

## LUCUTAN SENYAP PEMERCEPAT BERKAS ELEKTRON UNTUK PRODUK OZON

Agus Purwadi, Widdi Usada, Suryadi, Isyuniarto, Sri Sukmajaya, Mintolo  
Puslitbang Teknologi Maju – BATAN Yogyakarta

### ABSTRAK

*LUCUTAN SENYAP PEMERCEPAT BERKAS ELEKTRON UNTUK PRODUK OZON. Ozon adalah suatu molekul yang terdiri dari tiga atom oksigen. Karena sifat kelebihanannya sebagai oksidator yang sangat kuat maka ozon dapat digunakan sebagai pembunuh mikroorganisme patogen (bakteri, virus dan jamur). Oleh karenanya ozon dapat sangat berperan dalam sistem perlakuan limbah air, penyimpanan bahan makanan serta dalam pengolahan limbah industri karena selain berfungsi sebagai desinfektan, ozon juga mampu untuk menghilangkan warna dan bau. Telah dibuat sistem pemercepat berkas elektron metode lucutan senyap untuk produk ozon dengan gas masukan udara. Pada tabung lucutan, elektron berenergi (6 - 8,4) eV menumbuk molekul oksigen dan nitrogen untuk memperkaya tumbuhnya atom oksigen yang selanjutnya bereaksi dengan molekul oksigen membentuk molekul ozon. Lucutan senyap pemercepat berkas elektron dipasok oleh sumber tegangan tinggi bolak balik 25 kV, frekuensi 1,4 kHz, sedang luas elektroda (bentuk coaxial) yang digunakan adalah 106 cm<sup>2</sup>. Pada kondisi tersebut dengan menggunakan gas masukan aliran udara berkelajuan 3 lpm, diperoleh laju produksi ozon sebesar 0,04 mg/dt.*

*Kata kunci : lucutan senyap, plasma, energi elektron, oksigen, ozon*

### ABSTRACT

*SILENT DISCHARGE OF THE ELECTRON BEAM ACCELERATOR FOR OZONE PRODUCTION. Ozon is the molecule which consist of three oxygen atoms. Since its characteristics as a very strong oxidation, ozone can be used for killing pathogen microorganism (bacteria, virus and fungi). Because of that ozone can be very usefull as the waste water treatment, foods storage system and industri waste treatment. Besides as a disinfectans, ozone also capable of removing colour and bad smell. It has been constructed the system of electron beam accelerator by using silent discharge method for ozone production with air as the gas input. In the discharge tube, electron having energy about of (6 - 8,4) eV collide the oxygen and nitrogen molecules which will enrich to generate oxygen atom and then react with oxygen molecule to form ozone molecule. Silent discharge of the electron beam accelerator is suplied by alternating high voltage source of 25 kV, frequency 1.4 kHz and surface area of the type coaxial electrode is 106 cm<sup>2</sup>. On this condition and by using air flow rate of 3 lpm as the input gas, the ozone product flow rate of 0,04 mg/s has been obtained.*

*Key words : silent discharge, plasma, electron energy, oxygen, ozone*

### PENDAHULUAN

**G**as ozon konsentrasi rendah kalau dikelola dengan benar sesuai prosedur akan sangat bermanfaat bagi kesejahteraan manusia. Teknologi ozon juga sangat ramah lingkungan karena ozon sebelum atau setelah bereaksi dengan unsur lain selalu akan menghasilkan gas oksigen dan tanpa memberikan residu yang membahayakan. Ozon merupakan gas yang hampir tak berwarna dengan baunya yang khas sehingga dapat terdeteksi oleh indera cium sampai dengan konsentrasi 0,01 ppm (*part per million*). Konsentrasi ozon maksimum pada ruang terbuka adalah sekitar 0,10 ppm, sedang konsentrasi setinggi 1,00 ppm masih dapat dianggap tak berbahaya asal tidak terhirup ke dalam saluran pernafasan hingga lebih dari 10

menit<sup>[1]</sup>. Ozon berkemampuan untuk membasmi semua mikroorganisme seperti bakteri, virus dan jamur yang menimbulkan berbagai macam penyakit kulit (iritasi, exim) dan penyakit perut (kolera, tipes, desentri). Bahan makanan seperti buah-buahan, sayuran, ikan laut dan daging yang telah beberapa menit direndam dalam air terozonisasi maka bakteri yang ada di permukaannya akan mati sehingga bahan makanan tersebut akan menjadi steril, segar tidak berbau, awet dan lebih aman untuk dikonsumsi.

Sifat ozon di alam yang tak stabil mengakibatkan ozon tidak dapat dipaketkan untuk dibawa ke suatu tempat, sehingga ozon harus dibuat di tempat/lokasi yang memerlukan. Ozon yang merupakan gas *triatomic allotrope* oksigen dapat

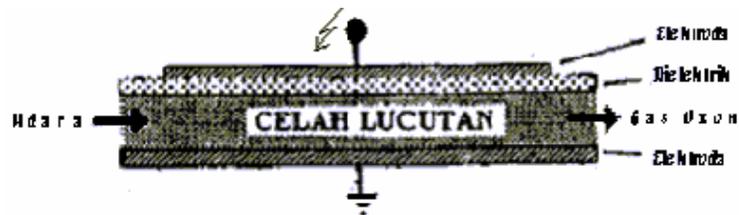
terbentuk akibat adanya hasil proses tumbukan antara elektron berenergi dengan partikel (molekul atau atom) yang mengandung unsur oksigen. Tumbukan elektron dengan partikel dapat menimbulkan ion berenergi yang selanjutnya menumbuk/bereaksi dengan suatu partikel lain yang akhirnya dapat dihasilkan partikel baru (termasuk ozon) dalam tabung lucutan. Dalam makalah ini akan ditunjukkan bahwa peranan berkas elektron pada tabung lucutan senyap adalah sangat utama yakni berguna sebagai penerang dalam proses reaksi kimia hingga terproduksi gas ozon.

## TEORI DASAR

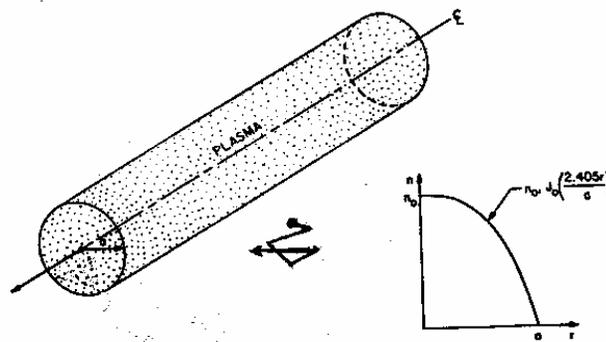
Berkas elektron pada lucutan senyap dapat dimanfaatkan untuk pembuatan gas ozon. Lucutan

senyap adalah nama lain dari lucutan terhalang dielektrik yang skema susunan elektrodanya adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Tampak pada Gambar 1 bahwa sistem lucutan senyap penghasil ozon paling sedikit harus ada tiga komponen penting yakni tabung lucutan senyap tempat dimana proses pembentukan ozon terjadi, sumber daya tegangan tinggi bolak-balik sebagai pemasok tegangan tinggi pada elektroda tabung lucutan senyap serta gas masukan yang dapat berupa gas oksigen atau udara kering. Masing-masing lucutan mikro dalam tabung lucutan berlangsung hanya beberapa nano sekon dan mencapai rapat arus  $100-1000 \text{ A/cm}^2$  dalam filamen berbentuk hampir silinder dengan jejari sekitar 100 mikro meter ( $\mu\text{m}$ ) yang ilustrasinya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Skema susunan elektroda dalam lucutan senyap.



Gambar 2. Filamen arus lucutan mikro bentuk silinder dalam tabung lucutan<sup>[2]</sup>.

Partikel plasma dalam filamen bergerak secara acak dan kerapatan plasmanya semakin menjauhi sumbu ke arah radial semakin berkurang.

Gas ozon dapat terbentuk akibat adanya hasil proses tumbukan antara elektron berenergi dengan partikel (molekul atau atom) yang mengandung unsur oksigen. Tumbukan elektron dengan partikel

tersebut juga dapat menimbulkan ion bertenaga yang selanjutnya akan menumbuk partikel lain yang ada dalam tabung lucutan. Dengan demikian kalau elektron ( $e^-$ ) dan ion ( $A^+$ ) yang berenergi pada lucutan mikro menumbuk partikel atom ( $A$  atau  $B$ ), molekul ( $AB$  atau  $BC$ ), radikal ( $A^*$ ) dan partikel kimia lain maka akan terjadi pembentukan berbagai proses hasil tumbukan seperti pada Tabel 1.

**Tabel 1. Proses-proses hasil tumbukan antara elektron dan atau ion bertenaga dengan partikel lain dalam tabung lucutan.**

Partikel	Proses hasil tumbukan		
<b>Elektron</b>	Ionisasi	$e + A$	$\rightarrow A^+ + 2e$
	Eksitasi	$e + A$	$\rightarrow A^*e + A + h\nu$
	Ionisasi Penning	$e + A^*$	$\rightarrow 2e + A^+$
	Hamburan elastis	$e + A$	$\rightarrow e + A$
	Disosiasi	$e + AB$	$\rightarrow e + A + B$
	Ionisasi disosiativ	$e + AB$	$\rightarrow 2e + A^+ + B$
	Tangkapan disosiativ	$e + AB$	$\rightarrow A^- + B$
	Rekombinasi	$e + A^+ + B$	$\rightarrow A + B$
<b>Ion</b>	Pertukaran muatan	$A^+ + B$	$\rightarrow A + B^+$
	Hamburan elastis	$A^+ + B$	$\rightarrow A^+ + B$
	Ionisasi	$A^+ + B$	$\rightarrow A + B^+ + e$
	Eksitasi	$A^+ + B$	$\rightarrow A^+ + B^* \rightarrow A^+ + B + h\nu$
	Rekombinasi	$A^+ + e + B$	$\rightarrow A + B$
	Disosiasi	$A^+ + BC$	$\rightarrow A^+ + B + C$
	Reaksi kimia	$A + BC$	$\rightarrow C + AB$

Pada dielektrik, lucutan mikro ini menyebar kedalam permukaan lucutan yang dapat menutup luasan daerah yang lebih lebar. Masing-masing lucutan mikro terdiri dari arus tipis yang terang dan menyebar pada dielektrik membentuk pola-pola muatan. Muatan yang terkumpul pada dielektrik akan menimbulkan medan listrik dalam celah yang dapat mendesak lucutan mikro ke arah yang berlawanan, sehingga akan timbul filamen arus baru yang berasal dari titik lain pada permukaan dielektrik. Muatan yang tertransfer adalah dalam orde 0,1 sampai 1,0 nC, terus mengalami tekanan sepanjang lintasannya di celah lucutan sedang arus-arus puncak terukur dalam orde 0,1 A sampai 0,5 A<sup>[3]</sup>. Dengan memperbesar penyedia daya secara pelan-pelan maka lucutan mulai terjadi ketika medan runtutan Paschen dicapai dan selanjutnya proses mengembang dalam keadaan filamen arus ter-aktivasi. Filamen arus teraktivasi ini dianggap mencapai kondisi hampir stabil (*quasi stationary*) mendekati fase transien bara dengan rapat arus beberapa kA/cm<sup>2</sup>, kerapatan elektron antara 10<sup>14</sup> sampai 10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup> serta medan listrik mendekati harga kritis dimana kejadian proses ionisasi hampir sama dengan proses tangkapan.

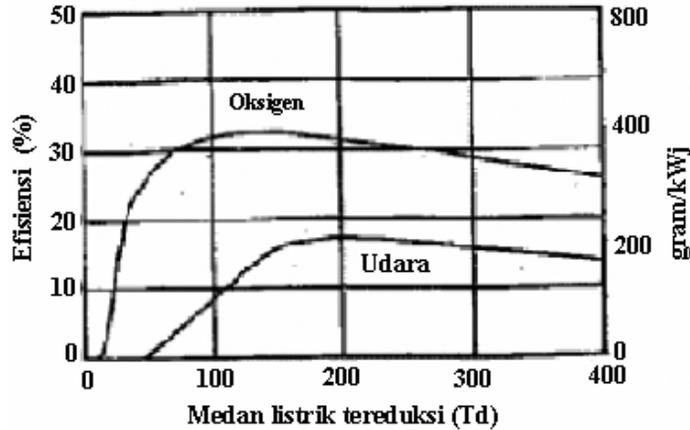
Besarnya diameter filamen arus dan jangka waktu lucutan mikro yang terjadi bergantung pada jenis gas yang digunakan dan besar tekanan. Pada tekanan rendah diameter filamen-filamen arus bertambah besar dan cenderung menjadi lebih banyak serta menyebar. Kalau tekanan terus diturunkan terjadi transisi kotinyu dari susunan

filamen dan lucutan senyap tampak cenderung menghambur ke bentuk lucutan bara. Medan runtutan bertambah untuk celah antar lucutan yang lebih kecil atau kerapatan yang lebih rendah. Pembentukan ozon dicapai terutama dalam kolom lucutan mikro dan semakin berkurang ke arah daerah yang mendekati permukaan elektroda. Pemilihan bahan dielektrik tipis dengan harga konstanta dielektrik tinggi yang konstan harus digunakan sehingga dapat diperoleh ozon dengan efisiensi tinggi<sup>[4]</sup>. Tegangan ambang lucutan bara merupakan suatu fungsi dari dielektrik, bertambah dengan bertambahnya ketebalan dielektrik dan mempengaruhi tegangan yang diperlukan untuk terjadinya lucutan. Pembuatan ozon dalam tabung lucutan senyap menggunakan gas masukan oksigen lebih menguntungkan dari pada menggunakan udara, karena pada kondisi operasi yang sama efisiensi produk ozon dapat menjadi dua sampai dengan tiga kalinya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Kalau menggunakan udara sebagai gas masukan maka idealnya air dalam udara harus dihilangkan dahulu sehingga titik beku tidak lebih tinggi dari pada -50 °C (-58 °F). Dengan produk uap air yang lebih tinggi dari harga tersebut, tidak hanya produksi ozon yang akan dipengaruhi tetapi oksida nitrogen seperti HNO<sub>3</sub> juga dapat dihasilkan yang mana dapat mempercepat dekomposisi ozon yang diperoleh serta dapat menyebabkan korosi metal, sehingga resiko kerusakan dielektrik juga bertambah. Dekomposisi ozon adalah sangat

sensitif terhadap temperatur dan dapat mempengaruhi karakteristik dielektrik yang bisa menyebabkan bocor dielektrik<sup>[5]</sup>. Oleh karenanya suatu metode penghilangan panas yang efisien yakni

dengan cara memberikan semacam alat pendingin di sekitar elektroda luar (*grounded*) adalah sangat diperlukan.



Gambar 3. Perbandingan efisiensi pembentukan gas ozon menggunakan masukan gas oksigen dan udara kering pada lucutan senyap<sup>[5]</sup>.

## TATAKERJA DAN PERCOBAAN

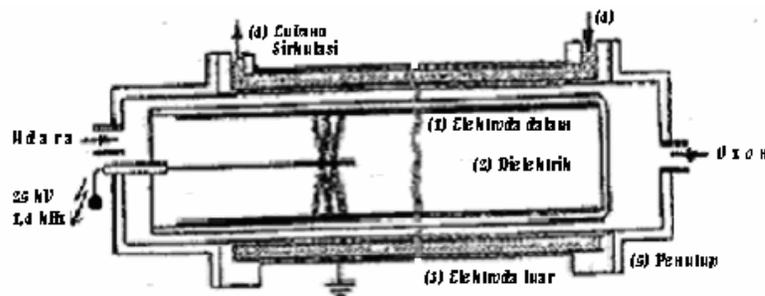
### Peralatan dan Bahan

Peralatan dan bahan yang digunakan dalam pembuatan sistem berkas elektron untuk produksi ozon secara global terdiri dari 3 unit komponen utama, yang meliputi tabung lucutan senyap tempat dimana proses pembentukan ozon terjadi, sumber daya tegangan tinggi bolak-balik untuk pemasok tegangan pada elektroda tabung lucutan dan gas masukan yang akan diubah menjadi gas ozon yakni dapat berupa aliran gas oksigen atau udara kering.

### Komponen Tabung Lucutan

Peralatan unit tabung lucutan senyap yang merupakan bagian penghasil gas adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

Terlihat pada Gambar 4 bahwa tabung lucutan senyap adalah terdiri dari beberapa komponen yang terdiri dari : (1) elektroda dalam terbuat dari bahan aluminium (Al) bentuk silinder sebagai anoda yang dihubungkan ke sumber tegangan tinggi bolak-balik; (2) dielektrik terbuat dari bahan gelas lunak yang dilapiskan pada elektroda dalam; (3) elektroda luar yang terbuat dari bahan stainless steel (SS) bentuk silinder dengan celah sebagai tempat aliran udara/air pendingin dilengkapi dengan lobang keluaran gas ozon dan masukan gas kerja berupa oksigen atau udara; (4) lubang pensirkulasi udara/air sebagai pendingin elektroda luar; (5) penutup ujung-ujung tabung lucutan terbuat dari bahan fleksiglas dilengkapi dengan tempat masukan tegangan tinggi. Ukuran bagian-bagian tabung lucutan yang digunakan, masing-masing adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 4. Unit tabung lucutan senyap.

Tabel 2. Ukuran bagian-bagian tabung lucutan senyap.

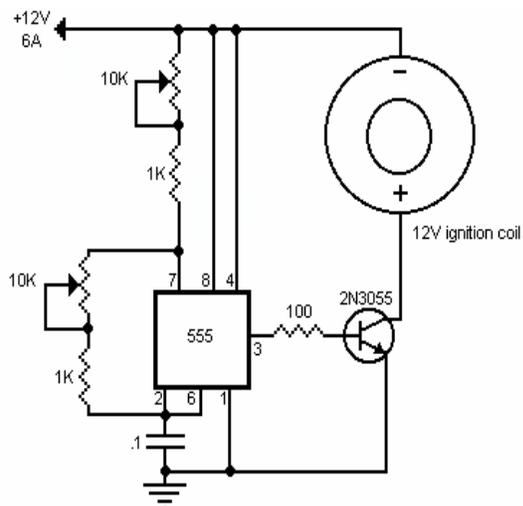
No	Nama Bagian	Bahan	Panjang (mm)	Diameter luar (mm)	Tebal (mm)
1	Elektroda dalam	Al	130	14,50	1,00
2	Dielektrik	Gelas lunak	210	16,00	1,50
3	Elektroda luar	SS	200	18,65	1,10
4	Pendingin elektroda	Udara	125	-	-
5	Penutup	Fleksiglas	80	-	10,00
6	Celah lucutan		130	-	1,55

### Sumber Daya Tegangan Tinggi Bolak-balik

Untuk melucut tabung lucutan tempat terjadinya proses pembentukan ozon mutlak diperlukan sumber daya tegangan tinggi. Sumber daya tersebut terdiri dari komponen IC NE 555 sebagai osilator, transistor daya 2N3055 sebagai penguat daya dan Ignition Coil 12V sebagai pelipat tegangan<sup>[6]</sup>. Skema dari rangkaian sumber daya tegangan tinggi yang digunakan adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

### Gas Masukan Tabung Lucutan

Gas masukan yang akan diubah menjadi gas ozon dalam percobaan ini adalah udara biasa. Sebelum udara masuk dalam tabung lucutan, udara dilewatkan *Flowmeter* untuk diketahui kecepatan alirnya.



Gambar 5. Rangkaian sumber daya tegangan tinggi.

### Pelaksanaan Percobaan

Proses pembentukan ozon dalam percobaan diawali dengan pengoperasian pompa hisap udara yang kecepatannya dapat ditera dengan Flowmeter. Selanjutnya tabung lucutan dipasang sumber daya tegangan tinggi bolak-balik 25 kV, berfrekuensi 1,4 kHz. Dengan adanya tegangan tinggi diantara anoda (dilapisi dielektrik) dan katoda maka pada celah lucutan akan terjadi elemen arus listrik bolak balik yang diskrit. Selanjutnya partikel udara atau oksigen yang dimasukkan ke dalam tabung lucutan akan mengalami proses tumbukan dan reaksi elektronik maupun ionik sedemikian rupa sehingga terproduksi gas ozon yang keberadaannya dapat diidentifikasi pada lubang keluaran tabung lucutan. Identifikasi telah terjadinya ozon dilakukan dengan menggunakan larutan kalium iodide (KI), sedang pengukuran laju produksi ozon dengan metoda serapan. Larutan penyerap (sampel) yang digunakan terdiri dari campuran larutan standar  $I_2$  dengan larutan pewarna disiapkan untuk dikontaminasi dengan keluaran gas ozon dari tabung lucutan senyap. Sampel sebanyak 50 mili liter (ml) yang telah dikontaminasi ozon selama dalam waktu tertentu (3 detik) selanjutnya dianalisa dengan spektrometer HP 8425A untuk ditentukan harga absorbansinya (data absorbansi dapat langsung terbaca dari layar monitor komputer) yang selanjutnya digunakan untuk perhitungan penentuan laju produksi ozon.

Digunakan metode serapan mengingat disamping ozon mempunyai sifat menyerap terhadap sinar ultraviolet (UV) juga dapat memisahkan yodium ( $I_2$ ) dari larutan potassium yodida (KI). Atas dasar kedua sifat inilah maka laju produksi keluaran gas ozon dari pembangkit ozon dapat ditentukan. Pada percobaan ini digunakan sinar UV yang berpanjang gelombang 352 nm (lampu cadmium yang terpasang pada alat

*Spectrometer*) untuk menyinari sampel yang telah terkontaminasi gas ozon. Selanjutnya kalau harga absorbansi sample telah diketahui maka dengan menggunakan metode serapan laju ozon terproduksi dapat ditentukan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabung lucutan senyap seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 dan sumber daya tegangan tinggi pada Gambar 5 setelah terealisasi kemudian dilengkapi dengan komponen selang saluran udara, pompa udara, flowmeter dan timer menjadi satu satuan rangkaian elektronik dan mekanik yang kompak sebagai satu unit alat pemercepat berkas elektron untuk produksi gas ozon. Unit alat tersebut ada di laboratorium Bidang Tekno Fisikokimia, P3TM-Batan Yogyakarta dan dapat dijinjing untuk dioperasikan di sembarang tempat (*portable*).

Uji coba alat telah dilakukan meliputi identifikasi terbentuknya gas ozon serta penentuan laju produksi ozon atau jumlah (berat) ozon yang dihasilkan persatuan waktu. Dari hasil percobaan telah terdeteksi bau khas (gas ozon) yang keluar dari lubang keluaran tabung lucutan. Deteksi secara visual, juga telah tampak adanya perubahan warna dari larutan kalium iodida (KI) yang semula berwarna jernih menjadi kuning (warna  $I_2$ ) setelah dikontaminasi dengan keluaran gas udara yang telah dilewatkan tabung lucutan senyap, sesuai dengan hasil reaksi sebagai berikut:



Dari persamaan (1) terlihat bahwa 1 gram molekul (grol)  $I_2$  dibebaskan oleh 1 grol  $O_3$ , sehingga dengan menggunakan larutan penyerap standar  $I_2$  untuk menyerap gas ozon maka konsentrasi  $O_3$  yang dihasilkan dapat ditentukan. Grafik standar yang merupakan hubungan antara konsentrasi  $I_2$  terhadap harga absorbansi dapat dibuat dengan cara memvariasi konsentrasi larutan penyerap lebih dulu, kemudian masing-masing disinari ultra violet (UV) selama waktu tertentu<sup>[7]</sup>. Karena absorbansi dari larutan penyerap yang telah terkontaminasi gas ozon (keluaran tabung lucutan) dapat diukur dengan bantuan alat spektrometer maka konsentrasi ozon dapat ditentukan langsung dengan membandingkan pada grafik standar.

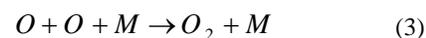
Untuk menentukan gas ozon yang diproduksi oleh tabung lucutan maka keluaran gas ozon dikontaminasikan pada larutan penyerap (50 ml) selama jangka waktu tertentu. Kecepatan aliran gas masukan udara sebesar 3 liter/menit (lpm) dalam

jangka waktu lucutan selama 3 detik (dt) maka volume gas udara yang (efektif) digunakan adalah sebanyak 0,15 liter. Larutan penyerap yang telah terkontaminasi gas ozon selama 3 detik selanjutnya ditentukan harga absorbannya dengan spektrometer dan diperoleh sebesar 0,12. Dengan mengacu pada grafik standar diketahui bahwa pada absorbansi sebesar 0,56 konsentrasinya adalah sebesar 5,13 mol/50ml yang diperoleh selama 3 dt. Akhirnya dengan mengingat bahwa berat 1 mol ozon adalah sebesar 24 gram, maka dapat dihitung laju/kecepatan rerata produksi ozon (dari tabung lucutan) adalah sebesar 0,04 milli gram ozon per detik (mg/dt) untuk masukan gas udara dengan kecepatan alir 3 lpm. Atas dasar hasil pengamatan dan pengukuran (pada tegangan tinggi 25 kV, frekuensi 1,4 kHz) terbukti bahwa gas masukan udara pada tabung lucutan senyap telah diubah menjadi gas ozon. Hal ini dapat terjadi hanya dengan adanya berkas elektron pada tabung lucutan akibat adanya pemasokan tegangan tinggi bolak balik. Seperti telah diketahui bahwa syarat utama yang harus dipunyai dalam proses pembentukan molekul ozon (gas ozon) adalah dengan telah terbentuknya atom-atom oksigen terlebih dulu. Hal ini mengingat bahwa proses utama dalam pembentukan ozon adalah reaksi tiga partikel menurut persamaan sebagai berikut:



dengan  $M$  adalah partikel ketiga yang mana tidak berubah dalam reaksi tetapi berpartisipasi dalam transfer tenaga dan momentum.  $M$  dapat sebagai molekul  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $O_3$  atau molekul dari dalam dinding yang digunakan untuk bahan tabung lucutan. Sebenarnya reaksi pembentukan ozon pada tekanan yang lebih tinggi dapat hanya reaksi dua partikel dan ini merupakan salah satu alasan mengapa lucutan nyala (*glow discharge*) tekanan rendah biasanya tidak digunakan untuk pembentukan ozon.

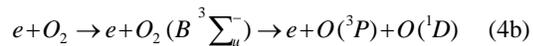
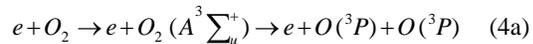
Untuk gas masukan berupa oksigen murni pada tekanan atmosfer maka pada reaksi persamaan (2) di atas membutuhkan waktu sekitar 10 mikro detik ( $\mu$ dt), sedang untuk gas masukan berupa udara akan membutuhkan waktu sekitar dua kalinya<sup>[8]</sup>. Keberadaan atom-atom oksigen selama waktu tersebut adalah ada dan dapat membentuk reaksi sampingan yang tidak diinginkan, misalnya reaksi rekombinasi untuk membentuk molekul oksigen, menurut reaksi :



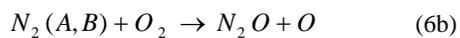
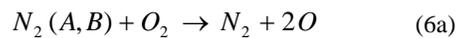
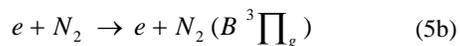
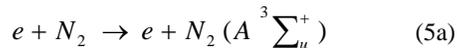
Semakin lebih rendahnya konsentrasi atom O maka akan mengurangi dampak reaksi kombinasi pem-

bentukan gas ozon. Oleh karena itu konsekuensinya kalau diperlukan konsentrasi ozon yang lebih besar harus dibuat lucutan mikro lemah yang relatif dalam jumlah besar, yakni dengan cara pemilihan tegangan Paschen yang paling minimum serta konstanta bahan dielektrik yang besar.

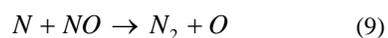
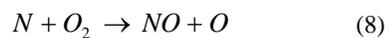
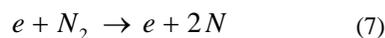
Dari hasil tumbukan pada tabung lucutan senyap antara elektron berenergi (sekitar 6 – 8,4 eV) dengan molekul oksigen maka reaksi disosiasinya akan berlangsung melalui dua keadaan tereksitasi, menurut persamaan sebagai berikut :<sup>[9]</sup>



Karena dalam percobaan gas masukan yang digunakan adalah udara maka molekul nitrogen tidak dapat dianggap sebagai gas pembawa yang pasif. Elektron dalam range energi di atas dapat mengeksitasi molekul nitrogen ke keadaan tripletnya yang selanjutnya mampu untuk mendisosiasi molekul oksigen, menurut persamaan reaksi sebagai berikut :



Elektron berenergi tersebut juga akan mendisosiasi molekul nitrogen dalam tabung lucutan yang selanjutnya atom-atom nitrogen akan mendisosiasi molekul oksigen dan molekul nitrogen-oksida yang mana dalam proses reaksi ini akan memperkaya atom oksigen untuk tujuan pembentukan ozon, menurut reaksi sebagai berikut :



Segera setelah ozon banyak terbentuk pada tabung lucutan tentunya proses pembentukan ozon

untuk yang berikutnya akan menjadi berkurang karena elektron, atom dan partikel tereksitasi dapat malah merusak (mendisosiasi) molekul ozon yang telah ada. Oleh karenanya suatu saat akan terjadi suatu keadaan jenuh dalam arti proses pembentukan ozon dan pengrusakannya hampir sama (seimbang) atau efisiensi pembentukan ozon hampir nol. Kalau keadaan seimbang ini telah dicapai maka pemasokan lucutan mikro seakan tidak ada pengaruhnya, bahkan malah konsentrasi ozon akan menurun. Dalam keadaan ini pemeliharaan keadaan seimbang tersebut sangat bergantung pada suhu diruang celah lucutan yakni semakin tinggi suhunya maka konsentrasi ozon akan menjadi cepat berkurang. Oleh karenanya dalam percobaan hal ini telah diatasi dengan memasang pendingin pada elektroda luar (berupa aliran udara) agar keadaan seimbang tersebut dapat terjadi pada saat konsentrasi ozon mencapai maksimum. Tentunya hal ini dapat dicapai tidak hanya bergantung pada satu faktor masalah pendinginan tabung reaktornya saja, tetapi juga bentuk dan ukuran geometri tabung lucutan, jenis bahan elektroda dan dielektrik serta cara pengoperasian (pemilihan tegangan dan frekuensi optimum) dari alat (pemercepat berkas elektron) yang digunakan.

## KESIMPULAN

Dari hasil pembuatan tabung lucutan senyap pemercepat berkas elektron, percobaan identifikasi/pengukuran produk ozon serta pembahasan mekanisme terbentuknya ozon pada tabung lucutan maka dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Dengan menggunakan gas masukan pada lucutan senyap (elektroda bentuk koaksial seluas 106 cm<sup>2</sup>) berupa udara berkecepatan 3 lpm, dapat diperoleh keluaran gas ozon sebesar 0,04 mg/dt pada operasi tegangan 25 kV, frekuensi 1,4 kHz.
2. Keberadaan elektron berenergi sekitar (6 – 8,4) eV yang diperoleh dalam tabung lucutan senyap (lucutan terhalang dielektrik). sangat berperan utama dalam proses terbentuknya ozon.
3. Pada proses pembentukan ozon dengan menggunakan gas masukan berupa udara, selain energi elektron dan molekul oksigen ternyata molekul nitrogen juga sangat besar peranannya, khususnya sumbangan pengkayaan atom oksigen (melalui reaksi-reaksi atom nitrogen dan molekul nitrogen-tereksitasi terhadap molekul oksigen dan molekul nitrogen-oksida) yang selanjutnya dengan molekul oksigen bereaksi membentuk molekul ozon.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para teknisi di Bidang: Elektro Mekanik, Akselerator dan Tekno-Fisikokimia, atas bantuan tenaga selama dalam pembuatan tabung lucutan, sampel larutan penyerap hingga analisa sampel hasil percobaan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] *A Service From The Canadian Center For Occupational Health And Safety (CCOHS)*, Basic Information On Ozone, February 19, 1999.
- [2] FRANCIS, G., *The Glow Discharge At Low Temperature in S. Flugge*, Hand Buch der Physics, Vol. XII, Springer, Gottingen, 1964.
- [3] BALDUR ELIASSON *et al.*, *Modeling and Application of Silent Discharge Plasmas*, IEEE Transactions On Plasma Science, Vol. 19, No. 2, April 1991.
- [4] B. ELIASSON *et al.*, *Ozone Synthesis From Oxygen in Dielectric Barrier Discharge*, Brown Boveri Research Center, CH-5405 Baden, Switzerland, J, Phys D. : Applied Phys 20(1987) 1421-1437, 3 Nov. 1986.
- [5] ULRICH KOGELSCHATZ, *Industrial Ozone Production*, ABB Corporate Research Ltd, Baden, Switzerland, 1999.
- [6] WIDDI USADA, dkk., *Konstruksi Sumber Daya Generator Ozon*, Prosiding PPI Litdas Iptek Nuklir P3TM-Batan Yogyakarta, 27 Juni 2002. Sumber asli diambil dari Internet: /www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/5322/hv2.html.
- [7] AGUS PURWADI, dkk., *Penentuan Produk Ozon Optimum Pada Ozonizer Plasma*, Prosiding PPI Litdas Iptek Nuklir P3TM-Batan Yogyakarta, 27 Juni 2002.
- [8] ULRICH KOGELSCHATZ and B. ELIASSON, *Ozone Generation and Application*, Asea Brown Boveri Baden, Switzerland, 2000.
- [9] ULRICH KOGELSCHATZ, *Ozone Synthesis in Gas Discharge*, Proceedings XVI Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Dusseldorf, Germany, Invited Papers, pp. 240-250 (1983).

## TANYA JAWAB

### Zainul Kamal

– *Bagaimana prinsip dasar Berkas Elektron dalam produksi ozon.*

- *Bahan yang direaksikan apa.*
- *Pereaksinya apa.*
- *Hasil reaksinya apa.*
- *Bagaimana identifikasi hasil.*

### Agus Purwadi

- Prinsipnya, berkas elektron berenergi dapat mendisosiasi O<sub>2</sub> dan atom oksigen bereaksi dengan molekul oksigen menjadi ozon (O<sub>3</sub>).
- Bahan yang digunakan molekul O<sub>2</sub> atau udara kering.
- Pereaksi awal adalah (hasil tumbukan) elektron berenergi (6 – 8,4 eV) dengan O<sub>2</sub> atau N<sub>2</sub> yang akhirnya dihasilkan gas ozon.
- Keluaran ozon diidentifikasi dengan larutan KI.

### Irianto

– *Apa pengaruhnya jika frekuensi pada pembangkit plasma dinaikkannya (orde MHz)?*

### Agus Purwadi

- Kalau frekuensi dinaikkan (orde MHz) maka dikawatirkan lucutan yang terjadi adalah lucutan nyala (*glow discharge*) bukan lucutan senyap (diskrit dan mengandung banyak elektron). Elektron lucutan senyap berenergi (6 – 8,4 eV) sangat berpotensi untuk produksi gas ozon.

### Slamet Riyadi

– *Teknologi ozon juga sangat ramah lingkungan. Bereaksi dengan unsur apa saja ozon dapat menghasilkan oksigen?*

### Agus Purwadi

- Karena ozon sifatnya sebagai oksidan yang sangat kuat (nomer 2 setelah Flour) maka ozon hampir dapat bereaksi dengan semua zat (yang mengandung unsur oksigen).