

PERBANDINGAN KONFIGURASI GEOMETRI ELEKTRODA PADA REAKTOR PLASMA LUCUTAN KORONA TEGANGAN TINGGI IMPULS DAN APLIKASINYA SEBAGAI PENGOLAH LIMBAH CAIR

Galuh Susilowati
Ir. Agung Warsito, DHET
Abdul Syakur, ST., MT.

Abstract

Beside negative affect of high voltage, such as electromagnetic wave radiation from SUTET tower that is believed effect the public health, existence of corona losses, radio and television interference, and audible noise, now high voltage is widely utilized to environmental friendly application. Such as high voltage utilization to generate plasma, which is used to kill germs on Air Conditioner (AC) up to waste purification treatment. One of the method to generate plasma is by using the utilization of high voltage corona discharge on an electrode configuration in a chamber of plasma reactor. There are several electrode configuration methods to generate corona discharge. Corona discharge occurs between the electrode and ionizes gas surrounding the electrode, then generates corona discharge plasma. The number of plasma generated depends on the amount of high voltage, configuration and material of electrode used, and the distance between the high voltage electrode.

In this final research will be held a comparative of the electrode configuration in the corona discharge plasma reactor using high voltage impulse source, which are electrode configuration of wire to cylinder, spiral to cylinder, wire to cylinder with DBD, and spiral to cylinder with DBD. By setting the geometry electrode configuration on the plasma reactor, will be expected to obtain more corona discharge thus more plasma generated. The number of plasma generated in the reactor will be applied to softdrink industrial wastewater treatment.

High voltage corona discharge plasma generated in each plasma reactor will be propotional to the number of process circulation held to softdrink industrial wastewater, where more process circulation held, so there will be more plasma generated, and the value of COD, TSS, and color level in wastewater will be more decreased. And so as the high voltage supplied, that more the number of high voltage applied, so there will be more plasma generated, and the lower value of COD, TSS, and color lever in wastewater will be obtained. As the effect of process circulation number (0-6th circulation) held, plasma reactor that able to decrease lowest value of COD is plasma reactor with spiral to cylinder electrode configuration, plasma reactor that able to decrease lowest TSS value is plasma reactor with wire to cylinder electrode configuration, and the lowest value of color level is obtained in plasma reactor with electrode configuration of spiral to cylinder with DBD. As the effect of high voltage impulse (0 kV, 15 kV, 16 kV) applied, plasma reactor that able to decrease lowest value of COD is plasma reactor with electrode configuration of wire to cylinder with DBD, plasma reactor that able to decrease lowest value of TSS is plasma reactor with electrode configuration of spiral to cylinder with DBD, and the lowest value of color level is obtained in plasma reactor with spiral to cylinder electrode configuration.

Keywords : electrode configuration, plasma reactor, corona discharge, high voltage, wastewater.

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan pemakaian tegangan tinggi pada saat ini semakin luas, tidak hanya digunakan untuk transmisi tenaga listrik, namun tegangan tinggi kini juga diaplikasikan pada bidang industri, kesehatan, dan penelitian di laboratorium. Pada penggunaannya dalam keperluan penelitian, tegangan tinggi yang dibangkitkan ialah tegangan tinggi AC, DC, dan tegangan tinggi impuls. Ketiga jenis tegangan tinggi tersebut masing-masing digunakan sesuai dengan keperluannya, di antaranya pembangkitan tegangan tinggi AC dan impuls untuk pengujian peralatan-peralatan listrik sebelum digunakan, seperti pengujian isolator maupun arrester. Sedangkan tegangan tinggi DC digunakan untuk menguji nilai kapasitansi dari suatu kabel daya. Selain dampak negatifnya yang dikenal oleh masyarakat umum, seperti adanya radiasi medan elektromagnetik dari menara Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) yang

dipercaya masyarakat berpengaruh negatif pada kesehatan manusia dan adanya gangguan berisik yang dikenal sebagai *Audible Noise*, serta timbulnya gangguan radio (*Radio Interference*) dan gangguan televisi (*Television Interference*), di sisi lain kini tegangan tinggi mulai dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi yang diarahkan pada teknologi ramah lingkungan, seperti penggunaan tegangan tinggi untuk menghasilkan plasma, mulai dari penggunaannya sebagai pembunuh kuman pada *Air Conditioner* (AC) hingga untuk proses penjernihan limbah.

Adapun plasma tegangan tinggi dapat dihasilkan dengan berbagai metode, di antaranya melalui pemanfaatan lucutan korona tegangan tinggi dengan suatu konfigurasi elektroda-elektroda dalam suatu ruang reaktor plasma. Dalam pembentukan lucutan korona tersebut, dapat digunakan beberapa metode konfigurasi elektroda, seperti jarum-bidang, kawat-silinder, spiral-silinder, dan *Dielectric Barrier Discharge*. Lucutan

Agung Warsito, Abdul Syakur adalah dosen di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro (Undip) Semarang Jl. Prof. Soedarto, S.H. Tembalang Semarang 50275.

Galuh Susilowati adalah mahasiswa di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro (Undip) Semarang Jl. Prof. Soedarto, S.H. Tembalang Semarang 50275.

korona yang terjadi di antara konfigurasi elektroda mengionisasi gas-gas di sekitarnya dan kemudian menghasilkan plasma lucutan korona. Medan listrik yang terdapat pada salah satu elektroda akan menarik ion-ion terlarut menuju elektroda lainnya yang memiliki muatan berlawanan. Banyaknya plasma yang dihasilkan dapat dipengaruhi oleh besarnya sumber tegangan tinggi, konfigurasi elektroda dan bahan elektroda yang digunakan, maupun jarak antar elektroda-elektroda tegangan tinggi dalam reaktor plasma.

Pada tugas akhir ini dilakukan perbandingan pada konfigurasi-konfigurasi elektroda dalam reaktor plasma lucutan korona dengan sumber tegangan tinggi impuls, yaitu konfigurasi geometri elektroda kawat-silinder, spiral-silinder, dan *Dielectric Barrier Discharge*. Dengan memilih konfigurasi elektroda pada reaktor plasma, akan dapat diperoleh lucutan korona lebih tinggi, sehingga dihasilkan lebih banyak plasma. Banyaknya plasma lucutan korona dalam reaktor plasma inilah yang diaplikasikan sebagai pengolah limbah cair, sebagai bagian upaya mengurangi dampak pencemaran lingkungan secara lebih efektif.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- Melakukan studi perbandingan pada model-model konfigurasi geometri elektroda yang digunakan pada reaktor plasma lucutan korona tegangan tinggi impuls,
- Melakukan analisa pembangkitan plasma lucutan korona tegangan tinggi impuls yang diperoleh dari tiap konfigurasi geometri elektroda untuk proses pengolahan limbah cair,
- Menentukan proses pengolahan limbah cair yang maksimal dengan memilih konfigurasi elektroda yang paling efisien dalam reaktor plasma pengolah limbah cair, yaitu dalam hal penurunan kadar COD (*Chemical Oxygen Demand*), TSS (*Total Suspended Solid*), dan warna pada limbah cair.

1.3 Pembatasan Masalah

Dalam penyusunan tugas akhir ini, pembahasan masalah dibatasi pada :

- Membahas perbandingan antara keempat konfigurasi geometri elektroda yang digunakan pada reaktor plasma lucutan korona meliputi bentuk kawat-silinder, spiral-silinder, serta konfigurasi elektroda berpenghalang dielektrik (*Dielectric Barrier Discharge/DBD*) kawat-silinder dan DBD spiral-silinder.
- Perbandingan keempat konfigurasi geometri elektroda pada reaktor plasma lucutan korona pengolah limbah cair meliputi hal proses pembangkitan plasma lucutan korona, dan pemanfaatannya pada pengolahan limbah cair, dalam hal penurunan kadar COD, TSS, dan warna.
- Keempat konfigurasi geometri elektroda yang diperbandingkan pada reaktor plasma lucutan korona digunakan dengan sumber pembangkit tegangan tinggi impuls jenis *flyback converter*
- Reaktor plasma lucutan korona digunakan mengolah limbah cair industri minuman ringan, dengan sampel

limbah cair industri minuman ringan dari PT. SINAR SOSRO Ungaran.

- Membahas efek penggunaan tegangan tinggi impuls untuk mengolah limbah cair sebagai fungsi besarnya tegangan impuls.
- Membahas efek penggunaan tegangan tinggi impuls untuk mengolah limbah cair sebagai fungsi banyaknya sirkulasi.
- Tidak membahas reaksi kimiawi pengolahan limbah cair dengan plasma lucutan korona secara mendetail.

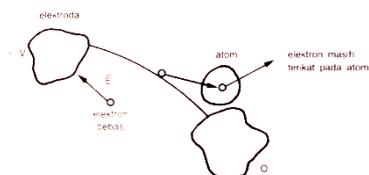
II DASAR TEORI

2.1 Konsep Dasar Tegangan Tinggi

Adapun yang disebut tegangan tinggi dalam dunia teknik tenaga listrik (*electric power engineering*) ialah semua tegangan yang dianggap cukup tinggi oleh para teknisi listrik, sehingga diperlukan pengujian dan pengukuran dengan tegangan tinggi yang semuanya bersifat khusus dan memerlukan teknik-teknik tertentu (subyektif), atau dimana gejala-gejala tegangan tinggi mulai terjadi (objektif). Salah satu faktor yang menentukan batas kapan suatu tegangan dapat dikatakan tinggi (*High Voltage*, disingkat HV), tinggi sekali (*Extra High Voltage*, EHV), atau ultra tinggi (*Ultra High Voltage*, UHV) ialah tingginya tegangan transmisi yang dipakai.

2.2 Ionisasi

Ionisasi didefinisikan sebagai proses terlepasnya elektron suatu atom atau molekul dari ikatannya. Jika di antara suatu elektroda diterapkan suatu tegangan V , maka akan timbul suatu medan listrik \vec{E} yang memiliki besar dan arah tertentu. Di dalam medan listrik, elektron-elektron bebas akan mendapatkan energi yang cukup kuat, sehingga dapat merangsang terjadinya proses ionisasi.



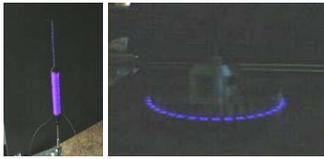
Gambar 1. Proses ionisasi antara elektroda-elektroda

2.3 Korona

Lucutan korona merupakan salah satu cara yang dapat digunakan untuk membangkitkan plasma non-thermal. Kata korona berasal dari bahasa Perancis yang berarti mahkota.

2.3.1 Pengertian Korona

Korona dapat dilihat sebagai cahaya redup yang melingkupi suatu konduktor tegangan tinggi dalam lucutannya. Lucutan korona adalah lucutan elektrostatik disebabkan ionisasi fluida yang mengelilingi sebuah konduktor, terjadi saat gradien potensial atau kekuatan medan listriknya melebihi nilai tertentu, namun kondisi tersebut tidak cukup untuk menimbulkan busur listrik ataupun breakdown listrik. Korona adalah plasma non-equilibrium dengan derajat ionisasi yang rendah, sekitar 8-10%.



(a) lilitan koil tegangan tinggi; (b) gigi-gigi logam gears

2.3.2 Mekanisme Lucutan Korona

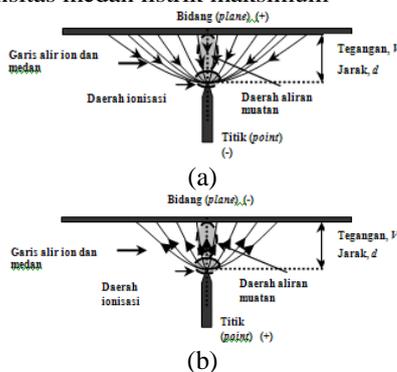
Lucutan korona dimulai ketika medan listrik di sekitar elektroda dengan bentuk geometri sangat lengkung (elektroda aktif) memiliki kemampuan untuk mengionisasi spesies (jenis senyawa, seperti *O, *OH, CO, dll) gas. Pembentukan lucutan korona dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti tekanan udara, temperatur, dan kelembaban.

Ilustrasi distribusi medan listrik pada konfigurasi geometri elektroda bidang ataupun silinder pada jarak r dari poros dirumuskan oleh persamaan berikut :

$$E = \frac{V}{r \cdot \ln\left(\frac{r_k}{r_a}\right)} \quad (2.7)$$

Dengan :

- r_k = jarak antar dinding bagian dalam tabung dengan permukaan kawat
- r_a = jari-jari kawat
- r = jarak dari poros kawat sampai titik tertentu dengan intensitas medan listrik maksimum



Gambar 3. Ilustrasi daerah antara dua elektroda pada lucutan korona titik bidang : (a) polaritas negatif pada elektroda titik (b) polaritas positif pada elektroda titik

Medan listrik yang tak seragam (*non uniform*) karena perbedaan geometri elektroda (*titik-bidang*) menimbulkan medan listrik yang kuat disekitar ujung elektroda titik. Kuat medan listrik antar elektroda merupakan fungsi dari jarak (x) antar elektroda :

$$E(x) = \frac{2V}{\left(r+2x-\frac{x^2}{d}\right) \cdot \ln\left(1+\frac{2d}{r}\right)} \quad (2.9)$$

Dengan :

- V = tegangan pada elektroda
- r = jari-jari ujung elektroda titik
- d = jarak antar elektroda
- x = jarak ujung elektroda titik dengan sebuah titik yang berjarak x tertentu di antara kedua elektroda.

Apabila $x = 0$ (posisi di ujung elektroda titik), maka besar medan listriknya :

$$E(x = 0) = \frac{2V}{r \cdot \ln\left(1+\frac{2d}{r}\right)} \quad (2.10)$$

2.3.3 Medan Insepsi Korona

Besarnya medan insepsi korona diperoleh dengan persamaan kawat paralel dari jari-jari r :

$$E_w = 30 \cdot m \cdot \delta \left[1 + \frac{0,301}{\sqrt{d \cdot r}}\right] \quad (2.11)$$

dimana :

- m = tingkat kekasaran permukaan
- δ = faktor koreksi udara

Untuk elektroda silinder koaksial :

$$E_w = 31 \cdot m \cdot \delta \left[1 + \frac{0,308}{\sqrt{d \cdot r}}\right] \quad (2.12)$$

dimana nilai faktor koreksi udara δ adalah :

$$\delta = \frac{b}{760} \cdot \frac{(273+T)}{(273+t)} \quad (2.13)$$

dimana :

- T = temperatur basah
- t = temperatur kering (temperatur di lapangan)
- b = tekanan atmosfer (dalam Torr atau mmHg)

Dalam kondisi standar untuk tekanan dan temperatur udara (*Standard conditions for Temperature and Pressure/STP*), yaitu temperatur ruang 25°C dan tekanan udara 760 mmHg :

$$\delta = \frac{0,392 \cdot b}{(273+t)} \quad (2.14)$$

2.3.4 Hukum Peek

Potensial pada saat korona muncul disebut sebagai tegangan ambang korona. Di atas tegangan ambang korona ini kenaikan arus akan sebanding dengan kenaikan tegangan yang disebut dengan hukum Ohm. Setelah daerah ini, arus akan meningkat dengan lebih cepat dan menuju suatu titik munculnya busur api (*arc*), yang disebut sebagai potensial dadal (*breakdown*). Tegangan awalnya korona atau Tegangan Insepsi Korona (*Corona Inception Voltage/CIV*) dapat diperoleh dengan hukum Peek (1929). Dalam fisika, hukum Peek lucutan korona di antara dua kawat :

$$e_v = m_v \cdot g_v \cdot \delta \cdot r \cdot \ln\left(\frac{S}{r}\right) \quad (2.15)$$

dimana :

- e_v = tegangan korona kritis visual (*Corona Inception Voltage*), dalam kV.
- m_v = faktor irregularitas kondisi kawat-kawat. [Kawat berpermukaan licin $m_v=1$; kawat berpermukaan kasar $m_v=0,98-0,93$; kabel $m_v=0,87-0,83$.]
- r = jari-jari kawat
- S = jarak di antara kawat dengan kawat
- δ = faktor koreksi udara.

Sedangkan g_v adalah gradien potensial kritis visual untuk terjadinya lucutan korona :

$$g_v = g_0 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right) \quad (2.16)$$

dimana g_0 adalah gradien potensial kritis disruptif korona, dimana untuk udara $g_0 = 30$ kV/cm.

2.3.5 Pemanfaatan Lucutan Korona

Adapun penerapan lucutan korona pada bidang komersial dan industri di antaranya adalah sebagai berikut :

- a. Pembuatan Ozon.
- b. Sterilisasi air kolam.
- c. Menghilangkan berbagai organik teruap yang tak diinginkan, seperti pestisida kimia, pelarut atau bahan kimia dari atmosfer.

- d. Pengion udara yang baik buat kesehatan.
- e. Laser nitrogen, dan sebagainya.

2.3.6 Lucutan Korona Sebagai Pembangkit Plasma

Lucutan korona ditandai fenomena kelistrikan yang terjadi secara bersama dalam medium gas di bawah pengaruh medan listrik yang tidak homogen akibat dari konfigurasi geometri elektroda. Kuat medan listrik tersebut cukup tinggi, sehingga mampu mengionisasi partikel-partikel gas.

2.4 Plasma

Kata plasma berasal dari bahasa Yunani yaitu *plasma*, yang berarti “*something formed or melded*”.

2.4.1 Pengertian Plasma

Dalam fisika dan kimia, plasma merupakan suatu gas yang memiliki porsi partikel tertentu yang terionisasi. Adanya sejumlah muatan pembawa yang membuat plasma konduktif secara kelistrikan, sehingga plasma tersebut dapat merespon medan elektromagnetik secara kuat. Layaknya seperti gas, plasma tidak memiliki bentuk maupun volume yang definit. Namun ketika plasma berada pada suatu ruang tertutup, berbeda dengan sifat gas, dalam pengaruh suatu medan magnetik, plasma tersebut dapat membentuk struktur seperti filamen-filamen, bercahaya, dan berlapis-lapis.



Gambar 4. Ilustrasi fase materi keempat

Konsep tentang plasma pertama kali dikemukakan oleh Langmuir dan Tonks pada tahun 1928. Mereka mendefinisikan plasma sebagai gas yang terionisasi dalam lucutan listrik. Plasma didefinisikan pula sebagai percampuran antara elektron, radikal, ion positif dan ion negatif. Percampuran antara ion-ion yang bermuatan positif dengan elektron yang bermuatan negatif memiliki sifat-sifat yang sangat berbeda dengan gas pada umumnya dan materi pada fase ini disebut fase plasma. Secara sederhana, plasma didefinisikan sebagai gas terionisasi dan dikenal sebagai fase materi keempat setelah fase padat, cair, dan gas.

Plasma terbentuk karena adanya ionisasi fluida yang terjadi di sekitar elektroda dan adanya perbedaan tegangan yang sangat tinggi antara kedua elektroda. Beberapa proses yang terjadi dalam plasma:

- a. Ionisasi
- b. Rekombinasi
- c. Dissosiasi
- d. Eksitasi

2.5 Ozon (O₃)

Ozon adalah molekul triatomik. Secara alamiah Ozon terdapat dalam lapisan stratosfer dan sebagian kecil dalam troposfer.

Tabel 1. Struktur alotropik Ozon

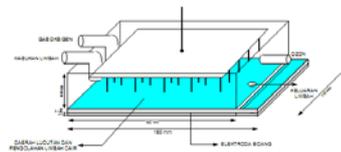
Keterangan	
Nama Sistematis	Trioxigen
Formula Molekul	O ₃
Penampakan	gas berwarna kebiru-biruan
Kepadatan	2.144 g·L ⁻¹ (0 °C),
Bentuk zat	gas
Daya larut dalam air	0.105 g·100mL ⁻¹ (0 °C)
Titik beku	80.7 K, -192.5 °C
Titik didih	161.3 K, -111.9 °C
Standar entalpi (ΔfH°)solid	+142.3 kJ·mol ⁻¹
Standar entropi (S°)solid	237.7 J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹

Dalam bidang perindustrian, Ozon dapat digunakan untuk :

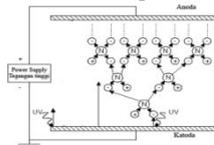
- ❖ Membasmi kuman sebelum dikemas (antiseptik)
- ❖ Menghilangkan pencemaran air (sterilisasi)
- ❖ Membantu kepada proses *flocculation* (proses pengabungan molekul dan membantu penapis menghilangkan besi dan arsenik).
- ❖ Mencuci, dan memutihkan kain.
- ❖ Membantu pewarnaan plastik.
- ❖ Sebagai bahan pengawet makanan.

2.6 Reaktor Plasma

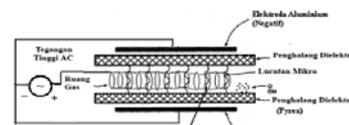
Reaktor plasma merupakan tempat yang menjadi media reaksi pembentukan plasma. Salah satu cara pembentukan plasma adalah dengan memanfaatkan peristiwa lucutan korona tegangan tinggi.



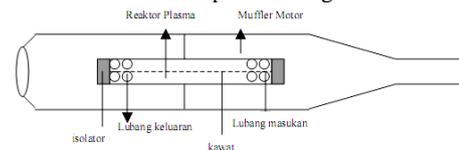
Gambar 5. Reaktor plasma lucutan korona elektroda jarum-bidang



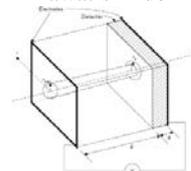
Gambar 6. Konfigurasi bidang paralel dalam daerah lucutan *breakdown*



Gambar 7. Sistem reaktor plasma dengan elektroda spiral



Gambar 8. Reaktor plasma termodifikasi dengan elektroda kawat-silinder



Gambar 9. Reaktor *Dielectric Barrier Discharge*

2.7 Limbah Cair

Air limbah adalah sisa dari suatu usaha dan atau kegiatan yang berwujud cair yang dibuang ke lingkungan dan diduga dapat menurunkan kualitas lingkungan. Baku mutu limbah cair di Indonesia diatur oleh Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No.51/MENLH/10/1995 tentang Baku Mutu Limbah Cair bagi Kegiatan Industri. Di daerah Jawa Tengah, hal tersebut diatur oleh Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah No 10 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Limbah.

Tabel 2. Baku mutu limbah cair kegiatan industri berdasarkan KepMen LH No.51 Tahun 1995

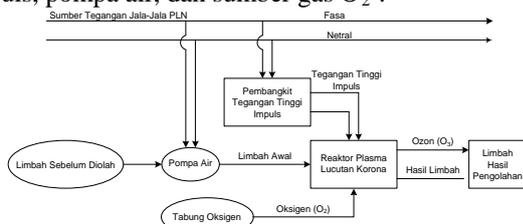
Parameter	Kadar maksimum (mg/l)	Beban pencemaran maksimum (kg/ton)
BOD ₅	85	12,75
COD	250	37,5
TSS	60	9,0
Fenol Total	1,0	0,15
Krom Total (Cr)	2,0	0,75
Minyak dan Lemak	5,0	0,75
PH	6 – 9	
Debit limbah maksimum	150 m ³ /ton produk tekstil	

Tabel 3. Peraturan Daerah Propinsi Jawa Tengah No. 10 Tahun 2004 Tentang Baku Mutu Air Limbah Industri Minuman Ringan (*Soft Drink*)

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum (ppm)	Beban Pencemaran Maksimum (g/m ³)			
			Dengan pencucian botol dengan pembuatan sirop	Dengan pencucian botol & tanpa pembuatan sirop	Tanpa pencucian botol & tanpa pembuatan sirop	Tanpa pencucian botol & tanpa pembuatan sirop
Suhu	°C	-	-	-	-	-
BOD ₅	Mg/L	85	150	140	85	60
COD	Mg/L	250	300	280	170	120
TSS	Mg/L	60	90	84	51	36
Minyak & Lemak	Mg/L	2,0	9	8,4	5,1	3,6
PH	-	5,0	-	-	-	-
Debit limbah maksimum (L/L produk minuman)	-	-	3,0	2,8	1,7	1,2

III PERANCANGAN REAKTOR PLASMA LUCUTAN KORONA

Studi perbandingan konfigurasi geometri elektroda pada reaktor plasma lucutan korona tegangan tinggi impuls dan aplikasinya sebagai pengolah limbah cair ini dilakukan dengan melakukan perbandingan pada empat macam konfigurasi geometri elektroda, yaitu konfigurasi elektroda kawat-silinder, elektroda spiral-silinder, elektroda kawat-silinder dengan dielektrik penghalang DBD, dan elektroda spiral-silinder dengan dielektrik penghalang DBD. Secara umum, penggunaan reaktor plasma sebagai sebuah sistem pengolah limbah cair dengan sumber sebuah pembangkit tegangan tinggi impuls, pompa air, dan sumber gas O₂ :



Gambar 10. Diagram blok reaktor plasma lucutan korona sebagai pengolah limbah cair

3.1 Reaktor Plasma

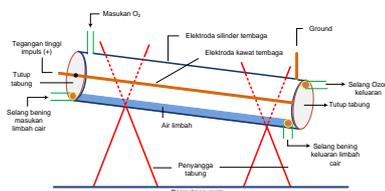
Keempat model konfigurasi elektroda pada reaktor plasma dibuat dengan beberapa spesifikasi yang sama untuk analisis perbandingan, yaitu disamakan pada bahan kedua elektroda, ukuran elektroda silinder, dan penggunaan ukuran kawat. Di antara elektroda positif dan elektroda negatif diberikan jarak sela sebagai daerah

lucutan korona, aliran gas Oksigen, dan aliran limbah cair di dalam reaktor.

Pada badan elektroda negatif masing-masing reaktor, yaitu pada badan tabung silinder terdapat empat titik lubang terhubung selang : dua lubang *inlet* untuk masukan O₂ dan limbah cair, dan dua lubang *outlet* untuk keluaran O₃ dan limbah cair hasil pengolahan reaktor. Dalam penggunaannya sebagai reaktor plasma pengolah limbah cair, konfigurasi geometri elektroda diposisikan miring dengan sudut kemiringan 10°, dengan bantuan dudukan penyangga tabung. Adanya kaki-kaki penyangga tabung reaktor ini dimaksudkan untuk mengatur aliran limbah yang masuk ke dalam reaktor plasma lucutan korona dapat mengalir di dalam reaktor.

3.1.1 Konfigurasi Elektroda Kawat-Silinder

Reaktor plasma lucutan korona dengan konfigurasi elektroda kawat-silinder ini terdiri atas dua bagian utama, yaitu elektroda positif kawat dan elektroda negatif (*ground*) silinder tabung, di antaranya jarak sela sebesar 12,5 mm. Adapun ruang reaktor plasma konfigurasi kawat-silinder ini berbentuk tabung yang memiliki tutup di bagian kanan dan kirinya terbuat dari akrilik.

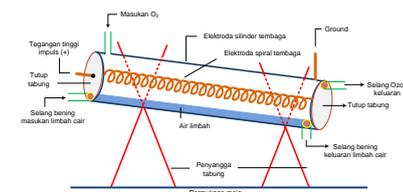


Gambar 11. Reaktor plasma lucutan korona pengolah limbah cair konfigurasi geometri elektroda kawat-silinder

Elektroda positif berbentuk kawat lurus yang terbuat dari kawat tembaga berdiameter 1,9 mm dan panjang 15,5 cm. Elektroda positif kawat diposisikan di tengah-tengah tabung silinder. Elektroda negatif (*ground*) berbentuk silinder terbuat dari pipa tembaga sepanjang 15,5 cm, diameter dalam 27 mm, dan ketebalan tabung 1 mm.

3.1.2 Konfigurasi Elektroda Spiral-Silinder

Reaktor plasma lucutan korona konfigurasi elektroda spiral-silinder terdiri atas dua bagian utama, yaitu elektroda positif spiral dan elektroda negatif (*ground*) silinder tabung, di antaranya jarak sela 10,6 mm.

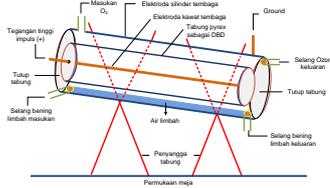


Gambar 12. Reaktor plasma lucutan korona pengolah limbah cair konfigurasi geometri elektroda spiral-silinder

Elektroda positif berbentuk spiral terbuat dari kawat tembaga berdiameter 1,9 mm yang dipilin menjadi spiral berdiameter 5,81 mm dan panjang 15,5 cm. Elektroda spiral tersebut diposisikan di tengah-tengah tabung silinder. Elektroda negatif (*ground*) berbentuk silinder dari pipa tembaga sepanjang 15,5 cm, diameter dalam 27 mm, dan ketebalan tabung 1 mm.

3.1.3 Konfigurasi Elektroda Kawat-Silinder dengan DBD

Reaktor plasma lucutan korona konfigurasi elektroda kawat-silinder berDBD terdiri atas tiga bagian utama, yaitu elektroda positif kawat, elektroda negatif (*ground*) silinder tabung, dan bahan dielektrik berfungsi sebagai penghalang *discharge*.



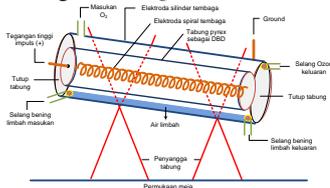
Gambar 13. Reaktor plasma lucutan korona pengolah limbah cair konfigurasi geometri elektroda kawat-silinder dengan *Dielectric Barrier Discharge*

Elektroda positif berbentuk kawat lurus terbuat dari kawat tembaga berdiameter 1,9 mm dan panjang 15,5 cm. Elektroda negatif (*ground*) berbentuk silinder terbuat dari pipa tembaga sepanjang 15,5 cm, diameter dalam 27 mm, dan ketebalan tabung 1 mm.

Di antara elektroda kawat dan silinder diposisikan sebuah bahan dielektrik berupa tabung berbahan kaca pyrex dengan panjang 15,5 cm dan diameter 16 mm. Tabung pyrex tersebut berfungsi sebagai penghalang (*barrier*) agar tidak terjadi *breakdown* antara elektroda positif kawat dan elektroda negatif silinder. Jarak sela di antara elektroda kawat dan elektroda silinder 12,5 mm.

3.1.4 Konfigurasi Elektroda Spiral-Silinder dengan DBD

Reaktor plasma konfigurasi geometri elektroda spiral-silinder DBD terdiri atas tiga bagian utama, yaitu elektroda positif spiral, elektroda negatif (*ground*) silinder tabung, dan bahan dielektrik yang berfungsi sebagai penghalang *discharge*.



Gambar 14. Reaktor plasma lucutan korona pengolah limbah cair konfigurasi geometri elektroda spiral-silinder dengan *Dielectric Barrier Discharge*

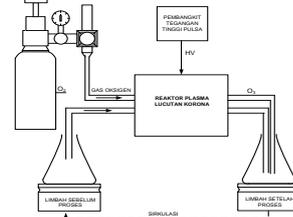
Elektroda positif berbentuk spiral terbuat dari kawat tembaga berdiameter 1,9 mm yang dipilin membentuk spiral berdiameter 5,1 mm dan panjang 15,5 cm. Elektroda negatif (*ground*) berbentuk silinder terbuat dari pipa tembaga sepanjang 15,5 cm, diameter dalam 27 mm, dan ketebalan tabung 1 mm.

Di antara elektroda spiral dan silinder diposisikan sebuah bahan dielektrik berupa tabung berbahan kaca pyrex dengan panjang 15,5 cm dan diameter tabung 16 mm. Jarak sela di antara elektroda spiral dan elektroda silinder 10,6 mm.

3.1.5 Pengolahan Limbah Cair Dalam Reaktor Plasma Lucutan Korona

Elektroda positif dihubungkan ke sumber positif pembangkit tegangan tinggi impuls, sedangkan elektroda negatif dihubungkan dengan *ground*. Di antara kedua elektroda diberikan jarak sela, sehingga akan timbul

lucutan korona positif. Lucutan korona ini dimanfaatkan untuk mengionisasi gas oksigen yang dialirkan melalui selang plastik ke dalam reaktor, menghasilkan spesies aktif dan radikal hidroksil, sehingga dihasilkan limbah cair yang terolah dengan terkena oleh plasma lucutan korona dan Ozon pada keluaran reaktor. Selanjutnya limbah direaksikan lagi dengan Ozon yang dihasilkan dalam tabung erlemeyer.



Gambar 15. Skema reaktor plasma lucutan korona pengolah limbah cair

3.2 Sumber Tegangan Tinggi Impuls

Reaktor plasma lucutan korona yang digunakan sebagai pengolah limbah cair ini menggunakan masukan tegangan tinggi impuls dari sebuah pembangkit tegangan tinggi impuls dengan rangkaian *flyback converter*.

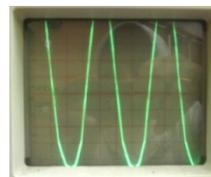
IV PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian dan analisis yang dilakukan pada penelitian tugas akhir ini meliputi pengukuran tegangan tinggi impuls sumber reaktor plasma, dan pengujian reaktor plasma lucutan korona melalui pengolahan limbah cair industri minuman ringan. Analisis yang dilakukan adalah meninjau sejauh mana masing-masing reaktor plasma lucutan korona dapat mengolah limbah cair industri minuman ringan, yaitu dalam hal penurunan kadar COD, TSS, dan warna pada limbah cair.

4.1 Pengukuran Tegangan Tinggi Impuls

4.1.1 Pengukuran Tegangan Jala-Jala PLN

Pengukuran pertama mengukur masukan pembangkit tegangan tinggi impuls yaitu tegangan jala-jala PLN satu fasa.



$$\begin{aligned} V_p &= 6 \text{ div} \times 5 \text{ V/div} \times 10 \\ &= 300 \text{ Volt} \\ f &= 1/T \\ &= 1/20 \text{ ms} \\ &= 50 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Gambar 16. Tegangan jala-jala PLN 5 V/div, 5 ms/div, probe x10

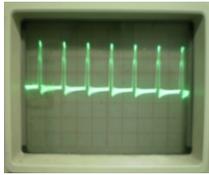
dapat diperoleh tegangan rata-ratanya adalah :

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = \frac{300}{\sqrt{2}} = 212 \text{ Volt} \quad (4.1)$$

Nilai tersebut telah sesuai dengan tegangan rata-rata sumber AC dari PLN, yaitu 220 Volt dengan toleransi 5%.

4.1.2 Pengukuran Tegangan Tinggi Impuls Keluaran

Tegangan keluaran dari pembangkit tegangan tinggi impuls sebagai suplai reaktor plasma lucutan korona untuk mengolah limbah cair minuman ringan. Pengukuran yang dilakukan sebanyak tiga kali :

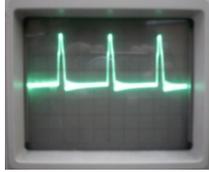


$$V = 3 \text{ div} \times 5 \text{ volt/div} \times 1000$$

$$= 15.000 \text{ Volt}$$

$$= 15 \text{ kVolt}$$

Gambar 17. Tegangan keluaran Pembangkit Tegangan Tinggi Flyback Converter, pengukuran pertama, Probe X1000, 5 Volt/div, 0,1 ms/div

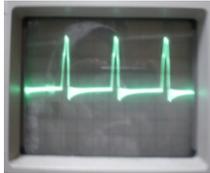


$$V = 3,2 \text{ div} \times 5 \text{ volt/div} \times 1000$$

$$= 16.000 \text{ Volt}$$

$$= 16 \text{ kVolt}$$

Gambar 18. Tegangan keluaran Pembangkit Tegangan Tinggi Flyback Converter, pengukuran kedua, Probe X1000, 5 Volt/div, 50 us/div



$$V = 3,4 \text{ div} \times 5 \text{ volt/div} \times 1000$$

$$= 17.000 \text{ Volt}$$

$$= 17 \text{ kVolt}$$

Gambar 19. Tegangan keluaran Pembangkit Tegangan Tinggi Flyback Converter, pengukuran ketiga, Probe X1000, 5 Volt/div, 50 us/div

4.1.3 Analisa Karakteristik Awal Limbah Cair Industri Minuman Ringan

Karakteristik awal sampel limbah cair industri minuman ringan yang diambil dari PT Sinar Sosro Ungaran sebelum diolah :

Tabel 4. Hasil analisa karakteristik awal sampel limbah cair industri minuman ringan

No	Parameter Analisa	Satuan	Baku Mutu	Hasil Analisa Awal	Perlu Pengolahan
1	COD	mg/L	250	4325.33	Ya
2	TSS	mg/L	80	4655.10	Ya
3	Warna	PtCo	-	4890	Ya

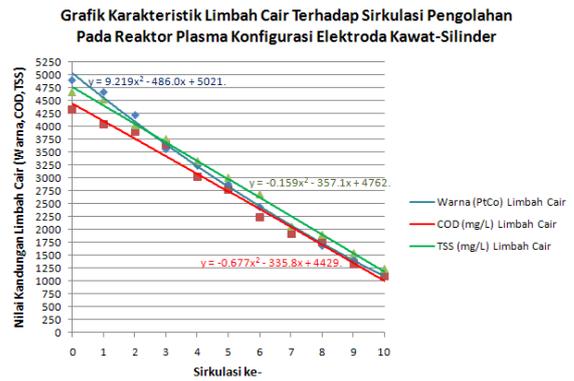
4.1.4 Analisa Karakteristik Limbah Cair Industri Minuman Ringan Terhadap Pengaruh Sirkulasi Pengolahan Reaktor Plasma

Pada pengujian reaktor plasma lucutan korona tegangan tinggi pada keempat konfigurasi geometri elektroda dilakukan dengan mengolah sampel limbah cair dari industri minuman ringan. Pengujian dilakukan dengan proses pengolahan sebanyak 10 sirkulasi, masing-masing mendapatkan perlakuan tegangan yang sama 15 kV, laju Oksigen 0,5 L/menit, maupun debit aliran sampel limbah cair 20 mL/menit.

4.1.4.1 Reaktor Plasma Lucutan Korona Konfigurasi Geometri Elektroda Kawat-Silinder

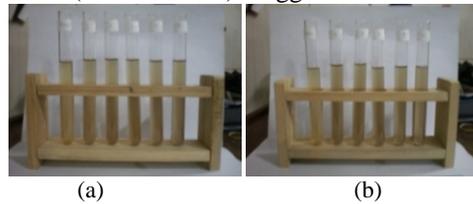
Tabel 5. Hasil karakteristik limbah cair terhadap sirkulasi pengolahan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda kawat-silinder

Sirkulasi Pengolahan	Karakteristik Hasil Limbah Cair		
	Warna (PtCo)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
Sirkulasi 0	4890	4325.33	4655.10
Sirkulasi 1	4655	4035.10	4522.25
Sirkulasi 2	4210	3885.45	4020.18
Sirkulasi 3	3560	3650.67	3756.32
Sirkulasi 4	3235	3015.44	3324.19
Sirkulasi 5	2870	2766.13	3003.42
Sirkulasi 6	2435	2239.46	2679.12
Sirkulasi 7	1980	1908.23	2055.45
Sirkulasi 8	1675	1755.19	1892.50
Sirkulasi 9	1410	1320.55	1540.97
Sirkulasi 10	1135	1090.30	1233.64



Gambar 20. Grafik karakteristik limbah cair terhadap sirkulasi pengolahan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda kawat-silinder

Dari tabel data dan grafik di atas, dapat terlihat bahwa plasma lucutan korona yang dibangkitkan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda kawat-silinder dapat mengolah limbah cair industri minuman ringan, yaitu dapat dilihat dari penurunan nilai kandungan warna, COD, serta kandungan TSS limbah cair, dari limbah awal (sirkulasi ke-0) hingga limbah sirkulasi 10.



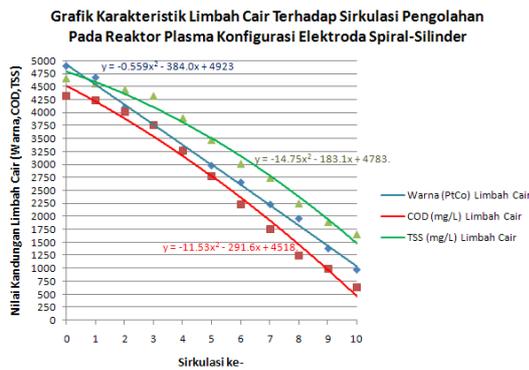
Gambar 21. Pemudaran warna pada sampel limbah cair minuman ringan hasil pengolahan reaktor plasma konfigurasi elektroda kawat-silinder : (a) Limbah awal hingga hasil sirkulasi ke-5; (b) Limbah awal, hasil sirkulasi ke6 hingga ke10

Dari gambar di atas, dapat terlihat adanya gradasi pemudaran warna yang menunjukkan adanya reaksi Ozon pada limbah cair, yang dihasilkan dalam reaktor plasma konfigurasi elektroda kawat-silinder.

4.1.4.2 Reaktor Plasma Lucutan Korona Konfigurasi Geometri Elektroda Spiral-Silinder

Tabel 6. Hasil karakteristik limbah cair terhadap sirkulasi pengolahan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda spiral-silinder

Sirkulasi Pengolahan	Karakteristik Hasil Limbah Cair		
	Warna (PtCo)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
Sirkulasi 0	4890	4325.33	4655.10
Sirkulasi 1	4675	4230.90	4557.27
Sirkulasi 2	4100	4007.73	4443.03
Sirkulasi 3	3765	3766.55	4321.30
Sirkulasi 4	3225	3260.16	3897.65
Sirkulasi 5	2970	2777.54	3462.12
Sirkulasi 6	2650	2233.32	3013.20
Sirkulasi 7	2235	1756.90	2732.75
Sirkulasi 8	1960	1244.12	2245.40
Sirkulasi 9	1380	987.65	1890.51
Sirkulasi 10	965	634.90	1644.06



Gambar 22. Grafik karakteristik limbah cair terhadap sirkulasi pengolahan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda spiral-silinder

Dari tabel dan grafik di atas, dapat terlihat bahwa plasma lucutan korona yang dibangkitkan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda spiral-silinder dapat mengolah limbah cair industri minuman ringan, yaitu dapat dilihat dari penurunan nilai kandungan warna, COD, serta TSS limbah cair, dari nilai kandungan limbah awal atau pada sirkulasi pengolahan ke-0 hingga nilai kandungan limbah pada hasil sirkulasi ke-10.



Gambar 23. Pemudaran warna pada sampel limbah cair minuman ringan hasil pengolahan reaktor plasma konfigurasi elektroda spiral-silinder : (a) Limbah awal hingga hasil sirkulasi ke-5; (b) Limbah awal, hasil sirkulasi ke-6 hingga ke-10

Dari gambar di atas, dapat terlihat adanya gradasi pemudaran warna yang menunjukkan adanya reaksi Ozon pada limbah cair, yang dihasilkan dalam reaktor plasma konfigurasi elektroda spiral-silinder.

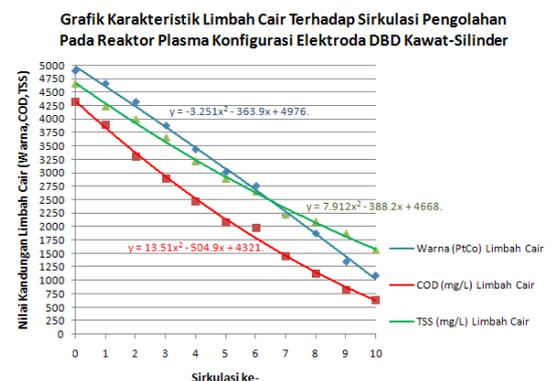
4.1.4.3 Reaktor Plasma Lucutan Korona Konfigurasi Geometri Elektroda Berpenghalang Dielektrik (DBD) Kawat-Silinder

Dari tabel dan grafik berikut, dapat terlihat bahwa plasma lucutan korona yang dibangkitkan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda dengan penghalang dielektrik (DBD) kawat-silinder dapat mengolah limbah

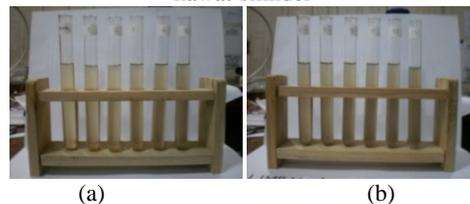
cair industri minuman ringan, yaitu dapat dilihat dari penurunan nilai kandungan warna, COD, serta kandungan TSS limbah cair, dari nilai limbah awal atau pada sirkulasi pengolahan ke-0 hingga nilai limbah pada sirkulasi ke-10.

Tabel 7. Hasil karakteristik limbah cair terhadap sirkulasi pengolahan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD kawat-silinder

Sirkulasi Pengolahan	Karakteristik Hasil Limbah Cair		
	Warna (PtCo)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
Sirkulasi 0	4890	4325.33	4655.10
Sirkulasi 1	4660	3901.34	4230.78
Sirkulasi 2	4325	3304.11	3990.10
Sirkulasi 3	3875	2890.40	3655.89
Sirkulasi 4	3430	2460.89	3210.77
Sirkulasi 5	3015	2080.35	2890.13
Sirkulasi 6	2750	1975.88	2655.90
Sirkulasi 7	2215	1450.17	2230.13
Sirkulasi 8	1870	1120.90	2087.56
Sirkulasi 9	1355	815.66	1877.08
Sirkulasi 10	1085	640.98	1560.70



Gambar 24. Grafik karakteristik limbah cair terhadap sirkulasi pengolahan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD kawat-silinder



Gambar 25. Pemudaran warna pada sampel limbah cair minuman ringan hasil pengolahan reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD kawat-silinder : (a) Limbah awal hingga hasil sirkulasi ke-5; (b) Limbah awal, hasil sirkulasi ke-6 hingga ke-10

Dari gambar di atas, dapat terlihat adanya gradasi pemudaran warna yang menunjukkan adanya reaksi Ozon pada limbah cair, yang dihasilkan dalam reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD kawat-silinder.

4.1.4.4 Reaktor Plasma Lucutan Korona Konfigurasi Geometri Elektroda Berpenghalang Dielektrik (DBD) Spiral-Silinder

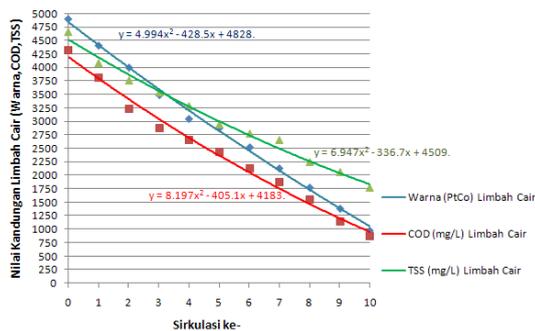
Dari tabel data dan grafik berikut, dapat terlihat bahwa plasma lucutan korona yang dibangkitkan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda dengan penghalang dielektrik (DBD) spiral-silinder dapat mengolah limbah cair industri minuman ringan, yaitu dapat dilihat dari penurunan nilai kandungan warna, COD, serta kandungan TSS limbah cair, dari nilai limbah awal atau

pada sirkulasi pengolahan ke-0 hingga nilai limbah pada sirkulasi ke-10.

Tabel 8. Hasil karakteristik limbah cair terhadap sirkulasi pengolahan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD spiral-silinder

Sirkulasi Pengolahan	Karakteristik Hasil Limbah Cair		
	Warna (PtCo)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
Sirkulasi 0	4890	4325.33	4655.10
Sirkulasi 1	4410	3813.35	4078.03
Sirkulasi 2	3995	3230.60	3766.20
Sirkulasi 3	3485	2877.56	3540.16
Sirkulasi 4	3050	2653.11	3290.33
Sirkulasi 5	2875	2432.90	2945.60
Sirkulasi 6	2510	2123.75	2770.24
Sirkulasi 7	2135	1875.67	2654.30
Sirkulasi 8	1775	1543.50	2240.78
Sirkulasi 9	1380	1145.78	2056.47
Sirkulasi 10	965	867.55	1766.80

Grafik Karakteristik Limbah Cair Terhadap Sirkulasi Pengolahan Pada Reaktor Plasma Konfigurasi Elektroda DBD Spiral-Silinder



Gambar 26. Grafik karakteristik limbah cair terhadap sirkulasi pengolahan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD spiral-silinder



Gambar 27. Pemudaran warna pada sampel limbah cair minuman ringan hasil pengolahan reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD spiral-silinder : (a) Limbah awal hingga hasil sirkulasi ke-5; (b) Limbah awal, hasil sirkulasi ke-6 hingga ke-10

Dari gambar di atas, dapat terlihat adanya gradasi pemudaran warna yang menunjukkan adanya reaksi Ozon pada limbah cair, yang dihasilkan dalam reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD spiral-silinder.

4.1.4.5 Perbandingan Karakteristik Akhir Limbah Cair Pada Keempat Reaktor Plasma Lucutan Korona Terhadap Pengaruh Sirkulasi Pengolahan

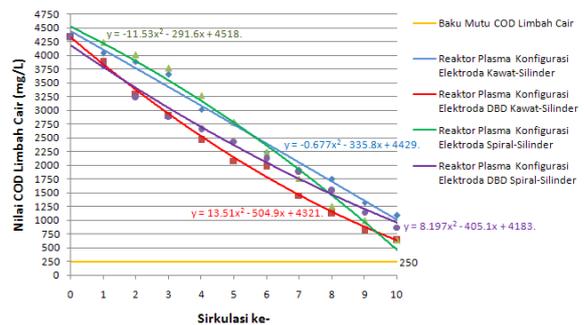
Pada pengujian pengaruh sirkulasi pengolahan ini diperoleh data karakteristik limbah hasil pengolahan pada tiap reaktor plasma lucutan korona untuk tiap sirkulasi pengolahan limbah :

Tabel 9. Karakteristik limbah cair pada tiap konfigurasi elektroda reaktor plasma terhadap sirkulasi pengolahan

Reaktor Plasma	Karakteristik Limbah Cair	Sirkulasi Pengolahan Ke-										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Konfigurasi Elektroda Kawat-Silinder	Warna	4890	4655	4210	3560	3235	2870	2435	1990	1675	1410	1135
	COD	4325.33	4033.10	3883.43	3650.67	3013.44	2766.13	2239.46	1908.23	1755.19	1320.33	1090.30
	TSS	4655.10	4322.25	4020.18	3756.32	3324.19	3003.42	2679.12	2055.43	1892.50	1340.97	1233.64
Konfigurasi Elektroda DBD Kawat-Silinder	Warna	4890	4660	4325	3875	3430	3015	2750	2215	1870	1355	1085
	COD	4325.33	3901.34	3304.11	2890.40	2460.89	2080.35	1975.88	1450.17	1120.90	815.66	640.98
	TSS	4655.10	4230.78	3990.10	3655.89	3210.77	2900.13	2655.90	2230.13	2087.56	1877.08	1560.70
Konfigurasi Elektroda Spiral-Silinder	Warna	4890	4675	4100	3765	3225	2970	2650	2335	1960	1580	965
	COD	4325.33	4230.90	4007.73	3766.53	3260.16	2777.34	2233.32	1756.90	1244.12	997.63	634.90
	TSS	4655.10	4527.27	4443.03	4321.30	3997.65	3462.12	3013.20	2732.75	2245.40	1890.51	1644.08
Konfigurasi Elektroda DBD Spiral-Silinder	Warna	4890	4410	3995	3485	3050	2875	2510	2135	1775	1380	965
	COD	4325.33	3813.35	3230.60	2877.56	2653.11	2432.90	2123.75	1875.67	1543.50	1145.78	867.55
	TSS	4655.10	4078.03	3766.20	3540.16	3290.33	2945.60	2770.24	2654.30	2240.78	2056.47	1766.80

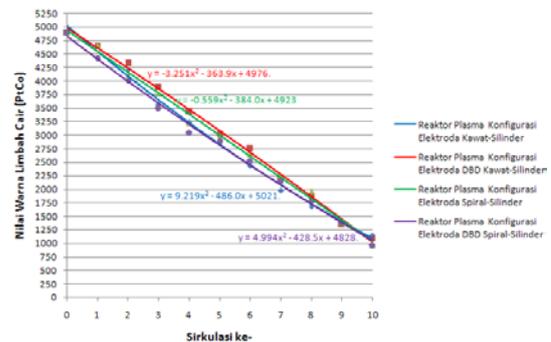
Berdasarkan grafik berikut, dapat terlihat bahwa keempat reaktor plasma lucutan korona memberikan karakteristik penurunan nilai COD limbah, dimana semakin banyak sirkulasi yang dilakukan pada pengolahan limbah dalam reaktor, maka kandungan COD limbah cair pun semakin turun. Dari grafik dapat terlihat bahwa penurunan nilai COD limbah cair yang paling rendah dari pengaruh sirkulasi pengolahan yang dilakukan, diperoleh pada reaktor plasma lucutan korona berkonfigurasi elektroda spiral-silinder.

Grafik Karakteristik COD Limbah Cair Pengaruh Sirkulasi Pengolahan Pada Keempat Reaktor Plasma Lucutan Korona Terhadap Baku Mutu



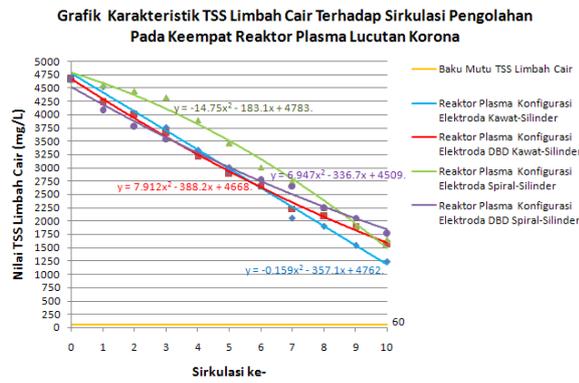
Gambar 28. Grafik karakteristik COD limbah cair pengaruh sirkulasi pengolahan pada keempat reaktor plasma lucutan korona terhadap nilai baku mutu

Grafik Karakteristik Warna Limbah Cair Terhadap Sirkulasi Pengolahan Pada Keempat Reaktor Plasma Lucutan Korona



Gambar 29. Grafik karakteristik warna limbah cair terhadap sirkulasi pengolahan pada keempat reaktor plasma lucutan korona

Berdasarkan grafik di atas, dapat terlihat bahwa keempat reaktor plasma lucutan korona memberikan karakteristik penurunan nilai warna limbah, semakin banyak sirkulasi yang dilakukan pada pengolahan limbah dalam reaktor, maka kandungan warna limbah cair pun semakin turun. Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa penurunan nilai warna limbah cair yang paling rendah dari pengaruh sirkulasi pengolahan yang dilakukan, diperoleh pada reaktor plasma lucutan korona berkonfigurasi elektroda DBD spiral-silinder.



Gambar 30. Grafik karakteristik TSS limbah cair pengaruh sirkulasi pengolahan pada keempat reaktor plasma lucutan korona terhadap nilai baku mutu

Berdasarkan grafik karakteristik TSS (mg/L) limbah cair terhadap sirkulasi pengolahan di atas, dapat terlihat bahwa keempat reaktor plasma lucutan korona memberikan karakteristik penurunan nilai TSS limbah, dimana semakin banyak sirkulasi yang dilakukan pada pengolahan limbah dalam reaktor, maka kandungan TSS limbah cair pun semakin turun. Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa penurunan nilai TSS limbah cair yang paling rendah dari pengaruh sirkulasi pengolahan yang dilakukan, diperoleh pada reaktor plasma lucutan korona berkonfigurasi elektroda kawat-silinder.

4.1.5 Analisa Karakteristik Limbah Cair Industri Minuman Ringan Terhadap Pengaruh Tegangan Pada Reaktor Plasma

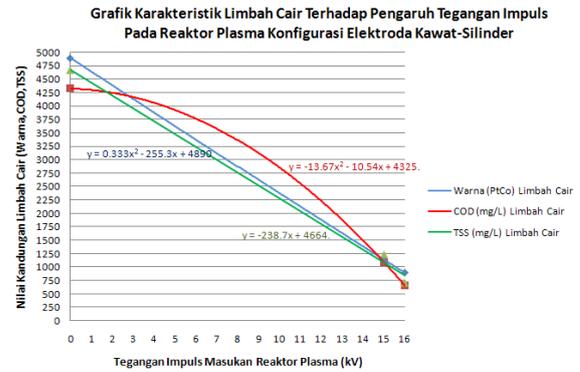
Pada pengujian reaktor plasma lucutan korona tegangan tinggi pada keempat konfigurasi geometri elektroda dilakukan dengan mengolah sampel limbah cair yang diambil dari industri minuman ringan. Pengujian dengan pengolahan sebanyak 10 sirkulasi dengan menguji pada variasi tegangan impuls, yaitu tegangan tinggi impuls sebesar 0 kV (limbah awal sebelum diberikan tegangan impuls), 15 kV, dan 16 kV. Kondisi pengujian yang dilakukan laju gas Oksigen 0,5 L/menit dan debit aliran limbah 20 mL/menit.

4.1.5.1 Reaktor Plasma Lucutan Korona Konfigurasi Geometri Elektroda Kawat-Silinder

Dari tabel data dan grafik berikut, dapat terlihat bahwa besarnya tegangan tinggi impuls yang diberikan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda kawat-silinder sangat berpengaruh pada karakteristik limbah cair yang diolah dalam reaktor plasma. Baik nilai COD (mg/L), TSS (mg/L), dan warna (PtCo) limbah cair mengalami penurunan seiring kenaikan tegangan tinggi impuls yang diberikan, dari limbah awal sebelum pengolahan (tegangan 0 kV) hingga tegangan 16 kV.

Tabel 10. Karakteristik limbah cair terhadap pengaruh tegangan impuls pada reaktor plasma konfigurasi elektroda kawat-silinder

Tegangan Impuls Masukan Reaktor	Karakteristik Hasil Limbah Cair		
	Warna (PtCo)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
0 kV	4890.0	4325.33	4655.10
15 kV	1135	1090.30	1233.64
16 kV	890.0	655.83	704.50

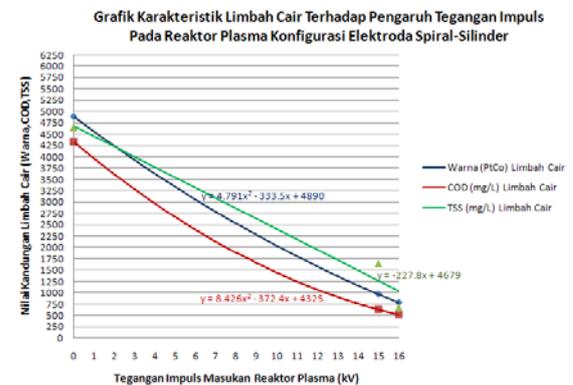


Gambar 31. Grafik karakteristik limbah cair terhadap tegangan impuls pada reaktor plasma konfigurasi elektroda kawat-silinder

4.1.5.2 Reaktor Plasma Lucutan Korona Konfigurasi Geometri Elektroda Spiral-Silinder

Tabel 11. Karakteristik limbah cair terhadap pengaruh tegangan impuls pada reaktor plasma konfigurasi elektroda spiral-silinder

Tegangan Impuls Masukan Reaktor	Karakteristik Hasil Limbah Cair		
	Warna (PtCo)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
0 kV	4890	4325.33	4655.10
15 kV	965.0	634.90	1644.06
16 kV	780.0	523.70	674.89



Gambar 32. Grafik karakteristik limbah cair terhadap tegangan impuls pada reaktor plasma konfigurasi elektroda spiral-silinder

Dari tabel data dan grafik di atas, dapat terlihat bahwa besarnya tegangan tinggi impuls yang diberikan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda spiral-silinder berpengaruh pada hasil karakteristik limbah cair yang diolah di dalam reaktor plasma. Baik nilai COD (mg/L), TSS (mg/L), dan warna (PtCo) limbah cair mengalami penurunan seiring kenaikan tegangan tinggi impuls yang diberikan, dari awal sebelum pengolahan (tegangan 0 kV) hingga tegangan 16 kV.

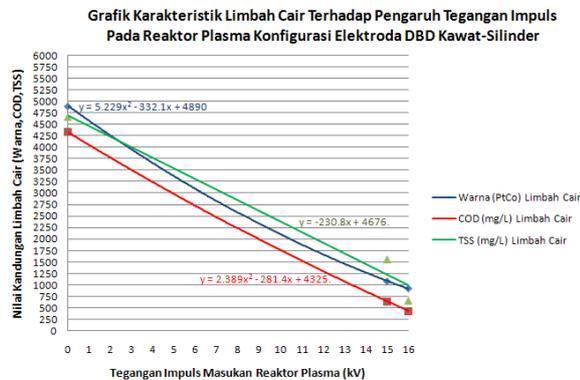
4.1.5.3 Reaktor Plasma Lucutan Korona Konfigurasi Geometri Elektroda DBD Kawat-Silinder

Dari tabel data berikut, dapat terlihat bahwa besarnya tegangan tinggi impuls yang diberikan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD kawat-silinder mempengaruhi nilai karakteristik hasil limbah cair yang diolah di dalam reaktor plasma. Baik nilai COD (mg/L), TSS (mg/L), dan warna (PtCo) limbah cair

mengalami penurunan seiring dengan kenaikan tegangan tinggi impuls yang diberikan, dari limbah awal (tegangan 0 kV) hingga tegangan 16 kV.

Tabel 12. Karakteristik limbah cair terhadap pengaruh tegangan impuls pada reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD kawat-silinder

Tegangan Impuls Masukan Reaktor	Karakteristik Hasil Limbah Cair		
	Warna (PtCo)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
0 kV	4890	4325.33	4655.10
15 kV	1085	640.98	1560.70
16 kV	915	433.58	658.60

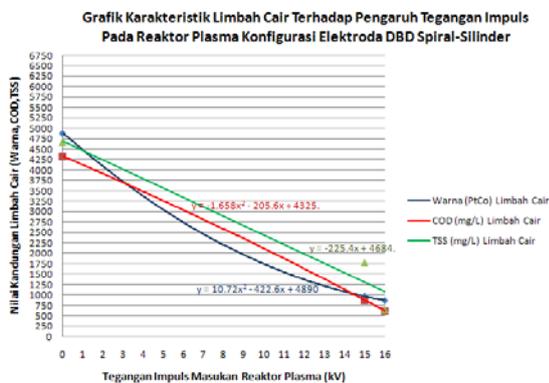


Gambar 33. Grafik karakteristik limbah cair terhadap tegangan impuls pada reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD kawat-silinder

4.1.5.4 Reaktor Plasma Lucutan Korona Konfigurasi Geometri Elektroda DBD Spiral-Silinder

Tabel 13. Karakteristik limbah cair terhadap pengaruh tegangan impuls pada reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD spiral-silinder

Tegangan Impuls Masukan Reaktor	Karakteristik Hasil Limbah Cair		
	Warna (PtCo)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
0kV	4890	4325.33	4655.10
15kV	965	867.55	1766.80
16kV	875	610.50	640.70



Gambar 34. Grafik karakteristik limbah cair terhadap tegangan impuls pada reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD spiral-silinder

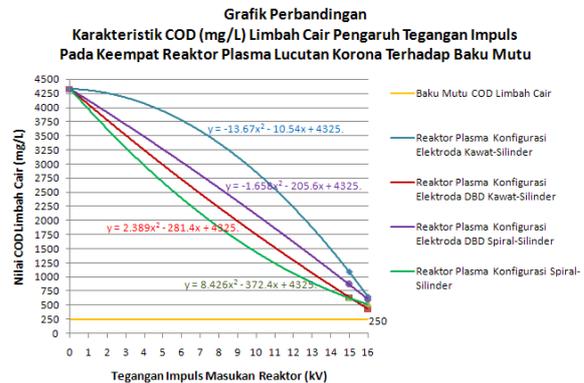
Dari tabel data dan grafik di atas, dapat terlihat bahwa besarnya tegangan tinggi impuls yang diberikan pada reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD spiral-silinder berpengaruh pada hasil karakteristik limbah cair yang diolah di dalam reaktor plasma. Baik nilai COD (mg/L), TSS (mg/L), dan warna (PtCo) limbah cair mengalami penurunan seiring kenaikan tegangan tinggi

impuls yang diberikan, dari awal sebelum pengolahan (tegangan 0 kV) hingga tegangan 16 kV.

4.1.5.5 Perbandingan Karakteristik Akhir Limbah Cair Pada Keempat Reaktor Plasma Lucutan Korona Terhadap Pengaruh Tegangan Impuls

Tabel 14. Karakteristik limbah cair pada tiap konfigurasi elektroda reaktor plasma terhadap tegangan tinggi impuls

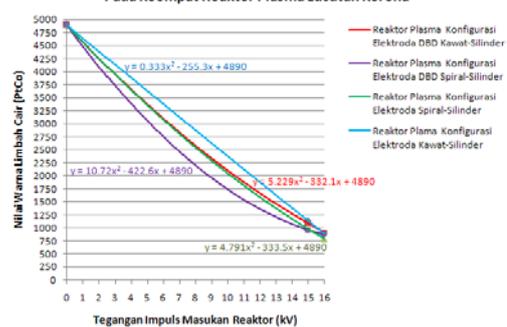
Reaktor Plasma	Karakteristik Limbah Cair	Tegangan Impuls (kV)		
		0	15	16
Konfigurasi Elektroda Kawat-Silinder	Warna	4890.0	1135	890.0
	COD	4325.33	1090.30	655.83
	TSS	4655.10	1233.64	704.50
Konfigurasi Elektroda DBD Kawat-Silinder	Warna	4890	1085	915
	COD	4325.33	640.98	433.58
	TSS	4655.10	1560.70	658.60
Konfigurasi Elektroda Spiral-Silinder	Warna	4890	965.0	780.0
	COD	4325.33	634.90	523.70
	TSS	4655.10	1644.06	674.89
Konfigurasi Elektroda DBD Spiral-Silinder	Warna	4890	965.0	875.0
	COD	4325.33	867.55	610.50
	TSS	4655.10	1766.80	640.70



Gambar 35. Grafik karakteristik COD limbah cair pengaruh tegangan impuls pada keempat reaktor plasma lucutan korona terhadap nilai baku mutu

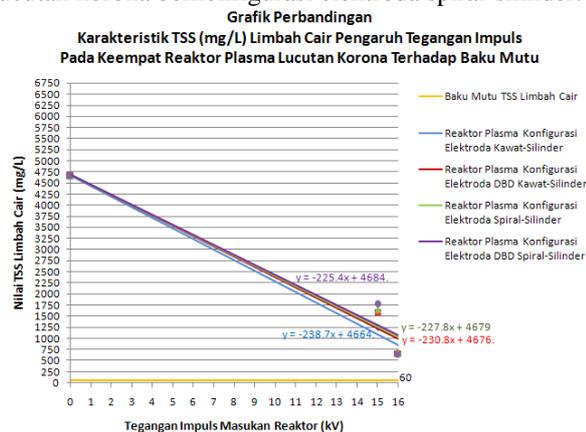
Berdasarkan grafik di atas, dapat terlihat bahwa keempat reaktor plasma lucutan korona memberikan karakteristik penurunan nilai COD, dimana semakin tinggi tegangan yang diberikan pada reaktor, kandungan COD limbah cair pun semakin turun. Dari grafik di atas, dapat terlihat bahwa penurunan nilai COD limbah cair yang paling rendah dari pengaruh tegangan yang diberikan diperoleh pada reaktor plasma lucutan korona berkonfigurasi elektroda DBD kawat-silinder.

Grafik Perbandingan Karakteristik Warna (PtCo) Limbah Cair Terhadap Tegangan Impuls Pada Keempat Reaktor Plasma Lucutan Korona



Gambar 4.24 Grafik karakteristik warna limbah cair terhadap tegangan impuls pada keempat reaktor plasma lucutan korona

Berdasarkan grafik di atas dapat terlihat bahwa karakteristik penurunan nilai warna limbah yang diperoleh yaitu semakin tinggi tegangan yang diberikan pada reaktor, kandungan warna limbah cair pun semakin turun. Dari grafik dapat terlihat bahwa penurunan nilai warna limbah cair yang paling rendah dari pengaruh tegangan yang diberikan diperoleh pada reaktor plasma lucutan korona berkonfigurasi elektroda spiral-silinder.



Gambar 4.27 Grafik karakteristik TSS limbah cair pengaruh tegangan impuls pada keempat reaktor plasma lucutan korona terhadap nilai baku mutu

Berdasarkan grafik di atas, dapat terlihat bahwa keempat reaktor plasma lucutan korona memberikan karakteristik penurunan nilai TSS limbah dimana semakin tinggi tegangan yang diberikan pada reaktor, kandungan TSS limbah cair pun semakin turun. Dari grafik dapat terlihat bahwa penurunan nilai TSS limbah cair yang paling rendah dari pengaruh tegangan yang diberikan diperoleh pada reaktor plasma lucutan korona berkonfigurasi elektroda DBD spiral-silinder.

V PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Dari hasil penelitian pada tugas akhir yang dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Reaktor plasma lucutan korona yang dirancang sebagai objek studi perbandingan dengan tegangan tinggi impuls adalah reaktor plasma konfigurasi elektroda kawat-silinder, reaktor plasma konfigurasi elektroda spiral-silinder, reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD kawat-silinder, dan reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD spiral-silinder.
2. Pengaruh jumlah sirkulasi pengolahan yang dilakukan (sirkulasi ke-0 hingga sirkulasi ke-10) pada masing-masing reaktor plasma lucutan korona memberikan nilai kadar warna, COD, dan TSS sampel limbah cair industri minuman ringan yang semakin menurun seiring semakin banyaknya sirkulasi pengolahan yang dilakukan.
3. Perubahan tegangan tinggi impuls yang diberikan (0 kV, 15 kV, dan 16 kV) masing-masing pada keempat reaktor plasma lucutan korona memberikan nilai kadar warna, COD, dan TSS sampel limbah cair industri minuman ringan yang semakin menurun seiring dengan kenaikan tegangan impuls yang diberikan.
4. Dari pengaruh jumlah sirkulasi pengolahan yang dilakukan, reaktor plasma lucutan korona yang

mampu memberikan nilai kadar COD paling maksimal pada sirkulasi ke-10 adalah reaktor plasma konfigurasi elektroda spiral-silinder, yaitu dari nilai 4325.33 mg/L menjadi 634.90 mg/L.

5. Dari pengaruh jumlah sirkulasi pengolahan yang dilakukan, reaktor plasma lucutan korona yang mampu memberikan nilai kadar TSS paling maksimal pada sirkulasi ke-10 adalah reaktor plasma konfigurasi elektroda kawat-silinder, yaitu dari nilai 4655.10 mg/L menjadi 1233.64 mg/L.
6. Dari pengaruh jumlah sirkulasi pengolahan yang dilakukan, reaktor plasma lucutan korona yang mampu memberikan nilai kadar warna paling maksimal pada sirkulasi ke-10 adalah reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD spiral-silinder, yaitu dari nilai 4890 PtCo menjadi 965 PtCo.
7. Dari pengaruh tegangan tinggi impuls yang diberikan, reaktor plasma lucutan korona yang mampu memberikan nilai kadar COD paling maksimal pada tegangan impuls 16 kV adalah reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD kawat-silinder, yaitu dari nilai 4325.33 mg/L menjadi 433.58 mg/L.
8. Dari pengaruh tegangan tinggi impuls yang diberikan, reaktor plasma lucutan korona yang mampu memberikan nilai kadar TSS paling maksimal pada tegangan impuls 16 kV adalah reaktor plasma konfigurasi elektroda DBD spiral-silinder, yaitu dari nilai 4655.10 mg/L menjadi 640.70 mg/L.
9. Dari pengaruh tegangan tinggi impuls yang diberikan, reaktor plasma lucutan korona yang mampu memberikan nilai kadar warna paling maksimal pada tegangan impuls 16 kV adalah reaktor plasma konfigurasi elektroda spiral-silinder, yaitu dari nilai 4890 PtCo menjadi 780 PtCo.

5.2 SARAN

Untuk kepentingan pengembangan penelitian tugas akhir ini, maka dapat diberikan saran-saran sebagai berikut :

1. Dengan reaktor plasma lucutan korona yang sama, penelitian dapat dilanjutkan dengan menambah jumlah sirkulasi pengolahan dan atau meninggikan nilai tegangan tinggi impuls untuk mencapai nilai kadar maksimum limbah cair sesuai baku mutu limbah cair.
2. Untuk mengetahui pengaruh konfigurasi elektroda terhadap karakteristik limbah cair industri minuman ringan dapat dilakukan dengan modifikasi reaktor plasma dengan konfigurasi elektroda yang sama namun dengan ukuran yang lebih besar dan tegangan yang lebih besar.
3. Untuk mengetahui pengaruh sumber gas pada reaktor terhadap karakteristik limbah cair industri minuman ringan dapat dilakukan dengan mengganti sumber gas oksigen dengan udara bebas, gas argon atau gas nitrogen.
4. Dapat dilakukan pengujian dengan menggunakan sampel limbah cair industri yang lain, misalnya industri tekstil atau makanan ringan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arismunandar, A., *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*, Ghalia Indonesia, Jakarta, 1983.
- [2] Arismunandar, A., *Teknik Tegangan Tinggi*, PT Pradnya Paramita, Jakarta, 1994.
- [3] Chen, J., dan Davidson, J.H., *Model of the Negative DC Corona Plasma : Comparison to the Positive DC Corona Plasma*, Department of Mechanical Engineering University of Minnesota, Minneapolis. 2003.
- [4] Lucas, J. Rohan., *High Voltage Engineering*, University of Moratuwa, Sri Lanka, 2001.
- [5] Metcalf dan Eddy, *Wastewater Engineering Treatment and Reuse fourth edition*, The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [6] Chen, J., dan Davidson, J.H., "Electron Density and Energi Distributions in the Positive DC Corona: Interpretation for Corona-Enhanced Chemical Reactions", *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 22, 199-224. 2002.
- [7] Nur, M, *Fisika Plasma dan Aplikasinya*, Stadium General Fisika Universitas Diponegoro, Semarang, 1998.
- [8] Anggoro, *Sistem Pembangkit Plasma Lucutan Pijar Korona yang Terintegrasi dengan Sistem Tenaga Sepeda Motor*, Skripsi S-1, Universitas Diponegoro, 2006.
- [9] Arifin, Fajar, *Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls Untuk Aplikasi Pengolahan Limbah Cair Industri Minuman Ringan Dengan Teknologi Plasma Lucutan Korona*, Tugas Akhir S-1, Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2009.
- [10] Lukes, Petr, *Water Treatment by Pulsed Streamer Corona Discharge*, Ph.D Thesis, Prague, 2001.
- [11] Setyaningrum, D. H., *Aplikasi Plasma Lucutan Penghalang Dielektrik Dengan Reaktor Berkonfigurasi Spiral-Silinder Menggunakan Gas Sumber Oksigen (O_2) Murni Untuk Menghasilkan Gas Ozon (O_3)*, Skripsi S-1, Jurusan Fisika MIPA Universitas Diponegoro, Semarang, 2006.
- [12] ---, Corona Discharge, http://en.wikipedia.org/wiki/Corona_discharge, Oktober 2009.
- [13] ---, Peek's Law (Physics), http://en.wikipedia.org/wiki/peeks_law, Desember 2008.

BIODATA PENULIS



Galuh Susilowati (L2F005536), dilahirkan di Jakarta, 9 Oktober 1989. Menempuh pendidikan dasar di SDI Al-Azhar 2 Jakarta. Melanjutkan ke SLTPI Al-Azhar 1 Jakarta, dan pendidikan lanjutan tingkat atas di SMAI Al-Azhar 2 Jakarta. Pada tahun 2005 melanjutkan studi Strata S-1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang, mengambil konsentrasi Teknik Tenaga Listrik.

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I

Ir. Agung Warsito, DHET
NIP. 19580617 1987031 002

Dosen Pembimbing II

Abdul Syakur, ST, MT
NIP. 19720422 1999031 004