

MOBILITAS ION-ION Ar^+ , OH^- , H^+ , CO_2^- , O_2^- DAN LAJU ALIRAN ANGIN ION DALAM PLASMA KORONA PADA TEKANAN ATMOSFER

Muhammad Nur¹; Ahmad Fadhilah²; Ahmad Suseno³; Heri Sutanto⁴

^{1,2,4}Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Diponegoro

³Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Diponegoro
Jl. H. Prof. Sudarto, Tembalang, Semarang
m.nur@undip.ac.id

ABSTRACT

A research on the corona plasma at atmospheric pressure has been carried out. In this study, the mobility of ions Ar^+ , OH^- , H^+ , CO_2^- , O_2^- is determined. Positive corona plasma is generated using a DC voltage source, and configuration of the electrodes is field point electrodes (hyperbolic). The results of the experiment show that the corona current (often called ion wind current) is proportional to V^2 in accordance with both analytical calculation by Robinson for common approaches and calculations by Choelo for hyperbolic-field approach. Ion mobility is determined using Choelo formulation the results of the determination of mobility using experimental data of currents and voltages, and the formulation Choelo are proved very close to the ion mobility obtained by time of flight method with a parallel field electrodes

Keywords: *positive corona plasma, ion mobility, field point electrode*

ABSTRAK

Penelitian tentang plasma korona pada tekanan atmosfer telah dilakukan. Dalam penelitian ini telah ditentukan mobilitas ion-ion Ar^+ , OH^- , H^+ , CO_2^- , dan O_2^- . Plasma korona positif dibangkitkan menggunakan sumber tegangan DC, dan konfigurasi elektroda adalah elektroda titik (hiperbolik) – bidang. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa arus korona (sering juga disebut arus angin ion) sebanding dengan V^2 sesuai dengan perhitungan analitik baik oleh Robinson untuk pendekatan umum dan perhitungan oleh Choelo untuk pendekatan hiperbolik-bidang. Mobilitas ion telah ditentukan menggunakan perumusan Choelo. Hasil penentuan mobilitas menggunakan data eksperimen arus dan tegangan dan perumusan Choelo sangat mendekati nilai mobilitas ion yang diperoleh dengan metode waktu terbang (time of flight) dengan elektroda bidang sejajar.

Kata kunci: *plasma korona positif, mobilitas ion, elektroda titik-bidang*

PENDAHULUAN

Penelitian tentang plasma korona telah banyak dilakukan baik secara teoritik, eksperimen maupun untuk tujuan-tujuan aplikatif (Jones, 2008; Nur, 1997; Rickard, et al, 2007). Aplikasi plasma korona sudah masuk ke berbagai bidang misalnya teknologi pangan (Timothy, et. al. 2007). Pengaruh angin ion dalam plasma korona yang dibangkitkan dengan elektroda multi titik-bidang terhadap transfer panas yang memungkinkan teknologi tersebut sebagai teknologi pengeringan telah dilakukan misalnya oleh (Kim, et. al., 2010). Teknologi korona yang menghasilkan angin korona yang sering juga disebut angin ion telah dimanfaatkan untuk mengurangi kotoran debu dan minyak pada isolator, telah dipatenkan dalam US Patent (Gelfan, 1975). Teknologi plasma korona telah banyak digunakan untuk pengendalian lingkungan terutama cemaran udara oleh gas emisi seperti CO_x, SO_x dan NO_x (Nur, et. al. 2004, Mizuno, et. al. 1995; Chang et al. 1993). Untuk meningkatkan efisiensi dan efektifitas produksi gas emisi dengan teknologi plasma dalam sistem pereduksian ditambahkan gas lain seperti Argon dan uap air dan oksigen (Nur et al, 2004). Gas-gas tersebut akan mengalami ionisasi, tereksitasi, rekombinasi, deeksitasi, radikalisasi. Aplikasi lain untuk pengendalian pencemaran udara telah dilakukan penelitiannya, misalnya tentang produksi SO_x, CO_x, dan NO_x, dari emisi yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor roda dua dan roda empat (Nur, dkk., 2004).

Hasil penelitian yang dilaporkan dalam penelitian tersebut belum membahas hal yang lebih mendasar ketika berlangsungnya peristiwa-peristiwa yang terjadi dalam kondisi plasma misalnya kajian terhadap ion secara kelistrikan dan spektroskopi. Secara kelistrikan mobilitas ion dalam kondisi plasma sangat menarik untuk dibahas. Pembahasan secara mikroskopik inilah yang diharapkan dapat menjelaskan penerapan teknologi plasma korona, agar teknologi tersebut dapat dimanfaatkan lebih efektif. Sistem plasma korona dengan elektroda titik bidang telah digunakan untuk menentukan mobilitas elektron non termal dalam gas argon dan nitrogen densitas tinggi dan sangat murni (Nur, et al., 1997).

Dalam artikel ini akan dibahas teknik penentuan mobilitas beberapa jenis ion antara lain ion-ion Ar⁺, OH⁻, H⁺, CO₂⁺ dan O₂⁻. Untuk menentukan mobilitas ion-ion tersebut terlebih dahulu akan dibahas, pendekatan Robinson dan pendekatan Choelo untuk menjelaskan hubungan arus ion (arus korona) terhadap tegangan dan kaitannya dengan unsur mikroskopik masalah-masalah transpor partikel bermuatan dalam plasma korona.

Pendekatan Umum Robinson

Robinson pada tahun 1961, telah mencari hubungan dasar tiga parameter utama yakni laju u , tegangan V , kuat arus korona (masing dalam ms⁻¹, volt dan ampere) (Robinson, 1961). Untuk jarak antar elektroda tertentu dapat dituliskan menjadi.

$$u \propto V \propto i^{1/2} \quad (1)$$

Untuk mendapatkan kaitan antara kuat arus, jarak antar elektroda, tegangan, kuat arus korona yang sering juga disebut angin korona diperoleh dengan menggunakan hukum Gauss. Diperoleh hubungan antara medan listrik dengan disipasi daya untuk tegangan V dan kuat arus i :

$$Vi = xy\mu\epsilon_0 E \int_0^d (\nabla \cdot E) Edz \quad (2)$$

dengan x, y, z adalah variabel dimensi dalam arah horizontal, longitudinal dan vertikal, d adalah jarak elektroda pada bidang z (semua dalam mm). E adalah kuat medan elektrostatis (V m⁻¹). μ adalah mobilitas ion (m² V⁻¹ s⁻¹) dan ϵ_0 permitivitas listrik udara (F m⁻¹). Jika diambil bidang 2-D lalu diperoleh:

$$V_i = xy\mu\epsilon_0 E \int_0^d \frac{dE}{dz} dz \quad (3)$$

Mengintegrasikan sepenuhnya dari 0 ke d dan diasumsikan bahwa $E = V/d$ lalu memberikan

$$i = \frac{xy\mu\epsilon_0}{2d^3} V^2 \quad (4)$$

Jika memperhitungkan tegangan ambang dimana arus mulai terjadi, perumusan (4) dapat dituliskan menjadi

$$i = \frac{xy\mu\epsilon_0}{2d^3} (V - V_i)^2 \quad (5)$$

persamaan (5) dapat digunakan secara umum untuk arus yang terdapat dalam dua elektroda yang medannya simetris, dengan jarak antar elektroda sebesar d . Dari rumus (5) dapat dihitung mobilitas muatan yang bergerak. Pada umumnya lucutan menghasilkan arus unipolar, yang didominasi oleh elektron. Mobilitas ion jarang digunakan dengan menggunakan perumusan tersebut.

Pendekatan Hiperbolik Bidang

Pada tahun 1971 Choelo (Choelo et al, 1971) melakukan analisis terhadap hubungan arus korona, tegangan, jarak antar elektroda untuk sistem elektroda yang menghasilkan medan tak simetris. Dalam kondisi lucutan korona ion yang mengalir adalah satu jenis ion (unipolar). Berbeda dengan kondisi lucutan *arc* muatan yang mengalir dapat ion positif, ion negatif dan elektron (bipolar). Arus ion unipolar dengan mobilitas μ mengalir dengan rapat muatan $\rho(r,t)$ dan rapat arus $j=\rho v$ tanpa mengalami difusi dalam medan listrik $E(r,t)$. perubahan rapat muatan (ρ) sepanjang aliran adalah:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + v \cdot \nabla\rho \quad (6)$$

Dari persamaan kontinuitas diperoleh

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (v\rho) = \frac{\partial\rho}{\partial t} + v \cdot \nabla\rho + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (7)$$

Maka persamaan 6 dapat dituliskan

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho \nabla \cdot v = -\mu\rho \nabla \cdot E = \frac{-\mu\rho^2}{\epsilon_0} \quad (8)$$

Persamaan (8) dapat diintegrasikan sehingga dapat diperoleh

$$\frac{1}{\rho(t)} - \frac{1}{\rho_0} = \frac{\mu}{\epsilon_0} (t - t_0) \quad (9)$$

Dengan Asumsi Ion berada tanpa pengaruh muatan ruang dengan waktu alir ion (T). persamaan (9) dapat diminimalkan menjadi,

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho \cdot \rho_0} = \frac{\mu}{\epsilon_0} (t - t_0) = \mu T$$

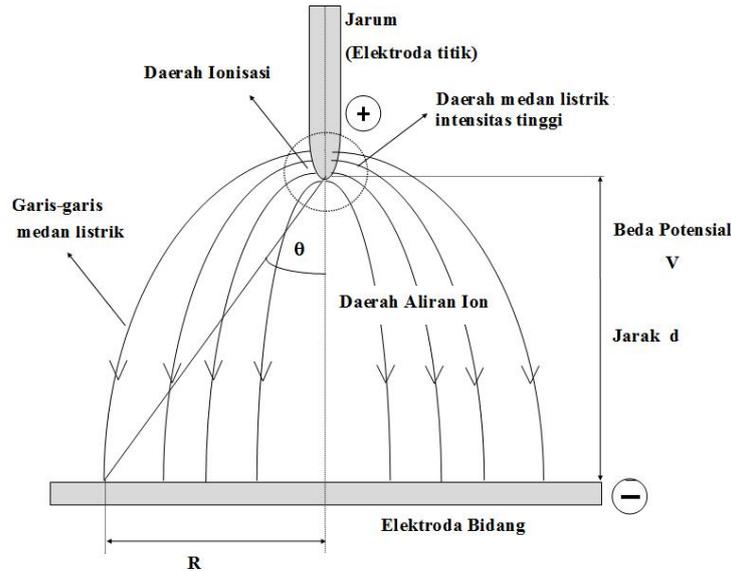
$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = -\frac{\rho_0\mu T}{\varepsilon_0} = \frac{\rho_0}{\rho_s}$$

maka

$$\rho_s \equiv \frac{\varepsilon_0}{\mu T} \quad (10)$$

dan ρ_s dinamakan rapat saturasi ion unipolar.

Berikut adalah Sketsa lucutan korona positif konfigurasi elektroda hiperbolik (titik)-bidang bidang (Gambar 1).



Gambar 1 Sketsa lucutan korona positif konfigurasi elektroda hiperbolik (titik)-bidang bidang

Apabila jarak aliran ion (L) dalam medan listrik (E). dapat diperoleh waktu alir $T=L/\mu E$, diketahui bahwa laju alir ion rata-rata $v = \mu E = \mu V/L$ dan ρ_s dapat dinyatakan kembali sebagai $\rho_s = \varepsilon_0 E/L$ sehingga diperoleh rapat arus saturasi

$$j_s = \rho_s \cdot \mu_s = \frac{\mu \varepsilon_0 E^2}{L} \quad (11)$$

Persamaan (11) disebut sebagai rapat arus saturasi ion.

Jika diberikan tegangan korona (V) laju rata-rata sepanjang medan adalah $v = \mu E = \mu V/L$ dan waktu alir L/v minimum, maka

$$\rho_L = \varepsilon_0 \bar{E} / L$$

$$j_L \approx \mu \bar{E} \sigma_L = \mu \varepsilon_0 \bar{E}^2 / L = j_s$$

atau

$$J_s = \mu \varepsilon_0 V^2 / L^3 \quad (12)$$

Persamaan (12) disebut sebagai rapat arus saturasi korona.

Dengan mengambil penyederhanaan geometri hiperboloid-bidang dan pemanfaatan distribusi Warburg dirumuskan, dan aliran ion sepanjang jarak antara titik dan bidang d maka Choelo mendapatkan arus saturasi sebesar.

$$I_s \approx 2\mu\epsilon_0 V^2 / d$$

$$\frac{I_s}{V^2} \approx \frac{2\mu\epsilon_0}{d} \quad (13)$$

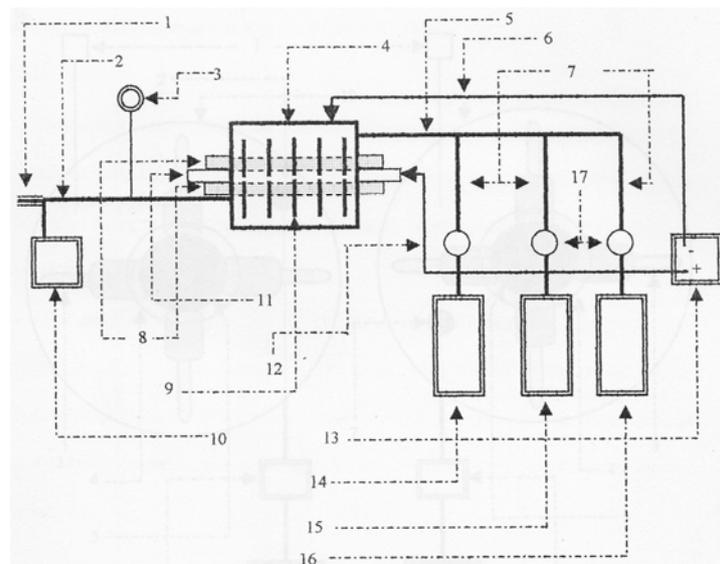
Secara eksperimen, arus saturasi (I) dapat diukur untuk tegangan operasi (V) tertentu dari lucutan korona yang terbentuk dengan konfigurasi titik bidang pada jarak antar titik dan bidang sebesar d . Jika diperhitungkan tegangan ambang korona V_i , hubungan arus saturasi dengan tegangan ditunjukkan oleh persamaan:

$$I_s = \frac{2\mu\epsilon_0}{d} (V - V_i)^2 \quad (14)$$

Pendekatan Robinson (1961) melalui medan simetris dan Choelo (1971) khusus untuk elektroda hiperbolik bidang (umumnya juga menghasilkan medan yang simetris) menghasilkan perumusan yang sama. Dengan menggunakan data eksperimen hubungan antara arus dan tegangan, dan menggunakan perumusan Robinson dan Choelo mobilitas dan laju pembawa muatan dapat ditentukan.

METODE

Gambar 2 menunjukkan skema eksperimen yang digunakan dalam penelitian ini. Reaktor plasma korona yang digunakan dalam eksperimen ini adalah reaktor multi titik berbentuk jarum yang terbuat dari stainless steel (9) dan bidang berupa tabung (4) yang di antara keduanya terdapat isolator teplon (8) yang dipasang pada sumbu tutup kedua tabung. Tegangan tinggi disediakan oleh pembangkit tegangan tinggi BATAN model BI. 767 dengan tegangan DC (13) maksimum sebesar 10 kV. Dari sumber tegangan tinggi reaktor plasma dihubungkan dengan kabel coaxial untuk polaritas positif (6) dan polaritas negatif (7).

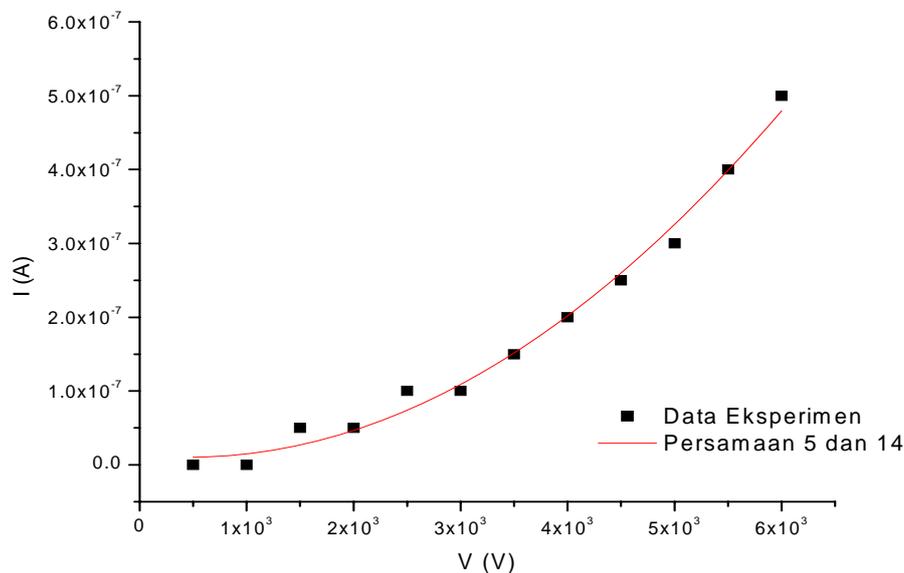


Gambar 2 Skema penelitian

Arus yang dihasilkan diukur dengan menggunakan manometer MA 3E, Leybold (3). Reaktor dibersihkan dari udara dan gas pengotor lain dengan memasukkan gas eksperimen antara lain CO₂ (14), uap air (15) dan Argon (16) ke dalam reaktor dan memompanya kembali keluar. Ini dilakukan berkali-kali agar reaktor hanya diisi oleh gas eksperimen. Pompa (10) yang digunakan merupakan pompa vakum primer dengan type RE-2 seri 1909960695. Pengaturan keluar masuknya gas dilakukan melalui keran tutup buka (1, 17). Pipa masukan gas (5) dan keluaran gas (2) terbuat dari stainless steel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

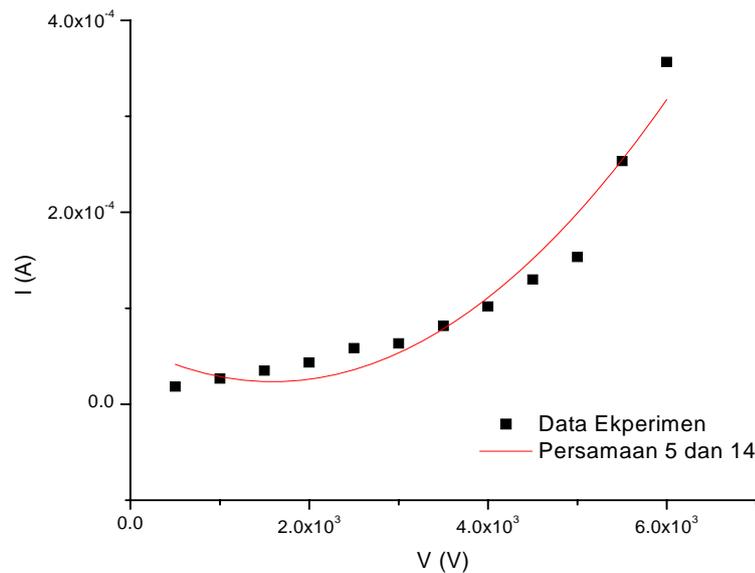
Grafik yang disajikan dalam Gambar 3 adalah hubungan antara kuat arus ion sebagai fungsi tegangan untuk lucutan korona dalam gas oksigen. Arus yang terukur adalah arus unipolar antara anoda dan katoda. Untuk gas oksigen korona menghasilkan ion negatif (O₂⁻) karena sifat oksigen sebagai molekul elektronegatif. Grafik tersebut menunjukkan hubungan bahwa arus korona sebanding dengan kuadrat tegangan. Selama eksperimen arus terpantau selalu dalam keadaan stabil. Ini sesuai perumusan analitik yang dilakukan oleh Robinson (Robinson, 1961), persamaan (5) dan Choelo (Choelo et al., 1971) persamaan (14). Dilakukan fitting data dicoba untuk menjelaskan persamaan analitik Robinson dan Choelo. Kedua persamaan (5) dan persamaan (14) dapat dituliskan menjadi $I_s = C(V - V_i)^\alpha$, dengan C adalah suatu konstanta dalam mA/kV. Dalam penelitian ini, untuk lucutan korona dalam oksigen diperoleh nilai $C = 1,5 \times 10^{-8}$ mA/kV, $V_i = 1$ kV dan $\alpha = 2$. dalam oksigen menghasilkan aliran muatan unipolar negatif (dalam hal ini adalah ion O₂⁻, karena oksigen adalah gas elektronegatif (Nur, et al. 1997)). Perkiraan V_i melalui fitting data dalam penelitian ini terlihat jelas dalam grafik pada Gambar 3, mendekati nilai eksperimen.



Gambar 3 Hubungan kuat arus korona sebagai fungsi tegangan dalam gas oksigen pada tekanan 1 atmosfer

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara arus sebagai fungsi tegangan untuk lucutan korona yang terjadi dalam uap air. Berbeda dengan oksigen, lucutan dalam uap air akan menghasilkan H^+ dan OH^- . Jadi terdapat dua jenis ion pembawa muatan. Arus listrik dengan dua jenis pembawa muatan disebut arus bipolar, dalam lucutan korona dengan arus stabil disebut saturasi bipolar. Untuk lucutan korona dalam uap air diperoleh nilai $C = 1,5 \times 10^{-5}$ mA/kV, $V_i = 2$ kV dan $\alpha = 2$.

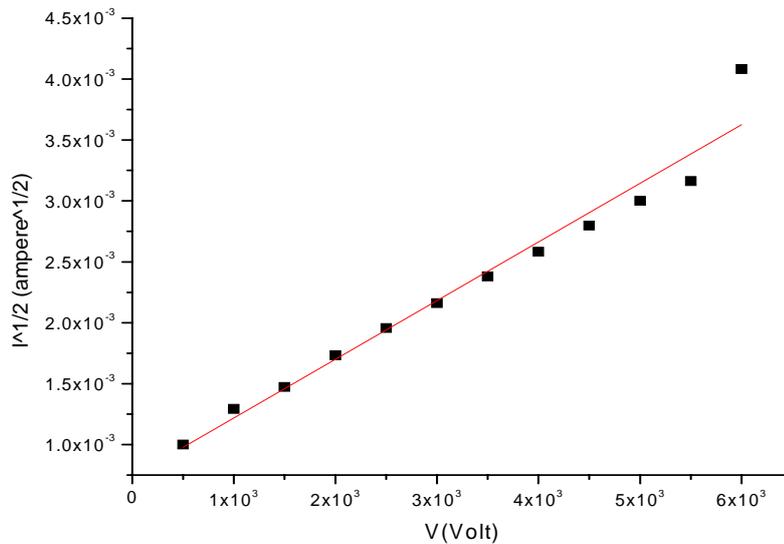
Untuk gas yang lain grafik hubungan antara arus dan tegangan ditunjukkan pada Gambar 4, yakni untuk H_2O uap. Arus ion sebagai fungsi tegangan untuk H_2O uap juga mengikuti formula Robinson dan Choelo.



Gambar 4 Hubungan kuat arus korona sebagai fungsi tegangan dalam H_2O uap pada tekanan 1 atmosfer

Peristiwa terdapatnya arus ion di antara dua elektroda diawali oleh 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. Kepadatan ion positif meningkat secara eksponensial dengan bertambahnya waktu di daerah dekat katoda. Hal ini dapat mendistorsi medan listrik yang menjadi bidang non-Laplacian. Bidang terdistorsi menciptakan lapisan tipis (sering disebut "selubung katoda") dengan ionisasi yang sangat intens didalamnya (Nur et al, 1997; Davies et al, 1980, Morrow et al, 1985). Dalam lapisan ini, medan listrik dan ionisasi menghasilkan elektron yang cukup banyak dan memungkinkan terjadinya keadaan stabil secara kelistrikan didalam daerah antar elektroda. Mekanisme seperti ini sudah sangat dikenal dengan lucutan korona dalam gas (Nupartovich, 1997). Arus ion unipolar yang oleh Sigmond (Sigmond, 1982) dinamai arus saturasi akan stabil dengan naiknya tegangan antar elektroda.

Dengan mengambil hubungan $I^{1/2}$ sebagai fungsi V , diperoleh grafik linier (Gambar 5) untuk plasma korona dalam gas Argon tekanan 1 atm. Melalui koefisien arah grafik linier dan menggunakan perumusan (14), mobilitas ion Ar^+ dapat ditentukan. Hal yang sama telah dilakukan untuk menentukan mobilitas jenis ion yang lain. Dalam penelitian ini telah ditentukan mobilitas ion Ar^+ , CO_2^- , O_2^- dan H^+ , OH^- . Khusus untuk OH^- dan H^+ merupakan mobilitas rata-rata kedua ion pembawa muatan tersebut. Keseluruhan hasil penentuan mobilitas yang diperoleh dalam penelitian ini diberikan dalam Tabel 1.



Gambar 5 Grafik hubungan antara $I^{1/2}$ dengan tegangan V untuk korona positif dalam gas Argon dengan tekanan atmosfer

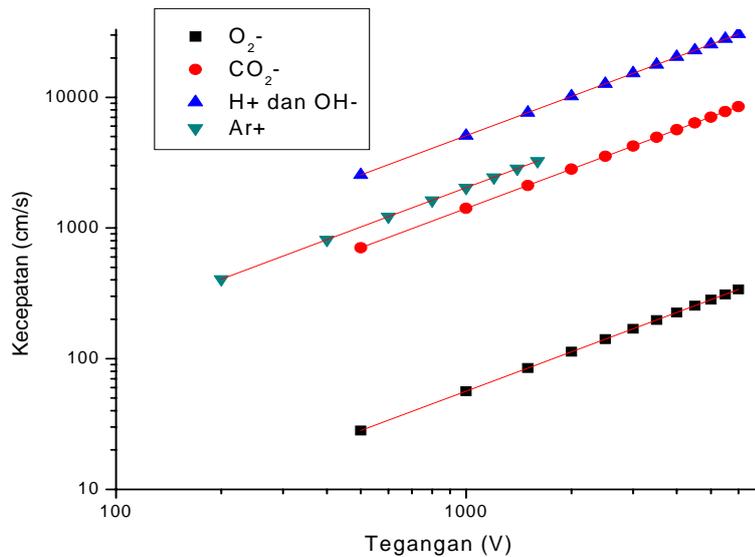
Tabel 1 Hasil mobilitas ion Ar^+ , CO_2^+ , O_2^- , H^+ dan OH^-

Jenis Gas	Jenis Ion	Nilai Mobilitas (cm^2/Vs)	Mobilitas hasil Peneliti Lain (cm^2/Vs)	Tekanan (atm)	Elektroda yang digunakan peneliti lain
Argon	Ar^+	1,423	1,565	1	Bowe, 1960 bidang-bidang
Karbon dioksida	CO_2^+	0,988	1,093	1	Allen dan Prew, 1970 Bidangbidang
Uap Air	H^+ , OH^-	3,558		1	
Oksigen	O_2^-	$3,95 \cdot 10^{-2}$	$4,12 \cdot 10^{-2}$	1	Nur et al, 1997

Hasil penentuan mobilitas ion dalam Tabel 1 menunjukkan bahwa hasil penelitian ini sangat mendekati nilai-nilai mobilitas ion yang ditemukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Hasil-hasil tersebut diperoleh dengan metoda berbeda yakni dengan metoda waktu terbang ion (*time of flight*) dengan elektroda bidang sejajar (Choelo, 1971; Bowe, 1960). Dengan menggunakan nilai mobilitas yang telah diperoleh dapat ditentukan laju pembawa muatan (ion positif dan/atau ion negatif) dan persamaan,

$$v = \mu E = \mu V/d$$

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara laju angin ion (ionic wind) untuk ion-ion Ar^+ , CO_2^+ , O_2^- , dan rerata (H^+ & OH^-). Dari grafik pada gambar 6 terlihat bahwa laju angin ion tergantung dengan jenis ionnya dan proporsional terhadap tegangan. Hasil yang ditunjukkan oleh grafik ini sama halnya seperti yang diperoleh oleh (Kim et al., 2010). Lebih jauh Kim et al, menggunakan beberapa tahap elektroda dengan tujuan untuk mendapatkan laju yang sesuai untuk aplikasi industri. Berbeda dengan Kim, penelitian ini menggunakan beberapa jenis gas sehingga dapat diketahui karakteristik dari dinamika ion dalam plasma korona.



Gambar 6 Grafik hubungan laju ion sebagai fungsi tegangan V untuk korona positif

Dari nilai laju aliran angin ion yang diperoleh pada Gambar 6 terlihat bahwa campuran ion (H⁺ & OH⁻) memiliki kelajuan yang paling besar, untuk semua tegangan terpasang. Dengan perkataan lain bahwa untuk tujuan mendapatkan kelajuan aliran ion sumber gas dalam lucutan korona uap air H₂O lebih efisien, namun uap air adalah aliran bipolar dengan kata lain arus aliran ion terjadi dua arah, karenanya tidak tepat untuk aplikasi industri. Selain itu, untuk aplikasi seperti teknologi pengeringan tak dapat digunakan karena akan menaikkan tingkat kelembaban. Dalam hal kelajuan ion Argon dan CO₂ memiliki nilai yang hampir sama. Angin ion untuk aplikasi industri pada umumnya yang dicari adalah konsumsi energi yang lebih rendah, dalam artian memiliki kelajuan yang tinggi untuk tegangan terpasang yang sama. Efisiensi angin ion dapat ditentukan melalui persamaan

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{input}} = \frac{P_{mekanik}}{P_{elektrik}}$$

dengan $P_{mekanik}$ adalah daya aliran ion yang tergantung pada kecepatan ion. Menurut

Moreau et al., (2006). bahwa daya mekanik dapat dihitung dengan persamaan $P_{mekanik} = \frac{1}{2} \rho V_{ion}^3$.

Dengan demikian efisiensi yang tinggi akan diperoleh dari laju aliran angin ion yang lebih tinggi, untuk ρ merupakan densitas gas yang digunakan dan V_{ion} adalah laju ion. Para peneliti berusaha memanfaatkan udara, dengan memodifikasi konfigurasi elektroda seperti yang dilakukan oleh June et al. (2011).

SIMPULAN

Mobilitas ion dan laju ion dari angin ion yang diproduksi melalui generator plasma korona dengan konfigurasi multi titik-bidang (selimut silender) telah dapat ditentukan. Mobilitas ditentukan menggunakan data eksperimen arus dan tegangan serta perumusan teoritik Choelo menghasilkan nilai yang sangat bersesuaian dengan pengukuran langsung dengan metoda waktu terbang ion (*time of flight*) dengan elektroda bidang sejajar. Ion (H⁺ & OH⁻) memiliki laju angin ion rerata terbesar karena merupakan arus ion bipolar. Laju angin ion unipolar terbesar dapan penelitian ini adalah ion argon, sehingga untuk konversi dari energi elektrik ke eneger mekanik ion argon menempati nilai tertinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, N. L. and Prew, B. A. (1970). Measurement of Positive Ion Drift Velocities in Electric Fields in Compressed Nitrogen and Carbon Dioxide. *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.*, 3: 1127-1133.
- Bowe, J. C. (1960). Drift Velocity of Electrons in Nitrogen, Helium, Neon, Argon, Krypton, and Xenon. *Phys. Rev.* 117: 1411–1415.
- Chang, J. S. (1993). Energetic Electron Induced Plasma Process for Reduction of Acid and Greenhouse. *Combustion Flue Gas*. Springer Verlag.
- Coelho, R., Debeau, J. (1971). Properties of the Tip-Plane Configuration. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 4: 1266.
- Davies, A. J., Evans, J. G. (1980). An Analysis of the One-Dimensional Steadystate Glow Discharge. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 13: L161–L166.
- Gelfan, P.C. (1975). Corona Wind Generating Device. *U.S. Patent No. 3,896,347*.
- Jones, J. E. (2008). On Corona-Induced Gas Motion And Heating I:Field Equations, Modelling And Vortex Formation. *Journal of Electrostatics*, 66: 84–93
- Kim, C., Park, D., Noh, K. C. and Hwang J. (2010). Velocity and Energy Conversion Efficiency Characteristics of Ionic Wind Generator in a Multistage Configuration. *Journal of Electrostatics*, 68: 36–41.
- Matthew, R., Dunn-Rankin, D. (2007). Numerical Simulation of a Tubular Ion-Driven Wind Generator. *Journal of Electrostatics*, 65: 646–654.
- Mizuno, A., K. Dascalescu, L. and Futura, S. (1995). NOx Removal Process Using Pulsed Discharge Plasma. *IEEE Transactions on Industry Application*, 31(5): 957-963.
- Moreau, E., Leger L., Touchard, G. (2006). Effect of a DC Surface-Corona Discharge on a Flat Plate Boundary Layer for Air Flow Velocity up to 25 m/s. *Journal of Electrostatics*, 64: 215-225.
- Morrow, R. (1985). Theory of Negative Corona in Oxygen. *Phys. Rev.*, 32: 1799–1809.
- Napartovich, A. P., Akishev, T. U. S., Deryugin, A. A., Kochetov, I. V., Pan'kin, M. V., Trushkin, N. I. (1997). Numerical Simulation of Trichel-Pulse Formation in a Negative Corona. *Appl. Phys.*, 30: 2726–2736.
- Nur, M. (1997) *Etude Des Décharges Couronne Dans L'argan Et L'azote Très Purs: Transport Des Charges, Spectroscopie Et Influence De La Densité*. PhD. Thesis. Joseph Fourier University, Grenoble, France.
- Nur, M., Triadyaksa, P., Suseno, A. (2004). Investigation of COx, Reduction System Prototype at 1000cc Vehicle Removal Gases Using Knife-to-Plate Glow Discharge Plasma. *Berkala Fisika*, 7(3): 75-82.
- Nur, M., Bonifaci, N., and 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.

- Robinson, M. (1961). Movement of Air in the Electric Wind of the Corona Discharge. *AIEE Trans.*, 80: 143–150.
- Sigmond, R.S. (1982). Simple Approximate Treatment of Unipolar Spacecharge-Dominated Coronas: The Warburg Law and The Saturation Current. *Appl. Phys.*, 53: 891–898.
- Timothy, I. J., Goodenough P., Goodenough, W., and Goodenough, S. M. (2007). The Efficiency of Corona Wind Drying and its Application to the Food Industry. *Journal of Food Engineering*, 80 (4): 1233-1238