

MODIFIKASI TABUNG REAKTOR OZONIZER GUNA PENINGKATAN LAJU PRODUK OZON DAN APLIKASINYA SEBAGAI BAHAN DESINFEKTAN AIR

Agus Purwadi, Widdi Usada, Suryadi, Isyuniarto, Tri Rusmanto

Puslitbang Teknologi Maju – BATAN Yogyakarta

ABSTRAK

MODIFIKASI TABUNG REAKTOR OZONIZER GUNA PENINGKATAN LAJU PRODUK OZON DAN APLIKASINYA SEBAGAI BAHAN DESINFEKTAN AIR. Telah dikonstruksi tabung reaktor ozonizer termodifikasi pada sistem alat generator ozon untuk tujuan aplikasi pada sampel air. Tabung reaktor ozonizer merupakan salah satu komponen utama sebagai sumber penghasil gas ozon pada sistem unit ozonizer. Tabung reaktor ozonizer dimodifikasi dengan memperluas permukaan elektroda dan meningkatkan kualitas dielektrik sehingga diperoleh laju produk ozon optimum. Perluasan permukaan elektroda dilakukan dengan memperpanjang dan menggandakan jumlah tabung sedang kualitas dielektrik ditingkatkan dengan mengganti geometri serta bahan dielektriknya. Tabung reaktor ozonizer termodifikasi mempunyai komponen-komponen terdiri dari : (1) dielektrik terbuat dari gelas pyrex bentuk silinder (panjang 215,00 mm, diameter 18,00 mm dan tebal 1,00 mm), (2) elektroda dalam/anoda terbuat dari bahan Al bentuk silinder (panjang 200,00 mm, diameter 16,00 mm), (3) elektroda luar/katoda terbuat bahan SS bentuk silinder (panjang 210,00 mm, diameter 21,0 mm dan tebal 1,0 mm), (4) celah lucutan (panjang 200,00 mm, tebal 2,00 mm) sebagai tempat aliran udara atau oksigen dari lobang masukan, (5) penyangga terbuat dari bahan fleksiglass sekaligus sebagai penutup ujung-ujung tabung lucutan (panjang 140,00 mm, lebar 70,00 mm dan tebal 12,00 mm), (6) lobang masukan terbuat dari bahan besi yakni tempat masuknya udara atau oksigen ke dalam tabung reaktor (panjang 11,00 mm, diameter 5,00 mm dan tebal 0,50 mm), (7) lobang keluaran ozon dengan bahan dan ukuran sama dengan lobang masukan, (8) terminal positif tempat untuk memasok tegangan tinggi positif dan (9) terminal negatif yang ditanahkan. Dengan mengalirkan masukan udara berkelajuan 3,00 lpm dapat diperoleh laju produk ozon rerata sebesar 0,20 mg/dt naik menjadi 167 % dari sebelumnya (0,12 mg/dt). Produk ozon dengan kecepatan 0,20 mg/det tersebut dapat digunakan sebagai bahan desinfektan air yakni untuk membunuh bakteri E. Colli sebanyak 1898 mpn/100 ml pada 'sampel air bersih' dengan pH 6,50 dalam jangka waktu 50-60 menit.

ABSTRACT

MODIFICATION OF THE REACTOR OZONIZER TUBE FOR INCREASING OZONE PRODUCT RATE AND ITS APPLICATION AS THE WATER DESINFECTAN MATERIAL. The modified ozonizer reactor tube in the ozone generator device has been constructed to aim at application on the water sample. Ozonizer reactor tube is the one of principal component as a source of ozone yield in the ozonizer unit system. The reactor ozonizer tube was modified by extending electrode surface and increasing dielectric quality so that the optimum of ozone product rate can be obtained. The extension of electrode surface was carried out by lengthen and multiplying the tube whereas the dielectric quality was increased by changing its geometry and its material. The component of modified ozonizer reactor tube consists of : (1) dielectric which is made of cylindrical pyrex glass (215,00 mm in length, 18,00 mm in diameter and 1,00 mm in thickness), (2) inner electrode/anode is made of cylindrical Al (200,00 mm in length, 16,00 mm in diameter), (3) outside electrode /chatode is made of cylindrical SS (210,00 mm in length, 21,00 mm in diameter and 1,00 mm in thickness), (4) discharge gap (200,00 mm in length, 2,00 mm in thickness) as a flowing pot of air or oxygen gas from the input pit, (5) Tube support and tube cover of its lower and upper ends which are both made of flexyglass (140,00 mm in length, 70,00 mm in wide and 12,00 mm in thickness), (6) The inlet is made of iron which is the place of air or oxygen go in to the reactor tube (11,00 mm of the length, 5,00 mm of the diameter and 0,50 mm of the thickness), (7) The ozone's outlet was dimensionally and materially the same as the outlet, (8) positive terminal is the place for charging the positive high voltage and (9) negative terminal as a grounding. By introducing with the air flow rate of 3,00 lpm can be obtained the mean rate of ozone product of 0,20 mg/s with increases from the previous rate (0,12 mg /s) as about 167%. Ozone product with velocity of 0,20 mg/s can be used as the water desinfectan material i.e. for killing bactery E. colli in 'the clear water sample' with pH 6.50 as much as 1989 mpn/100ml during the whole time that 50-60 minutes.

PENDAHULUAN

Ozon merupakan bahan pengoksidasi yang sangat kuat setelah fluorin, dan kalau dibandingkan terhadap klorin kekuatan ozon sebagai bahan desinfektan daya bunuhnya bisa 3250 kali lebih cepat serta 150% lebih kuat tenaga oksidatifnya. Karena sifat yang dimilikinya maka ozon dapat berfungsi sebagai pembersih, penghilang bau serta sebagai bahan desinfektan untuk membunuh mikroorganisme seperti bakteri, virus, jamur, benih dan sebagainya. Secara visual ozon merupakan gas yang hampir tak berwarna dengan bau yang khas sehingga dapat terdeteksi oleh indera cium sampai dengan konsentrasi 0,01 ppm (part per million). Konsentrasi ozon maksimum pada ruang terbuka adalah 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^[1]. Mengingat akan efek kegunaan dan kelebihan ozon maka tak mengherankan bila ozon hingga sekarang masih terus dimanfaatkan untuk sterilisasi mikroorganisme pada bahan makanan dan untuk netralisasi limbah cair atau udara.

Gas ozon banyak bermanfaat terhadap bidang teknologi lain seperti bidang kesehatan, lingkungan dan industri makanan/minuman atau tekstil, maka pembuatan generator ozon sangat perlu untuk direalisasi dan dikembangkan. Hal ini juga mengingat bahwa sifat ozon di alam sangat tak stabil mengakibatkan ozon tidak dapat dipaketkan untuk dibawa ke suatu tempat, sehingga ozon harus dibuat di tempat yang memerlukan. Generator ozon dapat dibuat atas dasar metode lucutan senyap (*silent discharge*) dimana lucutannya nyaris tidak terdengar selama berlangsungnya proses pembentukan ozon pada tabung ozonizer plasma. Lucutan ini dapat direalisasi dengan mengalirkan gas udara atau oksigen pada celah sempit (celah lucutan) diantara dua elektroda yang paling sedikit disalah satu permukaannya dilapisi dielektrik yang biasanya dari bahan gelas atau keramik, sedang sumber tegangan yang digunakan adalah sumber tegangan tinggi bolak-balik^[2].

Dalam rangka untuk mengoptimalkan laju rerata produk ozon, maka telah dilakukan penelitian dan pengembangan modifikasi tabung reaktor ozonizer. Modifikasi dilakukan dengan cara memperpanjang dielektrik arah axial sehingga hubungan arus pendek antar elektroda (dari hasil pengalaman sering terjadi untuk jangka waktu operasional yang relative lama) dapat dielemisir. Penggantian jenis bahan dielektrik juga perlu dilakukan mengingat efisiensi produk ozon disamping sangat dipengaruhi oleh besarnya harga konstanta dielektrik juga oleh ketebalan dielektriknya. Luasan permukaan elek-

troda pada tabung reaktor ozonizer perlu dilipatkan agar kuantitas produk ozon dapat maksimum yakni dengan cara melipat gandakan tabung lucutan sesuai dengan kebutuhan serta kemampuan daya listrik yang tersedia. Dengan perlakuan rekayasa memodifikasi tabung reaktor ozonizer tersebut diharapkan tujuan akhir laju produksi ozon optimal dapat dicapai.

Ozon yang telah terproduksi dalam tabung lucutan tersebut dapat dimanfaatkan untuk membunuh mikroorganisma patogen yakni sebagai bahan desinfektan. Desinfektan merupakan mekanisme primer dalam merusak atau menonaktifkan mikroorganisme patogen dengan maksud untuk mencegah menyebarnya bibit penyakit yang diakibatkannya kepada si penjangkit dan lingkungan sekitar. Pada limbah domestik yakni seperti pada air buangan rumah tangga bahkan pada air bersih (air minum) yang biasa dikonsumsi, besar kemungkinan masih banyak mengandung mikroorganisme patogen sehingga dapat menimbulkan berbagai macam jenis penyakit perut. Mikroorganisme patogen tersebut meliputi bakteri *vibrio cholerae* yang akan menimbulkan penyakit kolera, virus hepatitis A penyebab penyakit infeksi hepatitis, protozoa *entamoeba histolytica* penyebab penyakit desentri amuba dan *herminths ascaris lumbricoides* penyebab penyakit askaris (*ascariasis*)^[3]. Oleh karenanya untuk pencegahan terhadap terjangkitnya dari berbagai macam penyakit tersebut, maka sangatlah perlu dan mutlak segala bentuk air yang di konsumsi untuk disterilkan terlebih dahulu menggunakan bahan desinfektan, khususnya dengan menggunakan ozon. Sebagai contoh aplikasi ozon sebagai bahan desinfektan, sampel air (air sumur galian) yang mendapat perlakuan ozon diambil dari daerah Setran, Sumberarum, Moyudan, Yogyakarta karena di daerah tersebut dipandang air minum mengalami pencemaran oleh adanya sanitasi lingkungan yang tidak baik. Sangat dimungkinkan 'air bersih' yang ada di daerah ini banyak mengandung bakteri *Escherichia Coli* (*E. Coli*) sehingga akan sangat beresiko tinggi terhadap terjangkitnya berbagai macam penyakit perut kalau air tersebut langsung dikonsumsi. Menurut Peraturan Menteri Kesehatan No. 416 Th. 1990 yakni tentang persyaratan kualitas air minum, kandungan bakteri *E. Coli* pada air bersih yang diizinkan adalah 0 mpn (most probable number) tiap 100 milli liter air bersih (0 mpn/100 ml)^[4].

BAHAN DAN TATAKERJA

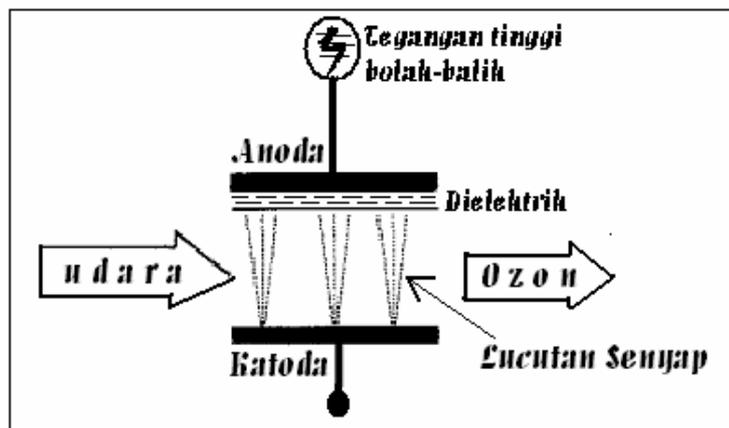
Tabung reaktor ozoniser merupakan ruangan tempat terjadinya proses pembentukan gas ozon.

Kualitas dan kuantitas produk ozon yang diperoleh selain dipengaruhi oleh bahan dasar pembuat tabung juga tentunya bentuk desain/rancangan tabung akan sangat berpengaruh. Dengan adanya bahan dielektrik pada salah satu elektroda (anoda/katoda) maka lucutan yang terjadi dalam tabung reaktor bukan merupakan lucutan kontinu tetapi lucutan diskrit atau lucutan senyap. Secara global skema proses terjadinya gas ozon dalam tabung generator ozon (ozonizer) adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

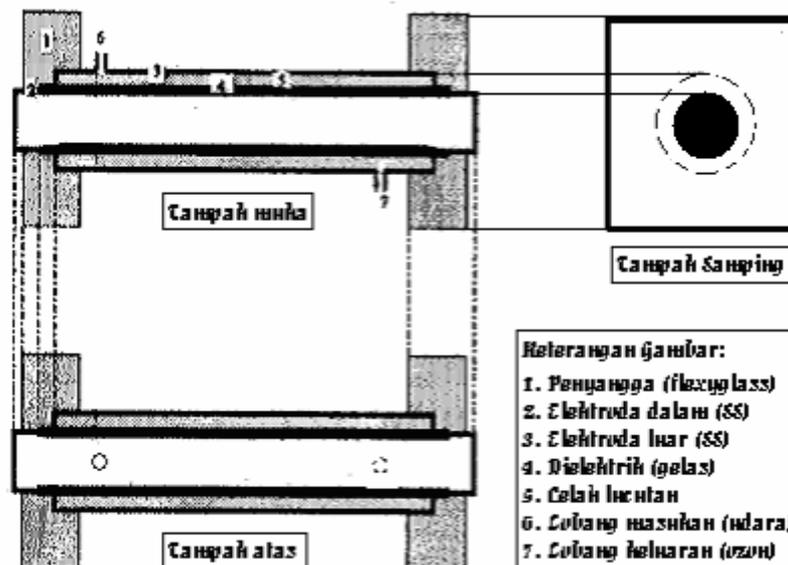
Bahan

Peralatan tabung reactor ozonizer merupakan satu sistem kesatuan penghasil ozon dapat di-

konstruksi dengan bentuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Bagian-bagian dari tabung reaktor tersebut meliputi (1) penyangga sekaligus sebagai penutup ujung-ujung tabung lucutan yang terbuat dari bahan fleksiglass, (2) elektroda dalam terbuat dari bahan stainless steel (SS) berbentuk silinder, (3) elektroda luar yang terbuat dari bahan SS juga dalam bentuk silinder, (4) dielektrik gelas bentuk silinder, (5) celah lucutan sebagai tempat aliran gas udara atau oksigen dari lobang masukan udara, (6) lobang masukan yakni tempat masuknya udara atau oksigen dari pompa udara yang terbuat dari bahan dan (7) lobang keluaran ozon dengan bahan dan ukuran sama dengan lobang masukan.



Gambar 1. Skema proses terjadinya ozon pada tabung ozonizer.



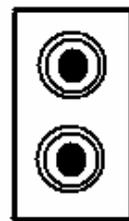
Gambar 2. Konstruksi tabung reaktor ozonizer tampak dari muka, samping dan atas.

Bahan yang digunakan meliputi larutan penyerap merupakan campuran antara larutan standar I_2 dengan larutan pewarna; bahan-bahan kimia yang digunakan untuk larutan standar I_2 terdiri dari Kalium Iodida (KI), Iodium (I_2), dan air ultra murni, sedang untuk larutan pewarna menggunakan bahan Kalium dihidrogen fosfat (KH_2PO_4), Dinatrium hidrophospat (Na_2HPO_4), KI dan air ultra murni.

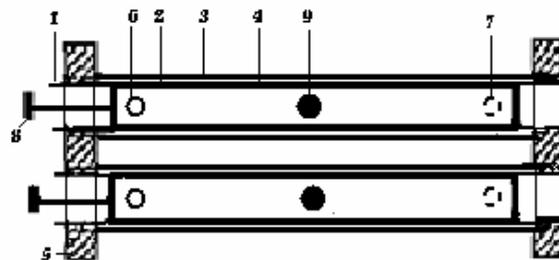
Tata Kerja

Modifikasi tabung reactor ozonizer dilakukan dengan cara memperpanjang lapisan dielektrik arah aksial dengan harapan tidak akan terjadi lagi hubungan arus pendek antara kedua elektroda dalam dan luar serta perluasan permukaan lucutan senyap agar diperoleh produk ozon maksimal. Bentuk geometri tabung reaktor ozonizer termodifikasi beserta keterangan dari masing-masing komponen adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Ukuran masing-masing komponen dari tabung *reactor ozonizer* termodifikasi adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

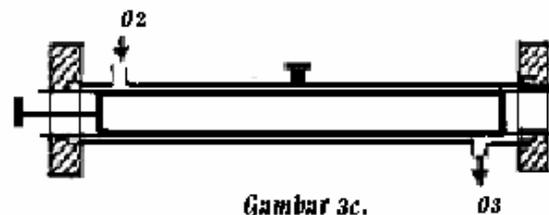


Gambar 3b.



Gambar 3a.

Keterangan gambar:
 1. Dielektrik
 2. Elektroda dalam/anoda
 3. Elektroda luar/katoda
 4. Celah lucutan
 5. Penutup
 6. Lobang masukan udara
 7. Lobang keluarnya O_3
 8. Terminal positif
 9. Terminal negatif



Gambar 3c.

Gambar 3. Konstruksi tabung reaktor ozonizer termodifikasi. (a) Tampak depan; (b) Tampak samping; (c) Tampak atas.

Tabel 1. Ukuran masing-masing komponen tabung reactor ozonizer termodifikasi.

| No | Nama Bagian | Bahan | Panjang (mm) | Diameter luar (mm) | Tebal (mm) |
|----|-----------------|-------------|--------------|--------------------|------------|
| 1 | Dielektrik | Gelas pyrex | 215,00 | 18,00 | 1,00 |
| 2 | Elektroda dalam | Al | 200,00 | 16,00 | - |
| 3 | Elektroda luar | SS | 210,00 | 21,00 | 1,00 |
| 4 | Celah lucutan | | 200,00 | - | 2,00 |
| 5 | Penutup | Fleksiglas | 140,00 | - | 10,00 |
| 6 | Lobang masukan | Fe | 11,00 | 5,00 | 0,50 |
| 7 | Lobang keluaran | Fe | 11,00 | 5,00 | 0,50 |

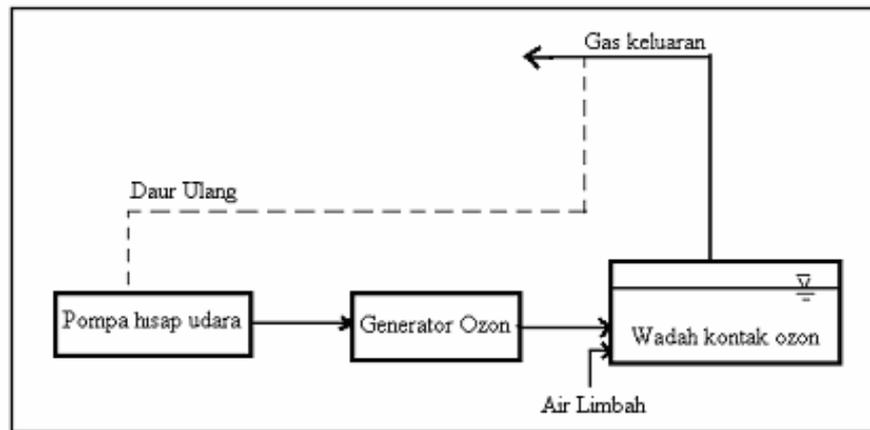
| | | | | | |
|---|------------------|----|---|---|---|
| 8 | Terminal positif | Fe | - | - | - |
| 9 | Terminal negatif | Fe | - | - | - |

Komponen penting lainnya adalah sumber daya tegangan tinggi bolak balik, keberadaan komponen ini sangat mutlak diperlukan dalam unit generator ozon yakni untuk melucut tabung reaktor tempat terjadinya proses pembentukan ozon. Sumber daya tegangan tinggi yang digunakan terdiri dari komponen IC NE 555 sebagai osilator, transistor daya 2N3055 sebagai penguat daya dan Ignition Coil 12V sebagai pelipat tegangan^[5].

Produksi dan identifikasi ozon dilakukan diawali dengan pengoperasian pompa hisap udara yang besar kecepatannya dapat ditera dengan flowmeter. Selanjutnya tabung reactor ozonizer tempat ozon diproduksi dilucut dengan menggunakan sumber daya tegangan tinggi bolak-balik 25 kV, berfrekuensi 1,5 MHz. Sampel (larutan penyerap) untuk penentuan laju produksi ozon dipersiapkan untuk dikontaminasi dengan keluaran gas ozon dari tabung reactor ozonizer.

Diketahui bahwa bahwa 1 gram molekul (grol) I_2 dapat dibebaskan oleh 1 grol O_3 , sehingga dengan menggunakan larutan penyerap standar I_2 untuk menyerap gas ozon maka dapat ditentukan konsentrasi O_3 yang dihasilkan oleh pembangkit ozon. 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 UV selama waktu tertentu^[6]. 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 reactor ozonizer, dalam percobaan ini keluaran gas ozon dikontaminasikan pada larutan penyerap (50 ml) selama jangka waktu tertentu.

Ozon yang telah terbentuk pada tabung lucutan/generator ozon dengan kelajuan produk tertentu diterapkan untuk mengozonisasi sampel 'air bersih' (sumur galian) yang dipandang tercemar bakteri E. Coli. Perlakuan ozon terhadap air bersih dilakukan selama 3 jam dan dipantau jumlah bakteri yang masih hidup setiap selang waktu 10 menit. Proses ozonisasi cair bersih dapat dilakukan dengan mengalirkan keluaran gas ozon ke tempat/wadah kontak antara ozon dengan sampel yang akan diozon seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Pada awalnya gas masukan udara dari pompa hisap udara oleh generator ozon akan diubah menjadi ozon dengan laju produk ozon tertentu, selanjutnya diperlakukan pada 'sampel air bersih' yakni air sumur galian yang masih dikonsumsi penduduk namun sangat dimungkinkan air tersebut telah tercemar bakteri E. Coli. Air tersebut mempunyai pH 6,50 dan akan diozonisasi dengan perlakuan terhadap variasi waktu. Pada bagian atas wadah kontak antara ozon dengan sampel dibuat lubang keluaran agar akumulasi ozon selama waktu tertentu pada wadah tersebut dapat menjadi gas sederhana untuk didaur ulang kembali masuk ke preparasi gas masukan untuk diolah kembali menjadi ozon^[7]. Setelah sampel air selesai mendapatkan perlakuan ozon selama waktu tertentu kemudian dilakukan analisa mikrobiologi untuk mengetahui jumlah bakteri dan sekaligus menaksir konsentrasinya. Perlakuan air bersih menggunakan ozon selama waktu tertentu akan diperoleh jumlah mikroorganisme yang masih hidup dan dibuat grafik hubungan antara jumlah mikroorganisma yang masih hidup tersebut terhadap lama waktu perlakuan. Pada percobaan ini mikrobiologi dalam air sumur yang diamati adalah jumlah bakteri E coli dan dianalisa menggunakan metode mpn (most probable number) di laboratorim air Dinas Departemen Kesehatan Kabupaten Sleman.



Gambar 4. Skema diagram proses ozonisasi air limbah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabung reaktor ozonizer termodifikasi telah direalisir untuk pembuatan satu unit alat generator ozon. Tabung tersebut telah dilengkapi dengan komponen pendukungnya yang terdiri dari: sumber daya tegangan tinggi dan komponen selang saluran udara, pompa udara, dan flowmeter menjadi satu unit rangkaian campuran elektronik dan mekanik dari ozonizer termodifikasi yang kompak seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

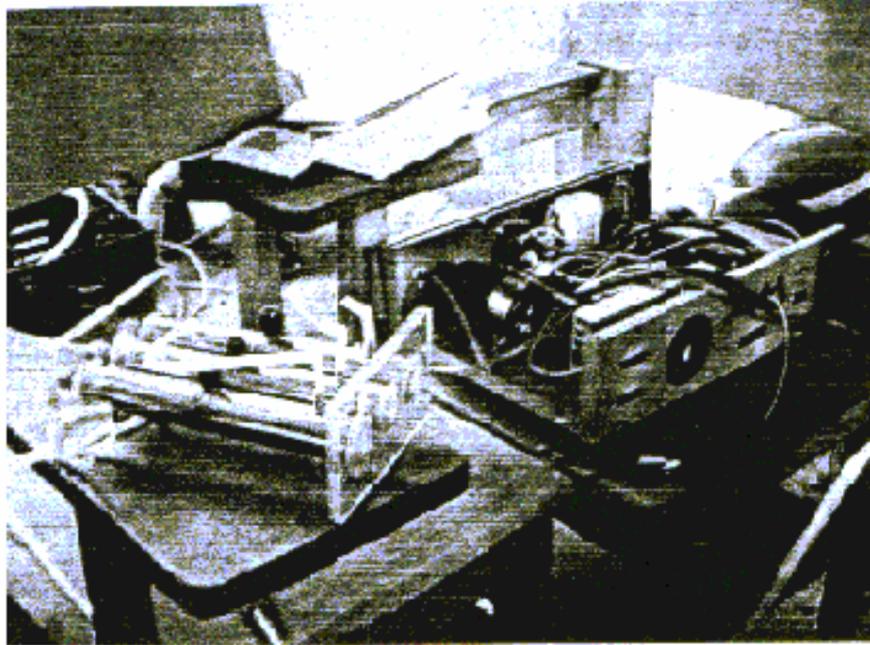
Terlihat bahwa tabung reaktor ozonizer tersebut (terdiri dari 3 tabung reaktor) belum dikemas dalam satu satuan wadah generator ozon, karena supaya generator ozon dengan mudah dapat dioperasikan pada besar daya listrik yang dibutuhkan pada saat untuk perlakuan suatu bahan misal saat ozon digunakan untuk menetralsasi gas buang, mengelola limbah cair industri dan air bersih, pengawetan buah dan sayur pasca panen, dan lain-lain.

Pengujian keluaran ozon dari tabung reaktor ozonizer telah dilakukan dengan mengidentifikasi 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 reaktor ozonizer. Deteksi secara visual, juga telah tampak adanya perubahan warna dari larutan kalium iodida (KI) yang semula

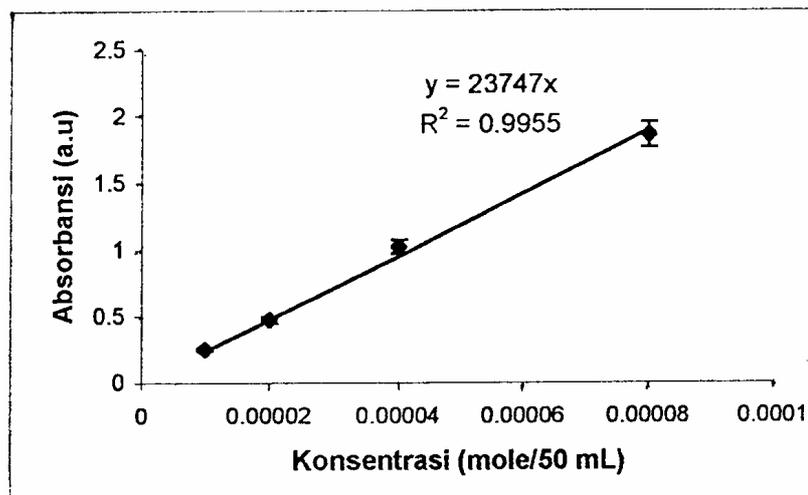
berwarna jernih menjadi kuning (warna I_2) setelah dikontaminasi dengan keluaran gas udara yang telah dilewatkan tabung reaktor tersebut, yang berarti gas ozon telah dapat memisahkan larutan KI menjadi molekul-molekul I_2 (berwarna kuning), KOH dan O_2 .

Konsentrasi O_3 yang dihasilkan ditentukan secara kimiawi dengan metode absorbansi. Absorbansi dari larutan penyerap yang telah terkontaminasi gas ozon (keluaran tabung reaktor) dapat diukur dengan bantuan alat spektrometer maka konsentrasi ozon dapat ditentukan langsung dengan membandingkan pada grafik standar yang telah dibuat/dipersiapkan sebelumnya yakni yang merupakan grafik hubungan antara absorbansi terhadap konsentrasi I_2 , dengan hasil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Kalau kecepatan aliran gas masukan udara sebesar 3 liter/menit (lpm) dalam jangka waktu lucutan selama 7 detik (dt) maka volume gas udara yang (efektif) digunakan adalah sebanyak 0,35 liter. Larutan penyerap yang telah terkontaminasi gas ozon selama 7 dt selanjutnya ditentukan harga absorbannya dengan spektrometer dan diperoleh harga absorbansi rerata sebesar 0,40. Dengan mengacu pada grafik standar diketahui bahwa pada absorbansi sebesar 0,40 konsentrasinya adalah sebesar $18 \mu\text{mol}/50\text{ml}$ atau $360 \mu\text{mol}/\text{l}$ yang mana diperoleh selama 7 dt.



Gambar 5. Tabung reaktor termodifikasi lengkap dengan komponen pendukung.



Gambar 6. Grafik hubungan antara absorbansi terhadap konsentrasi I_2 .

Dengan mengingat bahwa berat 1 mol ozon adalah sebesar 24 gram molekul (grol) dalam volume molar 24,45 liter pada suhu kamar dan tekanan 1 atmosfer^[8], maka hubungan kesetaraan jumlah ozon dalam satuan $\mu\text{mol/l}$ dengan mikro gram (μg) dapat dinyatakan sebagai $1 \mu\text{mol/l} = 0,98 \mu\text{g}$, sehingga hasil penentuan kuantitas ozon yang diperoleh sebesar $360 \mu\text{mol/l}$ dapat ditulis sebanyak $352,8 \mu\text{g} = 0,353$ milli gram (mg) dalam selang waktu operasional (lucutan) 7 dt atau kecepatan

produk ozon sebesar $0,050 \text{ mg/dt}$ untuk tiap tabung reaktor ozonizer.

Dari hasil pengamatan dan pengukuran (pada operasi tegangan tinggi 25 kV, frekuensi 1,4 kHz) terbukti bahwa dengan adanya modifikasi khususnya pada luas permukaan elektroda positif yang diperbesar (diameter tabung tetap, jumlah dan panjang tabung berubah) serta dielektrik yang semula dengan gelas lunak diganti dengan gelas pyrex ternyata dapat diperoleh laju produk ozon yang lebih besar yakni yang semula $0,04 \text{ mg/dt}$

menjadi 0,05 mg/dt untuk setiap tabung reaktornya. Hal ini dapat terjadi karena syarat utama untuk terbentuknya atom-atom oksigen pada tabung reaktor termodifikasi adalah bisa lebih banyak dibanding dengan jumlah atom-atom oksigen pada permukaan lucutan sebelumnya (tanpa dimodifikasi). Pada alat ozonizer yang telah dimodifikasi menggunakan 4 (empat) buah tabung ozonizer maka laju produk ozon yang dihasilkan adalah 0,20 mg/dt sedang sebelum ada modifikasi alat ozonizer menggunakan 3 (tiga) buah tabung ozonizer maka laju produk ozonnya adalah 0,12 mg/det, jadi ada kenaikan laju produk ozon sebesar 66,67 %.

Untuk gas masukan berupa oksigen murni pada tekanan atmosfer maka pada proses/reaksi pembentukan ozon membutuhkan waktu sekitar 10 mikro detik (μ dt), sedang untuk gas masukan berupa udara akan membutuhkan waktu sekitar dua kalinya atau sekitar 20 μ dt^[9]. Keberadaan atom-atom oksigen selama waktu tersebut dalam tabung reaktor adalah tetap masih ada dan dapat membentuk reaksi sampingan yang tidak diinginkan yakni misalnya reaksi rekombinasi bukannya untuk memperbesar produk ozon tetapi malah untuk membentuk molekul oksigen. Demikian pula sebaliknya semakin rendah konsentrasi atom O maka akan mengurangi dampak reaksi kombinasi pembentukan gas ozon. Oleh karena itu konsekuensinya kalau diinginkan konsentrasi ozon yang lebih besar harus dibuat lucutan mikro lemah yang relatif dalam jumlah besar, yakni dengan cara memperluas permukaan lucutan/elektrodanya. Demikian pula dalam hal ini disamping perlu dipilih jarak celah lucutan yang paling optimum sedemikian hingga dapat diperoleh tegangan Paschen yang paling minimum, juga pemilihan bahan dielektrik yang setipis mungkin tetapi harga konstanta dielektriknya bisa maksimal perlu dilakukan, yang mana dalam percobaan yang semula digunakan bahan dielektrik gelas lunak telah diganti dengan gelas pyrex.

Dalam percobaan walaupun luasan dari elektroda dibuat lebih besar namun tegangan tinggi listrik yang dibutuhkan untuk melucut tabung reaktor dibuat konstan sebesar tegangan operasi 25 kV, frekuensi 1,4 kHz. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk bisa membandingkan antara hasil laju produk ozon sebelum dengan sesudah adanya modifikasi, yang otomatis juga akan mengetahui kualitas dari bahan dielektrik yang digunakan. Dari hasil percobaan ditunjukkan bahwa laju produk ozon rerata dengan parameter tegangan tinggi yang konstan tersebut pada alat ozonizer termodifikasi bisa dinaikkan menjadi 166,67 % dari alat ozonizer sebelumnya, yakni yang semula sebesar 0,12 mg/dt menjadi 0,20 mg/dt. Hal seperti ini bisa terjadi

karena jumlah lucutan mikro pada tabung reaktor dapat dalam keadaan paling optimum (terpantau dari sisi tabung nyala lucutan lebih kuat) serta proses sintesa dapat berlangsung dengan sempurna yakni sesaat ozon sedang tidak ada pada saluran lucutan mikro.

Gas ozon dengan kelajuan sebesar 0,20 mg/dt tersebut telah diaplikasikan untuk membunuh bakteri *Escherichia Coli* (*E. Coli*) yang terdapat pada air bersih (sumur galian) dengan kondisi pH 6,50. Analisa bakteri *E. Coli* yang telah mendapat perlakuan (*treatment*) ozon selama 3 jam dilakukan di laboratorium air Departemen Kesehatan Sleman. Hasil variasi waktu pengaliran ozon terhadap jumlah bakteri *E. Coli* yang masih hidup adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil variasi pengaliran ozon terhadap jumlah bakteri *E. Coli*.

| No | Waktu pengaliran Ozon (menit) | Jumlah bakteri <i>E.Coli</i> (mpn/100ml) |
|----|-------------------------------|--|
| 1 | 0 | 1898 |
| 2 | 10 | 1898 |
| 3 | 20 | 1898 |
| 4 | 30 | 1898 |
| 5 | 40 | 438 |
| 6 | 50 | 95 |
| 7 | 60 | 0 |
| 8 | 90 | 0 |
| 9 | 120 | 0 |
| 10 | 150 | 0 |
| 11 | 180 | 0 |

Terlihat pada Tabel 2 bahwa untuk waktu pengaliran udara dari 0 sampai dengan 30 menit (yang dipantau perubahan jumlah bakterinya setiap 10 menit) ternyata jumlah bakteri tersebut masih tetap utuh yaitu sebanyak 1898 mpn/100ml. Hal ini bisa terjadi karena sebgaiian besar molekul ozon belum sampai menembus dinding sel atau hanya sebagian saja dan itupun proses pengikatan senyawa bahan organik pada dinding sel oleh ozon belum terjadi sehingga struktur sel (baik dalam dinding maupun dalam sitoplasma) masih baik dan reaktivitas sel masih ada.

Kemudian perlakuan ozon terhadap air dari 30 menit sampai dengan 40 menit, terlihat jumlah bakteri mulai menurun yakni tinggal 438 mpn/100 ml dan belum semua terbunuh, hal ini karena

kerja/aksi ozon yang sifatnya menyerang dan langsung membunuh bakteri E. Coli didalam air tidak terjadi secara serempak. Sedang sebagian besar bakteri yang mati karena telah mengalami proses pembunuhan oleh ozon secara sempurna. Semula ozon yang telah mendifusi ke dalam dinding sel mengikat senyawa molekul organik dinding sel kemudian dengan radikal bebasnya (O naksen) mengoksidasi senyawa organik sehingga merusak ikatan-kimia dalam sel. Karena dinding sel telah rusak maka sitoplasma dibagian dalam bakteri yang mengandung protein, asam nukleat, lemak dan karbohidrat akan terhambur keluar dan struktur bakteri otomatis mulai rusak. Selanjutnya dengan berjalannya waktu maka pengrusakan bakteri oleh ozon akan sempurna dan otomatis reaktivitas sel diseluruh organ sudah tidak ada lagi atau dengan kata lain bakteri telah mati.

Selanjutnya pada Tabel 2 juga ditunjukkan bahwa pengaliran udara/ozon dari 40 menit sampai dengan 50 menit, jumlah bakteri tinggal 95 mpn/100ml dan akhirnya untuk waktu pengaliran udara selama 50 menit sampai dengan 60 menit, jumlah bakteri E. Coli telah terbunuh semua.

Perlu diketahui bahwa proses pembunuhan oleh ozon ini akan terjadi pada setiap bakteri E. Coli dengan kurun waktu yang jauh lebih cepat (bisa 3500 kali) bila dibandingkan dengan menggunakan bahan desinfektan lain yang biasa digunakan yakni bahan khlorin. Hal ini dapat terjadi mengingat oksidasi reaktif khlorin adalah asam hipoklorat (*hypochloric acid*) yang mana terbentuk setelah khlorin terlarutkan dalam air. Oksidan kuat ini selanjutnya harus mendifusi melalui dinding sel bakteri yang dalam hal ini adalah tidak mudah dan perlu waktu, baru kemudian setelah sampai pada sitoplasma bakteri akan mengoksidasi enzim se-hingga reaktifitas bakteri tidak ada lagi, bakteri mati. Jadi sama-sama sebagai bahan desinfektan di-samping kecepatan membunuh bakterinya jauh lebih cepat, pemakaian ozon tidak punya efek samping yakni hasil reaksi ozon tidak akan meninggalkan residu dan racun tapi malah memberikan oksigen yang banyak bermanfaat bagi makhluk hidup, se-hingga teknologi ozon adalah sangat ramah ling-kungan. Ozon juga dapat menghilangkan bau/rasa dari suatu bahan yang tidak sedap serta sebagai bahan pemutih yang tidak semua dipunyai oleh bahan desinfektan khlorin^[10].

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil modifikasi pembuatan tabung reaktor ozonizer, percobaan identifikasi/pengukuran produk ozon serta pembahasan dengan adanya modifikasi tabung reaktor maka dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Telah terkonstruksi tabung reaktor ozonizer hasil modifikasi penambahan luas permukaan elektrode serta pergantian material dan geometri dari dielektrik guna peningkatan laju produk ozon. Tabung tersebut telah dilengkapi komponen pendukung menjadi satu unit alat ozonizer jinjing yang siap pakai.
2. Dengan metode serapan telah terukur besar laju rerata produksi ozon sebesar 0,20 mg/dt untuk gas masukan udara berkecepatan alir 3,00 lpm pada operasi tegangan tinggi bolak-balik 25 kV dan frekuensi 1,4 kHz. Hasil laju produk ozon sebesar 0,20 mg/dt ini lebih besar 67 % dari harga sebelum ada modifikasi (sebesar 0,12 mg/dt).
3. Gas ozon dengan laju produk 0,20 mg/det dapat digunakan untuk membunuh bakteri E. Coli sebanyak 1898 mpn/100 ml pada 'air bersih' (sumur galian) dengan pH 6,50 dalam jangka waktu efektif selama 50 sampai dengan 60 menit.
4. Laju produksi ozon masih dapat lebih ditingkatkan dengan menggunakan gas masukan berupa gas oksigen murni atau mengoptimalkan pemakaian parameter-parameter lain yang berhubungan dengan proses terbentuknya ozon (maksimum) pada tabung reaktor, seperti suhu gas masukan, jenis dan keadaan permukaan dari elektroda dan sebagainya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pinpro. Proyek Litbang Teknologi Maju dan Pemanfaatan Reaktor Kartini TA. 2004. Kepada para teknisi Bidang Akselerator dan Elektro Mekanik; Sudaryanto, Sri Sukmajaya, Mintolo, A. Zaenuri dan Ishak Ansori, atas bantuan tenaga selama dalam pembuatan tabung reaktor ozonizer, rangkaian sumber daya tegangan tinggi serta sampel larutan penyerap hingga analisa sampel hasil identifikasi dan pengukuran laju produk ozon.

DAFTAR PUSTAKA

1. *A Service From The Canadian Center For Occupational Health & Safety (CCOHS)*, Basic Information On Ozone, February 19, 1999.
2. AGUS PURWADI, WIDDI USADA, SURYADI, ISYUNIARTO, *Rancang Bangun Ozonizer Jinjing Saluran Ganda dan Manfaatnya*, Prosiding PPI Litdas Iptek Nuklir P3TM-Batan Yogyakarta, 8 Juli 2004.

3. Environmental Protection Agency (EPA), *Wastewater Technology Fact Sheet : Ozone Desinfection*, Washington, D.C., EPA 832-F-99-063, September, 1999.
4. Menteri Kesehatan, *Peraturan Menteri Kesehatan RI, Nomor : 416/Menkes/Per./IX/1990 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum*, Jakarta, Tanggal 3 September 1990.
5. WIDDI USADA, AGUS PURWADI, SURYADI, ISYUNIARTO, *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](http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/5322/hv2.html)
6. AGUS PURWADI, ISYUNIARTO, *Pembentukan dan Pengukuran Produk Ozon Pada Ozonizer Plasma*, Prosiding PPI Litdas Iptek Nuklir P3TM-Batan Yogyakarta, 7-8 Agustus 2001.
7. B.R. SWISTOCK, et al, *Treating Coliform Bacteria in Drinking Water, in Home Water Treatment Perspective*, Published by College of Agriculture Sciences, Penn State University, May 2001.
8. SOOK YEN W., *Construction and Studies of A Plasma Ozonizer*, Department of Physics, University of Malaysia, 1996.
9. ULRICH KOGELSCHATZ and B. ELIASSON, *Ozone Generation and Application*, Asea Brown Boveri Baden, Switzerland, 1999.
10. *A Service from the Canadian Center for Occupational Health & Safety (CCOHS)*, Basic Information on Ozone, February 19, 1999.

TANYA JAWAB

Wirjoadi

- Gas ozon ada yang beracun dan ada yang tidak, apakah dalam aplikasinya sudah dipikirkan mana yang aman dan mana yang berbahaya.

Agus Purwadi

- Sudah. Memang pada konsentrasi tertentu (dapat lihat tabel) ada batas-batas ozon yang sangat beracun, beracun, tidak beracun, berdampak dan tidak berdampak sama sekali.

Subarkah

- Sampai kapan modifikasi ozonizer ini akan dilakukan, selain tabungnya apakah ada parameter lain yang sangat menentukan terhadap produk ozon?

Agus Purwadi

- Modifikasi ozonizer akan terus dimodifikasi sampai user merasa puas dalam mengaplikasikannya.
- Selain tabungnya, juga macam dan kualitas komponen yang digunakan (bahan mekanik dan elektronik) harus selektif.

Tono Wibowo

- Produk ozon dengan 0,20 mg/dt selain untuk bahan desinfektan air dapat diaplikasikan untuk apa saja?

Agus Purwadi

- Karena sifat ozon adalah oksidan yang kuat maka dapat digunakan untuk bahan apa saja khususnya bahan yang mengandung bakteri, virus atau jamur.