrasi ozon– tegangan

Plasma senyap (*silent plasma*) dihasilkan dari reaktor plasma lucutan berpenghalang dielektrik. Pada lucutan plasma senyap terbentuk lucutan mikro yang kemudian akan menghasilkan ozon setelah mengionisasi oksigen yang terkandung dalam udara di sekitar elektroda. Proses menghasilkan ozon dilakukan dengan mengalirkan udara ke dalam reaktor plasma yang telah dibangkitkan. Grafik hubungan antara konsentrasi ozon sebagai fungsi tegangan dari hasil penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 7.

Dari grafik dapat diketahui bahwa konsentrasi ozon yang terukur pada reaktor plasma semakin menurun seiring dengan kenaikan tegangan dan semakin meningkat dengan meningkatnya laju aliran udara untuk besarnya tegangan yang sama. Hal ini disebabkan karena adanya nilai impedansi atau hambatan dari elektroda dalam. Nilai impedansi atau hambatan ini dipengaruhi oleh jumlah lilitan, semakin banyak jumlah lilitan, nilai impedansi semakin rendah. Berdasarkan hukum ohm, semakin kecil impedansi maka arus yang dihasilkan semakin besar, daya yang dihasilkan semakin besar, sehingga konsentrasi ozon yang dihasilkan juga semakin besar. konsentrasi ozon maksimum dicapai pada laju aliran udara 10 Liter/menit pada tegangan 0,6 kV sebesar 191,70 ppm.



Gambar 7. Grafik konsentrasi ozon sebagai fungsi tegangan

KESIMPULAN

Pada karakteristik arus (I) – tegangan (V), arus listrik yang dihasilkan reaktor plasma lucutan berpenghalang dielektrik meningkat seiring dengan kenaikan tegangan dan penambahan laju aliran udara bebas. Arus maksimum di dapatkan pada laju aliran udara 1 L/menit pada tegangan 1,4 kV sebesar 71,38 mA. Pada karakteristik konsentrasi ozon, konsentrasi ozon semakin kecil ketika tegangan dinaikkan dan semakin besar saat penambahan laju alir udara. konsentrasi ozon maksimum terjadi pada laju alir udara 10 L/menit pada tegangan 0,6 kV sebesar 191,70 ppm. Nilai mobilitas pembawa muatan maksimum terjadi pada laju aliran udara 8 Liter/menit yaitu sebesar $6,08 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{Vs}$. Kenaikan laju aliran udara yang diberikan dapat meningkatkan nilai mobilitas pembawa muatan ion udara yang bergerak saat melewati medan listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tuhi, A. dan Sutan (2011) *Pengolahan Air Limbah Industri Tahu Dengan Menggunakan Teknologi Plasma*, Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan Vol.2, No.2.
- [2] Chen, J. dan Davidson, J.H. (2002) *Electron Density and energy Distributions in the Positive DC Corona: interpretation for Corona-Enhanced Reactions*. Plasma Chemistry and Plasma Processing. Vol. 22, Hal. 199-224.
- [3] Erni E, P. (2008). *Sintesis Ozon (O₃) Menggunakan Reaktor Plasma Lucutan Penghalang Dielektrik Berkonfigurasi Spiral-Silinder dengan Gas Sumber Oksigen Murni*.
- [4] Fridman, A. (2008) *Plasma Chemistry*. Cambridge University Press.
- [5] Hao, H, dkk. (2014) *Non-thermal Plasma Enhanced Heavy Oil Upgrading*. Journal Fuel Vol. 149, Hal. 162-173.
- [6] Korzekwa, R., dkk. (1998) *Experimental Results Comparing Pulsed Corona and Dielectric Barrier Discharges for Pollution Control*, Los Alamos National Laboratory: Los Alamos.
- [7] Nur, M., Bonifaci, N., dan Denat, A. (1997) *Non-thermal Electron Mobility in High density Gaseous Nitrogen and Argon in Divergent Electric Field*. Proc. ICPIG XXIII, IV: 12-13. Toulouse, France.
- [8] Nur, M., Fadhilah, A. Suseno.A, dan Sutanto, H (2012) *Mobilitas Ion-Ion Ar⁺, OH⁻, H⁺, CO₂⁻, O₂⁻ dan Laju Aliran Angin Ion dalam Plasma Korona pada Tekanan Atmosfer*. Vol. 12 No. 2 Hal. 165-175.
- [9] Nur, M. (2016) *Modifikasi Karakteristik I (V) Robinson untuk Korona Kawat Silinder dengan Bahan Dielektrik Banyak*. Un Publish Paper.
- [10] Radojevic, M. dan Bashkin, V.N. (1999) *Practical Environmental Analysis*. Royal Society of Chemistry: England.
- [11] Susan, A. I (2016) *Kajian Perubahan Sifat Pembasahan Kain Poliester dan Kapas Akibat radiasi Plasma Lucutan Pijar Korona*, Tesis. Departemen Fisika FSM Undip, Semarang.
- [12] Sosiawati, T, Nur, M. dan Winarni T, (2014) *Produksi Ozon dalam Reaktor Dielectric Barrier Discharge Plasma (DBDP) terkait Panjang Reaktor dan Laju Alir Udara serta Pemanfaatan untuk Menjaga Kualitas Asam Amino Ikan*, Jurnal Berkala Fisika, Vol.17 No.1, Hal 25-32.
- [13] Tonk, L. (1967) *The birth of Plasma*. American Journal of Physics, Vol 35, Hal. 857-858.
- [14] Yulastri, A. H. dan Desminarti, R. (2013) *Aplikasi Plasma dengan Metoda Dielectric Barrier Discharge (DBD) untuk Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit*. Jurnal Nasional Teknik Elektro, Vol. 2 No.2.