

ANALISIS LILITAN PRIMER INTI TUNGGAL DAN INTI GANDA PADA KUMPARAN TESLA DALAM PEMBANGKITAN TEGANGAN TINGGI AC FREKUENSI TINGGI UNTUK REAKTOR OZON

Aditya Mahendra, Mochammad Facta, and Munawar Agus R.

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

E-mail : adityamahendra993@gmail.com

Abstrak

Trafo daya memiliki dimensi besar dengan lilitan banyak, sehingga tidak praktis untuk mendapatkan nilai tegangan tinggi dengan frekuensi tinggi. Kumparan Tesla adalah peralatan listrik yang mengubah nilai tegangan ke nilai yang lebih besar dengan frekuensi tinggi. Dalam tugas akhir ini dirancang suatu kumparan Tesla yang mendapat masukan dari inverter berbentuk gelombang kotak. Kumparan Tesla terdiri rangkaian induktor dan kapasitor. Rangkaian induktor terdiri lilitan primer dan sekunder. Dalam tugas akhir ini akan dianalisis dua macam lilitan primer dengan inti tunggal dan ganda. Lilitan primer dibuat dengan kawat email yang dililit pada pipa secara merata. Kapasitor adalah toroid yang terbuat dari selang dan dilapisi aluminium foil. Dengan perhitungan yang sesuai akan diperoleh frekuensi tepat sehingga menghasilkan tegangan keluaran besar. Tegangan keluaran trafo Tesla diaplikasikan pada beban reaktor ozon. Karakteristik reaktor ozon bekerja berdasarkan tegangan kerja dari frekuensi kumparan Tesla. Berdasarkan hasil perancangan lilitan primer tunggal dan ganda dalam tugas akhir ini adalah $6,7\mu\text{H}$. Lilitan sekunder mempunyai nilai $46,3\text{mH}$ dan nilai toroid sebesar $29,3\text{pF}$. Pengujian menghasilkan frekuensi resonan $60\text{-}65\text{kHz}$ dengan keluaran 2600V dan menghasilkan ozon $0,60$ ppm per 50ml

Kata kunci : Kumparan tesla, reaktor ozon, lilitan tunggal dan ganda.

Abstract

Power transformer have a large dimensions with a lot of winding and not practical to get a high voltage with high frequency. Tesla coil is a device that can change the value of a voltage value that is higher with higher frequency. In this final project, tesla coil input is obtained by inverter in the form of square wave pulse. Tesla coil consists of inductors and capacitor. The inductor circuit consisted by the primary and secondary windings. The primary winding made with email wire wrapped around the pipe evenly. Capacitors is toroid that made of hose and coated by aluminium foil. Frequency values to produce a higher output voltage of tesla transformer can be obtained by careful calculate. Tesla transformer output voltage was applied to the load in the form of ozone reactor. In this final project will be analyzed kind of primary winding with one and two cores. In this final project tesla coil primary winding is designed with single and double cores with a value of $6,7\mu\text{H}$. Secondary windings have $46,3\text{mH}$ value and the value of toroid is $29,3\text{pF}$. Test result value of the resonant frequency of 62 kHz with output 2600V and produce ozone 0.060 ppm in 50ml .

Keywords: tesla coil, ozone reactor, one and two cores

1. Pendahuluan

Pembangkitan tegangan tinggi terbagi menjadi pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik, pembangkitan tegangan tinggi searah, dan pembangkitan tegangan tinggi impuls^[1]. Banyak penelitian dan tugas akhir yang telah membahas tentang pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik menggunakan kumparan tesla.

Penelitian sebelumnya hanya menjelaskan sistem kerja dan keluaran dari pembangkit tegangan tinggi bolak-balik frekuensi tinggi menggunakan trafo tesla. Penelitian ini menggunakan metode *konvensional* seperti pada umumnya tanpa ada pengaplikasian lebih lanjut. Peneliti hanya menjelaskan bagaimana pengujian keluaran kumparan tesla dengan menggunakan sela bola berdiameter 10 cm dan membandingkan tegangan masukan dengan tegangan keluaran. Peralatan pembangkit tegangan tinggi lain adalah pembangkitan menggunakan kumparan tesla dengan *direct* langsung

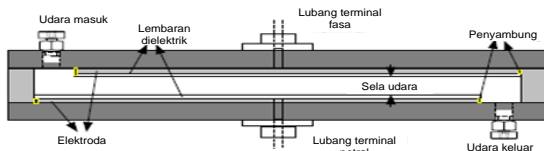
atau tanpa menggunakan kumparan primer. Sedangkan untuk pembangkitan tegangan tinggi menggunakan trafo tesla untuk *dielectric barrier discharge (DBD)* sebagai beban pada reaktor ozon belum ada. Pembangkit tegangan tinggi khususnya tegangan tinggi frekuensi tinggi dapat dibuat dengan teknik sederhana dan biaya yang cukup murah dengan menggunakan kumparan tesla dan dapat diaplikasikan untuk menghasilkan ozon. Trafo tesla mempunyai frekuensi kerja yang bisa mencapai nilai hingga megahertz^[1]. Frekuensi kerja trafo tesla dipengaruhi bagian dari sistemnya antara lain kumparan primer dan kumparan sekunder. Sistem kerja trafo tesla terdapat kumparan primer yang akan menginduksi kumparan sekunder. Pemilihan nilai induktor dan resistansi yang baik pada kumparan primer akan mempengaruhi nilai keluaran dari trafo tesla.

Dengan pemanfaatan peluahan dengan frekuensi tinggi dan tegangan tinggi yang menjadi karakteristik trafo tesla tersebut maka dapat diterapkan beban reaktor ozon untuk menghasilkan ozon. Ozon dapat digunakan dalam berbagai macam bidang seperti sterilisasi makanan, pengurangan bau, pemurnian air maupun penyimpanan makanan. Metode pembangkitan ozon ini disebut *dielectric barrier discharge (DBD)* atau peluahan dengan penghalang dielektrik pada reaktor ozon^[2]. Reaktor ozon dalam aplikasi ini mempunyai sifat beban tersendiri dan dengan karakteristik tersendiri. Sumber tegangan tinggi ini didapatkan dengan trafo dengan frekuensi tinggi seperti trafo tesla.

2. Metode

2.1 Reaktor Ozon

Reaktor ozon yang digunakan pada tugas akhir ini menggunakan konfigurasi elektroda bidang (*plate electrode*) untuk kedua sisi dari positif maupun negative dari reaktor ozon. Hasil perancangan reaktor ozon ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Gambar reaktor ozon[2]

Prinsip kerja reaktor ozon adalah elektroda positif dihubungkan dengan tegangan positif dari rangkaian tegangan tinggi impuls. Elektroda negative dihubungkan ke *ground*. Arus akan berusaha mengalir dari elektroda positif ke elektroda negative sedangkan ion akan berusaha menuju ke elektroda positif dari elektroda negatif. Sehingga akan menimbulkan lecutan. Lecutan tersebut digunakan untuk menghasilkan ozon.

2.2 Pembangkit Tegangan Tinggi

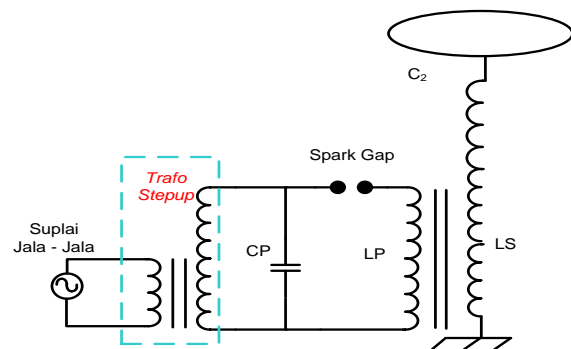
Secara garis besar pembangkit tegangan tinggi terdiri atas^[1] :

1. Pembangkit tegangan tinggi bolak-balik (AC).
2. Pembangkit tegangan tinggi searah (DC).
3. Pembangkit tegangan tinggi impuls.

2.3 Kumparan Tesla

Salah satu cara untuk membangkitkan tegangan tinggi dengan peralatan yang cukup portabel, mudah dalam penggunaannya, dan biaya yang cukup murah adalah dengan menggunakan kumparan tesla. Kumparan tesla merupakan alat yang mampu menghasilkan tegangan tinggi bolak-balik mulai dari ribuan volt sampai jutaan volt dengan frekuensi berkisar antara puluhan kilo hertz sampai dengan orde MHz. Tegangan keluaran kumparan tesla berbentuk pulsa dengan lebar pulsa bervariasi dari nano detik sampai ratusan mikro detik.

Secara sederhana kumparan Tesla dapat dibuat dengan beberapa komponen dasar seperti terlihat pada Gambar 2 Terdiri atas trafo yang membangkitkan tegangan tinggi sekitar 5 – 30 kV. Trafo tegangan tinggi ini akan memuat kapasitor primer melalui kumparan primer. Induktor primer terdiri dari beberapa lilitan kawat tebal yang mempunyai hambatan rendah[4][5].



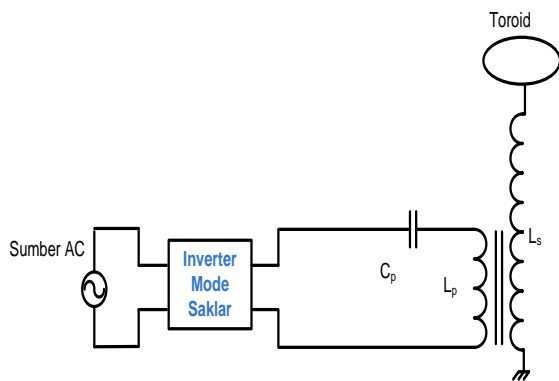
Gambar 2 Skema dasar kumparan tesla

Ketika kapasitor primer telah termuati maka beda potensial diantara elektroda-elektroda celah udara (*spark gap*) cukup tinggi sehingga terjadilah aliran arus dan mengakibatkan terjadinya *breakdown* udara. Saat *spark gap* terhubung, kapasitor primer dan induktor primer akan membentuk rangkaian resonansi dengan frekuensi resonansi yang besarnya ditentukan oleh nilai kapasitor dan lilitan primer^[4].

Medan elektromagnet yang dihasilkan lilitan primer sebagian akan diinduksikan ke kumparan sekunder. Ujung atas dari lilitan sekunder akan dihubungkan dengan toroida yang mempunyai kapasitansi tertentu sedangkan ujung bawah akan terhubung dengan tanah. Lilitan sekunder dan toroida akan membentuk rangkaian

resonansi. Jika frekuensi resonansi lilitan sekunder dan toroida cukup dekat dengan frekuensi rangkaian primer maka pada toroida akan terbangkitkan tegangan ekstra tinggi. Tegangan ekstra tinggi yang terbangkitkan cukup untuk membuat terjadinya breakdown udara dan hal ini ditandai dengan adanya flashover yang keluar dari permukaan toroida ke udara sekitarnya. Dan ketika terjadi discharge pada kapasitor sekunder, spark gap akan terbukadkan proses yang sama akan terulang lagi^[4].

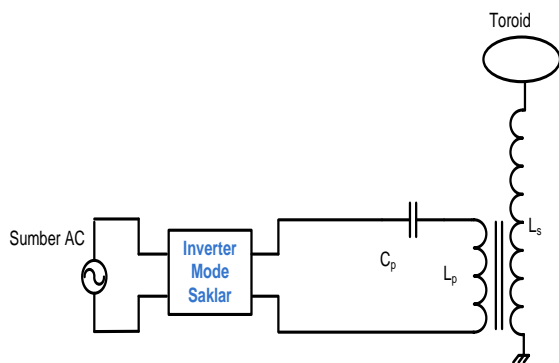
2.4. Kumparan Tesla dengan pensakaran menggunakan Inverter



Gambar 3 Kumparan Tesla dengan Inverter

Jika dibandingkan dengan kumparan tesla yang menggunakan spark gap seperti pada Gambar 3, maka pada kumparan tesla yang mengaplikasikan piranti pensaklaran, fungsi spark gap digantikan oleh inverter mode saklar dan suplai yang digunakan untuk inverter mode saklar adalah suplai jala-jala, sehingga trafo penaik tegangan (step up) pada kumparan tesla jenis ini tidak diperlukan.

Kumparan tesla yang dibuat dalam tugas akhir ini mempunyai skema dasar hubung seri antara kapasitor primer dan induktor pada sisi primernya. Gambar rangkaian kumparan tesla dalam rangkaian resonansi seri seperti gambar 4.



Gambar 4 Rangkaian resonansi seri

Pada kumparan tesla berinti tunggal digunakanlah lilitan pada induktor tidak menggunakan dua konduktor yang dipilin secara bersamaan. Dengan kata lain kumparan tesla berinti tunggal pada bagian induktornya hanya menggunakan satu buah penghantar saja. Berikut perancangan dari kumparan tesla.

1. Lilitan Sekunder

Pada lilitan sekunder merupakan bentuk lilitan yang didesign dengan tinggi (H) 102 cm dan diameter lilitan yang digunakan sebesar 11 cm (d=11cm, R=5,5cm=0,055m). Jumlah lilitan pada induktor tersebut adalah 2040 lilitan (N=2040) dengan diameter kawat yang digunakan adalah sebesar 0.5 mm. Maka berdasarkan perancangan yang dilakukan sesuai dengan rumus yang sama dengan rumus yang diterapkan pada lilitan primer berinti tunggal, maka diperoleh nilai induktansi sebesar :

$$L_p = \frac{5.5^2 \cdot 2040^2}{2540 \cdot (9 \cdot 5.5 + 10 \cdot 102)}$$

$$= 46,3 \text{ mH}$$

2. Kapasitor Sekunder

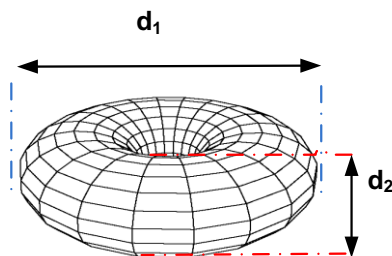
Toroid dalam tugas akhir ini berfungsi sebagai kapasitor pada sisi sekunder tesla coil. Hasil perancangan ditunjukkan pada Gambar 5. Toroid yang digunakan mempunyai diameter luar (d₁) sebesar 75 cm dengan diameter pada selubung (d₂) sebesar 11 cm dan mempunyai diameter dalam (d₁ - 2d₂) sebesar 64 cm. Sehingga sesuai dengan rumus :



Diperoleh nilai kapasitansi sebesar :

$$C_T = 2.8 \cdot \left(1.2781 - \frac{11}{75}\right) \cdot \sqrt{0.1217 \cdot 8.6 \cdot (75 - 11)}$$

$$= 29.3 \text{ pF}$$



Gambar 5 Gambar skema toroid

3. Lilitan Primer

Pada lilitan primer digunakan dua buah model, yaitu induktor berinti tunggal dan induktor berinti ganda. Untuk menjadikan induktor berinti ganda, dengan cara memilin dua buah konduktor.

a) Lilitan primer berinti tunggal

Untuk lilitan primer berinti tunggal dirancang dengan membentuk sebuah induktor berdiameter 15cm (R=7,5cm) menggunakan konduktor yang mempunyai diameter 5 mm. Mempunyai tinggi 20 cm dan lilitan sebanyak 9 buah. Hasil perancangan ditunjukkan pada Gambar 4. Dengan persamaan:

$$L_p = \frac{R^2 N^2}{2540 \cdot (9 \cdot 7,5 + 10 \cdot 20)} \quad (1)$$

Maka akan memperoleh nilai induktansi sebesar

$$L_p = \frac{7,5^2 9^2}{2540 \cdot (9 \cdot 7,5 + 10 \cdot 20)}$$

$$= 0.0067 \text{ mH}$$



Gambar 6 Lilitan primer berinti tunggal

b) Lilitan primer berinti ganda

Lilitan primer berinti ganda dirancang menggunakan dua buah konduktor berdiameter 2 mm dengan memilikinya. Induktornya mempunyai tinggi 26 cm dengan lilitan sebanyak 10 lilitan. Hasil perancangan ditunjukkan pada Gambar 7.

Pada perancangan kumparan tesla diukur pula induktansi dan resistansi dalam dari lilitan primer pada frekuensi 1kHz, 33 kHz, 66 kHz dan 100 kHz.



Gambar 7 Lilitan primer berinti ganda

4. Kapasitor Primer

Kapasitor primer disini berfungsi untuk melawan nilai induktansi agar terjadi resonansi pada saat reaktansi induktansi dan reaktansi kapasitansi saling meniadakan.

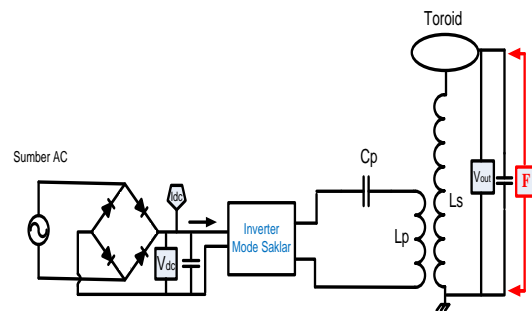
Kapasitor disini dirancang dengan memparalel 10 buah kapasitor bernilai 20 nF, sehingga menghasilkan nilai kapasitansi sebesar 200 nF. Hasil perancangan ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Gambar kapasitor primer

3. Hasil Dan Analisa

3.1 Rangkaian pengujian

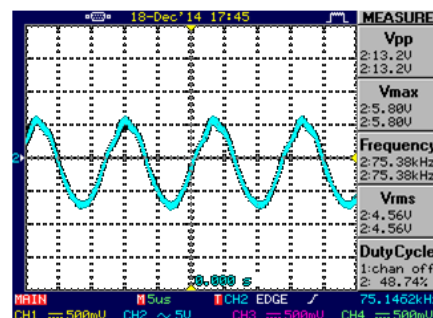


Gambar 9 Gambar rangkaian pengambilan data

3.2 Pengujian Kumparan Tesla

Dari gambar rangkaian seperti pada Gambar 9, maka diperoleh hasil pengujian kumparan tesla dengan membandingkan inti tunggal dengan inti ganda pada lilitan sisi primer. Pengujian ini diambil menggunakan probe dengan perbandingan 1:100.

Contoh bentuk Gambar 10 pada saat pengujian adalah



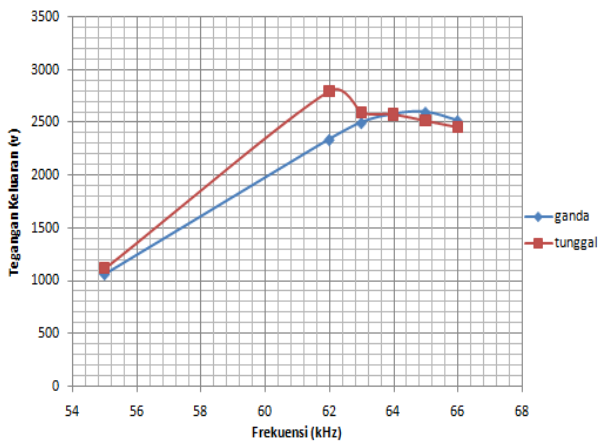
Gambar 10 Gambar keluaran tegangan (Vout) frekuensi 75 kHz

3.2.1 Pengujian Lilitan Primer

Tabel 1 Tabel hasil pengujian

Frek (kHz)	V _{input} (v)		V _{output} (v)		Cos φ	
	T	G	T	G	T	G
55	13.1	11.8	1120	1060	0.9	0.9
62	13.05	13.5	2800	2340	0.9	0.9
63	13	12.01	2600	2500	0.9	1
64	12.91	11.9	2580	2580	0.9	1
65	12.81	12.7	2520	2600	0.9	0.9
66	13.1	12.9	2460	2520	0.9	0.9

* T=Tunggal
G=Ganda



Gambar 11 Gambar grafik hubungan antara frekuensi dan tegangan keluaran tesla

Dengan Gambar 11 pada saat pengukuran seiring naiknya frekuensi mendekati nilai resonant, maka V_{out} juga akan naik. Sesuai dengan prinsip resonansi bahwa tegangan keluaran mengalami kenaikan mendekati resonansi dan terjadi penurunan tegangan sesudah melewati puncak resonansi. Hal ini terjadi karena jika tegangan pada lilitan primer semakin tinggi, maka akan semakin tinggi pula tegangan keluarannya.

Untuk nilai cos φ pada Tabel 1 terlihat ada perbedaan cos φ namun tidak terlalu signifikan. Hal ini sesuai dengan prinsip resonansi, ketika beresonansi nilai L dan C saling meniadakan, sehingga terdapat nilai resistif pada beban yang membuat nilai cos φ mendekati 1.

3.2.2 Pengujian Karakteristik Chamber

Pada pengujian ini diukur arus yang mengalir pada chamber dengan rumus sebagai berikut:

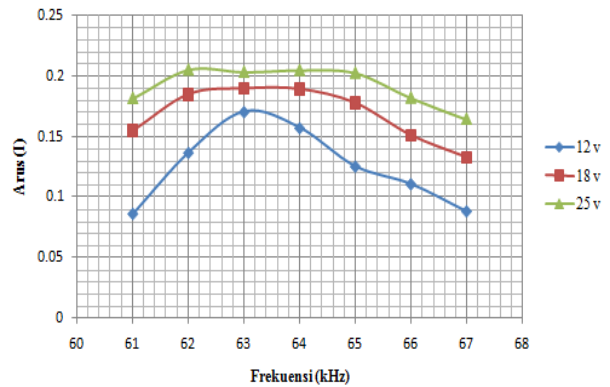
$$I_{c\text{mbr}} = C \cdot \omega \cdot V_{\text{max}} \cdot \text{Cos } \omega t \quad (3)$$

Maka diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 2 Tabel hasil pengujian

Arus pada Chamber (I)		
Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3
0.0868	0.1550	0.1820
0.1370	0.1850	0.2055
0.1705	0.1897	0.2036
0.1573	0.1892	0.2051
0.1257	0.1778	0.2029
0.1112	0.1513	0.1823
0.0888	0.1332	0.1647

Perbandingan Arus dan Frekuensi



Gambar 12 Gambar grafik perbandingan arus dan frekuensi

Dengan Gambar 12 perbandingan diatas maka dapat kita lihat bahwa arus chamber mengalami kenaikan dengan nilai keluaran tesla yang semakin besar pula. Dapat kita ketahui karakteristik dari chamber, semakin besar nilai keluaran dari tesla maka akan mempengaruhi besarnya arus yang mengalir pada chamber atau semakin besar arus yang mengalir pada chamber.

3.3 Pengujian Ozon

Pengujian Ozon bertujuan mengetahui ozon yang dihasilkan oleh reaktor ozon.

Tabel 3 Tabel hasil pengujian

Primer Tunggal		Primer Ganda	
Vout	Ozon (ppm)	Vout	Ozon (ppm)
1120	0	1120	0
2520	0,5	2520	0,5
2580	0,5	2580	0,5
2600	0,6	2600	0,6
2800	0,7	-	-

Dengan tegangan keluaran sebesar 2480 V maka tidak ada ozon yang terdeteksi pada kedua lilitan konduktor ganda dan tunggal. Pada tegangan 2520 V terdeteksi adanya ozon sebesar 0,5 ppm per 50 ml dan untuk tegangan keluaran sebesar 2580 V terdeteksi ozon sebesar 0,5ppm per 50 ml. Sedangkan untuk keluaran sebesar 2600 V dapat menghasilkan ozon maksimal 0,60ppm dalam 50ml. Untuk konduktor tunggal dapat

menghasilkan ozon sebesar 0,7 ppm per 50 ml dengan tegangan 2800 V. Indikator ozon meter mengalami kenaikan, namun perlu diketahui bahwa kenaikan indikator ini juga sangat dipengaruhi oleh tegangan, suhu sekitar, tekanan, dan kelembaban.

4 Penutup

Perancangan pembangkitan menggunakan trafo tesla telah dibuat dengan frekuensi resonansi dari kumparan tesla berada pada frekuensi 62 kHz untuk lilitan konduktor primer berinti tunggal dan 65 kHz untuk lilitan konduktor primer berinti ganda. Tegangan keluaran kumparan tesla (V_{out}) dengan kumparan primer menggunakan kumparan konduktor berinti tunggal lebih besar yaitu 2800 V dan kumparan primer menggunakan kumparan konduktor berinti ganda sebesar 2600 V. Pada V_{out} 2420 V dapat menghasilkan ozon dengan waktu 47 detik sebesar 0,50 ppm per 50ml, sedangkan V_{out} 2600 V menghasilkan ozon sebesar 0,60 ppm per 50ml dengan 33 detik. Untuk tugas akhir ini, suplai inverter dapat diganti dengan baterai untuk menggantikan suplai dari jala – jala PLN dan dapat divariasikan dengan bentuk toroid yang baru dan memungkinkan dibuat perhitungan yang berbeda. Untuk variasi bisa ditambahkan variasi pada jumlah inti konduktor yang digunakan dan memungkinkan untuk dibuat persamaan baru.

Referensi

- [1]. Tobing, Bonggas L, *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*, Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- [2]. Facta, Mochammad, *Prosiding Mathematics and Sciences Forum Karakteristik Reaktor Ozon Tipe Penghalang Peluahan Dielektrik dengan Pembangkit Tegangan Tinggi Frekuensi Rendah dan Frekuensi Tinggi*, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro 2014.
- [3]. Abduh, Syamsir, “*Teknik Tegangan Tinggi*”, Salemba Teknika, Jakarta, 36-38.
- [4]. Bagas Setiawan, Alga. “*Perancangan Pembangkitan Tegangan Tinggi AC Frekuensi Tinggi Menggunakan Kumparan Tesla dengan Rangkaian Resonansi Seri*”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, 2013.
- [5]. Mujahid, Wildan. “*Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi AC Frekuensi Tinggi dengan Kumparan Tesla menggunakan Inverter Jenis Push-Pull*”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, 2010.
- [6]. Denicolai, Marco. *Tesla Transformer for Experimentation and Research*. Thesis, Departement Electrical Engineering Helsinki University of Technology, 2001.
- [7]. Warsito. *Vademekum Elektronika*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta. 2006
- [8]. McLyman, Colonel Wm. *Transformer and Inductor Design Handbook*, CRC Press, California, 2004.
- [9]. Edminister, Joseph A, Mahmood Navi. *Rangkaian Listrik Edisi keempat*. Jakarta, Erlangga. 191-192, 7-8
- [10]. Dion. “*Analisis Inverter Dual Resonansi Sebagai Catu Daya Lampu Led*”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, 2013
- [11]. Yusuf, Baharudin. “*Aplikasi tegangan tinggi impuls pada Pembuatan Reaktor Ozon*”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, 2018
- [12]. Abdel-Salam, Mazen, *High-Voltage Engineering: Theory and Practice, Second Edition, Revised and Expanded*, CRC Press, New York, N.Y. : Dekker, 2000.