

PERANCANGAN PEMBANGKIT TEGANGAN TINGGI IMPULS 11,20 kV DENGAN MENERAPKAN *ZERO VOLTAGE SWITCHING (ZVS)* PADA KONVERTER *FLYBACK*

Novy Arizka Pratiwi^{*)}, Abdul Syakur, dan Karnoto

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

^{*)}E-mail: *novy.arizka@gmail.com*

Abstrak

Tegangan tinggi tidak hanya digunakan untuk keperluan transmisi, tetapi juga untuk penelitian di laboratorium. Pada umumnya, tegangan tinggi dibangkitkan menggunakan pembangkit tegangan tinggi konvensional yang berukuran besar. Oleh karena itu, diperlukan rangkaian yang lebih sederhana untuk membangkitkan tegangan tinggi, misalnya menggunakan konverter flyback. Konverter flyback merupakan konverter DC-DC yang memiliki isolasi di antara masukan dan keluarannya. Komponen utama dari konverter flyback adalah trafo step up dan komponen pensaklaran. Pada penelitian ini dirancang penerapan zero voltage switching (ZVS) pada konverter flyback untuk membangkitkan tegangan tinggi. Trafo step up dan komponen pensaklaran yang digunakan adalah trafo flyback dari monitor CRT (Cathode Ray Tube) dan MOSFET IRFP460. Tegangan tinggi hasil pembangkitan konverter flyback diterapkan pada reaktor ozon. Pada pengujian mode pensaklaran dengan menerapkan ZVS diketahui tegangan drain-source MOSFET (V_{DS}) bernilai nol ketika MOSFET turn off. Pada pengujian tanpa beban dengan variasi duty cycle diperoleh tegangan keluaran sebesar 11,20 kV pada duty cycle 60%. Pengujian tanpa beban dengan variasi frekuensi switching diperoleh tegangan keluaran sebesar 10,80 kV pada frekuensi switching 23 kHz. Pengujian berbeban dengan reaktor ozon sudah dapat menghasilkan ozon dengan konsentrasi 0,02-0,06 ppm pada tegangan operasi 7,4-8,4 kV.

Kata kunci : Konverter Flyback, Zero Voltage Switching (ZVS), Tegangan Tinggi, Ozon

Abstract

High voltage is not only used to transmission purposes, but also used to researches in laboratory. Generally, high voltage is generated by large conventional high voltage generator. Therefore, a simpler circuit is needed, for example is using flyback converter. Flyback converter is direct current to direct current (DC-DC) converter which has an isolation between input and output. The main components of flyback converter are step-up transformer and electronic switching device. In this research, application of zero voltage switching (ZVS) on flyback converter is designed to generate high voltage. The type of step-up transformer and switching device are flyback transformer from Cathode Ray Tube (CRT) monitor and IRFP460 MOSFET. High voltage generated by flyback converter is applied as a part of ozone generator. The ZVS switching mode test gives the MOSFET drain-source voltage (V_{DS}) at zero when MOSFET turns off. Unloaded test with duty cycle variation gives the output voltage of 11,20 kV at duty cycle of 60%. Unloaded test with switching frequency variation produces output voltage of 10,80 kV at switching frequency of 23 kHz. Loaded test with ozone generator has been able to produce ozone with ozone concentration of 0,02-0,06 ppm at operation voltage of 7,4-8,4 kV.

Keywords: Flyback Converter, Zero Voltage Switching (ZVS), High Voltage, Ozone

1. Pendahuluan

Konverter *flyback* merupakan konverter DC-DC yang memiliki isolasi di antara masukan dan keluarannya [1]. Pada penelitian [2]–[6] dibahas mengenai pembangkitan tegangan tinggi impuls dengan menggunakan konverter *flyback* dan rangkaian elektronika daya. Penelitian mengenai aplikasi tegangan tinggi untuk pembangkitan

ozon juga sudah banyak dilakukan, di antaranya untuk mengurangi bakteri pada susu perah dan penjernihan air [5], [6]. Metode pensaklaran dengan *zero voltage switching* sudah pernah dilakukan pada penelitian [7] yang diterapkan pada konverter DC-DC tipe *buck*.

Pada Penelitian ini, penulis merancang pembangkitan tegangan tinggi menggunakan konverter *flyback* dengan

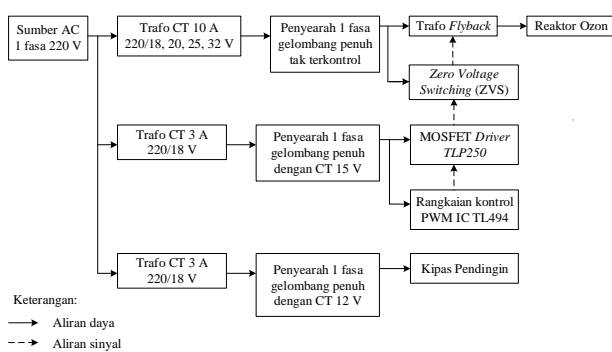
menerapkan *zero voltage switching* (ZVS). Konverter *flyback* terdiri dari trafo *step up* tegangan tinggi dan transistor *switching*. Trafo *step up* tegangan tinggi yang digunakan adalah trafo *flyback* dari monitor CRT. Transistor *switching* yang digunakan adalah MOSFET IRFP460. Metode pensaklaran yang digunakan adalah *zero voltage switching*, yaitu salah satu metode *soft-switching* di mana tegangan pada MOSFET bernilai nol ketika *turn on* atau *turn off*. Metode *switching* ini menggunakan kapasitor resonan (C_r) yang dipasang paralel dengan MOSFET dan induktor resonan (L_r) yang dipasang seri dengan kombinasi dari MOSFET dan kapasitor resonan [8]. Tegangan keluaran hasil dari penerapan *zero voltage switching* pada konverter *flyback* diterapkan pada reaktor ozon.

Tujuan utama dari pembuatan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat pembangkitan tegangan tinggi impuls dengan menerapkan *zero voltage switching* (ZVS) pada konverter *flyback* untuk pembangkitan ozon..
2. Mengetahui pengaruh variasi *duty cycle* terhadap tegangan keluaran konverter *flyback*.
3. Mengetahui pengaruh variasi frekuensi *switching* terhadap tegangan keluaran konverter *flyback*.
4. Mengetahui jumlah ozon (ppm) yang mampu dihasilkan dari penerapan tegangan tinggi impuls yang dibangkitkan dengan menerapkan *zero voltage switching* pada konverter *flyback*.

2. Metode

Perancangan Penelitian ini terdiri dari blok rangkaian penyearah, blok rangkaian ZVS konverter *flyback*, blok rangkaian kontrol, dan blok reaktor ozon.



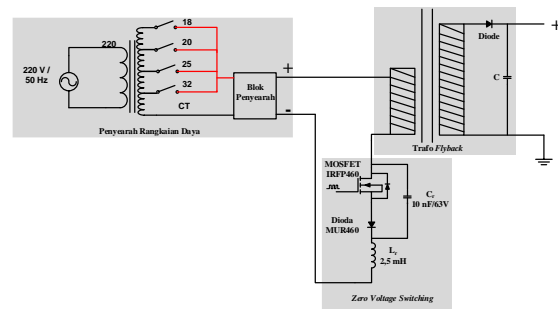
Gambar 1. Blok Diagram Alat

2.1. Zero Voltage Switching (ZVS) Konverter Flyback

Rangkaian ZVS konverter *flyback* pada Penelitian ini tersusun dari komponen-komponen berikut:

1. Sumber Tegangan DC (V_{in})
 Sumber tegangan yang digunakan sebagai suplai daya konverter berasal dari keluaran rangkaian penyearah 1 fasa gelombang penuh tak terkontrol.

2. Saklar
 Komponen pensaklaran yang digunakan adalah MOSFET. MOSFET yang digunakan adalah IRFP460 yang mampu menahan tegangan hingga 500 V [9].
3. Trafo
 Trafo yang digunakan pada Penelitian ini adalah trafo *flyback* dengan inti ferit yang diambil dari monitor CRT.
4. Dioda MUR460
 Dioda yang digunakan pada pensaklaran konverter *flyback* ini adalah dioda MUR460. Dioda ini dipilih karena dapat menghantarkan arus sebesar 4 A dan menahan reverse voltage hingga 600 V [10]
5. Kapasitor Resonan (C_r) dan Induktor Resonan (L_r)
 Nilai kapasitor (C_r) dan induktor (L_r) yang digunakan pada rancangan ZVS konverter *flyback* ini adalah kapasitor jenis MKM dengan nilai 10 nF/63 V dan induktor dengan nilai 2,5 mH.



Gambar 2. Rangkaian ZVS Konverter Flyback

2.2. Rangkaian Kontrol IC TL494

Pada Penelitian ini, sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) dihasilkan oleh IC TL494. Frekuensi osilasi diatur oleh komponen *capacitor timing* (C_T) yang terhubung dengan pin 5 dan *resistor timing* (R_T) yang terhubung dengan pin 6 IC TL494. Besarnya frekuensi osilasi maksimum dan minimum dari rangkaian PWM ini dapat ditentukan dengan Persamaan 1 di bawah ini [11].

$$f_s = \frac{1,1}{C_T \times R_T} \quad (1)$$

Di mana:

f_s : frekuensi pensaklaran (Hz)

C_T : kapasitor *timing* (F)

R_T : induktor *timing* (H)

$$f_{osc(max)} = \frac{1,1}{(10 \times 10^{-9}) \times 3900} = 28.205,1 \approx 28 \text{ kHz}$$

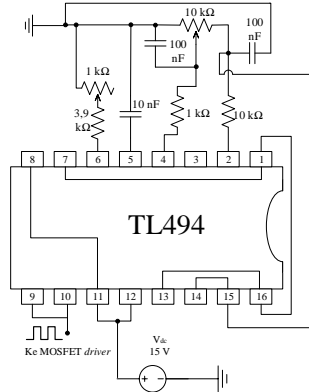
(untuk nilai $R_{var} = 0 \Omega$)

$$f_{osc(min)} = \frac{1,1}{(10 \times 10^{-9}) \times 4900} = 22.449 \approx 23 \text{ kHz}$$

(untuk nilai $R_{var} = 1 \Omega$)

Dengan demikian pada rangkaian PWM diperoleh *range* frekuensi *switching* dari 23 kHz sampai 28 kHz. Keluaran

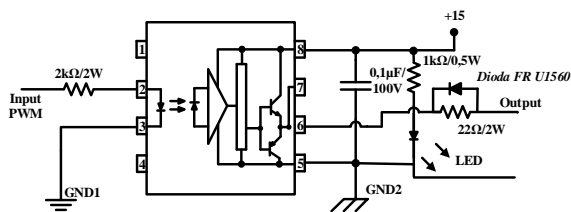
gelombang kotak terdapat pada pin 9 dan pin 10. IC TL494 bekerja dengan sistem operasi *single-ended* sehingga pin 13 dihubungkan dengan *ground*. Gambar 3. merupakan rangkaian kontrol IC TL494.



Gambar 3. Rangkaian Kontrol IC TL494

2.3. MOSFET Driver TLP250

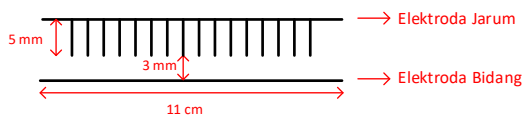
Rangkaian MOSFET driver TLP250 digunakan untuk mengisolasi dan menguatkan sinyal keluaran dari rangkaian kontrol IC TL494. TLP250 dapat digunakan untuk *driver* MOSFET tegangan tinggi.



Gambar 4. Rangkaian MOSFET Driver TLP250

2.4. Reaktor Ozon

Pada penelitian Penelitian ini, tegangan tinggi hasil pembangkitan ZVS konverter *flyback* diterapkan pada reaktor ozon. Reaktor ozon ini menggunakan elektroda jarum dan bidang.



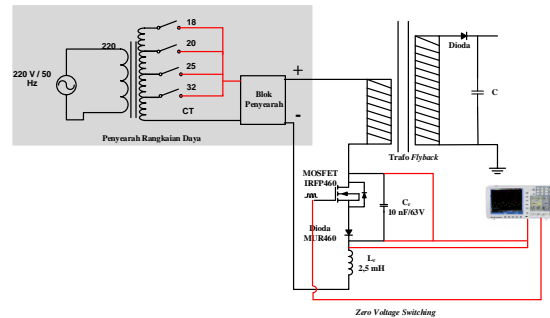
Gambar 5. Skema Elektroda Jarum dan Bidang

Gambar 5. merupakan *chamber* elektroda yang digunakan. Elektroda memiliki panjang 11 cm dengan jarak elektroda 3 mm. Elektroda jarum terbuat dari bahan *stainless steel* dengan panjang jarum 5 mm dan elektroda plat terbuat dari bahan tembaga (PCB *double layer*). Tegangan tinggi yang diterapkan pada reaktor ozon akan menghasilkan medan listrik. Semakin besar medan listrik di antara kedua elektroda, maka semakin banyak ozon yang terbentuk.

3. Hasil dan Analisa

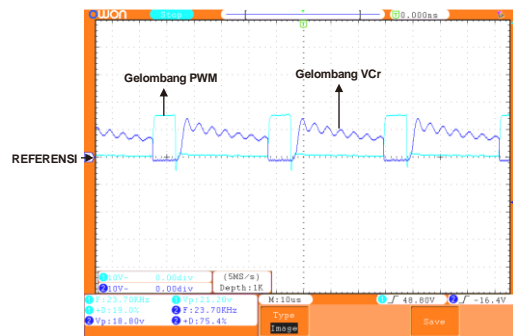
3.1. Pengujian Mode Pensaklaran Zero Voltage Switching (ZVS) Konverter Flyback

Pengujian dilakukan untuk mengetahui gelombang keluaran pada komponen kapasitor C_r dan induktor L_r pada rangkaian ZVS konverter *flyback*. Gelombang keluaran tersebut digunakan untuk mengetahui proses pensaklaran pada mode *zero voltage switching*. Skema pengujian pensaklaran mode ZVS ditunjukkan pada Gambar 6.



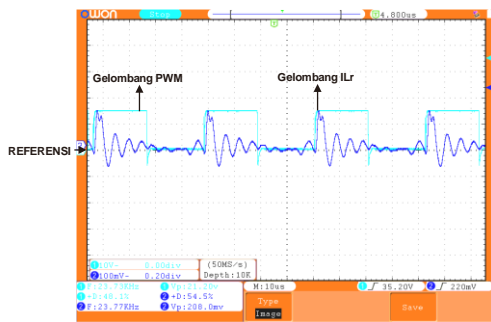
Gambar 6. Skema Rangkaian Pengujian Mode Pensaklaran ZVS

Gelombang keluaran tegangan V_{Cr} dan arus I_{Lr} ditunjukkan pada Gambar 7. Dan Gambar 8.



Gambar 7. Gelombang Tegangan Kapasitor (C_r) dan Gelombang Pemicuan Rangkaian Kontrol

Gambar 7. memperlihatkan bentuk gelombang V_{Cr} (berwarna biru tua) dan gelombang PWM (berwarna biru muda). Tegangan kapasitor (V_{Cr}) merepresentasikan tegangan pada titik *drain – source* karena kapasitor dirangkai secara paralel terhadap MOSFET. Gelombang PWM digunakan sebagai acuan pensaklaran MOSFET saat kondisi *ON* dan *OFF*. Tegangan pada kapasitor (C_r) mengalami kenaikan pada saat MOSFET dalam kondisi *OFF* dan bernilai nol pada saat MOSFET dalam kondisi *ON*. Hal ini dikarenakan pada saat MOSFET dalam kondisi *ON* arus mengalir pada MOSFET, tetapi tidak mengalir ke kapasitor C_r karena nilai resistansi MOSFET lebih kecil. Pada saat MOSFET dalam kondisi *OFF* terjadi pengisian tegangan pada kapasitor C_r oleh kumparan primer trafo *flyback*. Dengan demikian proses *zero voltage switching* terjadi ketika MOSFET *turn off*.



Gambar 8. Gelombang Tegangan Induktor (Lr) dan Gelombang Pemicuan Rangkaian Kontrol

Gambar 8. memperlihatkan bentuk gelombang keluaran induktor L_r (berwarna biru tua) dan gelombang PWM (berwarna biru muda). Arus yang mengalir pada induktor (I_{Lr}) merepresentasikan arus yang mengalir pada MOSFET karena induktor (L_r) dirangkai secara seri dengan MOSFET. Gelombang PWM digunakan sebagai acuan pensaklaran MOSFET saat kondisi *ON* dan *OFF*. Arus induktor L_r mengalami kenaikan pada saat MOSFET *turn on* karena terjadi pengisian arus pada induktor L_r . Arus pada induktor L_r mengalami penurunan pada saat MOSFET *turn off* karena terjadi pengosongan arus pada induktor L_r .

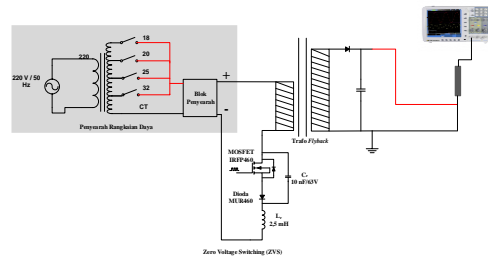
3.2. Pengujian Tegangan Keluaran Zero Voltage Switching (ZVS) Konverter Flyback

Pengujian tegangan keluaran ZVS konverter *flyback* dilakukan dengan mengatur nilai frekuensi *switching* dan *duty cycle* pada rangkaian kontrol. Nilai frekuensi *switching* yang digunakan adalah 23-28 kHz. Sedangkan untuk *duty cycle* yang digunakan adalah 10-60% dengan interval variasi *duty cycle* 10%. Pengukuran tegangan keluaran pada ZVS konverter *flyback* ini dilakukan tanpa beban. Gambar 9. merupakan skema pengujian tegangan keluaran dari ZVS konverter *flyback*.

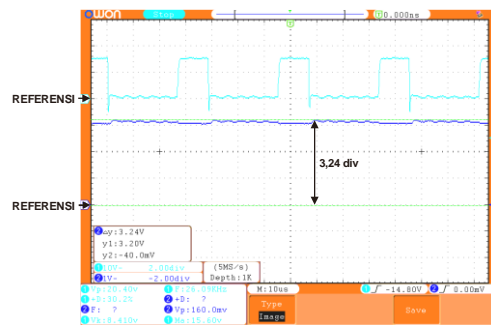
Gambar 10. menunjukkan gelombang keluaran tegangan ZVS konverter *flyback*. Gelombang tegangan keluaran ditunjukkan oleh gelombang berwarna biru tua (bawah) dan gelombang PWM ditunjukkan oleh gelombang berwarna biru muda (atas). Dapat dilihat bahwa gelombang tegangan keluaran ZVS konverter *flyback* pada Gambar 10. merupakan gelombang tegangan impuls tertapis karena pada trafo *flyback* yang digunakan terdapat komponen kapasitor [12]. Nilai tegangan yang dihasilkan dari Gambar 10. dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} V_{out} &= \text{div vertikal} \times V/\text{div} \times \text{pengali probe} \\ &= 3,24 \text{ div} \times 1 \text{ V}/\text{div} \times 1000 \\ &= 3240 \text{ V} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan dari Gambar 10. maka didapatkan nilai tegangan keluaran ZVS konverter *flyback* sebesar 3240 Volt.



Gambar 9. Skema Rangkaian Pengujian ZVS Konverter Flyback



Gambar 10. Gelombang Tegangan Keluaran ZVS Konverter Flyback

3.2.1. Variasi Duty Cycle Terhadap Tegangan Keluaran ZVS Konverter Flyback

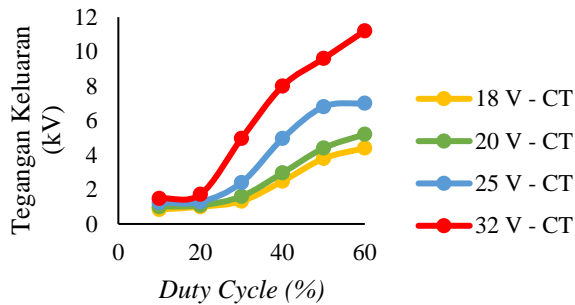
Pengukuran tegangan keluaran ZVS konverter *flyback* dilakukan dengan enam variasi *duty cycle*, yaitu 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, dan 60%. Variasi *duty cycle* diterapkan pada masing-masing tegangan masukan dari trafo CT, yaitu 18 V_{AC}, 20 V_{AC}, 25 V_{AC}, dan 32 V_{AC}. Pengukuran tegangan keluaran dilakukan dengan kondisi frekuensi *switching* tetap, yaitu 23 kHz. Pengukuran tegangan keluaran variasi *duty cycle* dilakukan tanpa beban dengan bantuan osiloskop digital OWON untuk membaca nilai tegangan keluaran. Hasil pengukuran tegangan keluaran ZVS konverter *flyback* dengan variasi *duty cycle* dapat dilihat pada Tabel 1.

Dari Tabel 1. dapat diketahui bahwa besarnya *duty cycle* mempengaruhi tegangan keluaran ZVS konverter *flyback*. Semakin besar *duty cycle*, maka tegangan keluaran yang dihasilkan semakin tinggi. Dengan kata lain besarnya *duty cycle* dan tegangan keluaran berbanding lurus.

Berdasarkan data pada Tabel 1. dapat diperoleh grafik hubungan antara *duty cycle* dan tegangan keluaran ZVS konverter *flyback* yang ditunjukkan pada Gambar 11.

Tabel 1. Data Tegangan Keluaran ZVS Konverter Flyback Variasi Duty Cycle (Dalam Satuan kV)

Tegangan Masukan (V _{AC})	Duty Cycle (%)					
	10	20	30	40	50	60
18 V - CT	0,84	1,00	1,32	2,48	3,80	4,40
20 V - CT	1,00	1,08	1,60	2,96	4,40	5,20
25 V - CT	1,24	1,28	2,40	4,96	6,80	7,00
32 V - CT	1,48	1,72	4,96	8,00	9,60	11,20



Gambar 11. Grafik Hubungan *Duty Cycle* dengan Tegangan Keluaran

Gambar 4.21 menunjukkan hubungan antara *duty cycle* dengan tegangan keluaran. Semakin besar *duty cycle* yang diterapkan, maka nilai tegangan keluarannya semakin tinggi. Variasi tegangan masukan juga mempengaruhi nilai tegangan keluaran. Pada *duty cycle* yang sama semakin tinggi tegangan masukan, maka tegangan keluaran juga semakin tinggi.

3.2.2. Variasi Frekuensi *Switching* Terhadap Tegangan Keluaran ZVS Konverter *Flyback*

Pengukuran tegangan keluaran ZVS konverter *flyback* dilakukan dengan enam variasi frekuensi *switching*, yaitu 23 kHz, 24 kHz, 25 kHz, 26 kHz, 27 kHz, dan 28 kHz. Variasi frekuensi *switching* diterapkan pada masing-masing tegangan masukan dari trafo CT, yaitu 18 V_{AC}, 20 V_{AC}, 25 V_{AC}, dan 32 V_{AC}. Pengukuran tegangan keluaran dilakukan dengan kondisi *duty cycle* tetap, yaitu 55%. Pengukuran tegangan keluaran variasi frekuensi *switching* dilakukan tanpa beban dengan bantuan osiloskop digital OWON untuk membaca nilai tegangan keluaran. Hasil pengukuran tegangan keluaran ZVS konverter *flyback* dengan variasi frekuensi *switching* dapat dilihat pada Tabel 2.

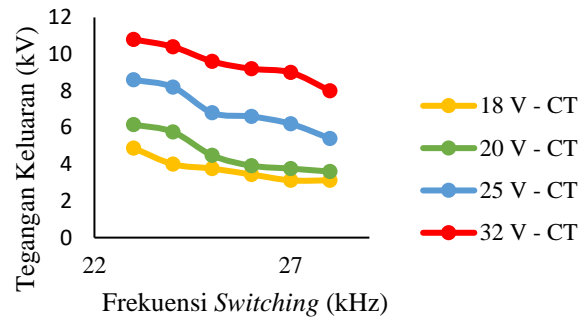
Tabel 2. Data Tegangan Keluaran ZVS Konverter *Flyback* Variasi Frekuensi *Switching* (Dalam Satuan KV)

Tegangan Masukan (V _{AC})	Frekuensi <i>Switching</i> (kHz)					
	23	24	25	26	27	28
18 - CT	4,88	4,40	3,76	3,44	3,12	3,12
20 - CT	6,16	5,76	4,48	3,92	3,76	3,60
25 - CT	8,60	8,20	6,80	6,60	6,20	5,40
32 - CT	10,80	10,40	9,60	9,20	9,00	8,00

Dari Tabel 2. dapat dilihat bahwa semakin besar frekuensi *switching*, maka tegangan keluaran yang dihasilkan semakin rendah. Dengan kata lain nilai tegangan keluaran berbanding terbalik dengan frekuensi *switching* yang diterapkan [1].

Dari data pada Tabel 2. dapat diperoleh grafik hubungan antara frekuensi *switching* dan tegangan keluaran ZVS

konverter *flyback* yang ditunjukkan pada Gambar 12.



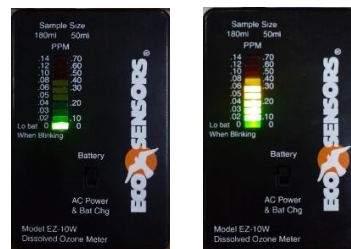
Gambar 12. Grafik Hubungan Frekuensi *Switching* dengan Tegangan Keluaran

Gambar 12. menunjukkan hubungan antara frekuensi *switching* dengan tegangan keluaran. Semakin besar frekuensi *switching* yang diterapkan, maka tegangan keluaran yang dihasilkan semakin rendah. Variasi tegangan masukan juga mempengaruhi nilai tegangan keluaran. Pada frekuensi *switching* yang sama semakin tinggi tegangan masukan, maka tegangan keluaran juga semakin tinggi.

3.3. Pengujian Ozon

Ozon adalah gas yang tidak stabil, berwarna biru, mudah mengoksidasi, dan bersifat iritan yang kuat terhadap saluran pernapasan. Ozon didapat secara alamiah di dalam stratosfir dan sebagian kecil di dalam troposfir [13]. Secara elektris, ozon dapat dihasilkan dengan menerapkan tegangan tinggi di antara dua elektroda di dalam suatu *chamber* udara atau gas oksigen. Metode untuk menghasilkan ozon ini dikenal dengan metode lucutan korona [14].

Pengujian ozon bertujuan untuk mengetahui ada atau tidaknya ozon dari pembangkitan tegangan tinggi ZVS konverter *flyback* yang telah dibuat. Pengujian dilakukan dengan menerapkan tegangan tinggi pada reaktor ozon, kemudian udara bebas dialirkan menggunakan pompa udara. Udara yang mengalir ke dalam reaktor kemudian dipecah oleh tegangan tinggi sehingga terbentuk ozon (O₃). Ozon yang dihasilkan diukur menggunakan *ozone meter* untuk dapat diketahui konsentrasinya.



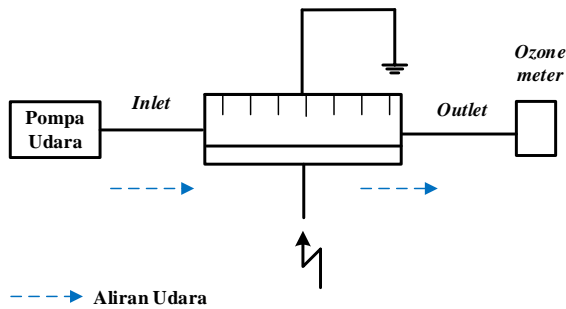
Gambar 13. *Ozone Meter*

Pengujian ozon dilakukan dengan dua variasi elektroda, yaitu:

1. Elektroda bidang diterapkan tegangan tinggi dan elektroda jarum dihubungkan dengan *ground* dengan jarak elektroda 3 mm.
2. Elektroda jarum diterapkan tegangan tinggi dan elektroda bidang dihubungkan dengan *ground* dengan jarak elektroda 3 mm.

3.3.1. Elektroda Bidang (Tegangan Tinggi) dan Elektroda Jarum (Ground)

Pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan tegangan tinggi pada elektroda bidang dan *ground* dihubungkan dengan elektroda jarum. Jarak elektroda adalah 3 mm. Skema pengujian ozon dengan variasi elektroda bidang (tegangan tinggi) dan elektroda jarum (*ground*) ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Pengujian Ozon Variasi Elektroda Bidang (Tegangan Tinggi) dan Elektroda Jarum (Ground)

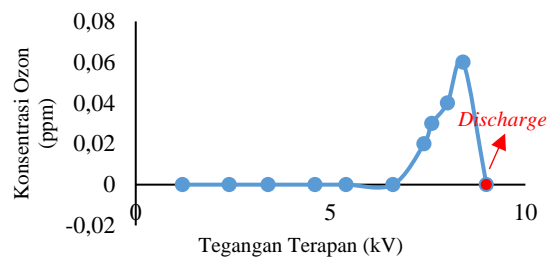
Pengujian ozon dilakukan dengan variasi tegangan keluaran ZVS konverter *flyback*. Data hasil pengujian ozon ditunjukkan pada Tabel 3.

Dari Tabel 3. dapat dilihat bahwa pada tegangan keluaran 1,2-6,6 kV konsentrasi gas ozon yang dihasilkan bernilai 0. Hal ini disebabkan medan listrik yang dihasilkan pada reaktor ozon belum cukup untuk mengubah udara menjadi ozon. Pada tegangan 7,4-8,4 kV, konsentrasi ozon yang dihasilkan berturut-turut sebesar 0,02 ppm; 0,03 ppm; 0,04 ppm; 0,05 ppm; dan 0,06 ppm. Semakin tinggi tegangan yang diterapkan, maka medan listrik yang dihasilkan semakin besar sehingga konsentrasi ozon yang terbentuk juga semakin banyak. Pada tegangan 9,0 kV tidak ada ozon yang terdeteksi karena terjadi *discharge* sehingga mempengaruhi deformasi ozon [15].

Dari data pada Tabel 3. diperoleh grafik hubungan antara tegangan keluaran dengan konsentrasi ozon yang ditunjukkan pada Gambar 15.

Tabel 3. Data Pengujian Ozon Variasi Elektroda Bidang (Tegangan Tinggi) dan Elektroda Jarum (Ground)

Tegangan Terapan (kV)	Konsentrasi Ozon (ppm)	Kondisi Elektroda
1,2	0	-
2,4	0	-
3,4	0	-
4,6	0	-
5,4	0	-
6,6	0	-
7,4	0,02	-
7,6	0,03	-
7,8	0,04	-
8,0	0,05	-
8,4	0,06	-
9,0	0	Discharge

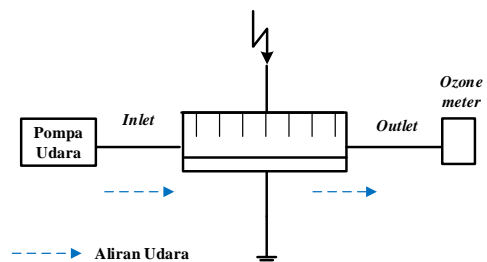


Gambar 15. Grafik Hubungan Konsentrasi Ozon dengan Tegangan Terapan

Gambar 15. menunjukkan hubungan antara konsentrasi ozon dengan tegangan keluaran. Konsentrasi ozon minimum yang dihasilkan sebesar 0,02 ppm pada tegangan 7,4 kV dan konsentrasi ozon maksimum yang dihasilkan sebesar 0,06 ppm pada tegangan 8,4 kV. Dapat disimpulkan bahwa reaktor ozon dengan elektroda bidang (tegangan tinggi) dan elektroda jarum (*ground*) dengan jarak elektroda 8 mm sudah dapat menghasilkan ozon.

3.3.2. Elektroda Jarum (Tegangan Tinggi) dan Elektroda Bidang (Ground)

Pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan tegangan tinggi pada elektroda jarum dan *ground* dihubungkan dengan elektroda bidang. Jarak elektroda adalah 3 mm. Skema dan data pengujian ozon dengan variasi elektroda jarum (tegangan tinggi) dan elektroda bidang (*ground*) ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Pengujian Ozon Variasi Elektroda Jarum (Tegangan Tinggi) dan Elektroda Bidang (Ground)

Pengujian ozon dilakukan dengan variasi tegangan keluaran ZVS konverter *flyback*. Data hasil pengujian ozon ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Pengujian Ozon Variasi Elektroda Jarum (Tegangan Tinggi) dan Elektroda Bidang (Ground)

Tegangan Terapan (kV)	Konsentrasi Ozon (ppm)	Kondisi Elektroda
1,2	0	-
2,0	0	-
3,2	0	-
4,0	0	-
5,4	0	-
6,6	0	-
7,4	0	Discharge
7,6	0	Discharge
7,8	0	Discharge
8,0	0	Discharge
8,4	0	Discharge
9,0	0	Discharge

Dari Tabel 4 dapat diketahui bahwa pada tegangan keluaran 1,2-6,6 kV konsentrasi ozon yang dihasilkan bernilai 0. Hal ini disebabkan medan listrik yang dihasilkan pada reaktor ozon belum cukup untuk mengubah udara menjadi ozon. Pada tegangan 7,4-9,0 kV tidak ada ozon yang terdeteksi. Hal ini disebabkan pada tegangan tersebut terjadi *discharge* elektroda pada reaktor ozon. Dapat disimpulkan bahwa pada variasi elektroda jarum (tegangan tinggi) dan elektroda bidang (*ground*) dengan jarak elektroda 3 mm tidak dapat dihasilkan ozon. Hal ini disebabkan elektroda jarum lebih mudah melepaskan muatan ke *ground* sehingga lebih cepat terjadi *discharge*.

4. Kesimpulan

Pembangkitan tegangan tinggi dengan menerapkan *zero voltage switching* (ZVS) pada konverter *flyback* telah berhasil dibuat dan menghasilkan tegangan keluaran tanpa beban sebesar 11,20 kV dengan tegangan masukan 32 V_{AC} pada *duty cycle* 60%. ZVS konverter *flyback* yang telah dibuat mampu melakukan pensaklaran dengan tegangan bernilai nol ketika MOSFET *turn off*.

Pada pengujian tegangan keluaran ZVS konverter *flyback* dengan variasi *duty cycle* dihasilkan tegangan keluaran sebesar 11,20 kV pada *duty cycle* 60%. Pada pengujian tegangan keluaran ZVS konverter *flyback* dengan variasi frekuensi *switching* dihasilkan tegangan keluaran sebesar 10,80 kV pada frekuensi 23 kHz. Semakin besar frekuensi *switching* yang diterapkan, maka tegangan keluaran semakin rendah.

Pada pengujian ozon variasi elektroda bidang (tegangan tinggi) dan elektroda jarum (*ground*) dengan jarak sela 3 mm dihasilkan ozon dengan konsentrasi 0,06 ppm pada tegangan 8,4 kV. Semakin tinggi tegangan yang diterapkan, maka konsentrasi ozon yang dihasilkan semakin banyak. Sedangkan pada pengujian ozon variasi elektroda jarum (tegangan tinggi) dan elektroda bidang (*ground*) dengan jarak sela 3 mm tidak ada ozon yang terdeteksi. Hal ini dikarenakan medan listrik yang dihasilkan tidak cukup untuk mengubah udara menjadi ozon dan terjadi *discharge* pada tegangan lebih dari 6,6 kV sehingga tidak ada ozon yang terdeteksi.

Referensi

- [1]. D. W. Hart, *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [2]. F. Arifin, A. Warsito, and A. Syakur, "Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls untuk Aplikasi Pengolahan Limbah Cair Industri Minuman Ringan dengan Teknologi Plasma Lucutan Korona," pp. 1-7, 2011.
- [3]. A. S. Pandu, M. Facta, and A. Syakur, "Pembuatan Alat Pereduksi Gas CO pada Asap Rokok berbasis Cuk-Flyback Tegangan Tinggi," vol. 4, no. 4, pp. 918-925, 2015.
- [4]. J. N. A. Prakosa, M. Facta, and M. A. Riyadi, "Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls Berbasis Konverter Flyback," *Transmisi*, vol. 17, p. 64, 2015.
- [5]. I. L. Purba, M. Facta, and A. Syakur, "Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls untuk Mengurangi Jumlah Bakteri pada Cairan Susu Perah," *Transient*, vol. 2, no. 3, pp. 720-727, 2013.
- [6]. B. Yusuf, A. Warsito, A. Syakur, and I. N. Widiasta, "Aplikasi Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls untuk Pembuatan Reaktor Ozon," pp. 1-6.
- [7]. A. R. Putra, T. Sukmadi, and M. Facta, "Analisis Pengaturan Arus Rotor Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Belitan Menggunakan Buck Konverter," pp. 1-9.
- [8]. M. K. Kazimierczuk and D. Czarkowski, *Resonant Power Converters*, Second Ed. Canada: Wiley, 2011.
- [9]. V. Siliconix, "Power MOSFET," no. V, pp. 1-9.
- [10]. D. Incorporated, "MUR460," pp. 1-2.
- [11]. T. Instruments, "TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits," pp. 1-21, 2017.
- [12]. Murata, "Flyback Transformers," pp. 1-2, 2013.
- [13]. S. R. Hidayatye, "Ozonisasi," pp. 1-17.
- [14]. M. Amjad, Z. Salam, M. Facta, and K. Ishaque, "Design and Development of a High-Voltage Transformer-less Power Supply for Ozone Generators Based on a Voltage-fed Full Bridge Resonant Inverter," *J. Power Electron.*, vol. 12, no. 3, pp. 387-398, 2012.
- [15]. M. Facta, Hermawan, Karnoto, Z. Salam, and Z. Buntat, "Double Dielectric Barrier Discharge Chamber for Ozone Generation," *2014 1st Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Electr. Eng. Green Technol. Its Appl. a Better Futur. ICITACEE 2014 - Proc.*, no. 1, pp. 409-412, 2015.