

## Mengkaji Ciri- Ciri Pengionan Gas Oksigen Menggunakan Kaedah Berangka- Suatu Kajian Awal

### *Studying the Characteristics of Oxygen Gas Ionization Using Numerical Methods- A Preliminary Study*

Uthman Abdullah Zaik<sup>1</sup>, Siti Amira Othman<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Applied Sciences and Technology, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia

<sup>2</sup> Faculty of Applied Sciences and Technology, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia

#### Article Info:

Received: 08 – 07 - 2024

in revised form: 16 – 07 - 2024

Accepted: 28 – 08 - 2024

Available Online: 03 – 10 - 2024

#### Keywords:

Pengionan, oksigen, mobiliti, townsend, elektron

#### Corresponding Author:

Siti Amira Othman, Faculty of Applied Sciences and Technology, Universiti Tun Hussein Onn Malaysi, e-mail: [sitiamira@uthm.edu.my](mailto:sitiamira@uthm.edu.my)

**Abstract:** A neutral gas, when subjected to ionization energy, will cause the gas molecules to change into ions that have a positive charge and a negative charge. It can also change from its original nature of insulating to conducting electricity. The methods frequently used to ionize gases are photoionization, electrical discharge and thermal ionization. The gas tested for its ionizing properties in this study is oxygen gas. Oxygen has two interesting specifications that are factors for testing its ionizing properties, which is that it has high electronegativity. Oxygen is ozone, which is in the stratosphere and protects the earth from external radiation. The two terms of the Boltzmann equation are used to analyze the desired ionization characteristics. COMSOL software with a one-dimensional (1D) model is used to solve the two-term Boltzmann equation. Townsend's coefficient ( $\alpha$ ), electron mobility ( $\mu_e$ ) and electron mobility energy ( $\mu_e$ ) are the characteristics of ionization that have been identified. Starting at an energy of 0.25 eV, the townsend coefficient appears until the mean electron energy at 6 eV and becomes increasingly stable thereafter. Electron and electron mobility energy decrease as the mean electron energy increases. The value of the decrease in electron mobility is lower than the decrease in energy of electron mobility. The three properties explain the electronegativity properties of oxygen in more detail.

**Abstrak:** Gas yang neutral apabila dikenakan tenaga pengionan akan menyebabkan molekul gas tersebut berubah menjadi ion yang memiliki cas positif dan cas negatif. Ia boleh juga berubah daripada sifatnya yang asal iaitu penebat kepada pengalir arus elektrik. Kaedah yang kerap digunakan untuk mengionkan gas ialah fotopengionan, nyahcas elektrik dan pengionan termal. Gas yang diuji sifat pengionannya di dalam kajian ini ialah gas oksigen. Oksigen memiliki dua spesifikasi yang menarik yang menjadi faktor untuk diuji sifat pengionannya iaitu memiliki keelektronegatifan yang tinggi dan oksigen adalah ozon yang berada di aras stratosfera yang melindungi bumi dari radiasi luar. Dua terma persamaan Boltzmann digunakan untuk menganalisa ciri- ciri pengionan yang dikehendaki. Perisian COMSOL dengan model satu dimensi (1D) digunakan bagi menyelesaikan dua terma persamaan Boltzmann. Pekali Townsend ( $\alpha$ ), mobiliti elektron ( $\mu_e$ ) dan tenaga mobiliti elektron ( $\mu_e$ ) adalah ciri- ciri pengionan yang telah dikenalpasti. Bermula tenaga 0.25 eV, pekali Townsend kelihatan tidak stabil sehinggalah min tenaga elektron pada 6 eV dan menjadi semakin stabil selepas itu. Mobiliti elektron dan tenaga mobiliti elektron pula semakin berkurang sepanjang peningkatan min tenaga elektron. Nilai penurunan mobiliti elektron lebih rendah berbanding penurunan tenaga mobiliti elektron.

## PENDAHULUAN

Atom dan molekul adalah bersifat neutral secara elektriknyanya. Bilangan elektron yang memiliki cas negatif adalah sama dengan bilangan proton yang memiliki cas positif. Atom yang memiliki bilangan elektron dan proton yang sama boleh dilihat pada gas nadir kumpulan nombor 18 di dalam jadual berkala. Sekiranya atom tidak memiliki bilangan elektron yang cukup untuk memenuhi orbit, ia akan membentuk ikatan dengan atom lain lalu dinamakan sebagai molekul. Walaubagaimanapun, apabila sejumlah tenaga (tenaga pengionan) diberikan kepada atom atau molekul, maka akan berlaku pengurangan atau penambahan elektron dan ia memiliki sifat cas elektrik. Ini dinamakan sebagai proses pengionan.

Pengionan adalah proses yang melibatkan penambahan atau pengurangan elektron. Kekurangan elektron akan menukarkan atom kepada ion cas positif, manakala penambahan elektron akan menukarkan atom kepada ion cas negatif. Ia boleh dilakukan melalui banyak kaedah, di antaranya ialah dengan menggunakan kaedah nyahcas elektrik. Beza keupayaan di antara elektrod katod dan anod akan membentuk medan elektrik. Apabila tenaga dibekalkan, katod akan mengeluarkan elektron. Elektron yang memecut dengan jumlah tenaga yang sama atau melebihi tenaga pengionan akan bertindak mengionkan molekul dan atom.

Gas yang dinyahcasakan akan mengalami beberapa proses di antaranya ialah runtutan *Townsend*. Runtutan *Townsend* berlaku apabila elektron dipancarkan dan memecut di dalam medan elektrik yang kuat lalu mengionkan atom melalui pelanggaran. Akibat pelanggaran tersebut, terhasilnya elektron-elektron baru seterusnya mengalami proses yang sama secara kumulatif. Akibat pengionan yang berlaku, banyak elektron bebas yang terhasil. Bilangan elektron bebas per unit isipadu dipanggil sebagai ketumpatan elektron. Ketumpatan elektron berbeza pada setiap elemen. Kesan ketumpatan elektron pada hidrogen,  $H_2$  dan Helium, He masing-masing ialah 10 Mev dan 20 Mev di dalam tekanan 10 atm dan tenaga keupayaan dari 2-35 Mev.

Di dalam kajian ini, Oksigen,  $O_2$  telah dipilih sebagai gas yang akan dikaji sifat pengionannya. Oksigen adalah elemen yang memiliki 8 proton dan 8 elektron dengan ketumpatan gas  $1.429 \text{ gcm}^{-3}$  pada suhu 293K. Ia dijumpai oleh penyelidik pada tahun 1774. Untuk mencapai kestabilan, oksigen membentuk diatomik molekul  $O_2$ . Berbeza dengan molekul ozon iaitu hasil pembentukan 3 atom oksigen  $O_3$  dan ianya adalah molekul yang reaktif dan tidak stabil. Secara semulajadi pengionan oksigen boleh didapati pada pembentukan ozon di lapisan stratosfera. Pembentukan ozon berlaku apabila oksigen terdedah dengan sinar UV atau kilat lalu terurai dan membentuk molekul baru iaitu  $O_3$ . Ozon dikenali sebagai penyerap radiasi yang baik, buktinya dapat dilihat pada kemampuannya menyerap radiasi UV dan radiasi kosmik (Fogle et al., 2010).

Aplikasi pengionan gas sudah banyak digunakan dalam kehidupan seharian. Contohnya pada lampu pendarflour. Lampu pendarflour menggunakan konsep nyahcas elektrik dengan mengionkan gas di dalamnya. Hasil pengionan akan menyebabkan berlakunya proses rekombinasi, iaitu proses yang melibatkan atom kembali ke keadaan asal seperti elektron yang kembali semula ke orbit setelah disentakkan. Kesan proses tersebut akan melepaskan radiasi lalu melanggar dinding lampu yang diselaputi fosfor. Hasilnya akan terbentuk sebuah cahaya yang mampu menerangi sebuah bilik. Di dalam lampu pendarflour, gas nadir digunakan untuk proses nyahcas kerana memiliki pekali kelekatan elektron yang rendah berikutan keelektronegatifannya yang rendah. Wap logam alkali pula digunakan bagi meransang proses pengionan. Ini kerana logam alkali memiliki tenaga pengionan yang rendah.

Manakala aplikasi semulajadi bagi pengionan gas yang kita boleh memanfaatkan ialah pengionan molekul gas oksigen apabila terdedah dengan sinaran ultraungu (UV). Hasil pengionan daripada sinar UV, ozon iaitu molekul yang memiliki tiga oksigen terbentuk. Penyelidik telah menemui satu sebatian yang baru ketika sedang menjalankan ujikaji ke atas gas oksigen lalu menamakannya sebagai ozon yang bermaksud bau kerana memiliki bau yang tersendiri. Satu ujikaji telah dilakukan terhadap ozon oleh beberapa penyelidik dan mendapati bahawa ozon mampu menyerap sinar UV dengan kuat. Ozon adalah molekul oksigen yang terdapat pada stratosfera iaitu pada ketinggian 22 km atas bumi. Ia melindungi hidupan bumi daripada sinaran UV dan sinaran kosmik. Timbul persoalan, adakah oksigen juga mampu menyerap radiasi mengion.

Oleh itu, bagi mengenalpasti sifat pengionan gas oksigen iaitu elemen yang memiliki keelektronegatifan yang tinggi serta terpilih untuk berada di lapisan stratosfera sebagai penyerap radiasi luar bumi, kajian mengenai pengionan gas oksigen perlu dilakukan. Selain itu, masih belum ada kajian yang mencadangkan agar aplikasi gas oksigen digunakan sebagai pelindung alternatif kepada pengamal radiasi daripada radiasi yang mengion. Kebanyakan pelindung yang digunakan ialah pepejal dengan menggunakan plumbum sebagai bahannya kerana memiliki ketumpatan yang tinggi dan terbukti mampu menyerap radiasi. Ketumpatan plumbum yang agak tinggi menjadikannya berat dan menyukarkan penggunaannya. Aplikasi ini sangat diperlukan oleh pekerjaan yang sering terlibat dengan sinaran seperti pegawai perlindungan sinaran (RPO).

Oleh yang demikian, kajian ini bertujuan untuk meneliti sifat pengionan gas di dalam nyahcas elektrik seperti pekali *townsend*, mobiliti elektron dan tenaga mobiliti electron pada molekul oksigen  $O_2$ . Sifat pengionan ini penting bagi mengenalpasti ketahanan gas oksigen apabila dikenakan tenaga luar. Bagi menyempurnakan kajian ini, satu uji kaji hendaklah dilakukan. Akan tetapi penggunaan alatan yang terhad beserta harganya yang tinggi di pasaran menyukarkan kajian. Bagi mengatasi masalah ini, kajian ini menggunakan kaedah berangka bagi mencapai objektif yang telah digariskan.

## Penghasilan Elektron dan Ion Dalam Gas

Di antara kaedah asas di dalam menghasilkan elektron dan ion menurut beberapa penyelidik ialah:

1. Pengionan menggunakan hentaman elektron
2. Fotopengionan
3. Pengionan terhimpun
4. Pengionan oleh hentaman ion positif
5. Pengionan oleh pelanggaran daripada jenis yang kedua
6. Pengionan termal

Teknik pengionan ini dicadangkan oleh Davydov (2006) di dalam bukunya "*electricity in gases*" yang menyatakan bahawa untuk mengionkan mana-mana atom atau molekul normal, elektron yang hendak menghentam itu hendaklah memiliki tenaga kinetik yang cukup bagi proses pengionan. Tenaganya mestilah melebihi tenaga minimum pengionan bagi sesuatu atom. Terdapat juga hentaman elektron yang memiliki tenaga pengionan yang tinggi bersamaan mengeluarkan 2 elektron daripada orbit sekaligus.

## Fotopengionan

Fotopengionan boleh berlaku apabila molekul atau atom normal terdedah kepada radiasi yang memiliki frekuensi lebih besar daripada nilai  $\nu_i$  di dalam persamaan  $h\nu_i = eV_i$ . Dimana  $h$  adalah pemalar Plank,  $\nu_i$  adalah frekuensi dan  $eV_i$  pula adalah tenaga dalam unit elektronvolt. Elektronvolt adalah tenaga yang dimiliki oleh satu elektron apabila bergerak melalui keupayaan 1 Volt. 1 eV

bersamaan dengan  $1.6 \times 10^{-19}$  J. Radiasi yang memiliki jumlah frekuensi yang lebih tinggi daripada frekuensi elektron akan mampu mengionkan atom. Fotopengionan boleh berlaku sama ada atom gas didedahkan kepada radiasi atau atom itu sendiri yang mengeluarkan radiasi hasil rekombinasi selepas hentaman elektron kemudian mengionkan atom yang lain.

Aplikasi fotopengionan dapat kita lihat pada pengionan gas di dalam tiub Geiger-Muller untuk mengesan radiasi. Tiub Geiger-Muller kebiasaannya menggunakan gas Helium atau Argon (Baeva et al., 2012). Apabila radiasi memasuki tiub, ia akan mengionkan gas. Elektron-elektron yang terhasil daripada proses pengionan tadi akan melekat kepada elektrod anod dan menghasilkan arus elektrik. Radiasi yang dimaksudkan disini adalah foton.

Apabila pengionan itu berlaku secara berperingkat sama ada dua atau lebih ia dinamakan pengionan terhimpun. Pengionan terhimpun boleh berlaku setelah pengionan pertama daripada hentaman elektron atau fotopengionan. Elektron yang disentak akan kembali semula kepada orbit dan mengeluarkan radiasi. Sekiranya radiasi tersebut memiliki tenaga yang cukup untuk proses pengionan, ia akan mengionkan atom yang lain pula. Ataupun elektron yang disentak itu memiliki tenaga kinetik yang tinggi melebihi tenaga pengionan, ia akan menghentam atom lain dan mengionkannya. Proses ini boleh berlaku secara berterusan di dalam medan elektrik sehingga terbentuk runtutan (avalanche) elektron (Laurence & John, 1972).

Sekiranya proses pengionan mampu menggunakan hentaman elektron untuk mengionkan atom, proses pengionan menggunakan hentaman ion positif juga boleh digunakan. Walaubagaimanapun, pengionan menggunakan hentaman ion positif sedikit berbeza berbanding pengionan menggunakan hentaman elektron. Walaupun ion positif memiliki tenaga kinetik yang cukup, kebarangkalian untuk mengionkan atom adalah sangat rendah. Hal ini kerana ion positif memiliki jisim yang besar dan halaju yang rendah berbanding elektron yang memiliki halaju yang tinggi. Ini berdasarkan prinsip am interaksi zarah bahawa pergerakan yang lambat adalah bersifat adiabatik, ia tidak mampu memindahkan tenaga kepada pergerakan yang laju.

Pengionan oleh pelanggaran dari jenis yang kedua adalah kesan pemindahan tenaga daripada molekul yang telah diionkan kepada molekul yang lain. Atau dalam kata lain, apabila ion positif berlanggar dengan atom, ia akan mengionkan atom tersebut dan ion positif tadi akan menjadi neutral. Contoh ini dapat kita lihat pada tindak balas di antara Argon dan Helium,  $A + He^+ \rightarrow He + A^+$ . Beberapa penyelidik mencadangkan kemungkinan pengionan yang dilakukan oleh ion positif adalah kerana ia memiliki tenaga pengionan yang tinggi.

## Oksigen

Oksigen adalah unsur yang memiliki keelektronegatifan yang tinggi. Dua allotrofi utama yang terdapat pada oksigen ialah  $O_2$ , molekul yang biasa terdapat di udara dan yang kedua ialah  $O_3$ , ozon dengan tiga atom per molekul. Molekul oksigen adalah paramagnet, sekiranya diberikan medan magnet, ia akan tertarik kepadanya. Sifat magnetnya lebih lemah berbanding logam kerana mempunyai dua elektron valensi pada molekul  $O_2$ . Paling jarang ditemui ialah spesis tetratom ( $O_4$ ) yang tidak memiliki sifat magnet dan sangat tidak stabil.

Molekul diatom oksigen  $O_2$  adalah molekul yang mudah didapati di aras troposfera iaitu sebanyak 23.19% jisim daripada komposisi udara. Ia adalah gabungan daripada 2 atom oksigen yang memiliki 8 elektron setiap satu dengan perkongsian 2 elektron valensi.

$O_2$  juga merupakan gas yang sentiasa diperlukan oleh tubuh badan manusia. Ia merupakan elemen yang paling banyak di dalam badan manusia iaitu sebanyak 61 %. Ozon adalah molekul triatome,  $O_3$  kepada oksigen. Ia terbentuk daripada proses penguraian molekul diatom oksigen,  $O_2$ . Nama ozon diberikan kerana ia mengeluarkan bau yang tajam dan ia diambil daripada perkataan Greek yang berbunyi *ozein* yang membawa maksud bau. Sebanyak 90% ozon didapati

pada aras stratosfera pada ketinggian 10 hingga 50 kilometer daripada permukaan bumi. Sekiranya semua ozon di atmosfera dimampatkan pada tekanan aras laut, ia akan membentuk lapisan hanya setebal 3 milimeter sahaja.

Pembentukan ozon di aras stratosfera berlaku bersilih ganti dengan pembentukan molekul diatom oksigen. Molekul diatom oksigen yang diuraikan apabila terkena sinar ultraviolet akan membentuk dua atom yang berasingan. Atom tersebut pula akan membentuk ikatan dengan molekul diatom oksigen yang lain, akhirnya terbentuklah ozon. Apabila ozon terkena sinar UV, satu ikatan atom oksigen akan terputus. Atom oksigen tersebut akan membentuk ikatan dengan atom oksigen lain dan menjadikan ia molekul diatom semula. Begitulah proses pembentukan ozon yang silih ganti berlaku di aras stratosfera.

Selain manfaat semulajadi yang dilakukan oleh ozon untuk melindungi hidupan bumi daripada sinar UV berbahaya, ozon juga boleh dibentuk oleh manusia menerusi beberapa kaedah pengionan. Diantaranya ialah kaedah menggunakan nyahcas elektrik, kaedah menggunakan sinar UV dan kaedah menggunakan elektrokimia.

### **NYAHCAS ELEKTRIK**

Kaedah yang menggunakan nyahcas elektrik ialah menggunakan jenis nyahcas korona. Beza nyahcas korona dengan nyahcas yang lain seperti dielektrik ialah nyahcas korona menggunakan saiz katodnya yang lebih kecil berbanding saiz anod seperti sebatang jarum. Manakala nyahcas dielektrik menggunakan saiz yang sama pada kedua-dua elektrod. Gas oksigen akan dilalukan melalui medan elektrik. Medan elektrik akan memisahkan molekul diatom oksigen kepada dua atom oksigen berasingan. Atom oksigen akan menjadi stabil setelah melakukan ikatan dengan molekul diatom  $O_2$  yang lain lalu terhasillah molekul ozon  $O_3$ . Penghasilan ozon menggunakan nyahcas elektrik boleh juga kita dapati penghasilannya ketika berlaku petir di peringkat troposfera.

Penjana ozon yang menggunakan radiasi ultraungu juga turut dilakukan oleh manusia. Peniruan mekanisma sama yang berlaku di aras stratosfera menghasilkan ozon sepertimana yang dikehendaki. Walaubagaimanapun penghasilan ozon menggunakan kaedah ini jauh lebih kurang berbanding penghasilan ozon menggunakan kaedah nyahcas elektrik iaitu 1% wt. berbanding 10% wt. Kaedah ini mungkin lebih sesuai untuk penghasilan ozon pada kadar yang sedikit. Penjana ozon elektrokimia pula menggunakan kaedah elektrolisis bagi menghasilkan ozon terus daripada air. Penjana elektrokimia mampu menjana kepekatan ozon yang tinggi iaitu boleh mencapai 3-47 %. Melalui kaedah ini, kepekatan ozon bergantung kepada ketumpatan arus elektrik di dalam litar.

### **Ozon**

Diantara aplikasi ozon ialah dengan menggunakan kemampuannya untuk merawat air kumbahan. Ozon merupakan oksidan yang sangat kuat. Ia boleh melakukan oksidasi terus atau pemusnahan pada dinding sel, tindak balas dengan produk radikal penguraian ozon dan merosakkan konstituen asid nukleik. Apabila ozon diuraikan di dalam air, radikal bebas hidrogen peroxy ( $HO_2$ ) dan hidroksil (HO) yang terbentuk memiliki kapasiti oksidasi yang kuat dan memainkan peranan untuk proses pembasmian kuman. Secara umumnya dipercayai bahawa bakteria dimusnahkan kerana oksidasi yang bersifat fotoplasma terhasil di dalam peleraian dinding sel. Aplikasi lain ozon boleh juga didapati di dalam meningkatkan penjagaan mikrobiologi dan kualiti makanan.

Gas ozon boleh dikira sebagai pencemaran dan berbahaya kepada manusia dan fitotoksik kepada tumbuhan apabila kepekatan gas ozon mencapai beberapa tahap. Walaubagaimanapun penguraian ozon tidak dilihat berbahaya kepada persekitaran atau kegunaan manusia, dan di sana tidak ada peraturan di dalam pembebasan air rawatan ozon. Penguraian ozon adalah proses penguraian molekul ozon kepada molekul yang lain.

## Gas Elektronegatif

Pauling mendefinisikan elektronegatif dengan kekuatan atom di dalam molekul untuk menarik elektron kepada dirinya. Oleh itu faktor pengionan yang bertujuan mengeluarkan elektron daripada atom sangat berlawanan dengan sifat elektronegatif. Di antara proses yang berlaku ketika pengionan gas ialah kelekatan. Kelekatan ialah proses apabila elektron yang dikeluarkan dari orbit melekat pada atom lain. Kelekatan elektron menghilangkan elektron bebas sekaligus menjadikan gas memiliki kekuatan sifat dielektrik yang tinggi. Gas yang padanya terdapat kelekatan elektron diklasifikasikan sebagai gas elektronegatif. Pekali kelekatan,  $\eta$  boleh didefinisikan, analog kepada  $\alpha$ , sebagai nombor kelekatan per elektron per unit resapan di dalam arah medan.

Jadual 1 Minimum cucuhan voltan pada setiap jenis gas

| Gas              | $V_{\min}$ (V) | p.d pada $V_{\min}$ (torr-cm) |
|------------------|----------------|-------------------------------|
| Udara            | 327            | 0.567                         |
| Argon            | 137            | 0.9                           |
| Hidrogen         | 273            | 1.15                          |
| Helium           | 156            | 4.0                           |
| Carbon dioksida  | 420            | 0.51                          |
| Nitrogen         | 251            | 0.67                          |
| Nitrogen oksida  | 418            | 0.5                           |
| Oksigen          | 450            | 0.7                           |
| Sulfur dioksida  | 457            | 0.33                          |
| Hidrogen Sulfida | 414            | 0.6                           |

Jadual 1 menunjukkan perbezaan cucuhan voltan pada setiap gas yang berbeza sifat elektronegatifnya. Gas oksigen pada kedudukan kedua tertinggi manakala gas sulfur oksida berada pada kedudukan yang paling tinggi nilai minimum cucuhan voltan dengan nilai masing-masing sebanyak 450 V dan 457 V. Manakala gas argon daripada kumpulan gas adi memiliki nilai minimum cucuhan voltan yang paling rendah iaitu sebanyak 137 V.

## COMSOL MULTIFIZIK

COMSOL multifizik merupakan perisian yang menarik dan mesra pengguna. Ia menggunakan *finite element method* (FEM) yang sudah dibuktikan ketepatannya. Perisian ini menggabungkan kesemua proses bermula daripada mereka bentuk model, menetapkan sifat fizik, berjejaring (meshing) hinggalah ke komput data yang dimasukkan. Banyak modul yang disediakan bagi memudahkan penyelidikan menggunakannya. Diantara modul yang sukar didapati pada perisian lain ialah modul plasma (Djellabi & Latreche, 2014). Beberapa penyelidik telah melakukan model simulasi kapasitif terdinding plasma menggunakan kod yang terdapat pada modul plasma di dalam perisian COMSOL. Hasil daripada model ini digunakan untuk mengira daya terhadap zarah mikro.

Runtuhan Townsend atau boleh dipanggil sebagai runtuhan elektron merupakan satu fenomena yang berlaku apabila elektron pertama meluncur kepada anod, pada masa yang sama mengionkan gas dan menghasilkan runtuhan. Runtuhan berkembang sepanjang masa dan ruang kerana penggandaan elektron berjalan terus dari katod ke anod.

Anggapkan apabila dua plat selari dengan voltan diberikan antara katod dan anod. Ruang di antara plat dipenuhi dengan gas nitrogen pada tekanan yang diberikan. Elektron bermula dari katod dengan tenaga yang kecil (0.5 eV) dan memecut ke arah anod di bawah pengaruh medan elektrik. Perlanggaran anjal elektron dengan molekul gas melambatkan pergerakan elektron ke arah anod. Tetapi apabila medan elektrik yang diberikan adalah cukup besar, elektron memecut dengan tenaga kinetik yang cukup tinggi menyebabkan pengionan tidak anjal dan pelanggaran teruja di antara elektron dengan gas berlaku (Smith, 1962).

Apabila elektron terus bergerak dari katod ke anod, dipandu oleh medan elektrik, ia akan mengalami banyak pengionan pelanggaran yang menyebabkan ion dan elektron baru terhasil. Oleh itu elektron akan berkembang dan menjadi awan elektron lalu bergerak menuju anod. Manakala ion pula hampir tidak bergerak sepanjang masa runtuh berlaku dan berada di belakang. Begitu juga apabila gas diionkan oleh foton. Elektron pertama yang menerima tenaga daripada foton akan menjadi elektron yang menghentam elektron-elektron lain di atom gas. Ia akan mengalami proses runtuh elektron yang sama sepertimana pengionan oleh hentaman elektron. Pekali Townsend mengungkapkan bilangan pasangan ion yang terhasil per unit panjang ion negatif bergerak dari katod ke anod. Penyelidik membuat kesimpulan bahawa pekali Townsend yang pertama pada pengurangan medan elektrik yang tinggi bergantung hampir sepenuhnya kepada min lintasan bebas elektron.

Penyelidik telah menguji gas udara pada kepelbagaian pekali Townsend kedua  $\gamma$  di dalam nyahcas tanpa elektrod dengan tiub nyahcas yang memiliki panjang berbeza diantara julat tekanan dari 1  $\mu$  hingga 1000  $\mu$ . Ia mendapati bahawa  $\gamma$  berbeza dengan tekanan dan juga berbeza dengan pengurangan medan elektrik  $E/p$  di dalam nyahcas arus terus. Di dalam kes nyahcas tanpa elektrod, dapat dijangkakan bahawa di dalam julat tekanan yang digunakan di dalam eksperimen,  $\gamma$  meningkat adalah disebabkan empat faktor yang berbeza: elektron melanggar permukaan kaca, ion positif melanggar permukaan kaca, pengionan daripada ion positif dan fotopengionan (Davydov, 2006).

## MOBILITI ELEKTRON

Mobiliti elektron boleh diumpamakan dengan berapa cepat elektron boleh bergerak melalui medium apabila dipengaruhi oleh medan elektrik. Beberapa penyelidik mendapati dengan pengiraan serakan keratan rentas menggunakan formula penghampiran termasuk tapisan kebergantungan momentum dan serakan pasangan akhirnya diketahui keseluruhan kadar serakan bendasing yang bergantung kepada nombor atomik dan nombor elektron berada pada spesies penderma di dalam semikonduktor. Menggunakan model serakan bendasing ini akhirnya diperolehi mobiliti elektron sebagai fungsi bagi suhu dan kepekatan bagi P-, As-, Sb-, dan B didopkan Si.

Penyelidik mengukur mobiliti elektron pada kepelbagaian rintangan plasma di dalam medan magnet. Dapat dilihat kebergantungan rintangan plasma kepada perubahan suhu. Daripada suhu 1300-1500 K, nilai rintangan  $R$  meningkat secara linear dengan  $d$  dan garis lurus  $R(d)$  adalah pada kosong untuk  $d = 0$  (Schwabe & Graves, 2013). Selain itu, penyelidik telah menguji mobiliti elektron pada plasma di dalam medan magnet dan mendapati peningkatan berlaku pada ketumpatan elektron dan suhu plasma. Penggabungan di antara medan elektrik dengan medan magnet meningkatkan lagi mobiliti elektron.

## KAEDAH

Untuk menguji sifat pengionan gas oksigen, satu kaedah berangka telah pun dikenalpasti. Perisian COMSOL versi 5.0 telah dipilih bagi menguji sifat pengionan gas oksigen. COMSOL 5.0 memiliki modul plasma yang sangat diperlukan bagi kajian ini. Persamaan Boltzmann perlu digunakan bagi mendefinisikan pengionanan gas. Jenis simulasi yang akan digunakan ialah berbentuk satu dimensi (1D). Jarak pengionan adalah bermula dari 0 hingga 100 m. Gas diuji di dalam jarak 100 m dibawah suhu bilik iaitu 300 K bermula dengan min tenaga 0.25 V (Hagelaar & Pitchford, 2005). Penyelesaian dua-terma persamaan Boltzmann mampu memberi maksimum yang konsisten diantara kinetik dan penerangan bendalir pada dinamik elektron. Ia juga mampu mengira herotan halaju elektron. Herotan halaju elektron adalah penting kerana ia bergantung kepada semua pelanggaran yang menyumbang kepada sifat kimia plasma. Didalam kajian ini kita

hanya akan memberi fokus kepada pekali Townsend, mobiliti electron dan tenaga mobiliti elektron (Dutton, 1975).

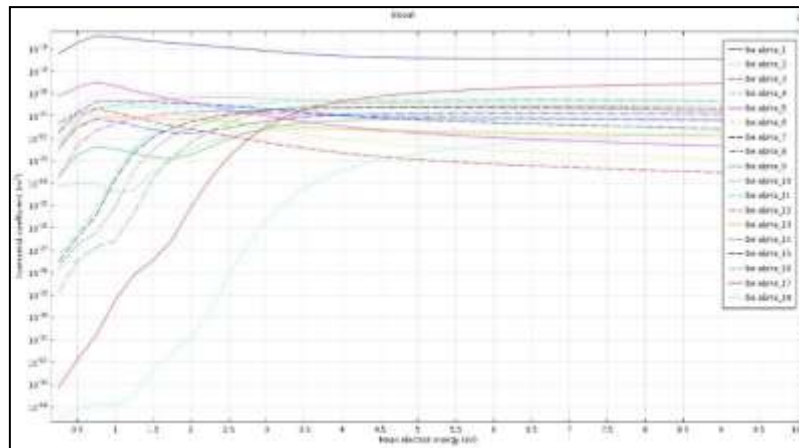
## KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Rajah 1 menunjukkan plot pekali townsend melawan min tenaga elektron pada gas oksigen. Setiap garis plot mewakili tindak balas yang berbeza. Bermula dari tindak balas anjal, kelekatan, dan keterujaan. Pada permulaan min tenaga elektron yang rendah, plot pekali Townsend mengalami sedikit turun naik. Walaubagaimanapun, selepas min tenaga elektron 6 eV, plot pekali *Townsend* agak stabil. Secara keseluruhannya, plot pekali Townsend bergerak secara seragam dengan peningkatan min tenaga elektron. Min tenaga elektron yang sedikit tidak cukup untuk membentuk runtunan townsend pada gas oksigen yang memiliki keelektronegatifan yang tinggi. Keelektronegatifan yang tinggi menyebabkan elektron yang dikeluarkan daripada orbit seringkali berlaku proses kelekatan dengan atom atau ion oksigen yang lain menyebabkan penerusan pelanggaran elektron dengan atom lain berkurang. Apabila sudah mencapai tenaga yang mencukupi, runtunan *Townsend* berlaku dengan baik dan pekali *Townsend* memiliki nilai yang tetap.

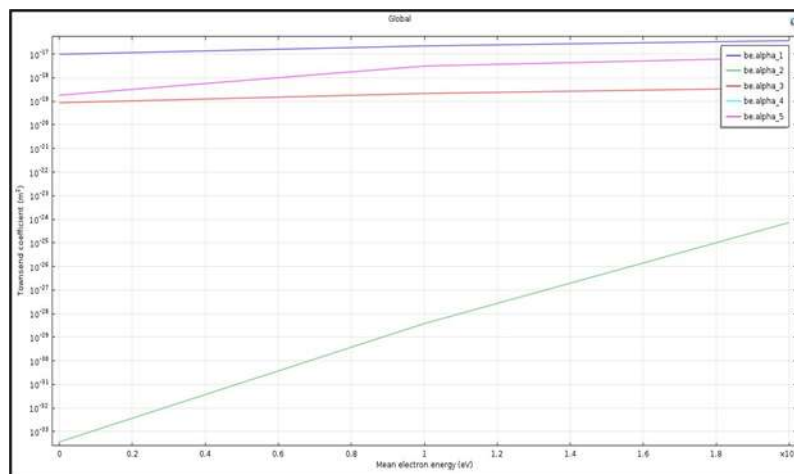
Jadual 2- Tindakbalas dan jenis pelanggaran elektron dengan molekul oksigen

| Tindakbalas | Jenis      |
|-------------|------------|
| be.alpha_1  | Momentum   |
| be.alpha_2  | Kelekatan  |
| be.alpha_3  | Keterujaan |
| be.alpha_4  | Keterujaan |
| be.alpha_5  | Keterujaan |
| be.alpha_6  | Keterujaan |
| be.alpha_7  | Keterujaan |
| be.alpha_8  | Keterujaan |
| be.alpha_9  | Keterujaan |
| be.alpha_10 | Keterujaan |
| be.alpha_11 | Superanjai |
| be.alpha_12 | Keterujaan |
| be.alpha_13 | Superanjai |
| be.alpha_14 | Keterujaan |
| be.alpha_15 | Superanjai |
| be.alpha_16 | Penceraian |
| be.alpha_17 | Penceraian |
| be.alpha_18 | Penceraian |
| be.alpha_19 | Pengionan  |

Rajah 14 pula menunjukkan plot pekali Townsend melawan min tenaga elektron pada gas argon. Argon bukanlah gas yang tergolong dalam golongan gas elektronegatif. Oleh itu, proses runtunan townsend boleh berjalan dengan mudah tanpa mengalami proses kelekatan yang menyebabkan elektron sukar meluncur ke elektron anod. Plot yang ditunjukkan dalam rajah 2 bergerak secara seragam sepanjang peningkatan min tenaga elektron bermula dari awal min tenaga elektron. Sekiranya dibandingkan plot pekali Townsend di antara gas oksigen dan gas argon, dapat dilihat bahawa perbezaan yang agak ketara di mana pekali Townsend pada gas argon tidak memerlukan tenaga yang agak tinggi untuk mencapai kestabilan. Di dalam rajah 2, be.alpha\_1 adalah tindakbalas pelanggaran anjal diikuti dengan be.alpha\_2 dan be.alpha\_3 iaitu tindakbalas keterujaan. Manakala be.alpha\_4 dan be.alpha\_5 pula adalah tindakbalas pengionan.



Rajah 1 Pekali Townsend melawan min tenaga elektron pada gas oksigen



Rajah 2 Pekali Townsend melawan min tenaga elektron pada gas Argon

### Mobiliti Elektron dan Tenaga Mobiliti Elektron

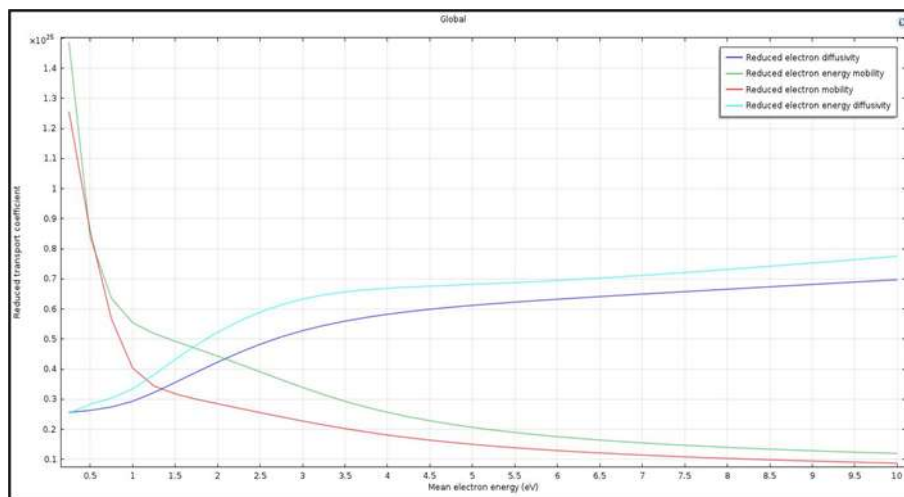
Sifat pekali townsend telah pun dikenal pasti melalui rajah 1 dan 2. Mobiliti elektron atau pergerakan elektron di dalam nyahcas gas oksigen memberi satu penjelasan mengenai keberlangsungan runtunan townsend apabila diionkan. Pengionan sesuatu gas mengeluarkan elektron daripada atom, maka pergerakan elektron tersebut sepanjang proses pengionan dipanggil mobiliti elektron. Rajah 3 menunjukkan plot pekali pengurangan pembawa. Pembawa yang dimaksudkan di sini ialah mobiliti dan peserapan elektron. Daripada graf dapat dilihat, mobiliti elektron dan tenaga mobiliti elektron berkurang sepanjang peningkatan min tenaga elektron. Nilai mobiliti elektron kelihatan lebih kecil berbanding tenaga mobiliti elektron.

Manakala peserapan elektron dan tenaga peserapan elektron meningkat sepanjang peningkatan min tenaga elektron. Peningkatan peserapan elektron dan tenaga peserapan elektron adalah disebabkan proses pengionan dan runtunan townsend. Manakala pengurangan mobiliti elektron dan tenaga mobiliti elektron adalah disebabkan faktor sifat keelektronegatifan yang terdapat pada gas oksigen.

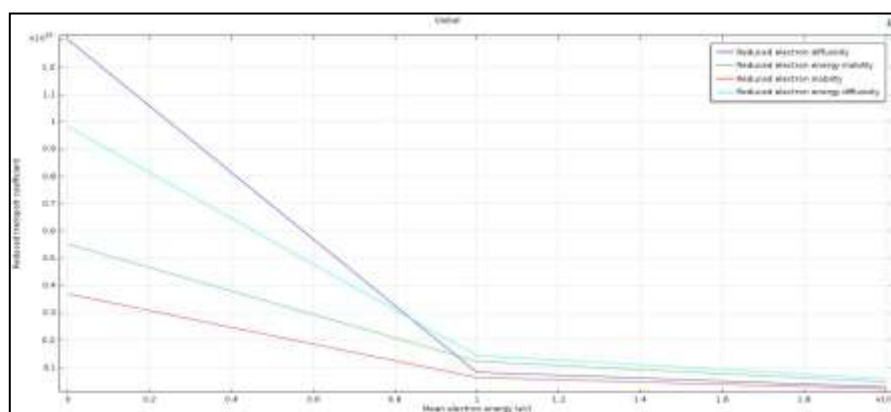
Sekiranya dibandingkan dengan rajah 4, plot mobiliti elektron dan peserapan elektron bergerak hampir sama sepanjang min tenaga elektron. Perbezaan ini menunjukkan ciri-ciri gas oksigen yang berlainan dengan gas lain. Mobiliti elektron dan tenaga mobiliti elektron berkurang

dengan peningkatan min tenaga elektron. Sepanjang proses pengionan, mobiliti elektron tenaga mobiliti elektron menurun berkadar songsang dengan peningkatan tenaga min elektron. Mobiliti elektron memiliki nilai yang lebih besar berbanding nilai tenaga mobility elektron. Namun penurunan mobiliti elektron dan tenaga mobility eletron masing-masing berlaku dengan lancar. Sekiranya dibuat perbandingan di antara mobility elektron pada oksigen dan argon, penurunan mobiliti elektron pada gas argon lebih lancer berbanding pada gas oksigen. Nilai tenaga mobiliti elektron pula lebih besar berbanding mobiliti elektron pada gas oksigen. Manakala gas argon pula memiliki nilai tenaga mobiliti elektron yang lebih kecil berbanding mobiliti elektron.

Sifat keelektronegatifan yang dimiliki oleh oksigen menyukarkan mobiliti elektron sepanjang proses pengionan. Manakala argon yang tidak memiliki keelektronegatifan menjadikan argon mengalami proses pengionan dengan mudah dan mobiliti elektron berjalan dengan lancar. Ketidakteraturan di antara mobility elektron dan tenaga mobility elektron pada gas oksigen di mana tenaga mobility elektron lebih besar daripada mobiliti elektron menunjukkan tenaga bukanlah pengaruh yang besar di dalam penurunan nilai mobiliti elektron tetapi sifat keelektronegatifannya itu menyebabkan elektron tidak dapat bergerak dengan lancar. Berbanding argon apabila diionkan, tenaga mobiliti elektronnya lebih kecil berbanding mobiliti elektron sekaligus menunjukkan tenaga mobiliti elektron menjadi faktor kepada penurunan nilai mobiliti elektron.



Rajah 3 Mobiliti elektron dan peserapan elektron bagi gas oksigen



Rajah 4 Mobiliti elektron dan peserapan elektron bagi gas argon

## SIMPULAN

Runtuhan *townsend* mampu menerangkan sifat pengionan sesuatu gas berdasarkan ciri keelektronegatifannya. Mobiliti elektron dan tenaga mobiliti elektron menerangkan dengan lebih jelas akan faktor yang menyebabkan gas oksigen mengalami kesukaran ketika diionkan. Di dalam laporan ini, kajian terhadap pengionan gas oksigen telah menunjukkan sifat pekali Townsend, mobiliti elektron dan tenaga mobiliti elektron. Ketiga-tiga sifat tersebut menjelaskan lagi akan perangkai oksigen yang memiliki daya lekat elektron yang tinggi disamping keberadaannya pada lapisan stratosfera sebagai ozon. Kestabilan pekali Townsend yang memerlukan capaian tenaga 4 eV dan pengurangan mobiliti elektron yang berkadar dengan min tenaga elektron menunjukkan faktor ketahanannya apabila dikenakan tenaga.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan setinggi penghargaan kepada Fakulti Sains Gunaan dan Teknologi, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia di atas fasiliti yang disediakan bagi membolehkan kajian ini dilakukan dengan jayanya.

## RUJUKAN

- Baeva M., A.Bosel, J. Ehlbeck and D. Loffhagen (2012). Modeling of Microwave- Induced Plasma in Argon at Atmospheric Pressure.
- Djellabi K. and M.E.H. Latreche (2014). Induction Heating Process Design Using Comsol Multiphysics Software Version 4.2a.
- Davydov Yu.I. . (2006). On the first Townsend coefficient at high electric field. IEEE Trans. Nucl. Sci. 53, 2931-2935
- Dutton J. (1975). A Survey of Electron Swarm Data. J. Phys. Chem. Ref. Data , vol. 4, pp. 577-866.
- Fogle M., S.H.M. Deng, C.R. Vane and M.E. Bannister (2010). Electron-impact dissociation of ozone cations  $O^{3+}$
- Hagelaar G.J.M. and L.C. Pitchford (2005). Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models. Plasma Sources Science and Technology, vol. 14, pp. 722- 733.
- Laurence E. Kline and John G. Siambis. (1972). Computer simulation of electric breakdown in gases: avalanche and streamer formation Phys. Rev. A 5, 794. Smith A. C. H., E. Caplinger, R. H. Neynaber, Erhard W. Rothe, and S. M.
- Trujillo. (1962). Electron Impact Ionization of Atomic Nitrogen. Phys. Rev. 127, 1647
- Schwabe M. and D. B. Graves. 2013. Simulating the dynamics of complex plasmas Phys. Rev. E 88, 023101.
- Shigeo Kawata. (2023). Physics and Selected Simulation Examples. Springer Series in Plasma Science and Technology, 1, 290. Springer Singapore.