

Desain Generator Tegangan Tinggi Impuls 31,4 kV menggunakan *Ignition Coil*

ABDUL SYAKUR, OKRISAL REKA NUGRAHA, FADILLA DWI PUTRI
RIYANTO, RAFIF DAFFA ARIBAWA PUTRA

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Indonesia
Email: asyakur@lecturer.undip.ac.id

Received 7 Februari 2023 | Revised 9 Maret 2023 | Accepted 29 Maret 2023

ABSTRAK

Peralatan pembangkitan tegangan tinggi yang ada sejauh ini masih memerlukan perangkat-perangkat besar dan kompleks. Pada penelitian ini dihasilkan suatu alat pembangkit tegangan tinggi impuls yang menjawab persoalan dimensi dan kompleksitas. Metode pembangkitan tegangan tinggi impuls yang digunakan berbasis pada pemanfaatan ignition coil. Ignition coil diberi masukan berupa gelombang kotak. Gelombang kotak memicu proses switching pada komponen SSR (solid state relay) sehingga tegangan masukan yang berupa gelombang kotak dapat dinaikkan menjadi gelombang impuls bertegangan tinggi. Pengujian dilakukan dengan menerapkan tegangan masukan DC sebesar 1 – 12 V dan mengamati hasilnya dengan pengambilan 5 sampel spektrum pada osiloskop dan pengamatan fisis. Tegangan tinggi impuls mulai dapat dihasilkan pada variasi tegangan masukan 3 V. Secara fisis, tegangan tinggi impuls dapat diamati dengan munculnya bunga api ujung elektroda. Rata-rata tegangan tinggi impuls 31,4 kV tercapai pada tegangan masukan 7 V.

Kata kunci: bunga api, ignition coil, impuls, pembangkit, tegangan tinggi

ABSTRACT

The equipment of high voltage generating which so far still requires large and complex devices. In this research a high voltage impulse generator device was produced which answered the dimensional and complexity issues. The method of high voltage impulse generation is based on the utilization of the ignition coil. The ignition coil is given input in the form of a square wave. The square wave triggers the switching process on the SSR (solid state relay) component so that the input voltage in the form of a square wave can be increased into a high-voltage impulse wave. The test was carried out by applying a DC input voltage of 1 – 12 V and observing the results by taking 5 spectrum samples on an oscilloscope and physical observations. High voltage impulses can be generated at variations in the input voltage of 3 V. Physically, high voltage impulse can be observed by the appearance of a spark at the tip of the electrode. The average high voltage impulse of 31.4 kV is achieved at an input voltage of 7 V.

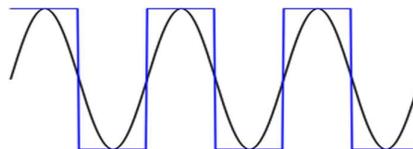
Keywords: spark, ignition coil, impulse, generator, high voltage

1. PENDAHULUAN

Macam-macam jenis atau bentuk tegangan tinggi di antaranya yaitu tegangan DC (arus searah), AC (arus bolak-balik), dan impuls (**Pravitasari, dkk, 2018**). Jika ditemui suatu gelombang yang pendek durasi mukanya, memiliki rentang pecahan dengan satuan mikro detik sampai beberapa puluh mikro detik, serta amplitudonya berkurang secara perlahan menuju nol maka jenis tegangan tersebut tergolong tegangan tinggi impuls. Lebih dari 1000 kV tegangan tinggi impuls dapat dicapai dalam proses pembangkitan khususnya pada keperluan laboratorium (**Manik, dkk, 2020**). Pengujian isolasi sistem adalah tujuan atau keperluan umum mengapa tegangan tinggi impuls dibangkitkan, selain daripada keperluan penelitian lainnya (**Bernad, dkk, 2018**). Tegangan tinggi impuls petir, surja hubung, dan terpotong merupakan tipe tegangan tinggi impuls yang mungkin dapat dialami oleh suatu sistem tenaga listrik (**Yusmartato & Nasution, 2020**). Beberapa metode yang dapat digunakan dalam pembangkitan tegangan tinggi impuls di antaranya adalah menggunakan generator Marx, rangkaian RC dan RLC, dan rangkaian flyback converter (**Manik, dkk, 2020**). Hanya saja peralatan atau perangkat tegangan tinggi impuls tersedia saat ini masih dalam sistem yang besar, susah dalam penggunaannya, tidak portable sehingga kurang efisien digunakan, serta biaya mahal (**Arifin, dkk, 2011**). Metode lain yang dapat digunakan dalam pembangkitan tegangan tinggi impuls yang efisien yaitu dengan memanfaatkan ignition coil.

Ignition coil merupakan salah satu komponen di dalam sistem otomotif sebagai pembakar campuran bahan bakar dengan cara memunculkan bunga api pada busi. Ignition coil tergolong ke dalam transformator step up dimana lilitan sekundernya dikonfigurasi satu inti dengan lilitan primernya (**Pasaribu, 2019**). Pada dasarnya, transformator hanya dapat bekerja pada arus AC karena adanya perubahan polaritas yang menyebabkan perubahan medan magnet sehingga muatan dapat terinduksi di kumparan sekunder (**Kareem, 2019**). Agar transformator atau ignition coil dapat bekerja pada arus DC, maka perlu diberikan perlakuan khusus agar terdapat perubahan medan magnet yaitu dengan memberikan masukan berupa gelombang kotak. Pada gelombang kotak, tegangan dinaikkan ke nilai tertentu, kemudian diturunkan lagi ke nol dan siklus ini dilakukan terus menerus. Dengan adanya perubahan nilai tegangan tersebut, maka akan terjadi perubahan medan magnet sehingga muatan dapat terinduksi dan dihasilkan tegangan keluaran berupa tegangan impuls.

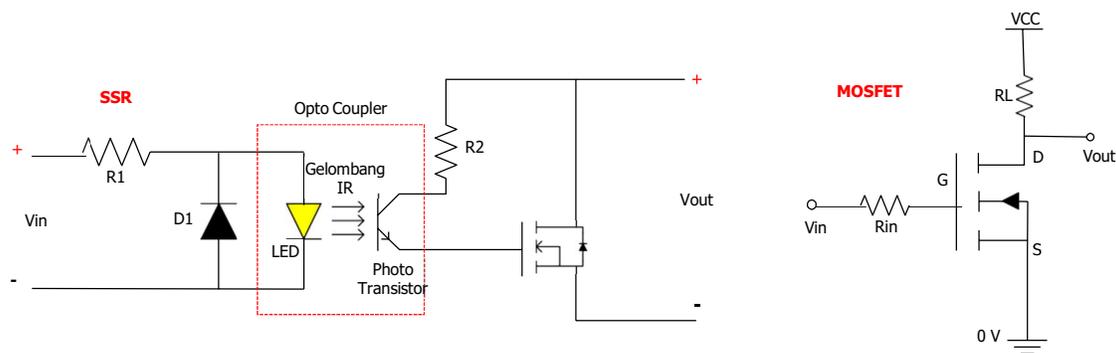
Ignition coil yang pada prinsipnya merupakan trafo step-up hanya dapat bekerja menaikkan tegangan jika diberikan masukan tegangan AC. Namun jika tegangan AC diterapkan pada ignition coil, tentulah hasil yang akan diperoleh adalah tegangan tinggi AC dimana hasil tersebut tidak sesuai seperti yang diinginkan penelitian ini. Berdasarkan hal tersebut, dengan masukan yang sebenarnya merupakan tegangan DC bersumber dari buck-boost converter, tim peneliti mengkondisikan supaya tegangan yang masuk ke ignition coil adalah berupa perubahan tegangan yang mendadak antara dua nilai tegangan biner. Hal tersebut tidak bertentangan dengan prinsip kerja dari trafo. Sebab trafo akan bekerja jika terdapat perubahan tegangan. Perubahan yang dimaksud tidak hanya perubahan yang sifatnya kontinu (misalnya sinusoidal), melainkan juga perubahan yang sifatnya diskrit (misalnya gelombang kotak).



Gambar 1. Gelombang sinusoidal dan kotak

Gambar 1 menunjukkan perbedaan antara gelombang sinusoidal dan kotak. Pada gambar tersebut dapat diamati bahwa gelombang sinusoidal selalu memiliki nilai keluaran tegangan yang berbeda untuk setiap waktunya (kontinu). Sedangkan pada gelombang kotak memiliki sifat diskrit biner yang berarti untuk setiap interval waktu hanya memiliki dua nilai keluaran (tegangan) misalnya 0 V dan 5 V saja. Karena hanya terdapat dua nilai keluaran, sehingga perubahan tegangan yang diterapkan hanya memiliki dua kemungkinan yaitu saat kondisi low ke high dan high ke low. Dengan demikian, ide utama yang diterapkan pada penelitian ini dalam membangkitkan tegangan tinggi impuls adalah menciptakan tegangan masukan yang berupa gelombang kotak pada sisi primer ignition coil. Gelombang kotak ini dihasilkan dari sistem switching yang akan dibahas mendalam pada bagian-bagian selanjutnya dari makalah ini. Perubahan tegangan yang diterapkan memanfaatkan peralihan tegangan low ke high dan high ke low. Momen perubahan tegangan inilah yang dapat dinaikkan nilainya oleh ignition coil, sedangkan pada saat nilai konstan tidak ada proses step-up pada ignition coil. Dengan pemberian tegangan kotak pada sisi primer ignition coil akan dihasilkan tegangan tinggi impuls pada sisi sekunder yang dihubungkan melalui elektroda jarum sehingga observasi fisisterhadap bunga api (sparking) dapat diamati.

Komponen penting yang berperan untuk menghasilkan bentuk gelombang impuls adalah komponen atau sistem switching (pensaklaran). Sistem switching pada penelitian dan perancangan ini menggunakan solid state relay (SSR). Sebelum digunakannya SSR dalam sistem ini, terdapat beberapa alternatif yang telah dipilih dan diujicobakan, misalnya MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). MOSFET merupakan transistor efek medan (FET) dengan gate yang memiliki lapisan tipis oksida silikon dan bersifat insulator. MOSFET terdiri satu drain, satu source, dan satu/dua gate. MOSFET memiliki gate yang terisolasi dari bahan metal seperti aluminium. Dari karakteristik tersebut sehingga transistor ini disebut metal-oxide (**Sahal & Azizahwati, 2014**). MOSFET memiliki keunggulan dalam sistem pensaklaran dan penguatan yang lebih baik daripada transistor bipolar. Selain itu, jika dibandingkan dengan bipolar, MOSFET juga menghasilkan disipasi daya yang lebih rendah (**Yaqin, dkk, 2021**). Pada awalnya, MOSFET diduga akan menjadi komponen terbaik untuk proses switching pada penelitian ini. Namun pada akhirnya justru penggunaan MOSFET pada sistem ini tidak cocok karena tidak sesuai dengan prinsip kerja dari MOSFET itu sendiri. Gambar 2 di bawah menunjukkan perbandingan antara model SSR dan MOSFET.



Gambar 2. SSR dan MOSFET

Salah satu bagian krusial pada penelitian ini yaitu proses on-off switching. Alasannya adalah pada proses ini dihasilkan tegangan kotak yang berperan sebagai tegangan masukan sisi primer ignition coil. Gelombang kotak sebagai masukan dari ignition coil dihasilkan dari tegangan DC konstan yang diputus dan disambung secara bergantian dan kontinu, atau diterapkan proses switching sehingga terbentuk gelombang kotak. Proses switching diatur oleh

SSR (solid state relay) yang merupakan relai optis (pengganti relai mekanik). Proses switching pada SSR dikendalikan oleh IC 555 yang akan memantik SSR untuk bekerja. IC 555 dipilih karena kapabilitasnya dalam menghasilkan suplai yang stabil dan akurat untuk sinyal pulsa (gelombang kotak) **(Kasri & Piah, 2017)**. SSR bekerja dengan memperoleh sinyal pemicu on dan off. Jika sinyal pemicu adalah on maka SSR akan berada dalam kondisi rangkaian tertutup (tersambung) dan sebaliknya. Sehingga untuk setiap runtun sinyal pulsa on-off yang dihasilkan oleh IC 555 akan memerintahkan SSR untuk on dan off saat itu juga. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, proses switching diatur oleh SSR (solid state relay) yang dikendalikan oleh IC 555 dengan frekuensi kerja dan duty cycle tertentu. Nilai frekuensi kerja (f) dan duty cycle switching (D) ditentukan oleh nilai resistor dan kapasitor yang dapat dirumuskan secara matematis sebagai berikut:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1,44}{C \times (R_1 + 2R_2)} \quad (1)$$

$$\text{Duty cycle} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} \times 100 \quad (2)$$

dimana f adalah frekuensi switching, T adalah periode gelombang kotak, C adalah nilai kapasitansi yang digunakan, serta R_1 dan R_2 adalah nilai resistansi yang digunakan **(Pramono & Fanriadho, 2018)**.

Terdapat dua sisi unik pada luaran penelitian yang diinginkan. Yang pertama dan sekaligus menjawab tujuan dilakukannya penelitian ini yaitu untuk menghasilkan suatu alat atau produk pembangkit tegangan tinggi impuls yang portabel, berukuran lebih kecil, tidak memerlukan peralatan laboratorium pendukung, sederhana, dan mudah digunakan. Yang kedua adalah sistem switching yang diterapkan berbasis relai optis. Hal ini merupakan kebaruan sebab biasanya sistem switching yang digunakan berbasis MOSFET atau relay mekanis. Penggunaan relai optis atau pada penjelasan sebelumnya dikenal sebagai SSR memiliki keunggulan seperti lebih andal dibanding relai mekanis dan fungsionalitas yang lebih sesuai daripada MOSFET. Sementara, secara khusus penelitian ini ingin menghasilkan suatu alat atau produk pembangkit tegangan tinggi yang mampu menciptakan tegangan tinggi impuls mencapai 31,4 kV dengan tegangan masukan DC yang relatif kecil berkisar antara 3 V hingga 7 V.

2. METODE DAN DESAIN SISTEM

2.1 Kebutuhan Bahan

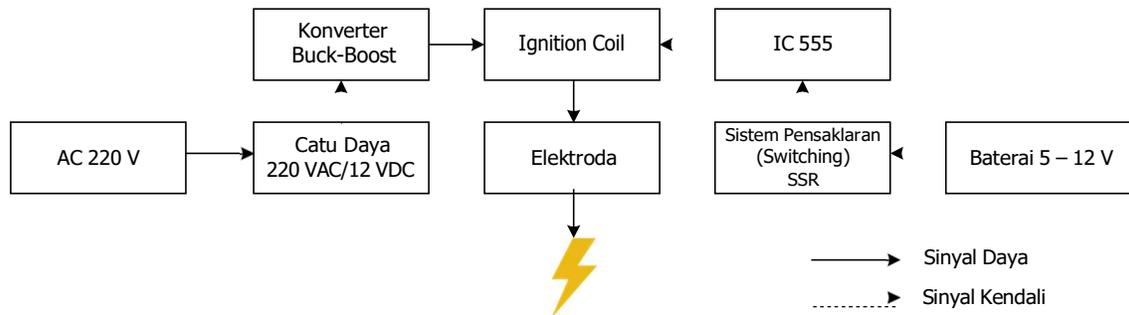
Penelitian ini memerlukan beberapa bahan seperti power supply, buck-boost converter, baterai 5 - 12 V, IC 555 dan komponen elektronika, solid state relay (SSR), ignition coil, saklar, MCB (Miniature Circuit Breaker), dan elektroda. Secara garis besar, komponen utama yang digunakan sebagai pembangkit tegangan tinggi adalah ignition coil. Ignition coil pada dasarnya adalah sebuah transformator step up yang biasa dipakai di kendaraan bermotor sebagai bagian dari sistem pembakaran untuk menghasilkan bunga api pada busi. Tegangan masukan yang diberikan adalah tegangan kotak.

2.2 Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem pada Gambar 3 menunjukkan urutan kerja sistem dimulai sumber tegangan penyuplai hingga proses akhir tegangan tinggi impuls dapat terbentuk. Sebagai sumber tegangan pada alat, digunakan power supply DC 12V/5A yang diberi masukan tegangan AC 220 V. Kemudian, output power supply dihubungkan ke buck-boost converter agar tegangan input ke ignition coil dapat divariasikan. Agar ignition coil dapat digunakan,

maka diperlukan komponen switching berupa SSR (penghasil gelombang kotak) yang dipasang pada jalur negatif antara ignition coil dengan buck-boost converter.

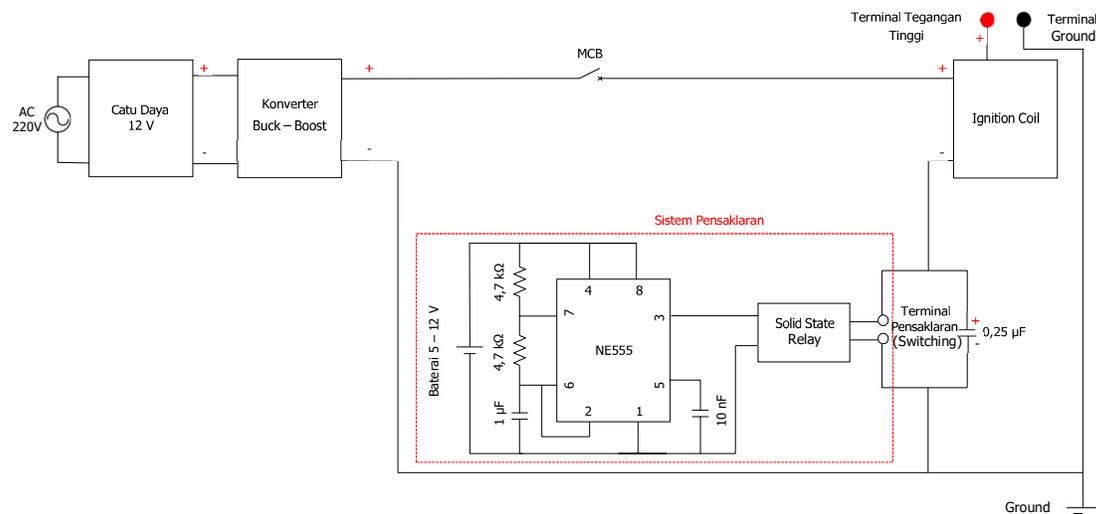
Untuk sistem switching, digunakan IC 555 yang disuplai dengan baterai 5 - 12 V. Dengan konfigurasi yang telah disesuaikan, IC 555 akan menghasilkan gelombang kotak yang akan digunakan untuk mengontrol switching pada SSR. Dengan demikian, tegangan kotak dapat dihasilkan. Kemudian, tegangan yang masuk ke ignition coil akan dinaikkan. Dikarenakan tegangan masukannya berupa gelombang kotak, maka tegangan keluaran yang dihasilkan berjenis tegangan impuls. Keluaran dari ignition coil akan dihubungkan ke elektroda. Ketika alat dinyalakan, maka akan muncul bunga api (sparking) pada sela elektroda.



Gambar 3. Diagram blok sistem pembangkitan tegangan tinggi impuls 31,4 kV menggunakan ignition coil

2.3 Rangkaian Sistem

Secara garis besar, sistem terdiri dari power supply sebagai suplai tegangan ignition coil, buck-boost converter sebagai penaik dan penurun tegangan masukan, ignition coil sebagai penaik tegangan, dan switching system sebagai pengolah tegangan masukan DC menjadi tegangan kotak. Keseluruhan rangkaian sistem yang menggambarkan detail penyusunan diagram blok sebelumnya ditunjukkan pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Rangkaian sistem pembangkitan tegangan tinggi impuls 31,4 kV menggunakan ignition coil

Sistem yang merupakan perangkat listrik/elektronika memerlukan power supply sebagai pengonversi energi listrik jenis AC menjadi DC yang kemudian dapat digunakan sebagai penyuplai energi (**Fitriani, 2020**). Power supply pada sistem ini digunakan sebagai suplai tegangan DC pada alat pembangkitan tegangan tinggi impuls. Cara kerja power supply yang digunakan pada alat secara singkat yaitu dengan menurunkan tegangan AC 220 V menjadi 15 V lalu disearahkan menggunakan full bridge rectifier. Hasil penyearahan disaring sedemikian rupa sehingga menghasilkan tegangan keluaran 12 V. Variasi tegangan masukan diatur oleh rangkaian elektronika bernama buck-boost converter, dimana tegangan keluaran dapat dinaikkan atau diturunkan melalui rangkaian tersebut berdasarkan pada nilai duty cycle (**Wicaksono, dkk, 2019**). Buck-boost converter ini merupakan salah satu jenis DC chopper atau konverter DC ke DC. Secara sistem kerja, buck-boost converter adalah gabungan dari buck converter dan boost converter. Setelah variasi nilai tegangan masuk diperoleh, kemudian tegangan DC akan diubah menjadi tegangan kotak degan SSR sebagai komponen switching. SSR yang dipakai berjenis DC ke DC, dimana suplai SSR menggunakan tegangan DC, dan beban yang terhubung ke SSR menggunakan tegangan DC.

2.4 Produk Hasil Perancangan

Komponen pada alat akan ditempatkan di dalam kotak dengan dimensi 250 × 350 × 150 mm. Penampakan fisik produk hasil perancangan tampak atas ditunjukkan pada Gambar 5. (a) dan tampak dalam ditunjukkan pada Gambar 5. (b). Elektroda sebagai media munculnya bunga api (sparking) dihubungkan dengan ignition coil menggunakan kabel. Pada sisi depan kotak terdapat satu buah saklar untuk mengaktifkan sistem switching, satu buah MCB untuk mengaktifkan suplai tegangan ignition coil, dan 1 buah knob yang dilengkapi dengan layar untuk mengatur serta mengamati tegangan masukan yang akan diberikan. Alat ini didesain dengan sistem yang praktis agar lebih mudah dalam penggunaannya. Pengguna hanya perlu mencolokkan steker ke stop kontak terlebih dahulu sebagai sumber tegangannya. Kemudian, aktifkan saklar switching dan MCB. Putar knob untuk mengatur nilai tegangan masukan yang ingin digunakan. Pengguna dapat mengamati nilai tegangan masukan pada layar.



Gambar 5. Produk generator tegangan tinggi impuls 31,4 kV (a) Tampak atas dan (b) tampak dalam

Pengukuran tegangan keluaran dapat dilakukan dengan menggunakan osiloskop dan probe tegangan tinggi. Probe sisi positif dihubungkan ke keluaran positif dari sistem dan probe negatif dihubungkan ke keluaran negatif dari sistem. Kemudian probe dihubungkan ke osiloskop. Sebelum melakukan pengukuran, dilakukan penyesuaian atenuasi pada osiloskop agar gelombang impuls tegangan keluaran dapat ditangkap sepenuhnya oleh osiloskop. Pengukuran dilakukan dengan mengambil sampel 5 spektrum keluaran setiap variasi. Tujuannya adalah untuk memperoleh nilai tegangan keluaran yang lebih akurat.

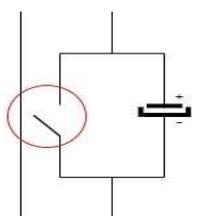
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan menggunakan Persamaan (1) dan (2), ketika rangkaian switching menggunakan resistor bernilai 4,7 kΩ dan kapasitor bernilai 1 μF, maka didapatkan nilai frekuensi dan duty cycle sebagai berikut:

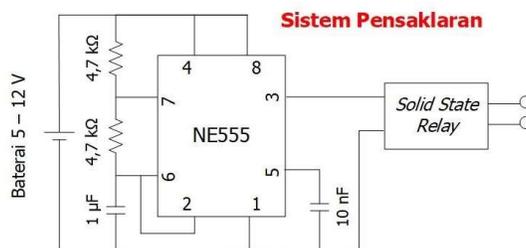
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1,44}{C \times (R_1 + 2R_2)} = \frac{1,44}{10^{-6} \times (4700 + (2 \times 4700))} = \frac{1,44}{10^{-6} \times 14100} = 102,127 \text{ Hz}$$

$$\text{Duty cycle} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} \times 100 = \frac{4700 + 4700}{(4700 + (2 \times 4700))} \times 100 = 66,67 \%$$

Gambar 6 merupakan bagian rangkaian switching dengan pemodelan rangkaian yang lebih spesifik mengacu pada Gambar 4 di bagian terminal pensaklaran (switching). Dapat diamati bahwa proses switching terjadi pada terminal switching yang terletak paralel dengan kapasitor yang kemudian terhubung dengan terminal positif ignition coil. Pada sistem ini, diinginkan terjadi proses switching melalui penghantar yang paralel terhadap kapasitor. Munculnya tegangan tinggi impuls yang ditandai dengan munculnya bunga api (sparking) pada elektroda jarum terjadi bersamaan dengan proses switching atau on-off pada terminal switching tersebut. Ketika terminal switching berada pada kondisi on atau terminal terhubung, maka akan muncul bunga api. Proses switching akan menentukan bagaimana bunga api dan tegangan tinggi impuls dapat dihasilkan. Untuk satu kali proses switching akan dihasilkan satu gelombang tegangan tinggi impuls dan satu letupan bunga api. Sehingga untuk menghasilkan gelombang tegangan tinggi impuls dan bunga api yang beruntun (kontinu), maka diperlukan proses switching yang berkali-kali atau berulang. Proses ini juga tidak mungkin dilakukan secara manual oleh manusia. Sehingga pada sistem ini, tim peneliti merancang komponen switching dengan menggunakan SSR dan IC 555 seperti yang ditunjukkan Gambar 7.



Gambar 6. Bagian rangkaian switching pada sistem pembangkitan tegangan tinggi impuls 31,4 kV menggunakan ignition coil



Gambar 7. Sistem pengontrol switching pada sistem pembangkitan tegangan tinggi impuls 31,4 kV menggunakan ignition coil

Untuk mengatur kerja SSR dalam proses switching, digunakan IC 555 sebagai pemacu. IC 555 ditenagai oleh baterai 5 - 12 V yang terpisah dengan sumber energi utama. IC 555 dipilih

karena tangguh dalam pemakaian sehari-hari. Untuk kestabilan frekuensi, IC 555 cocok pada suhu yang relatif tinggi (Syamsuri, 2016). Pada penelitian ini menggunakan dua buah resistor bernilai 4,7 k Ω dan kapasitor bernilai 1 μ F supaya menghasilkan gelombang kotak dengan frekuensi 102,127 Hz dan duty cycle 66,67 %. Frekuensi 102,127 Hz menggambarkan bahwa dalam 1 detik terdapat 102,127 siklus switching dengan persentase lama waktu on sebesar 66,67 % dan lama waktu off sebesar 33,37% dalam satu siklus. SSR dikendalikan dengan frekuensi switching sebesar 102,127 Hz dan duty cycle 66,67 %, maka dalam 1 detik terminal SSR akan mengalami on-off sebanyak 102,127 kali dengan persentase waktu on sebesar 66,67 % atau setara dengan 0,6667 detik, sedangkan persentase waktu off sebesar 33,37 % atau setara dengan dengan 0,3337 detik setiap 1 kali switching. Gelombang kotak yang keluar dari pin 3 IC 555 akan memantik SSR untuk melakukan proses switching sesuai runtun on-off yang diterimanya. Ketika SSR menerima sinyal positif maka terminal SSR akan on (terhubung) dan juga sebaliknya. Sehingga ketika sebanyak 102,127 Hz runtun gelombang kotak ditransmisikan ke terminal masukan SSR, maka pada terminal keluaran SSR akan melakukan proses switching juga sebanyak 102,127 Hz. Hingga pada akhirnya terbentuk gelombang tegangan tinggi impuls beserta bunga api yang kontinu (tidak terputus-putus). Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan (1) dan (2) dengan parameter nilai setiap komponen pada IC 555, frekuensi dan duty cycle yang dihasilkan adalah bernilai 102,127 Hz dan 66,67 %. Sedangkan frekuensi dan duty cycle yang diperoleh dari hasil pengukuran serta pengamatan pada layar osiloskop bernilai 100,5 Hz dan 66,78 % sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Gelombang kotak 100,5 Hz duty cycle 66,78% yang dihasilkan dari proses switching pada sistem pembangkitan tegangan tinggi impuls 31,4 kV menggunakan ignition coil

Untuk menunjukkan mengapa SSR adalah komponen yang tepat dalam menjalankan fungsi switching, pembahasan diarahkan kembali pada Gambar 6 dan Gambar 7. Dapat diamati bahwa proses switching pada sistem ini dimaknai sebagai suatu proses pemutusan dan penyambungan terminal yang paralel terhadap kapasitor. Terminal switching tersebut terletak pada penghantar (line) sisi negatif sistem. Artinya, terminal switching terletak pada jalur antara

terminal negatif ignition coil dan berakhir ke terminal negatif suplai atau ground. Meskipun dengan mengamati polaritas kapasitor dapat diketahui bahwa terminal switching yang tersambung pada terminal negatif ignition coil tentu memiliki potensial yang lebih positif dan terminal switching yang tersambung pada ground memiliki potensial yang lebih negatif.

Jika diamati, proses switching memerlukan suatu komponen dimana bagian aktuator switching-nya terpisah dengan sinyal daya dan kendali. Sebab pada jalur tempat terminal switching berada bukanlah jalur yang terdiri dari sinyal daya dan sinyal kendali. Sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa terminal switching terletak pada jalur negatif sistem, bukan diapit oleh dua jalur daya (positif dan negatif). Begitu juga tidak ada jalur atau sinyal kendali yang menuju terminal switching. Sehingga penggunaan MOSFET bukan pilihan yang tepat. Sebab proses switching pada MOSFET (misalnya MOSFET tipe n) memerlukan sinyal daya yaitu tegangan positif pada kaki drain dan tegangan negatif atau ground pada kaki source, serta sinyal kendali pada kaki gate. Supaya MOSFET dapat melakukan proses switching, MOSFET perlu ditenagai dengan sejumlah tegangan dan dikendalikan kecepatan atau momen switching-nya. Syarat itulah yang tidak dapat dipenuhi jika MOSFET diterapkan pada terminal switching sistem ini. Seandainya MOSFET tetap digunakan, proses switching tidak akan terjadi karena MOSFET tidak memperoleh sinyal daya yang sesuai dan tidak ada sinyal kendali yang diterapkan padanya.

Alternatif lain yang juga pernah diujicobakan yaitu menggunakan relai mekanik. Secara fungsi sebenarnya sama saja dengan SSR, namun penggunaan relai mekanik memiliki banyak kelemahan jika dibandingkan dengan SSR. Saat menggunakan relai mekanik, proses on-off menghasilkan osilasi berkepanjangan di sekitar set point. Hal tersebut tidak diinginkan dalam proses pengontrolan dengan keluaran yang konstan. Kekurangan lain dari relai mekanik yaitu timbulnya percikan api saat peralihan kondisi on-off dengan bunyi yang keras. Kondisi tersebut tentu sangat berbahaya karena berpotensi menimbulkan kebakaran akibat percikan api **(Firdiansyah, dkk, 2014)**. Kemudian, relai mekanik memiliki bagian yang bergerak sehingga bisa mengalami aus saat digunakan untuk pensaklaran dalam frekuensi tinggi. Waktu yang lebih cepat dapat diakomodasi oleh SSR pada sistem pensaklaran dibandingkan dengan relai mekanik serta tidak adanya masalah korosi kontak karena tidak ada pemicu percikan api antar kontak **(Kustiawan, 2018)**. Pada praktiknya terdapat dua hal yang mendorong penggantian relai mekanik menjadi SSR yaitu keandalan sistem dan batasan frekuensi. Relai mekanik memiliki keandalan yang lebih rendah. Penggunaan dengan waktu yang lama membuat aktuator mekaniknya menjadi panas dan mempengaruhi ketepatan dan responsivitas dari proses switching, termasuk delay yang diakibatkan karena sistem yang sudah lelah. Dari sisi frekuensi, batasan atau cakupan frekuensi switching pada relai mekanik lebih rendah daripada SSR. Dalam proses uji coba, relai mekanik hanya mampu mencapai frekuensi 100 Hz saja sedangkan SSR mampu mencapai frekuensi 500 Hz. Walaupun nilai 100 Hz adalah nilai yang cukup mendekati dengan spesifikasi yang diinginkan sistem ini, namun pencapaian frekuensi 100 Hz sangat membebani kinerja relai mekanik ditambah lagi aktuator yang memanas dengan peralihan switching yang sangat cepat dan adanya kebisingan jika menggunakan relai mekanik. Sedangkan pada SSR tidak dihasilkan kebisingan sebab prinsip kerja SSR yang menggunakan sistem optis. Selain itu, tidak ada efek gravitasi, getaran, atau kejutan (shocking) pada SSR **(Verma, dkk, 2015)**.

Karena penelitian ini menginginkan terdapat variasi nilai tegangan masukan, sehingga gelombang kotak yang masuk pada sisi primer ignition coil merupakan gelombang kotak yang dapat divariasikan besar tegangannya. Variasi besar tegangan masukan ke ignition coil ini diperoleh dari sistem buck-boost converter. Buck-boost converter disuplai oleh keluaran power supply 12 V/5 A. Pada proses ini, bentuk tegangan yang keluar dari buck-boost converter

masih berupa tegangan DC konstan yang nilainya berkisar antara 0 V – 30 V. Setelah variasi tegangan berhasil diperoleh dari buck-boost converter, variasi tegangan ini kemudian akan masuk pada terminal switching yang diatur oleh SSR. Sehingga tegangan yang masuk pada bagian primer ignition coil merupakan tegangan yang dapat divariasikan dengan bentuk gelombang kotak hasil pemutusan dan penyambungan terminal akibat proses switching.

Pada tahap ini, tegangan masukan berupa gelombang kotak dengan nilai yang dapat divariasikan telah berhasil dirancang dan dijelaskan. Selanjutnya penjelasan akan berfokus pada bagaimana gelombang impuls terbentuk. Secara umum, gelombang tegangan tinggi impuls terbentuk karena proses step-up gelombang kotak yang masuk pada sisi primer ignition coil. Tegangan tinggi yang dihasilkan berbentuk impuls sebagai akibat dari proses step-up peralihan atau perubahan tegangan secara tiba-tiba pada sisi primer ignition coil. Misalnya ketika digunakan tegangan masukan sebesar 7 V berarti dalam satu periode terdapat setengah gelombang positif bernilai 7 V dan setengah gelombang negatif bernilai 0 V (dengan asumsi duty cycle tepat 50%).

Dengan contoh yang sama, untuk satu kali proses switching pada sisi primer ignition coil terdapat satu kali peralihan atau perubahan tegangan dari fase off ke on atau 0 V ke 7 V sebelum pada akhirnya kembali lagi ke 0 V dan siklus kembali berulang. Saat tegangan masukan bernilai 7 V, kumparan sisi primer akan menghasilkan medan magnet statis. Akan tetapi, kumparan primer belum dapat menginduksi kumparan sekunder karena syarat dari terjadinya induksi elektromagnetik adalah adanya perubahan intensitas medan magnet. Maka dari itu, perlu dilakukan perubahan intensitas medan dengan cara melepas tegangan masukan. Ketika tegangan masukan dilepas, maka akan terjadi induksi elektromagnetik pada kumparan sekunder sehingga dihasilkan arus listrik. Karena tegangan masukannya berupa gelombang kotak, maka tegangan keluarannya berbentuk impuls sebagaimana lazimnya ignition coil bekerja. Perubahan tegangan masukan dari 0 V menjadi 7 V kemudian setelah beberapa saat kembali lagi ke 0 V menghasilkan satu gelombang impuls bertegangan tinggi pada sisi sekunder ignition coil.

Pada rangkaian seperti yang ditunjukkan Gambar 6, digunakan komponen kapasitor sebesar 0,25 μ F. Penggunaan kapasitor di sistem ignition coil diperlukan karena dua alasan. Yang pertama, kapasitor dapat mencegah dampak dari back emf (electromotive force) yang dapat merusak sistem switching. Ketika switch dari kondisi close diubah menjadi open, akan ada back emf yang dihasilkan oleh ignition coil. Back emf menghasilkan arus yang bergerak berlawanan arah. Arus akan selalu mencari jalur yang bisa dialiri dengan mudah. Arus ini berpotensi merusak sistem switching berupa arcing pada komponen switching. Untuk mengatasinya, komponen switching (dalam hal ini SSR) diparalelkan dengan kapasitor. Dengan demikian, arus akan masuk ke kapasitor. Alasan kedua yaitu kapasitor dapat membantu menyediakan energi dalam proses induksi elektromagnetik. Dari kedua alasan tersebut, cukup jelas bahwa peran kapasitor 0,25 μ F pada sistem sangat signifikan.

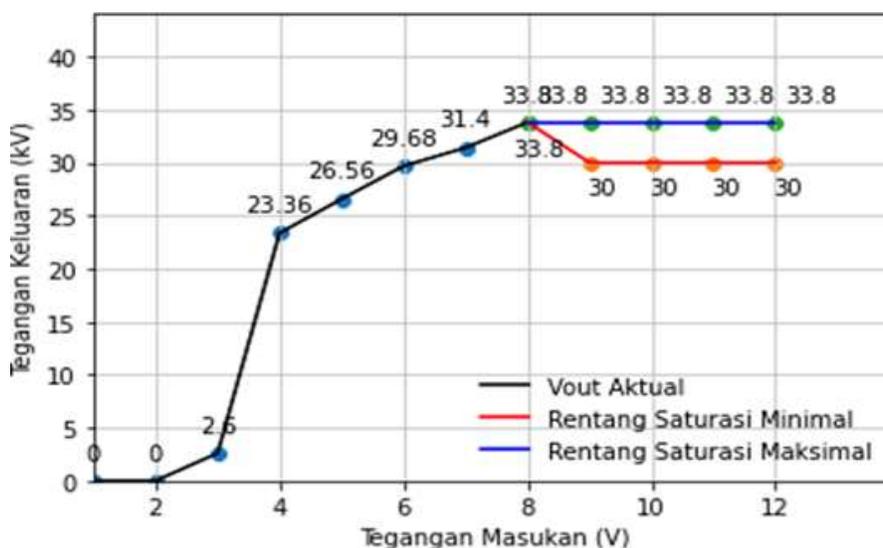
Setelah melalui proses step-up pada ignition coil, maka terbentuklah gelombang tegangan tinggi impuls. Gelombang ini dapat diamati dengan menggunakan osiloskop. Sedangkan wujud fisis hasil pembangkitan tegangan tinggi impuls dapat diamati pada kedua ujung elektroda jarum yang menghasilkan bunga api (sparking). Elektroda yang digunakan adalah elektroda jarum berbahan iron chromium aluminum dengan jarak antara terminal tegangan tinggi dan terminal ground sebesar 2 mm. Tegangan tinggi impuls yang dihasilkan dari proses step-up pada ignition coil dapat diamati pada Tabel 1. Pengambilan data dilakukan sebanyak dua belas kali dengan rentang tegangan masukan bernilai 1 – 12 V. Tegangan impuls yang tertangkap pada layar osiloskop diatur sebanyak 5 buah spektrum. Dari kelima spektrum tersebut didapatkan tegangan keluaran rata-rata. Selain itu, dari data pada Tabel 1 didapatkan grafik

pada Gambar 9 yang menggambarkan hubungan antara tegangan masukan dan tegangan keluaran yang dihasilkan melalui proses step-up pada ignition coil.

Tabel 1. Data masukan dan keluaran pembangkitan tegangan tinggi impuls

Tegangan Masukan DC (V)	Spektrum Tegangan Keluaran (kV)					Rata-Rata (kV)	Bunga Api (Sparking)
	S1	S2	S3	S4	S5		
1	-	-	-	-	-	-	Tidak ada
2	-	-	-	-	-	-	Tidak ada
3	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	Ada
4	30	28,6	14	32,2	12	23,36	Ada
5	26,8	25,6	26,8	26,8	26,8	26,56	Ada
6	32,2	32,2	32,2	32,2	19,6	29,68	Ada
7	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	Ada
8	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8	33,8	Ada
9	Saturasi Pembacaan 30 - 33,8 kV						Ada
10	Saturasi Pembacaan 30 - 33,8 kV						Ada
11	Saturasi Pembacaan 30 - 33,8 kV						Ada
12	Saturasi Pembacaan 30 - 33,8 kV						Ada

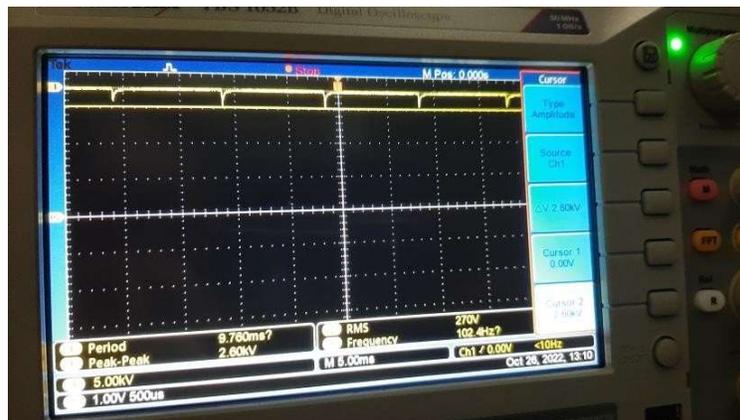
Pengambilan data dilakukan menggunakan osiloskop digital merek Tektronix seri TBS1052B yang dilengkapi probe tegangan tinggi dengan penguatan 1:1000. Dalam pengambilan data, batas pengukuran tegangan pada osiloskop diatur pada nilai 5 V/Div (maksimal). Variasi tegangan masukan 1 V dan 2 V belum memberikan hasil keluaran termasuk bunga api.



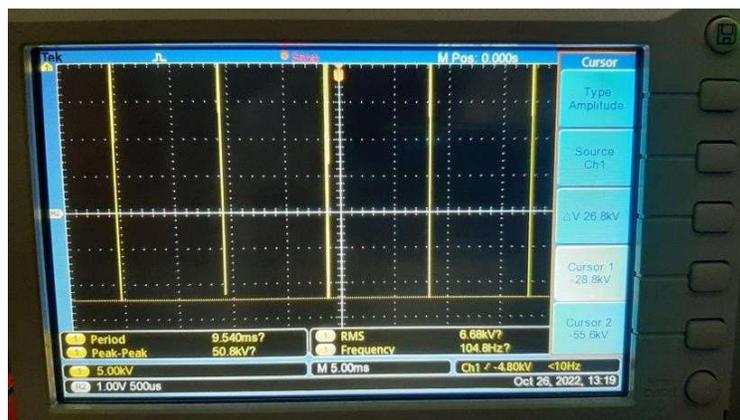
Gambar 9. Grafik korelasi tegangan masukan dan keluaran ignition coil

Pada variasi ketiga hingga kedua belas, gelombang impuls keluaran dapat tertangkap pada layar osiloskop. Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12 merupakan contoh tampilan layar

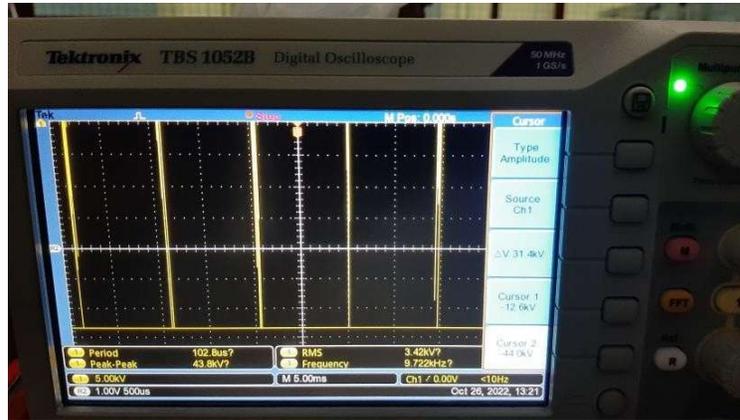
osiloskop pada saat tegangan masukan bernilai 3 V, 5 V, dan 7 V. Pada variasi ketiga dengan tegangan masukan bernilai 3 V akan menghasilkan rata-rata tegangan impuls keluaran sebesar 2,6 kV. Pada variasi keempat hingga keenam dengan tegangan masukan yang diberikan bernilai 4 V, 5 V, dan 6 V rata-rata tegangan impuls keluaran yang dihasilkan sudah mencapai nilai >20 kV yaitu bernilai 23,36 kV, 25,76 kV, dan 29,68 kV. Pada variasi keempat hingga keenam ini tegangan impuls keluaran yang dihasilkan meningkat cukup signifikan dibandingkan dengan tegangan impuls keluaran pada variasi ketiga. Pada variasi ketujuh dan kedelapan, dengan tegangan masukan 7 V dan 8 V tegangan impuls keluaran yang dihasilkan sudah mencapai 30 kV yaitu bernilai 31,4 kV dan 33,8 kV. Pada variasi ini, tujuan penelitian yang menginginkan tegangan tinggi impuls 31,4 kV sudah dapat terwujud dengan mengatur besar tegangan masukan DC sebesar 7 V. Pada variasi kesembilan hingga kedua belas dengan nilai tegangan masukan 9 V hingga 12 V menghasilkan tegangan impuls keluaran dengan rentang nilai yang relatif sama yaitu berkisar antara 30 – 33,8 kV. Dari sisi munculnya bunga api atau sparking, pada variasi pertama dan kedua tidak muncul bunga api pada sela elektroda. Kemudian, pada variasi ketiga hingga kedua belas pada sela elektroda muncul bunga api secara konsisten. Beberapa hasil pengujian bunga api ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 10. Tampilan gelombang impuls dengan tegangan keluaran rata-rata 2,6 kV dan masukan 3 V



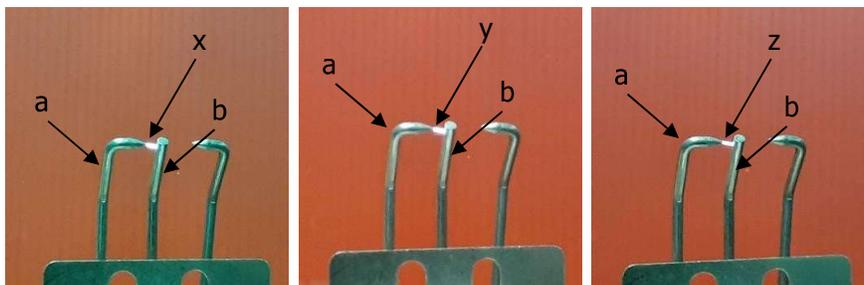
Gambar 11. Tampilan gelombang impuls dengan tegangan keluaran rata-rata 26,56 kV dan masukan 5 V



Gambar 12. Tampilan gelombang impuls dengan tegangan keluaran rata-rata 31,4 kV dan masukan 7 V

Dari data pengukuran tersebut, didapatkan hubungan antara tegangan masukan dan tegangan keluaran hasil proses step-up pada ignition coil yang digambarkan melalui grafik pada Gambar 9. Berdasarkan grafik tersebut, dapat dilihat bahwa saat variasi pertama dan kedua gelombang impuls keluaran masih belum tertangkap karena energi listrik belum cukup kuat untuk membuat lucutan dari terminal tegangan tinggi ke terminal ground. Saat diberikan tegangan masukan 3 V hingga 8 V tegangan impuls keluaran berangsur-angsur meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan masukan, dengan kata lain tegangan masukan tersebut sebanding dengan tegangan impuls yang dihasilkan dengan karakteristik terjadi lonjakan signifikan pada tegangan masukan 3 V ke 4 V serta hubungan masukan-keluaran yang sebanding namun tidak linear. Kemudian, saat diberi tegangan masukan 9 V hingga 12 V tegangan impuls keluaran yang dihasilkan mengalami saturasi pembacaan pada interval 30 – 33,8 kV. Perlu diketahui bahwa, saturasi ini bersifat saturasi dalam pembacaan bukan saturasi yang diartikan sebagai jenuhnya dan sudah tidak dapat meningkatnya suatu besaran. Hal ini disebabkan karena keterbatasan pada alat pengukuran dimana osiloskop Tektronix seri TBS1052B hanya mampu menangkap gelombang keluaran dengan batas pengukuran 5 V/Div, sehingga spektrum yang tertangkap di atas batas tersebut tidak dapat ditampilkan secara utuh dan berakibat pada parameter pengukuran yang diinginkan menjadi terbatas (terpotong). Dengan kata lain, jika keterbatasan pengukuran tersebut dapat diatasi, maka tentunya untuk tegangan masukan di atas 8 V akan diperoleh hasil keluaran tegangan tinggi di atas 33,8 kV dan penelitian dapat lebih tereksplorasi pada tegangan yang lebih tinggi lagi.

Berdasarkan Tabel 1, terdapat data kualitatif yang menunjukkan ada atau tidaknya bunga api (sparking) yang muncul ketika proses pembangkitan. Data tersebut diperjelas dengan beberapa dokumentasi hasil pengujian sebagai berikut.



Gambar 13. Pengujian bunga api tegangan masukan 3 V, 5 V, dan 7 V (berurutan dari kiri)

Gambar 13 menunjukkan tiga dokumentasi pengujian bunga api untuk tegangan masukan 3 V, 5 V, dan 7 V. Pengujian bunga api dilakukan pada elektroda jarum. Label a menunjukkan bagian elektroda tegangan tinggi sedangkan label b menunjukkan bagian elektroda ground. Sementara itu, untuk label x, y, dan z menunjukkan bunga api (sparking) dari setiap variasi tegangan masukan. Jika diamati, munculnya bunga api pada variasi tegangan masukan 5 V memang terlihat lebih kuat daripada variasi tegangan 3 V. Namun pada variasi tegangan 7 V terlihat lebih lemah daripada variasi tegangan masukan 5 V. Pengamatan secara visual terhadap munculnya bunga api pada elektroda jarum hanya dapat membuktikan bahwa tegangan tinggi impuls berhasil dibangkitkan, namun tidak dapat menunjukkan seberapa detail atau berpengaruhnya variasi tegangan masukan terhadap tegangan keluaran. Sebab, terdapat faktor lain yang menyebabkan mengapa pada variasi tegangan masukan yang lebih tinggi justru menunjukkan bunga api yang lebih lemah. Hal tersebut dikarenakan pada tingkat tegangan yang lebih tinggi memiliki reaksi lucutan yang tinggi pula dan mengakibatkan ujung-ujung elektroda jauh lebih 'terbakar dan gosong' sehingga justru menghambat melompatnya elektron. Permasalahan ini dapat dikompensasi dengan membersihkan ujung-ujung elektroda dengan amplas sehingga dapat memudahkan elektron untuk melompat dan lucutan bunga api dapat lebih kuat teramati. Pengamatan secara kuantitatif terhadap setiap parameter hasil pembangkitan tegangan tinggi akan valid jika diamati melalui pembacaan osiloskop.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang suatu alat yang mampu membangkitkan tegangan tinggi impuls 31,4 kV. Penelitian di bidang pembangkitan tegangan tinggi impuls sebenarnya masih belum sebanyak pembangkitan tegangan lain seperti AC maupun DC. Pembangkitan tegangan tinggi impuls pada penelitian ini memanfaatkan *ignition coil* sebagai trafo penaik tegangan dengan masukan berupa tegangan kotak yang divariasikan nilainya. Pembangkitan tegangan tinggi yang biasanya dihasilkan atau diperoleh dari perangkat-perangkat berukuran besar seperti transformator tegangan tinggi kini mampu dihasilkan oleh perangkat yang lebih kecil berukuran 250 × 350 × 150 mm, dapat menghemat ruang, penggunaan yang mudah, dan juga biaya perancangan yang lebih murah. Tentunya hal ini menjadi suatu keunggulan dari produk hasil penelitian ini. Tegangan tinggi impuls sebesar 31,4 kV dengan nilai pengukuran frekuensi switching 100,5 Hz dapat diperoleh dengan memberikan masukan tegangan DC sebesar 7 V. Tegangan masukan dan keluaran menunjukkan hubungan yang sebanding namun tidak linear dengan lonjakan terbesar dari masukan 3 V ke 4 V. Ditinjau dari data kualitatifnya, kekuatan bunga api yang muncul tidak sebanding dengan kenaikan variasi tegangan masukan dan cenderung terlihat konstan. Pada variasi tegangan masukan yang lebih tinggi belum tentu bunga api yang dihasilkan lebih kuat. Hal ini disebabkan pengaruh reaksi lucutan dengan energi tinggi mampu membakar dan menggosongkan ujung elektroda sehingga menghambat loncatnya elektron dari terminal tegangan tinggi ke terminal ground. Namun demikian, hal tersebut dapat dikompensasi dengan pembersihan ujung terminal elektroda dengan amplas. Hasil yang valid terhadap pengamatan dan pengujian dilakukan dengan menggunakan osiloskop sehingga data yang diperoleh adalah data yang terukur.

DAFTAR RUJUKAN

- Arifin, F., Warsito, A., & Syakur, A. (2011). Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls untuk Aplikasi Pengolahan Limbah Cair Industri Minuman Ringan dengan Teknologi Plasma Lucutan Korona [Skripsi]. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Bernad, D., Syakur, A., & Warsito, A. (2018). Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls Eksponensial Ganda Rangkaian R-C. *Transient*, *7*(4), 1062–1068.
- Firdiansyah, H., D, H. A., & Masruroh. (2014). Rancang Bangun Sistem Pengontrol Suhu Menggunakan Hybrid Kontrol Fase Bertahap dengan Kontrol On-Off Pada Tanur Temperatur Tinggi Berbasis Mikrokontroler ATMEGA16A [Skripsi]. Malang: Universitas Brawijaya.
- Fitriani, I. M. (2020). Kinerja Topologi Flayback pada SMPS (Switch Mode Power Supply). *JUPITER (Jurnal Pendidikan Teknik Elektro)*, *5*(2), 31–43.
- Kareem, P. R. (2011). Transformer. ResearchGate. Diakses dari https://www.researchgate.net/publication/332874982_TRANSFORMER_Working_principle_of_transformer
- Kasri, N. F., & Piah, M. A. M. (2017). A Compact and Reliable Pulse Generator Using Dual 555-Timer IC to Produce PWM Method. *IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, (pp. 100–104).
- Kustiawan, E. (2018). Meningkatkan Efisiensi Peralatan dengan Menggunakan Solid State Relay (SSR) dalam Pengaturan Suhu Pack Pre-Heating Oven (PHO). *STT YUPPENTEK*, *9*(1), 1–6.
- Manik, A., Utami, S., Wibowo, B. S., & Syakur, A. (2020). Simulasi Bentuk Muka Gelombang Impulse Petir pada Generator Impuls RLC dan RC Menggunakan PSim. *JTET (Jurnal Teknik Elektro Terapan)*, *9*(1), 18–24.
- Pasaribu, S. (2019). Kajian Coil Standart dan Racing Terhadap Konsumsi Bahan Bakar pada Mesin 125 CC. *Jurnal Teknik Informatika Kaputama (JTIK)*, *3*(2), 44–52.
- Pramono, W. B., & Fanriadho, M. (2018). Rancang Bangun Electromagnetic Bootstrap Sebagai Gate Driver pada Mosfet. *FT Seminar Nasional Energi & Teknologi (SINERGI)*, (pp. 50–59).
- Pravitasari, C. D. C., Syakur, A., & Setiyono, B. (2018). Perancangan Pengukuran Tegangan Tinggi pada Modul Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls. *Transient*, *7*(4), 1002–1009.
- Sahal, M., & Azizahwati. (2014). Pembuatan Media Rangkaian Dasar Mosfet Sebagai Pengendali Motor [Skripsi]. Pekanbaru: Universitas Riau.
- Syamsuri, T. U. (2016). Merancang dan Membuat Modul Input Analog PLC Kecil untuk Sensor Analog. *SENTIA*, *8*(2), 82–85.

- Verma, N., Gupta, K., & Mahapatra, S. (2015). Implementation Of Solid State Relays For Power System Protection. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 4(06), 65– 70.
- Wicaksono, A., Winarto, I., & Rahmatullah, D. (2019). Rancang Bangun Perbandingan Buck Boost Converter dan Cuk Converter untuk Penstabil Tegangan pada Sistem Wind Turbine dengan Monitoring IoT (Internet of Things). *Seminar Sains Nasional dan Teknologi*, (pp. 66–71).
- Yaqin, F. A., Rahmawati, D., Ibadillah, A. F., & Wibisono, K. A. (2021). Perancangan Power Supply Switching dengan Power Factor Correction (PFC) untuk Mengoptimalkan Daya Output dan Pengaman Proteksi Hubung Singkat. *Jurnal Arus ElektroIndonesia (JAEI)*, 7(2), 42–45.
- Yusmartato, & Nasution, R. (2020). Menentukan Parameter Generator Impuls Untuk Gelombang Impuls Petir. *Journal of Electrical Technology*, 5(3), 128.