

PEMBANGKITAN TEGANGAN TINGGI BOLAK BALIK MENGGUNAKAN KUMPARAN TESLA

Sonong¹⁾

Abstrak: Kumparan tesla merupakan alat yang mampu menghasilkan tegangan tinggi mulai dari ribuan volt sampai jutaan volt. Tegangan tinggi yang dihasilkan oleh kumparan tesla adalah tegangan tinggi bolak-balik dengan frekuensi berkisar antara puluhan kilohertz sampai dengan orde MHz. Tegangan keluaran kumparan tesla berbentuk pulsa dengan lebar pulsa bervariasi dari nano detik sampai ratusan mikro detik. Pada awal perkembangannya, kumparan tesla menggunakan sela bola untuk membangkitkan pulsa tersebut. Perkembangan selanjutnya kumparan tesla lebih banyak dikembangkan dengan teknologi semikonduktor untuk menggantikan fungsi sela bola. Selain mudah dalam pengaturan lebar pulsa, teknologi semikonduktor juga lebih ringkas dan praktis. Pada makalah ini akan dibahas perancangan kumparan tesla yang menggunakan inverter frekuensi tinggi dengan range frekuensi antara 150–800 KHz. Untuk pengukuran tegangan keluaran kumparan tesla digunakan sela bola standar.

Kata Kunci: Tegangan rendah, Kumparan Tesla, Semikonduktor, Tegangan Tinggi.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan sistem tenaga listrik yang pesat membutuhkan transmisi tegangan tinggi. Lingkup studi tegangan tinggi sangat luas, antara lain meliputi fenomena tegangan tinggi, seperti perhitungan medan listrik, gejala tembus listrik dielektrik, dan lain-lain. Pembangkitan tegangan tinggi terbagi menjadi pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik, pembangkitan tegangan tinggi searah, dan pembangkitan tegangan tinggi impuls. Pembangkit tegangan tinggi khususnya tegangan tinggi frekuensi tinggi dapat dibuat dengan teknik sederhana dan dengan biaya yang cukup murah yaitu dengan menggunakan kumparan tesla. Kumparan tesla konvensional menggunakan *spark gap* untuk menghasilkan pulsa listrik frekuensi tinggi dan memerlukan sumber tegangan masukan dalam orde puluhan kilovolt. Perkembangan selanjutnya kumparan tesla lebih memanfaatkan teknologi semikonduktor berupa inverter untuk menghasilkan pulsa listrik berfrekuensi tinggi. Dan dengan menggunakan inverter maka tegangan masukan kumparan tesla cukup dalam orde puluhan volt saja.

Tujuan dalam makalah ini adalah membuat hardware pembangkit tegangan tinggi ac frekuensi tinggi menggunakan kumparan tesla. Pembahasan masalah dalam makalah ini dibatasi oleh:

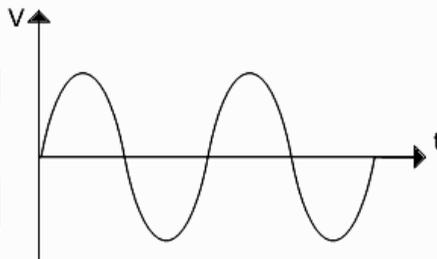
¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

1. Modul perangkat keras yang dibuat adalah pembangkit tegangan tinggi bolak-balik frekuensi tinggi kumputan tesla.
2. Jenis pembangkit tegangan tinggi yang dibahas dalam makalah ini adalah pembangkit tegangan tinggi ac frekuensi tinggi, sedang untuk jenis pembangkit tegangan tinggi yang lain tidak dibahas secara mendalam.
3. Kumputan tesla yang dibahas adalah kumputan tesla dengan mengaplikasikan *switching device* berupa MOSFET.
4. Kumputan tesla yang mempergunakan teknologi *spark gap* tidak dibahas.
5. MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) yang digunakan IRFP 460 sebagai komponen elektronika daya untuk saklar.
6. Rangkaian kendali PWM menggunakan IC TL 494 dengan frekuensi pensaklaran yang dapat diatur mulai dari 150kHz sampai dengan 800kHz serta duty cycle tetap sebesar 50%.
7. Variac digunakan untuk mengatur tegangan masukan ke penyearah jembatan.
8. Variac tidak dibahas dalam makalah ini.
9. Sistem bekerja pada kalang terbuka.

Secara garis besar pembangkit tegangan tinggi terdiri atas:

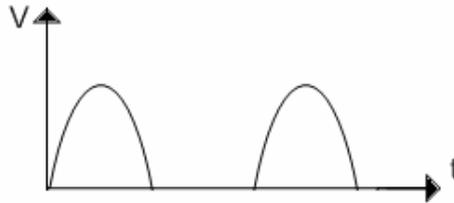
1. Pembangkit tegangan tinggi bolak-balik (AC)
2. Pembangkit tegangan tinggi searah (DC)
3. Pembangkit tegangan tinggi impuls.

Tegangan tinggi bolak-balik diperoleh dari suatu trafo satu fasa dengan perbandingan belitan yang jauh lebih besar daripada trafo daya yang biasa disebut trafo uji. Belitan primer trafo dihubungkan ke sumber tegangan rendah bolak-balik, 220VAC/50 Hz. Belitan sekundernya membangkitkan tegangan tinggi dalam orde ratusan kilovolt.



Gambar 1. Tegangan keluaran belitan sekunder

Rangkaian pembangkit tegangan tinggi bolak-balik pada Gambar 1 membangkitkan tegangan tinggi bolak-balik pada frekuensi jala-jala (50/60 Hz). Tegangan tinggi searah dibangkitkan dengan menyearahkan tegangan tinggi bolak-balik.



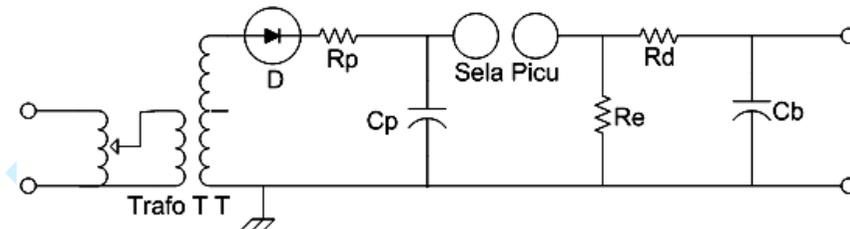
Gambar 2. Tegangan keluaran penyearah setengah gelombang

Jika dibutuhkan tegangan keluaran yang lebih rata maka di terminal keluaran dipasang kapasitor perata. Ada tiga bentuk tegangan impuls yang mungkin dialami sistem tenaga listrik yaitu: tegangan impuls petir, tegangan impuls surja hubung, dan tegangan impuls terpotong.



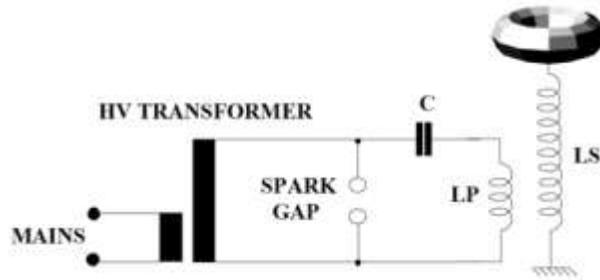
Gambar 3. Jenis tegangan impuls

Alat pembangkit tegangan tinggi impuls antara lain adalah generator impuls RLC, generator impuls RC, dan generator marx. Untuk rangkaian generator impuls RC dapat dilihat pada gambar 4



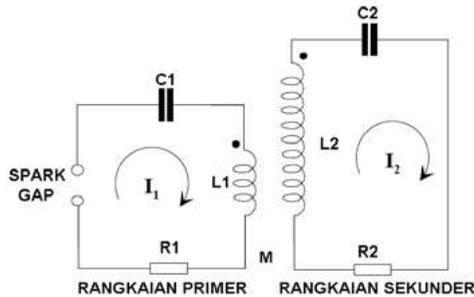
Gambar 4. Rangkaian generator impuls RC

Kumparan tesla dapat dibuat dengan komponen dasar seperti terlihat pada Gambar 5. Terdiri dari trafo yang membangkitkan tegangan tinggi sekitar 5–30 kV. Trafo tegangan tinggi ini akan memuat kapasitor primer melalui kumparan primer LP. LP terdiri dari 5–20 lilitan kawat tebal yang mempunyai hambatan rendah.



Gambar 5. Skema dasar kumputan tesla

Ketika C 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, C akan terhubung parallel dengan LP dan akan membentuk rangkaian resonansi dengan frekuensi resonansi yang besarnya ditentukan oleh nilai CP dan LP. Medan elektromagnet yang dihasilkan oleh LP sebagaimana akan terinduksikan ke kumputan sekunder LS. Ujung atas dari LS akan dihubungkan dengan toroid yang mempunyai kapasitansi sekitar 15 – 30 pF sedangkan ujung bawah akan terhubung dengan ground. LS dan toroid akan membentuk rangkaian resonansi. Jika frekuensi resonansi LS dan toroid cukup dekat dengan frekuensi rangkaian primer maka pada toroid akan terbangkitkan tegangan ekstra tinggi. Dan ketika terjadi *discharge* pada CP, *spark gap* akan terbuka dan proses yang sama akan terulang lagi. Kumputan tesla dapat dipandang sebagai dua buah rangkaian resonansi yang tergendeng secara induksi magnetik seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian resonansi yang tergendeng secara induksi magnetik

Sesuai dengan hukum Kirchoff yang menyatakan bahwa jumlah tegangan pada rangkaian tertutup adalah nol maka

$$R_1 i_1 + 1/C_1 \int i_1 dt + L_1 di_1/dt + M di_2/dt = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$R_2 i_2 + 1/C_2 \int i_2 dt + L_2 di_2/dt + M di_1/dt = \dots\dots\dots (2)$$

Untuk mendapatkan persamaan tegangan keluaran maka kedua persamaan diatas harus diselesaikan dengan operator D. Hasilnya adalah

$$V_2(t) = \frac{2kv_1}{\sqrt{(1-T)^2 + 4kT}} \sqrt{L2/L1} \sin\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} \cdot t\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} \cdot t\right) \dots \dots (3)$$

Berdasarkan persamaan (3), maka bentuk tegangan keluaran kumparan tesla dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 7. Bentuk tegangan keluaran kumparan tesla

Hubungan (masukan kumparan tesla) dan (keluaran kumparan tesla) diturunkan dengan konsep bahwa energi yang tersimpan dikapasitor dipindahkan ke kapasitor . Karena adanya rugi-rugi ditahanan kumparan, maka energi yang dipindahkan itu tidak seluruhnya diterima kapasitor C, tetapi lebih kecil daripada energi yang tersimpan di . Jika efisiensi pemindahan energi adalah η , maka persamaan energi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{1}{2}C_2V_2^2 = \eta \frac{1}{2}C_1VL_2^2 \dots \dots \dots (4)$$

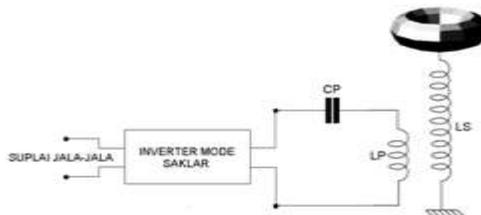
Sehingga tegangan keluaran kumparan tesla dapat ditulis

$$V_2 = V_1 \sqrt{\eta c_1/c_2} \dots \dots \dots (5)$$

Karena nilai efisiensi, η tetap, maka besarnya η dapat diganti dengan sebuah konstanta K. Sehingga persamaan 2.5 dapat ditulis ulang sebagai berikut

$$V_2 = KV_1 \dots \dots \dots (6)$$

Dari persamaan 5 terlihat bahwa antara tegangan keluaran dan tegangan masukan kumparan tesla berlaku hubungan linier. Diagram kumparan tesla dengan mengaplikasikan piranti pensaklaran semikonduktor dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Kumparan tesla dengan aplikasi piranti pensaklaran

Jika dibandingkan dengan kumparan tesla yang menggunakan *spark gap* seperti pada Gambar 8 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. Rangkaian primer terdiri atas kapasitor primer dan lilitan primer (LP), rangkaian sekunder terdiri atas toroid yang berfungsi sebagai kapasitor sekunder dan lilitan sekunder (LS). Besarnya frekuensi resonansi yang dibentuk antara kapasitor dan induktor adalah $f_{Res} = 1/(2\pi\sqrt{LC})$(7)

Kapasitor primer (CP) yang digunakan adalah kapasitor jenis milar dengan nilai antara 0.05 uF sampai 0.2 uF. Pemilihan nilai kapasitansi akan menentukan frekuensi resonansi kumparan tesla.

Nilai induktansi lilitan primer dihitung menggunakan rumus berikut

$$L_P = \frac{R \cdot N}{2540(9R+10H)} \dots\dots\dots (8)$$

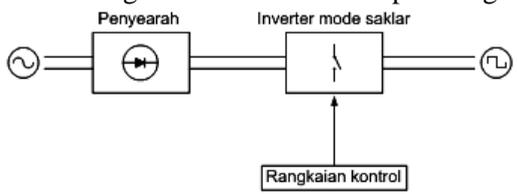
dimana:
sL adalah induktansi sekunder (mH)
R adalah jari-jari kumparan sekunder (cm)
H adalah tinggi kumparan sekunder (cm)
N adalah jumlah lilitan

Toroid terbuat dari bahan konduktor yang dibentuk menyerupai kue donat. Toroid pada kumparan tesla berfungsi sebagai kapasitor dengan sisi positif adalah toroid itu sendiri dan sisi negatifnya adalah tanah (*ground*), sedangkan yang berfungsi sebagai dielektrik adalah udara. Nilai kapasitansi toroid ditentukan dengan rumus 8 $C_T = 2.8 \cdot (1.2781 - d_2/d_1) \cdot \int 0.1217 \cdot d_2(d_1 - d_2) \dots(9)$

dimana:
TC adalah kapasitansi toroid (pF)
1d adalah diameter toroid (cm)
2d adalah diameter selubung (cm)

Nilai induktansi lilitan sekunder, sama halnya dengan lilitan primer, dihitung dengan rumus 8.

Fungsi inverter adalah mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output AC. Inverter dapat dibuat dengan mengikuti blok diagram pada Gambar 8 Sumber DC yang diperlukan inverter berasal dari tegangan AC yang disearahkan. Untuk mendapatkan output yang dikehendaki digunakan rangkaian kontrol. Rangkaian kontrol ini berfungsi untuk mengatur frekuensi dan amplitudo gelombang output.



Gambar 9. Blok diagram inverter

Inverter mode saklar (*switch mode inverter*) merupakan rangkaian utama dari sistem, berfungsi membalikkan tegangan searah dari penyearah ke tegangan AC. Disebut mode saklar karena kerjanya menggunakan teknik pensaklaran (*switching*). Sedangkan rangkaian kontrol berfungsi untuk mengendalikan proses switching yang terjadi pada inverter mode saklar. Pengendalian ini akan menentukan antara lain bentuk, amplitudo dan frekuensi gelombang tegangan output secara keseluruhan. Penyearah yang dipakai pada alat ini adalah penyearah gelombang penuh dengan menggunakan transformator jenis *centre tap* (CT).

Cara kerja dari rangkaian penyearah gelombang penuh adalah pada saat VA positif dan VB negatif, maka arus akan mengalir melalui A-D1-RL dan berakhir di CT, sedangkan dioda D2 tidak menghantar. Pada saat VA negatif dan VB positif, maka arus akan mengalir melalui B-D2-RL dan berakhir di CT, sedangkan dioda D1 tidak menghantar.

Arus yang mengalir pada RL adalah arus satu arah. Berikut persamaan tegangan dan arus pada penyearah gelombang penuh.

$$V_{DC} = 2V_M/\pi \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$I_{DC} = 2I_M/\pi \quad \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan:

VDC= Tegangan hasil penyearahan.

VM = Tegangan maksimal hasil penyearahan.

IDC = Arus hasil penyearahan.

IM = Arus maksimal hasil penyearahan.

π = Ketetapan sebesar 3,14..

Rangkaian kontrol PWM membangkitkan sinyal pemicuan yang dapat diatur lebar pulsa dan frekuensinya sebagai penggerak gerbang pada MOSFET. Pada tugas akhir ini digunakan IC TL 494. IC TL 494 merupakan komponen terintegrasi yang mempunyai 16 pin dalam dua jalur *Dual In Package* (DIP) sebagai komponen utama rangkaian Kontrol PWM dalam tugas akhir ini. Isolator pulsa digunakan untuk memisahkan rangkaian pemicuan dan rangkaian daya. Trafo pulsa memiliki satu lilitan primer dan memiliki satu atau lebih lilitan sekunder. Gerbang diisolasi dengan transformator. Mosfet merupakan singkatan dari *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* yang merepresentasikan bahan-bahan penyusunnya yang terdiri dari logam, oksida dan semikonduktor. Terdapat 2 jenis MOSFET yaitu tipe NPN atau N *channel* dan PNP atau biasa disebut P *channel*. MOSFET dibuat dengan meletakkan lapisan oksida pada semikonduktor dari tipe NPN maupun PNP dan lapisan logam diletakkan di atasnya.

II. METODE

Blok diagram peralatan pembangkit tegangan tinggi menggunakan kumpanan tesla. Suplai AC 1 Fasa yang digunakan adalah sumber tegangan AC satu fasa dengan tegangan 140V, 50 Hz kemudian disearahkan menggunakan penyearah gelombang penuh menjadi tegangan DC dan setelah diberi perata maka tegangan keluaran yang dihasilkan sebesar 200Vdc yang merupakan input inverter. Untuk suplai inverter, rangkaian penyearah jembatan menggunakan dioda 1N5408 dengan kapasitas arus sebesar 3A dan *breakdown voltage* sebesar 1000V (sesuai *datasheet*), agar tegangan keluaran lebih halus digunakan kapasitor sebesar 330uF 400V. Output tegangan yang dihasilkan oleh penyearah rangkaian daya ini adalah sebesar 200 Vdc dengan arus maksimal 3 A.

A. Suplai Rangkaian Kontrol PWM

Untuk suplai rangkaian kontrol PWM, suplai 1 fasa yang digunakan berasal dari jala-jala PLN dengan tegangan 220 V dan frekuensi 50 Hz diturunkan tegangannya melalui

SUPLAI RANGKAIAN KONTROL PWM

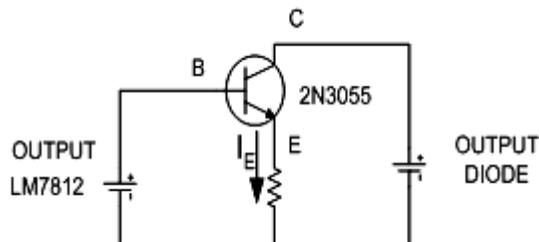
transformator *step down center tap* menjadi AC -15 dan +15 V.

B. Penyearah Rangkaian Kontrol PWM

Untuk suplai rangkaian kontrol PWM agar output tegangan yang dihasilkan konstan +12 V maka digunakan IC regulator LM7812 (sisi positif) dengan karakteristik sebagaimana gambar 3 dan

Gambar 4 Karakteristik IC regulator tegangan LM7812

Dari gambar 3 di atas terlihat bahwa LM7812 (positif) mampu mengatur tegangan keluaran penyearah konstan pada +12 V, walaupun tegangan input mengalami perubahan. Dimana range perubahannya antara 14,5 V sampai 27 V . Pada *datasheet* disebutkan bahwa kedua IC regulator ini hanya mampu dilewati arus maksimum sebesar 1 A, sedangkan penyearah yang dirancang diharapkan dapat memiliki kapasitas arus sampai 2 A. Untuk itu pada keluaran IC regulator dipasang rangkaian transistor sebagai penguat arus sebagai berikut.



Gambar 10. Rangkaian transistor penguat arus 7812

Sesuai gambar 4 maka tegangan keluarannya menjadi , dimana V dengan rasio penguatan arus $BEV = 7,0 = BEV = BCFEih20$ sampai 70 (sesuai *datasheet*). Dari penjelasan-penjelasan di atas maka dapat digambarkan rangkaian penyearah secara lengkap.

C. Inverter 1 Fasa

Inverter 1 fasa yang dirancang menggunakan 4 buah MOSFET Rangkaian *inverter* pada dasarnya adalah tipe pencincang (*chopper*) dimana catu DC secara bergantian dibuka dan ditutup oleh alat pensaklaran elektronik. Untuk mengoperasikan MOSFET IRFP 460 sebagai saklar (daerah saturasi), dibutuhkan tegangan gerbang dan sumber sebesar 20 Volt. Tegangan kontrol disambungkan pada terminal gerbang dan sumber DC positif disambungkan pada terminal *drain* MOSFET, dan sumber DC negative disambungkan pada *source* MOSFET. *Inverter* jembatan penuh ini dirancang dengan menggunakan empat buah MOSFET IRFP 460 dan setiap MOSFETnya dipicu secara terpisah. Untuk mengatur pemecuan digunakan 4 buah pin yang masing-masing terhubung dengan trafo pulsa. Komponen-komponen yang digunakan dalam rangkaian *inverter* ini antara lain:

1. MOSFET
2. Dioda

D. Mosfet

Pemilihan MOSFET harus memperhatikan nilai tegangan dan arus operasi, karena operasi saklar dalam kondisi *on* dan *off* maka MOSFET beroperasi dengan tegangan *drain* (D) ke *source* (S) puncak $V_{DS(peak)}$ dua kali tegangan VDD, dimana tegangan sumber 200 volt sehingga besar tegangan drain ke sumber puncak $V_{DS(peak)}$ dari MOSFET adalah:

$$V_{DC(peak)} = 2 \times V_{DC} \dots\dots\dots(12)$$

$$2 \times 200 = 400V$$

Dengan penyediaan arus untuk rangkaian *inverter* sebesar 3 A maka penggunaan MOSFET IRFP 460, dengan tegangan *breakdown drain source* $V(BR)_{DSS}$ adalah 500V dan kemampuan arus drain maksimal $I_D(maks)$ sebesar 20A sehingga dapat menjamin keamanan rangkaian. Parameter yang lain yaitu: $R_{DS(on)} = 0,27 \Omega$; tegangan *threshold gate* $V_{GS(th)} = 20V$; pengisian gate $Q_{\pm GS} = 29 \text{ nC}$; waktu tunda alih *on* $t_d(on) = 18 \text{ nS}$; waktu naik (*rise time*) $t_r = 59 \text{ nS}$; waktu tunda alih *off* $t_d(off) = 110 \text{ nS}$; waktu turun (*fall time*) $t_f = 58 \text{ nS}$.

E. Dioda

Dioda *freewheeling* yang digunakan dalam perancangan modul ini menggunakan dioda *fast recovery* dimana waktu pemulihan lebih rendah dibanding dioda biasa. Dalam inverter ini digunakan dioda MUR 1660CT yang mempunyai kemampuan arus maju (IF) sebesar 16 A dan tegangan mundur (VR) sebesar 600 V

Dengan demikian dengan mengatur putaran tahanan geser (VR) dapat diperoleh frekuensi osilator yang diinginkan.

I. Kumparan Tesla

Kumparan tesla yang dibuat dalam tugas akhir ini dirancang untuk beroperasi secara maksimal pada frekuensi resonansi sekitar 150 kHz. Perancangan secara teknis akan lebih mudah dilakukan pada sisi rangkaian sekunder terlebih dulu baru setelah itu rangkaian primer. Hal ini dilakukan agar frekuensi resonansi yang didapat untuk masing-masing rangkaian dapat saling mendekati nilainya.

Lilitan sekunder yang akan digunakan mempunyai tinggi 33 cm dan diameter 10 cm dengan lilitan sebanyak 1250 lilitan dan diameter kawat email tembaga yang digunakan adalah sebesar 0.24 mm. Berdasarkan spesifikasi yang telah ditentukan, maka besarnya induktansi lilitan sekunder dapat dihitung berdasarkan rumus 2.8. adalah $22512502540951033sL \cdot = 41 \text{ mH}$

Dalam makalah ini toroid yang digunakan mempunyai diameter sebesar 33.5 cm dan diameter selubung sebesar 27.8, maka besarnya kapasitansi toroid berdasarkan persamaan 1.9 adalah

Besarnya frekuensi resonansi untuk rangkaian sekunder yang terbentuk antara lilitan sekunder dan toroid dihitung dengan rumus 13, $12RESsTfLC \pi = \cdot$
 $3123.1441105.510 = 334.8 \text{ kHz}$

Lilitan primer terbuat dari kawat email tembaga berdiameter 2 mm sebanyak 11 lilitan. Untuk lilitan primer, lilitan tidak dibuat rapat seperti lilitan sekunder, tetapi antar lilitan diberi jarak untuk menghindari terkelupasnya lapisan email kawat karena panas yang timbul akibat kawat dilalui arus yang cukup besar. Besarnya jarak yang digunakan untuk tugas akhir ini sekitar 23 mm sehingga panjang keseluruhan lilitan sekitar 25 cm dengan diameter lilitan 11.43 cm. Untuk menghitung nilai induktansi lilitan primer digunakan rumus 13 sama seperti pada menghitung nilai induktansi lilitan sekunder. $() 222540910pRNLRH = \cdot + () 225.7211254095.721025 \cdot = \cdot \cdot +$
 $= 0.0052 \text{ mH}$

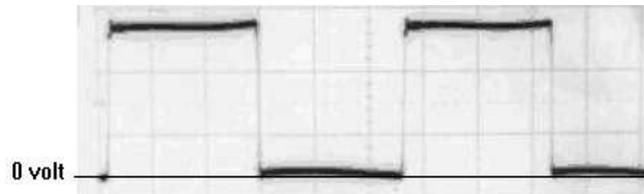
Agar frekuensi resonansi rangkaian primer yang diperoleh mendekati frekuensi resonansi rangkaian sekunder, maka besarnya kapasitansi primer yang dipilih adalah sebesar 0.05uF 275 V dan jenis yang digunakan adalah jenis milar. Frekuensi resonansi yang terbentuk antara lilitan primer dan kapasitor primer berdasarkan rumus $12RESppfLC \pi = \cdot$ $66125.2100.0510 \pi - - = 150 \text{ kHz} =$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sinyal pemicuan MOSFET merupakan sinyal PWM yang dihasilkan oleh kaki 9 dan 10 IC TL494 yang dapat dilihat pada gambar dibawah.

V/D: 5 V/div Probe: 1x

T/D: 0.5 uS/div f = 200 kHz

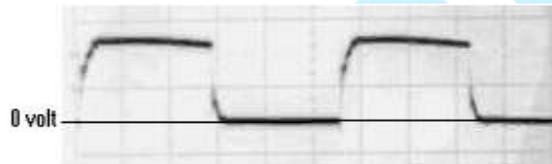


Gambar 12. Sinyal pemicuan keluaran TL494

Selanjutnya sinyal pemicuan dari TL494 ini dilewatkan ke rangkaian trafo pulsa dan output dari trafo pulsa ini yang akan memicu MOSFET. Trafo pulsa ini berfungsi untuk mengisolasi rangkaian kontrol dari rangkaian daya.

V/D: 5 V/div Probe: 1x

T/D: 0.5 uS/div $f = 200$ kHz

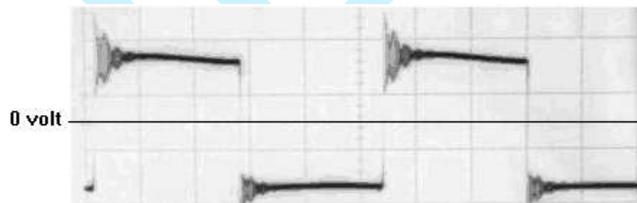


Gambar 13. Sinyal keluaran tarfo pulsa

Dari pengujian tegangan pada kondisi tanpa beban dengan menggunakan osiloskop diperoleh bentuk gelombang tegangan seperti gambar dibawah ini

V/D: 5 V/div Probe: 1x

T/D: 0.5 uS/div $f = 200$ kHz



Gambar 14. Bentuk tegangan keluaran inverter

Dari gambar 14 keluaran inverter terjadi osilasi hal ini karena adanya kapasitansi gerbang pada mosfet.

Pengujian kumparan tesla meliputi pengujian frekuensi resonansi kumparan tesla, pengujian tegangan keluaran kumparan tesla menggunakan sela bola standar diameter 10 cm. Dari hasil pengujian yang dilakukan pada ruangan bersuhu 27°C pada tekanan udara 740mmHg dan frekuensi resonansi yang terjadi adalah 200kHz diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 1. Pengujian tegangan keluaran kumparan tesla dengan sela bola

Tegangan puncak masukan kumparan tesla (volt)	Jarak sela bola ketika terjadi tembus udara (cm)
45.07	0.5
45.71	0.6
46.73	0.7
46.73	0.7
52.71	0.8
56.91	0.9
58.95	1
64.76	1.1
68.12	1.2
70.16	1.3
70.03	1.4
75.5	1.5
90.65	1.6
94.35	1.7
100.71	1.8
99.95	1.9
104.79	2

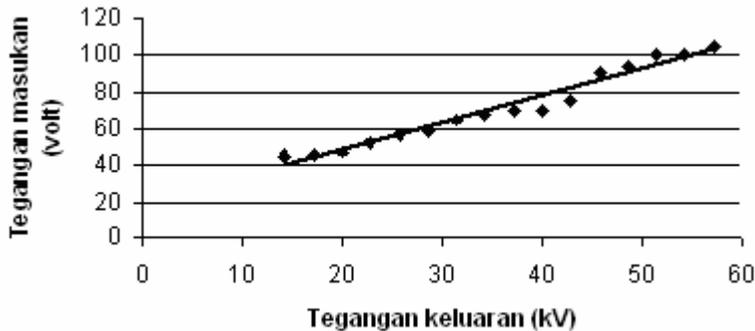
Tabel 2 Pengujian tegangan keluaran kumparan tesla tanpa sela bola

Tegangan puncak masukan kumparan tesla (volt)	Jarak sela bola ketika terjadi tembus udara (cm)
45.07	14.28
45.71	17.14
46.73	19.99
46.73	22.85
52.71	25.70
56.91	28.56
58.95	31.42
64.76	34.27
68.12	37.13
70.16	39.98
70.03	42.84
75.5	45.70
90.65	48.55
94.35	50.41
100.71	51.41
99.95	54.26
104.79	52.12

Tegangan tembus yang terjadi dapat dihitung dengan rumus berikut $V = \delta V_s$ dimana δ adalah tegangan tembus saat pengujian (keadaan udara sembarang) V_s adalah faktor koreksi udara adalah tegangan tembus sela bola standar (30 kV/cm) Faktor koreksi udara tergantung pada suhu dan tekanan udara besarnya sebagai berikut $\theta + \delta = 27338$

dimana = δ faktor koreksi udara
 = p tekanan udara (mmHg)
 = θ temperatur udara C^0

sehingga besarnya faktor koreksi udara pada suhu 27 dan tekanan udara 740mmHg adalah 0.952. Setelah dikalikan dengan faktor koreksi maka tegangan keluaran kumputan tesla berdasarkan data tabel 1 dapat dituliskan pada tabel 2 sebagai berikut.



Gambar 15. Grafik hubungan tegangan masukan dan keluaran kumputan tesla

Dari gambar 15 terlihat bahwa hubungan antara tegangan masukan kumputan tesla dan tegangan keluaran kumputan tesla mempunyai kecenderungan linier. Pengambilan data tegangan keluaran kumputan tesla pada tugas akhir ini hanya dilakukan pada frekuensi resonansi kumputan tesla yaitu sebesar 200kHz dan tegangan masukan kumputan tesla maksimal sebesar 85 VAC. Untuk frekuensi diluar frekuensi resonansi tidak dilakukan pengambilan data karena terjadi kebocoran fluks yang mengakibatkan terbakarnya lilitan primer dan lilitan sekunder kumputan tesla.

IV. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Hasil pengujian dan analisa tentang perancangan modul perangkat keras kumputan tesla dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Tegangan keluaran kumputan tesla mempunyai nilai maksimal pada frekuensi resonansi.
2. Menjalankan kumputan tesla diluar frekuensi resonansi kumputan tesla jika terlalu jauh dari frekuensi resonansi dapat mengakibatkan rusaknya kumputan tesla hal ini karena korona yang terjadi semakin besar.
3. Tegangan keluaran kumputan tesla mempunyai hubungan yang cenderung linier dengan tegangan masukan kumputan tesla.
4. Tegangan keluaran kumputan tesla pada tugas akhir ini mempunyai jangkauan yang terbatas hal ini karena masukan tegangan untuk kumputan tesla terbatas oleh kemampuan inverter yang digunakan.

5. Tegangan keluaran inverter dibatasi oleh tegangan *breakdown* mosfet yang digunakan.

B. Saran

1. Untuk hasil tegangan keluaran yang lebih besar dapat digunakan IGBT dengan tegangan *breakdown* yang lebih besar dari 1000 volt.
2. Pipa yang digunakan untuk menggulung lilitan primer dan sekunder sebaiknya terbuat dari plastik jenis HDPE karena mempunyai kebocoran fluks yang rendah.

V. DAFTAR PUSTAKA

Abduh, Syamsir, *Teknik Tegangan Tinggi*, Penerbit Salemba Teknik, Jakarta, 2001.

Denicolai, Marco, Tesis: Tesla Transformer for Experimentation and Research, HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2001.

<http://www.easternvoltagegresearch.com>.

<http://www.irf.com>

<http://www.motorola.com>

<http://www.richieburnett.co.uk>

<http://www.scopeboy.com>

<http://www.stevhv.4hv.org>

Malvino, *Prinsip-Prinsip Elektronik*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1984.

Mohan.Ned ,Tore M.Undeland ,William P Robbins, *Power Electronics: Converter, Applications, and Design*, John Wiley and Sons Inc, Canada, 1995.

M. Rashid, *Elektronika Daya, Rangkaian, Devais Dan Aplikasinya*. Jilid 1, PT. Prenhallindo, Jakarta, 1993.

Parsumo R. Drs, *Elektronika Daya*, Politeknik Negeri Semarang, 1997.

Rashid M, *Power Electronics Circuit, Device, and Aplication* 2nd, Prentice-Hall International Inc, 1988.

53 Sonong, *Pembangkitan Tegangan Tinggi Bolak Balik menggunakan Kumpanan Tesla*

Sidik, Fajar, Tugas Akhir: *Soft Starting dan Dinamic Braking Motor Induksi Tiga Fasa*, Universitas Diponegoro 2006.

Tobing, Bonggas L, *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*, Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.

SINERGI