

Makalah Seminar Tugas Akhir PEMBANGKITAN TEGANGAN TINGGI BOLAK – BALIK FREKUENSI TINGGI MENGUNAKAN KUMPARAN TESLA

Ahmad Habibi L2F 002 546

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

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 tugas akhir ini akan dibahas perancangan kumparan tesla yang menggunakan inverter frekuensi tinggi dengan range frekuensi antara 150 – 800 KHz. Untuk mengukur tegangan keluaran kumparan tesla digunakan sela bola standar.

I. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang Masalah

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.

1.2 Tujuan

Tujuan dalam Tugas Akhir ini adalah membuat hardware pembangkit tegangan tinggi bolak-balik frekuensi tinggi menggunakan kumparan tesla.

1.3 Batasan Masalah

Pembahasan masalah dalam tugas akhir ini dibatasi oleh :

1. Modul perangkat keras yang dibuat adalah pembangkit tegangan tinggi bolak-balik frekuensi tinggi kumparan tesla

2. Jenis pembangkit tegangan tinggi yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah pembangkit tegangan tinggi bolak-balik frekuensi tinggi, sedang untuk jenis pembangkit tegangan tinggi yang lain tidak dibahas secara mendalam.
3. Kumparan tesla yang dibahas adalah kumparan tesla dengan mengaplikasikan *switching device* berupa MOSFET.
4. Kumparan 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 tugas akhir ini.
9. Sistem bekerja pada kalang terbuka.

II. Dasar Teori

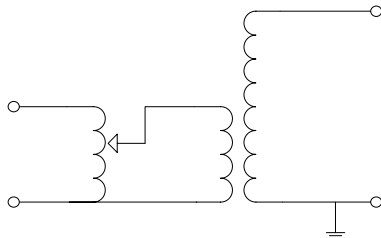
2.1 Pembangkit Tegangan Tinggi

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

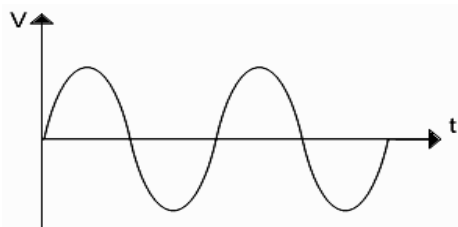
2.1.1 Pembangkit Tegangan Tinggi Bolak-Balik

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.



Gambar 2.1 Rangkaian pembangkit tegangan tinggi bolak-balik

Belitan primer trafo dihubungkan ke sumber tegangan rendah bolak-balik, 220VAC/50 Hz. Belitan sekundernya membangkitkan tegangan tinggi dalam orde ratusan kilovolt.

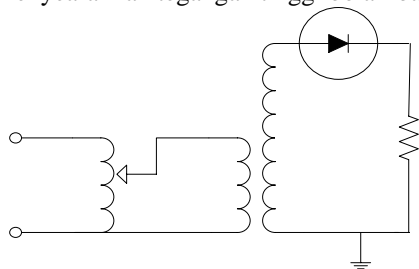


Gambar 2.2 Tegangan keluaran belitan sekunder

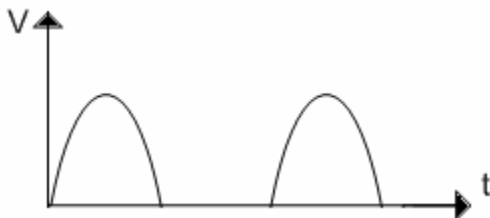
Rangkaian pembangkit tegangan tinggi bolak-balik pada Gambar 2.1 membangkitkan tegangan tinggi bolak-balik pada frekuensi jala-jala (50/60 Hz).

2.1.2 Pembangkit Tegangan Tinggi Searah Ototrafo

Tegangan tinggi searah dibangkitkan dengan menyearahkan tegangan tinggi bolak-balik.



Gambar 2.3 Rangkaian penyearah setengah gelombang



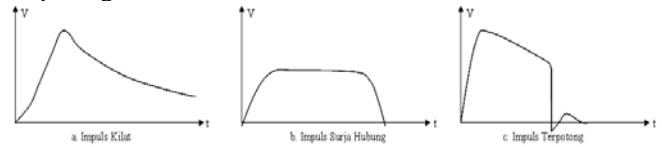
Gambar 2.4 Tegangan keluaran penyearah setengah gelombang

Jika dibutuhkan tegangan keluaran yang lebih rata maka di terminal keluaran dipasang kapasitor perata.

2.1.3 Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls

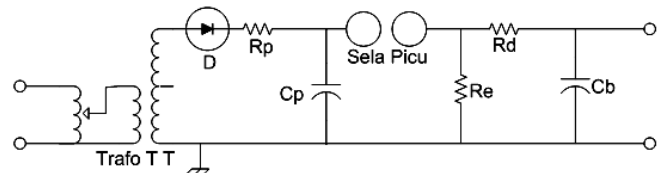
Ada tiga bentuk tegangan impuls yang mungkin dialami sistem tenaga listrik yaitu : tegangan impuls petir,

tegangan impuls surja hubung, dan tegangan impuls terpotong.



Gambar 2.5 Jenis tegangan impuls

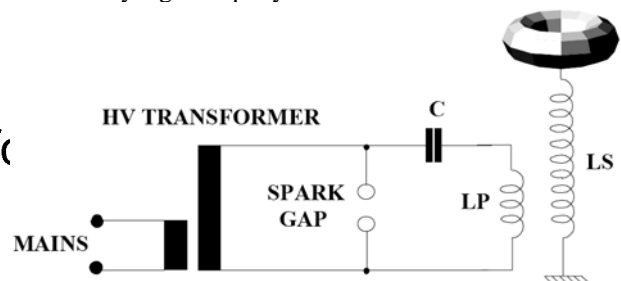
Alat pembangkit tegangan tinggi impuls antara lain adalah generator impuls RLC, generator impuls RC, dan generator marx. Untuk rangkaian generator impuls RC dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Rangkaian generator impuls RC

2.2 Kumparan Tesla

Kumparan tesla dapat dibuat dengan komponen dasar seperti terlihat pada Gambar 2.7. Terdiri dari trafo yang membangkitkan tegangan tinggi sekitar 5 – 30 kV. Trafo tegangan tinggi ini akan memuati kapasitor primer melalui kumparan primer LP. LP terdiri dari 5 – 20 lilitan kawat tebal yang mempunyai hambatan rendah.



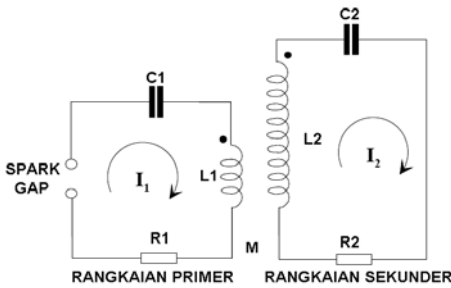
Gambar 2.7 Skema dasar kumparan tesla

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 sebagian akan terinduksikan ke kumparan 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.

2.2.1 Cara Kerja Kumparan Tesla

Kumparan tesla dapat dipandang sebagai dua buah rangkaian resonansi yang terganggu secara induksi magnetik seperti terlihat pada Gambar 2.8.



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

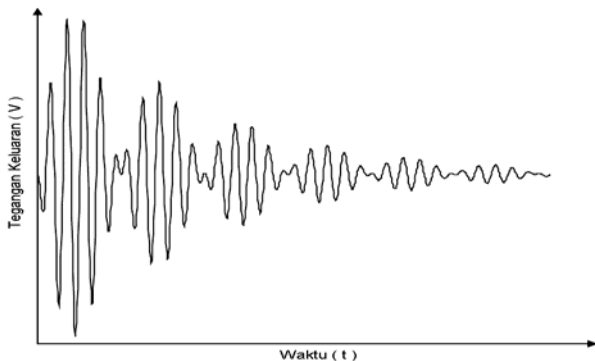
$$R_1 i_1 + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = 0 \dots\dots\dots (2.1)$$

$$R_2 i_2 + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0 \dots\dots\dots (2.2)$$

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

$$v_2(t) = \frac{2kV_1}{\sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \sin\left(\frac{w_2 + w_1}{2} t\right) \sin\left(\frac{w_2 - w_1}{2} t\right) \dots\dots\dots (2.3)$$

Berdasarkan persamaan (2.3), maka bentuk tegangan keluaran kumparan tesla dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 2.9 Bentuk tegangan keluaran kumparan tesla

Hubungan V_1 (masukan kumparan tesla) dan V_2 (keluaran kumparan tesla) diturunkan dengan konsep bahwa energi yang tersimpan dikapasitor C_1 dipindahkan ke kapasitor C_2 . Karena adanya rugi-rugi $i^2 r$ ditahanan kumparan, maka energi yang dipindahkan itu tidak seluruhnya diterima kapasitor C, tetapi lebih kecil daripada energi yang tersimpan di C_1 . Jika efisiensi pemindahan energi adalah η , maka persamaan energi dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{1}{2} C_2 V_2^2 = \eta \frac{1}{2} C_1 V_1^2 \dots\dots\dots (2.4)$$

Sehingga tegangan keluaran kumparan tesla dapat ditulis

$$V_2 = V_1 \sqrt{\eta \frac{C_1}{C_2}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Karena nilai efisiensi, η , C_1 , dan C_2 tetap, maka

besaranya $\sqrt{\eta \frac{C_1}{C_2}}$ dapat diganti dengan sebuah konstanta

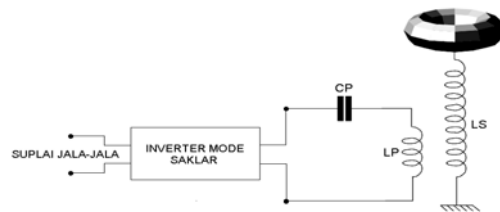
K. Sehingga persamaan 2.5 dapat ditulis ulang sebagai berikut

$$V_2 = KV_1 \dots\dots\dots (2.6)$$

Dari persamaan 2.15 terlihat bahwa antara tegangan keluaran dan tegangan masukan kumparan tesla berlaku hubungan linier.

2.3 Kumparan Tesla dengan Aplikasi Piranti Pensaklaran Semikonduktor

Diagram kumparan tesla dengan mengaplikasikan piranti pensaklaran semikonduktor dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Kumparan tesla dengan aplikasi piranti pensaklaran

Jika dibandingkan dengan kumparan tesla yang menggunakan *spark gap* seperti pada Gambar 2.7, 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

$$f_{RES} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.3.1 Kapasitor Primer

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^[3].

2.3.2 Lilitan Primer^[3]

Nilai induktansi lilitan primer dihitung menggunakan rumus berikut

$$L_p = \frac{R^2 N^2}{2540 \cdot (9R + 10H)} \dots\dots\dots (2.8)$$

dimana :

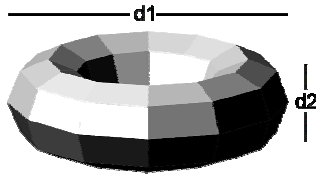
L_s adalah induktansi sekunder (mH)

R adalah jari-jari kumparan sekunder (cm)

H adalah tinggi kumparan sekunder (cm)
 N adalah jumlah lilitan

2.3.3 Toroid

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 2.18.^[3]



Gambar 2.11 Toroid yang berfungsi sebagai kapasitor

$$C_T = 2.8 \cdot \left(1.2781 - \frac{d_2}{d_1} \right) \cdot \sqrt{0.1217 \cdot d_2 \cdot (d_1 - d_2)} \dots (2.9)$$

dimana :

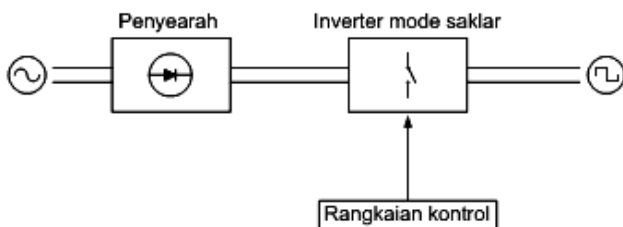
- C_T adalah kapasitansi toroid (pF)
- d_1 adalah diameter toroid (cm)
- d_2 adalah diameter selubung (cm)

2.3.4 Lilin Sekunder

Nilai induktansi lilitan sekunder, sama halnya dengan lilitan primer, dihitung dengan rumus 2.8.

2.4 Inverter

Fungsi inverter adalah mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output AC. Inverter dapat dibuat dengan mengikuti blok diagram pada Gambar 2.12. 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 2.12. 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*).

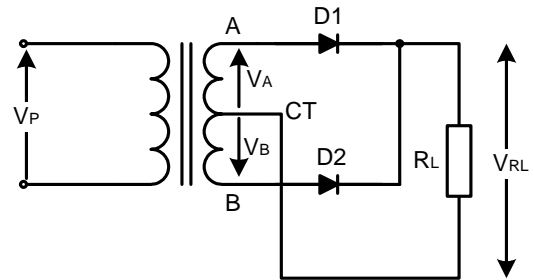
Sedangkan rangkaian kontrol berfungsi untuk mengendalikan proses switching yang terjadi pada

inverter mode saklar. Pengendalian ini akan menentukan antara lain bentuk, amplitudo dan frekuensi gelombang tegangan output secara keseluruhan.

2.5 Penyearah

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 V_A positif dan V_B negatif, maka arus akan mengalir melalui A-D₁-R_L dan berakhir di CT, sedangkan dioda D₂ tidak menghantar. Pada saat V_A negatif dan V_B positif, maka arus akan mengalir melalui B-D₂-R_L dan berakhir di CT, sedangkan dioda D₁ tidak menghantar.



Gambar 2.16 Rangkaian Penyearah gelombang penuh Arus yang mengalir pada R_L adalah arus satu arah. Berikut persamaan tegangan dan arus pada penyearah gelombang penuh.

$$V_{DC} = \frac{2 V_M}{\pi} \dots \dots \dots (2.10)$$

$$I_{DC} = \frac{2 I_m}{\pi} \dots \dots \dots (2.11)$$

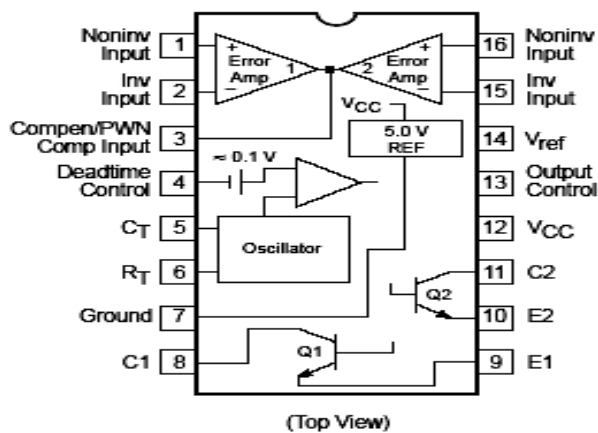
Keterangan:

- V_{DC} = Tegangan hasil penyearahan.
- V_M = Tegangan maksimal hasil penyearahan.
- I_{DC} = Arus hasil penyearahan.
- I_M = Arus maksimal hasil penyearahan.
- π = Ketetapan sebesar 3,14..

2.6 Rangkaian Kontrol PWM (*Pulse Width Modulation*)^[5]

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.

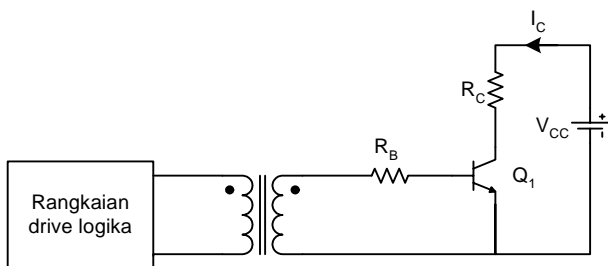
IC TL 494 merupakan komponen terintegrasi yang mempunyai 16 pin dalam dua jalur *Dual In Package* (DIP) sebagai komponen utama rangkaian Kontrol PWM dalam tugas akhir ini. Gambar 2.17 dibawah ini memperlihatkan konfigurasi pin IC TL 494.



Gambar 2.17 Konfigurasi pin IC TL 494

2.7 Isolator Pulsa

Isolator pulsa digunakan untuk memisahkan rangkaian pemucuan dan rangkaian daya. Trafo pulsa memiliki satu lilitan primer dan memiliki satu atau lebih lilitan sekunder. Gerbang diisolasi dengan transformator ditunjukkan pada Gambar 2.24 dibawah ini.



Gambar 2.18 Gerbang diisolasi dengan transformator pulsa

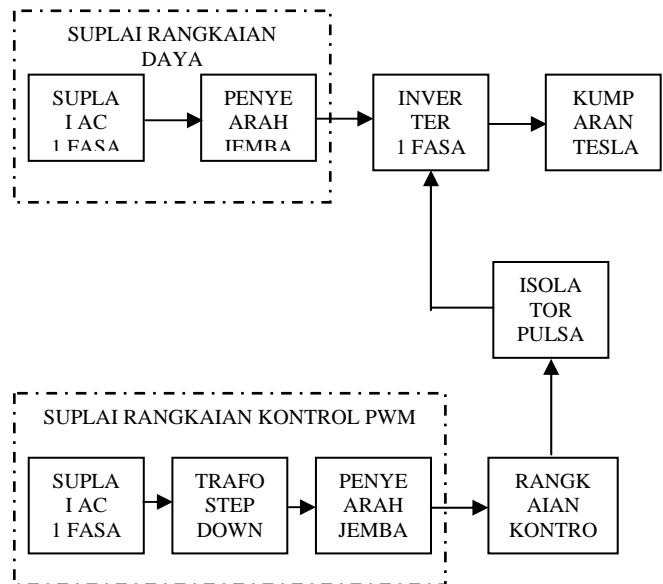
2.8 MOSFET

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 diatasnya.

III. Perancangan dan Pembuatan Alat

3.1 Perancangan Alat

Blok diagram peralatan pembangkit tegangan tinggi menggunakan kumparan tesla dapat dilihat pada gambar 3.1.



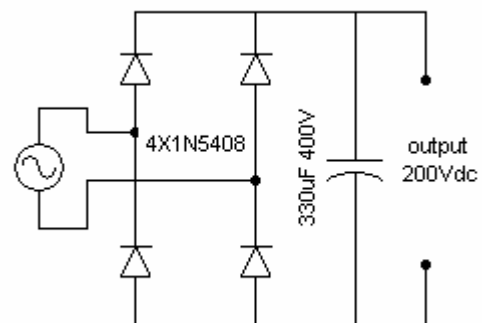
Gambar 3.1 Diagram blok perancangan

3.2 Suplai Rangkaian Daya

3.2.1 Suplai AC 1 Fasa

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.

3.2.2 Penyearah Rangkaian Daya



Gambar 3.2 Penyearah untuk 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.

3.3 Suplai Rangkaian Kontrol PWM

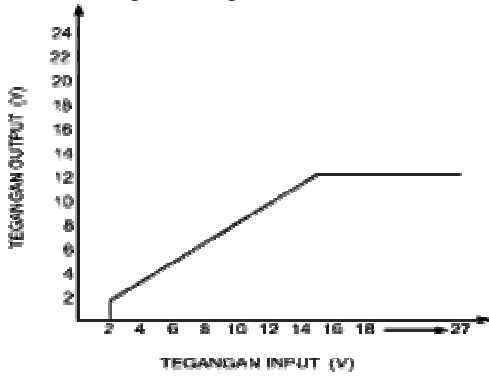
3.3.1 Suplai AC 1 Fasa

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

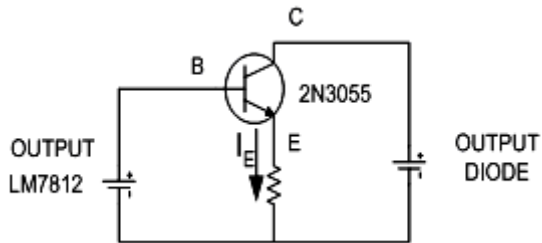
transformator *step down center tap* menjadi AC -15 dan +15 V.

3.3.2 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 3.4.

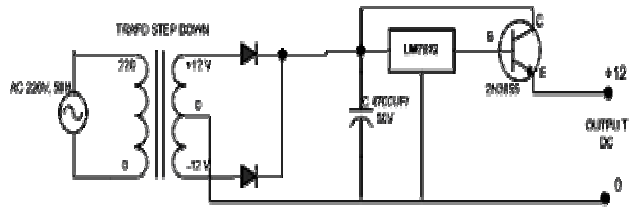


Gambar 3.3 Karakteristik IC regulator tegangan LM7812
 Dari gambar 3.3 di atas terlihat bahwa LM7812 (positif) mampu mengatur tegangan keluaran penyearah konstan pada +12 V, walaupun tegangan input mengalami perubahan. Dimana range perubahannya antara 14,5 V sampai 27 V . Pada *datasheet* disebutkan 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 3.4 Rangkaian transistor penguat arus 7812

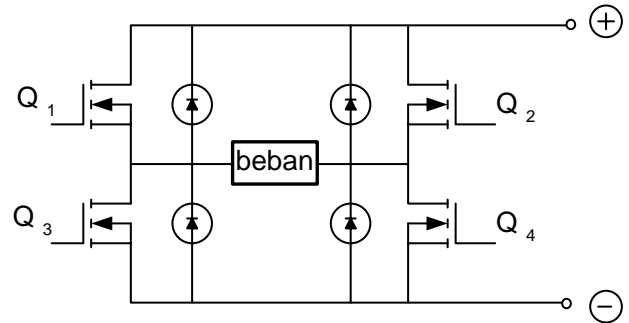
Sesuai gambar 3.4 maka tegangan keluarannya menjadi $V_E = V_B - V_{BE}$, dimana $V_{BE} = 0,7$ V dengan rasio penguatan arus $h_{FE} = \frac{i_C}{i_B} = 20$ sampai 70 (sesuai *datasheet*). Dari penjelasan-penjelasan di atas maka dapat digambarkan rangkaian penyearah secara lengkap pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Penyearah gelombang penuh menggunakan IC regulator 7812

3.4 Inverter 1 Fasa

Inverter 1 fasa yang dirancang menggunakan 4 buah MOSFET seperti ditunjukkan pada gambar 3.6



Gambar 3.6 Konstruksi inverter 1 fasa

Rangkaian *inverter* pada dasarnya adalah tipe pencincang (*chopper*) dimana satu 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

3.4.1 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 V_{DD} , dimana tegangan sumber 200 volt sehingga besar tegangan drain ke sumber puncak $V_{DS(peak)}$ dari MOSFET adalah:

$$V_{DS(peak)} = 2 \times V_{DD} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$= 2 \times 200 = 400 \text{ V}$$

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* $V_{GS(th)} = \pm 20V$; pengisian gate $Q_{GS} = 29 nC$; waktu tunda alih *on* $t_{d(on)} = 18 nS$; waktu naik (*rise time*) $t_r = 59 nS$; waktu tunda alih *off* $t_{d(off)} = 110 nS$; waktu turun (*fall time*) $t_f = 58 nS$.^[9]

3.4.2 Dioda

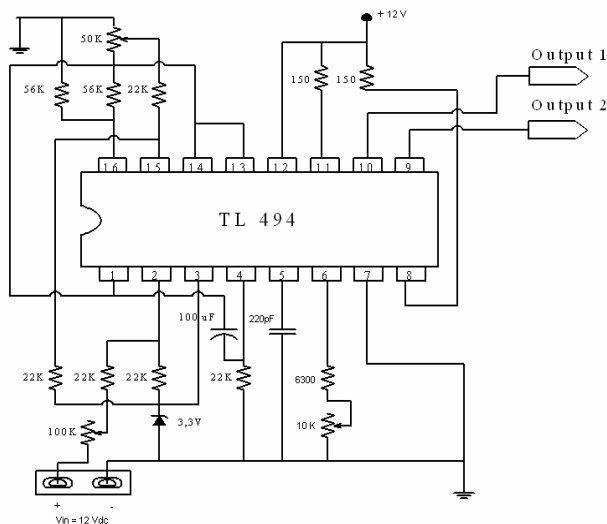
Dioda *freewheeling* yang digunakan dalam perancangan modul ini menggunakan dioda *fast recovery* dimana waktu pemulihan lebih rendah dibanding dioda biasa. Dalam inverter ini digunakan dioda MUR 1660CT yang mempunyai kemampuan arus maju (I_F) sebesar 16 A dan tegangan mundur (V_R) sebesar 600 V dan mempunyai waktu pemulihan sebesar 60 ns. sehingga mencukupi untuk *inverter* ini dimana tegangan sumber 200V dan arus maksimum 3A.^[10]

3.5 Isolator Pulsa

Rangkaian isolator pulsa digunakan untuk memisahkan rangkaian kontrol PWM dengan rangkaian daya. Isolator pulsa yang digunakan adalah trafo pulsa dengan inti ferit. Pemilihan inti ferit ini dimaksudkan agar tidak mudah terjadi saturasi karena frekuensi pensaklaran yang tinggi dalam orde kilohertz.

3.6 Rangkaian Kontrol PWM (Pulse Width Modulation)^[5]

Rangkaian kontrol PWM digunakan pada tugas akhir ini digunakan IC TL 494 yang merupakan komponen terintegrasi sebagai komponen utama pembangkit lebar pulsa termodulasi. Rangkaian kontrol PWM yang direncanakan seperti pada gambar 3.8 dibawah.



Gambar 3.8 Rangkaian kontrol PWM

3.6.1 Rangkaian Pembangkit Gelombang Gigi Gergaji

Pada TL 494 dilengkapi osilator pembangkit gelombang gigi gergaji sebagai pewaktu utama sistem pensaklaran. Frekuensi osilator ini dapat diatur melalui 2 komponen luar yaitu R_T dan C_T , besarnya frekuensi ditentukan oleh persamaan yang terdapat pada lembar data komponen, yaitu:

$$f_{osc} = \frac{1,1}{R_T \cdot C_T} \dots\dots\dots (3.2)$$

Frekuensi pensaklaran yang dirancang besarnya antara 150kHz – 800kHz.

Nilai komponen yang digunakan yaitu:

- CT : 220 pF
- RT : 6300 Ω
- VR : 10 k Ω ,

Maka besarnya frekuensi osilator adalah:

$$f_{OSC(maks)} = \frac{1,1}{6300 \cdot 220 \cdot 10^{-12}} = 800 \text{ kHz}$$

$$f_{OSC(min)} = \frac{1,1}{56300 \cdot 220 \cdot 10^{-12}} = 150 \text{ kHz}$$

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

3.7 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 rangkian sekunder terlebih dulu baru setelah itu rangkaian primer. Hal ini dilakukan agar frekuensi resonansi yang didapat untuk masing-masing rangkaian dapat saling mendekati nilainya.

3.7.1 Perancangan Lilitan Sekunder

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.

$$L_s = \frac{5^2 \cdot 1250^2}{2540 \cdot (9 \cdot 5 + 10 \cdot 33)} = 41 \text{ mH}$$

3.7.2 Perancangan Toroid

Dalam tugas akhir ini toroid yang digunakan mempunyai diameter sebesar 33.5 cm dan diameter selubung sebesar 27.8, maka besarnya kapasitansi toroid berdasarkan persamaan 2.9 adalah

$$C_T = 2.8 \cdot \left(1.2781 - \frac{27.8}{33.5} \right) \cdot \sqrt{0.1217 \cdot 27.8 (33.5 - 27.8)}$$

$$= 5.5 \text{ pF}$$

Besarnya frekuensi resonansi untuk rangkaian sekunder yang terbentuk antara lilitan sekunder dan toroid dihitung dengan rumus 2.13

$$f_{RES} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s \cdot C_T}}$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3.14 \sqrt{41 \cdot 10^{-3} \cdot 5.5 \cdot 10^{-12}}}$$

$$= 334.8 \text{ kHz}$$

3.7.3 Lilitan Primer

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 2.14 sama seperti pada menghitung nilai induktansi lilitan sekunder.

$$L_p = \frac{R^2 N^2}{2540 \cdot (9R + 10H)}$$

$$= \frac{5.72^2 \cdot 11^2}{2540 \cdot (9 \cdot 5.72 + 10 \cdot 25)}$$

$$= 0.0052 \text{ mH}$$

3.7.4 Kapasitor Primer

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 2.13 adalah

$$f_{RES} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p \cdot C_p}}$$

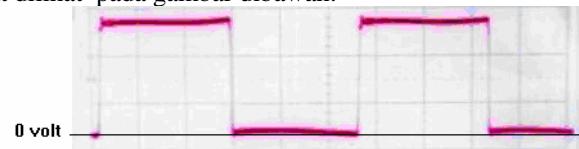
$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{5.2 \cdot 10^{-6} \cdot 0.05 \cdot 10^{-6}}}$$

$$= 150 \text{ kHz}$$

IV. Pengujian dan Analisa

4.1 Pengujian Sinyal Pemicuan

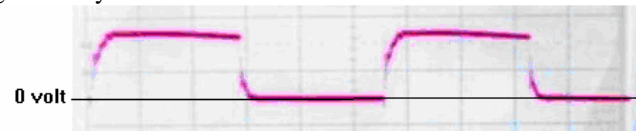
Sinyal pemicuan MOSFET merupakan sinyal PWM yang dihasilkan oleh kaki 9 dan 10 IC TL494 yang dapat dilihat pada gambar dibawah.



V/D : 5 V/div Probe: 1x
T/D : 0.5 uS/div f = 200 kHz

Gambar 4.1 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.

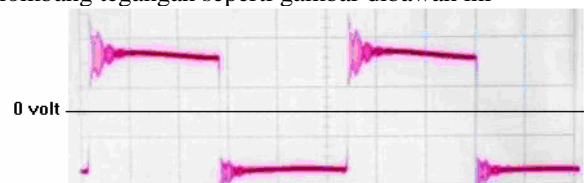


V/D : 5 V/div Probe: 1x
T/D : 0.5 uS/div f = 200 kHz

Gambar 4.2 Sinyal keluaran tarfo pulsa

4.2 Pengujian Output Inverter

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 4.3 Bentuk tegangan keluaran inverter

Dari gambar 4.3 keluaran inverter terjadi osilasi hal ini karena adanya kapasitansi gerbang pada mosfet^[6].

4.3 Pengujian Kumaran Tesla

Pengujian kumaran tesla meliputi pengujian frekuensi resonansi kumaran tesla, pengujian tegangan keluaran kumaran 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 4.1 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
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 4.2 Pengujian tegangan keluaran kumparan tesla dengan sela bola dalam kV

Tegangan puncak masukan kumparan tesla (volt)	Tegangan keluaran ketika terjadi tembus udara (kV)
45.07	14.28
45.71	17.14
46.73	19.99
52.71	22.85
56.91	25.70
58.95	28.56
64.76	31.42
68.12	34.27
70.16	37.13
70.03	39.98
75.5	42.84
90.65	45.70
94.35	48.55
100.71	51.41
99.95	54.26
104.79	57.12

Tegangan tembus yang terjadi dapat dihitung dengan rumus berikut [2]

$$\hat{V} = \delta \hat{V}_s$$

dimana \hat{V} adalah tegangan tembus saat pengujian (keadaan udara sembarang)

δ adalah faktor koreksi udara

\hat{V}_s adalah tegangan tembus sela bola standar (30 kV/cm)

Faktor koreksi udara tergantung pada suhu dan tekanan udara besarnya sebagai berikut [1]

$$\delta = \frac{0.386p}{273 + \theta}$$

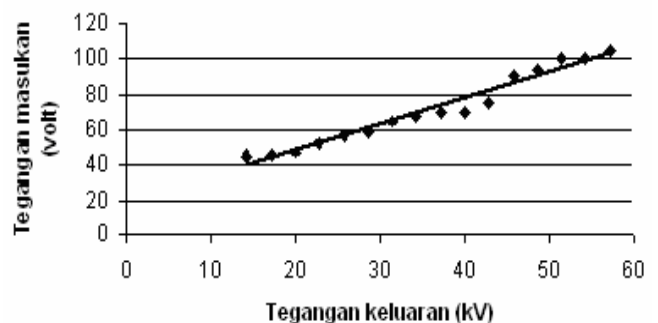
dimana δ = faktor koreksi udara

p = tekanan udara (mmHg)

θ = temperatur udara ($^{\circ}C$)

sehingga besarnya faktor koreksi udara pada suhu $27^{\circ}C$ dan tekanan udara 740mmHg adalah 0.952. Setelah dikalikan dengan faktor koreksi maka tegangan keluaran kumparan tesla berdasarkan data tabel 4.1 dapat dituliskan pada tabel 4.2 sebagai berikut

Berdasarkan tabel 4.2 dapat dibuat grafik



Gambar 4.4 grafik hubungan tegangan masukan dan keluaran kumparan tesla

Dari gambar 4.4 terlihat bahwa hubungan antara tegangan masukan kumparan tesla dan tegangan keluaran kumparan tesla mempunyai kecenderungan linier.

Pengambilan data tegangan keluaran kumparan tesla pada tugas akhir ini hanya dilakukan pada frekuensi resonansi kumparan tesla yaitu sebesar 200kHz dan tegangan masukan kumparan 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 kumparan tesla.

V. Kesimpulan

5.1. Kesimpulan

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

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

5.2. 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.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abduh, Syamsir, Teknik Tegangan Tinggi, Penerbit Salemba Teknik, Jakarta, 2001.
- [2] Tobing, Bonggas L, Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi, Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- [3] Denicolai, Marco, *Tesis: Tesla Transformer for Experimentation and Research*, HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2001.
- [4] M. Rashid, Elektronika Daya, Rangkaian, Devais Dan Aplikasinya. Jilid 1, PT. Prenhallindo, Jakarta, 1993.
- [5] Malvino, Prinsip - Prinsip Elektronik, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1984
- [6] Sidik, Fajar, *Tugas Akhir: Soft Starting dan Dinamic Braking Motor Induksi Tiga Fasa*, Universitas Diponegoro 2006.
- [7] Parsumo R. Drs, *Elektronika Daya*, Politeknik Negeri Semarang, 1997.
- [8] Rashid .M, *Power Electronics Circuit, Device, and Application 2nd*, Prentice-Hall International Inc, 1988.
- [9] Mohan.Ned ,Tore M.Undeland ,William P Robbins, *Power Electronics : Converter, Applications, and Design*, John Wiley and Sons Inc, Canada, 1995.
- [10] <http://www.richieburnett.co.uk>
- [11] <http://www.easternvoltagegeresearch.com>.
- [12] <http://www.stevhev.4hv.org>
- [13] <http://www.irf.com>
- [14] <http://www.motorola.com>
- [15] <http://www.scopeboy.com>



Ahmad Habibi, Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Diponegoro angkatan 2002 yang sedang menyelesaikan pendidikan S1.

Menyetujui :

Pembimbing I

Abdul Syakur, S.T., M.T.
NIP. 132 231 132

Pembimbing II

Ir. Agung Warsito DHET
NIP. 131 668 485