

**DESAIN RANGKAIAN PELIPAT TEGANGAN 6 kV MARX
GENERATOR EMPAT TINGKAT SEBAGAI CATU TEGANGAN
GENERATOR SURJA**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar sarjana teknik



**TEGUH VIO PIKALOKA
NIM. 145060300111008**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**



LEMBAR PENGESAHAN
DESAIN RANGKAIAN PELIPAT TEGANGAN 6 kV MARX
GENERATOR EMPAT TINGKAT SEBAGAI CATU TEGANGAN
GENERATOR SURJA

SKRIPSI
TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar sarjana teknik



TEGUH VIO PIKALOKA
NIM. 145060300111008

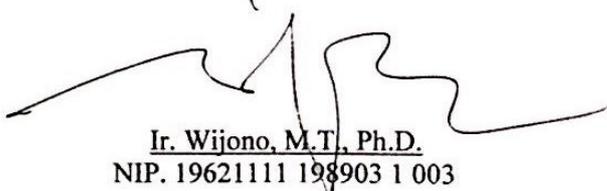
Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 17 Mei 2018

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Elektro



Hadi Susanto, S.T., M.T., Ph.D., IPM
NIP. 19730520 200801 1 013

Dosen Pembimbing



Ir. Wijono, M.T., Ph.D.
NIP. 19621111 198903 1 003



JUDUL SKRIPSI:

DESAIN RANGKAIAN PELIPAT TEGANGAN 6 kV *MARX GENERATOR* EMPAT
TINGKAT SEBAGAI CATU TEGANGAN GENERATOR SURJA

Nama Mahasiswa : Teguh Vio Pikaloka
NIM : 145060300111008
Program Studi : Teknik Elektro
Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik

KOMISI PEMBIMBING:

Ketua : Ir. Wijono, M.T., Ph.D.

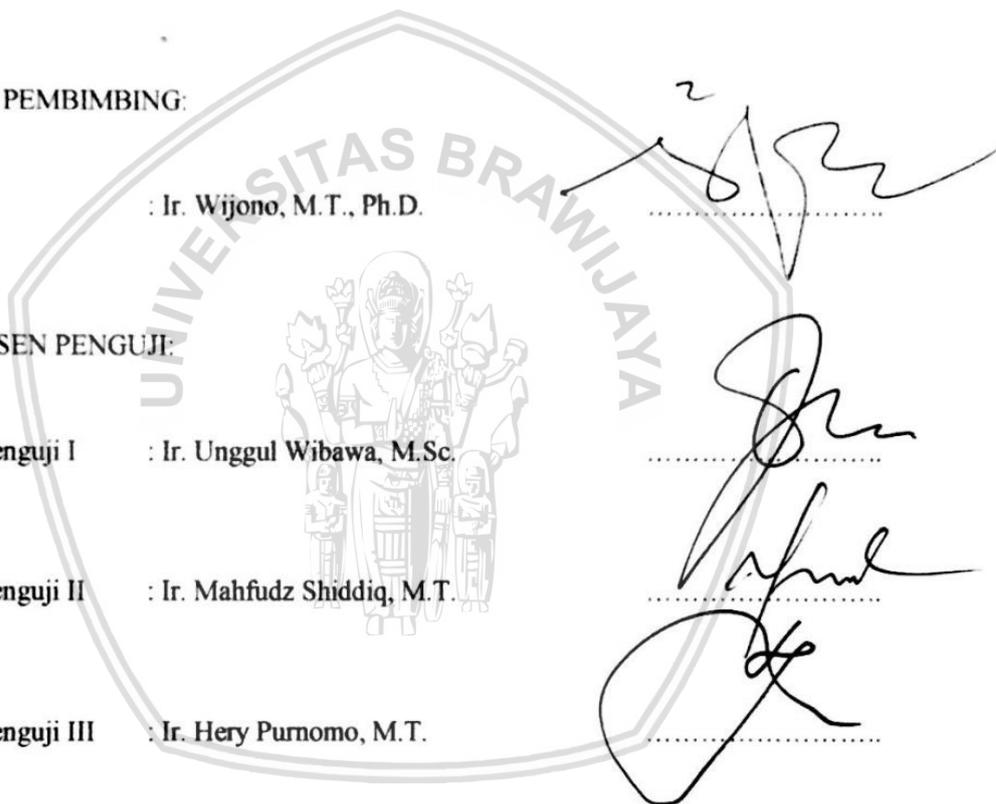
TIM DOSEN PENGUJI:

Dosen Penguji I : Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.

Dosen Penguji II : Ir. Mahfudz Shiddiq, M.T.

Dosen Penguji III : Ir. Hery Purnomo, M.T.

Tanggal Ujian : 23 Maret 2018
SK Penguji : 624/UN10.F07/SK/2018



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 17 Mei 2018

Mahasiswa,



Teguh Vio Pikaloka
NIM. 145060300111008



RIWAYAT HIDUP

Teguh Vio Pikaloka, Malang, 10 Juli 1997 anak dari ayah Teguh Prayitno dan Ibu Dwi Susilowati, SD sampai SMA di Kota Malang lulus SMA tahun 2014, lulus program sarjana Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2018. Pengalaman kerja sebagai asisten laboratorium di Laboratorium Mesin Elektrik Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2016 hingga 2018.

Malang, Maret 2018

Penulis





***Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:
Ayahanda Teguh Prayitno dan Ibunda Dwi Susilowati***



RINGKASAN

Teguh Vio Pikaloka, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Maret 2018, *Desain Rangkaian Pelipat Tegangan 6 kV Marx Generator Empat Tingkat sebagai Catu Tegangan Generator Surja*, Dosen Pembimbing: Wijono.

Marx Generator adalah salah satu jenis rangkaian pelipat tegangan yang terdiri dari resistor, kapasitor dan *spark gap*. Rangkaian ini mampu menghasilkan tegangan *output* berbentuk impuls dengan nilai yang lebih besar dari tegangan *input* DC. Memiliki dimensi yang kecil dan *portable*, komponen yang mudah ditemui di pasaran, serta biaya yang murah menjadi poin utama pada *Marx Generator*. Pada penelitian ini rangkaian *Marx Generator* dirancang dan dibuat untuk mengisi *storage capacitor* pada peralatan pembangkit kombinasi tegangan-arus impuls atau yang biasa disebut dengan generator surja dengan mengikuti standar yang ditetapkan oleh IEC (*International Electrotechnical Commission*) 61000-4-5 kelas 4. *Marx Generator* tersebut dirancang mampu membangkitkan tegangan hingga 6 kV. Generator dibangun menggunakan kapasitor *high voltage* 100nF/3kV yang diparalel dengan resistor 10k Ω /5 Watt dan kemudian disusun menjadi empat tingkat, dimana pada setiap tingkatnya dipasang sebuah *spark gap* berupa baut dengan diameter 5mm dan panjang 6cm. Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan saat rangkaian *Marx Generator* dalam kondisi tanpa beban dan berbeban. Dalam pengujiannya, dibuat variasi jarak pada sela *spark gap* yaitu 0,2 mm, 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm dan 2 mm. Hasil pengujian tanpa beban pada ruangan dengan keadaan udara sembarang, menunjukkan nilai *output* tegangan impuls maksimal yaitu 6,8 kV. Ketika jarak sela dinaikkan, maka nilai tegangan *input* yang dibutuhkan untuk menghasilkan *spark* pertama kali pada sela juga semakin besar. Saat kondisi berbeban *Marx Generator* mampu mengisi *storage capacitor* hingga tegangan 3,7 kV dalam waktu 98 menit.

Kata kunci : Pelipat Tegangan *Marx Generator*, *Spark Gap*, Tegangan *Storage Capacitor*.

SUMMARY

Teguh Vio Pikaloka, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, March 2018, Design of 6 kV Four Stages Voltage Multiplier Marx Generator Circuit as Surge Generator Power Supply, Academic Supervisor: Wijono.*

Marx Generator is one kind of voltage multiplier circuit. It consist of resistors, capacitors and spark gaps. These circuit produces impulse voltages with a value greater than its DC input voltage. Having a small dimension and portable, using common components, and low cost become the main points of Marx Generator. The Marx Generator circuit is designed, manufactured to charge storage capacitors of a impulse current voltage generating devices or so-called surge generators. The surge generator fulfils IEC (International Electrotechnical Commission) standard no 61000-4-5 class 4. The Marx Generator is designed to generate 6 kV voltage. It is constructed of 100nF / 3kV high voltage capacitor in parallel with 10k Ω / 5Watt resistors. The generator is arranged into four levels, where each level equipped with a spark gap made of bolts with diameter 5mm and length of 6cm. In this research the generator output are measured for no load and load conditions. Distance between the spark gap are varied for 0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm and 2 mm. Based on no-load test in room with any air condition, we obtained maximum output impulse voltage at 6.8 kV when the distance is increased, then the value of input voltage become greater to produce first spark in a gap. Meanwhile, when load condition Marx Generator able to fill storage capacitor up to 3,7 kV voltage within 98 minutes.

Keywords : Marx Generator Voltage Multiplier, Spark Gap, Storage Capacitor Voltage

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat, barokah dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Desain Rangkaian Pelipat Tegangan 6 kV *Marx Generator* Empat Tingkat Sebagai Catu Tegangan Generator Surja” ini dengan baik. Skripsi ini disusun dalam rangka untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik, di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Penulisan skripsi ini tidak dapat terselesaikan dengan baik dan lancar tanpa adanya dukungan dan bantuan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Ibunda Tercinta, Dwi Susilowati dan Ayahanda, Teguh Prayitno yang dengan penuh kasih sayang dan kesabaran telah mengasuh, membesarkan, mendidik, memberikan pelajaran hidup yang tak ternilai harganya. Tak lupa dengan adik penulis Dinda Putri Maritsha yang juga turut senantiasa memberi semangat dan dukungan.

Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dan mendukung dalam penyelesaian skripsi ini. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
2. Ibu Ir. Nurussa'adah, M.T. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. selaku KKDK konsentrasi Teknik energi elektrik Teknik Elektro.
4. Bapak Ir. Wijono, M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan bimbingan, ide, nasihat, arahan, motivasi, waktu, serta saran dalam penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Waru Djuriatno, S.T., M.T. selaku dosen yang telah memberikan ide, nasihat, arahan, dan juga saran dalam pembuatan skripsi ini.
6. Semua dosen, pegawai administrasi dan laboran Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya atas segala ilmu, masukan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis.
7. Alumni Teknik Elektro Universitas Brawijaya angkatan 1991 yang telah

- memberi dana bantuan skripsi sehingga menjadi semangat bagi penulis.
8. Teman seperjuangan pengerjaan skripsi yaitu Nola Ribath dan Dony Darmawan, S.T., yang membantu menyelesaikan skripsi ini serta selalu memberi dukungan dan motivasi.
 9. Teman-teman mahasiswa Teknik Elektro angkatan 2014 (DIODA), khususnya konsentrasi (A) Teknik Energi Elektrik.
 10. Rekan-rekan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro periode 2017/2018 khususnya Departemen Kewirausahaan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro periode 2017/2018.
 11. Rekan-rekan Asisten Laboratorium Mesin Elektrik dan Elektronika Proses.
 12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam skripsi ini karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan penelitian. Oleh karena itu saran dan kritik mengenai penelitian ini diharapkan oleh penulis agar penelitian ini dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan berguna. Semoga laporan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, 15 Maret 2018

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR.....	6
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Bidang Kajian Penelitian.....	2
1.5 Manfaat.....	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II.....	5
2.1 Tegangan Impuls.....	5
2.2 Rangkaian Pelipat Tegangan <i>Marx Generator</i>	7
2.2.1 Prinsip Kerja Rangkaian Pelipat Tegangan <i>Marx Generator</i>	8
2.3 <i>Spark Gap</i>	9
2.3.1 Tembus pada <i>Spark Gap</i>	9
2.4 Pengisian <i>Storage Capacitor</i>	10
2.5 Standar <i>Storage Capacitor</i>	13
2.6 <i>Stray Capacitance</i>	14
2.7 Seri dan Paralel Kapasitor	14
BAB III	15
3.1 Diagram Alir Penelitian	15
3.1.1 Penentuan Waktu Pengisian <i>Storage Capacitor</i>	16
3.1.2 Penentuan Tegangan Akhir yang Diharapkan pada <i>Storage Capacitor</i>	16
3.1.3 Penentuan Tegangan <i>Input</i> pada Rangkaian Pelipat Tegangan <i>Marx Generator</i>	17
3.1.4 Penentuan Nilai Komponen Rangkaian <i>Marx Generator</i>	17

3.1.5 Penentuan Tegangan Keluaran Maksimum pada Rangkaian Pelipat Tegangan <i>Marx Generator</i>	18
3.1.6 Perhitungan Banyak Tingkat pada Rangkaian Pelipat Tegangan <i>Marx Generator</i>	18
3.1.7 Pengukuran Tegangan Maksimum pada Pelipat Tegangan <i>Marx Generator</i> dan Waktu Pengisian <i>Storage Capacitor</i>	18
3.2 Target Penelitian	19
3.3 Rencana Pengujian dan Pengambilan Data	19
3.4 Perhitungan dan Analisis.....	19
3.5 Penarikan Kesimpulan dan Saran.....	19
BAB IV	21
4.1 Perancangan Rangkaian Pelipat Tegangan <i>Marx Generator</i>	21
4.2 Pembuatan Rangkaian Pelipat Tegangan <i>Marx Generator</i>	24
4.2.1 Alat dan Bahan Pembuatan <i>Marx Generator</i>	24
4.2.2 Foto Alat <i>Marx Generator</i>	24
4.3 Prosedur Pengujian	25
4.3.1 Prosedur Pengujian Rangkaian <i>Marx Generator</i> Sebelum Dihubungkan <i>Storage Capacitor</i>	25
4.3.2 Prosedur Pengujian <i>Marx Generator</i> dengan Beban <i>Storage Capacitor</i>	25
BAB V	27
5.1 Pengujian Tanpa Beban.....	27
5.1.1 Pengujian Pertama <i>Marx Generator</i> Tanpa Beban.....	27
5.1.2 Pengujian <i>Marx Generator</i> Kedua Tanpa Beban	28
5.2 Pengujian <i>Marx Generator</i> dengan <i>Storage Capacitor</i>	32
5.2.1 Pengujian Pertama <i>Marx Generator</i> dengan <i>Storage Capacitor</i>	32
5.2.2 Pengujian Kedua <i>Marx Generator</i> dengan <i>Storage Capacitor</i>	33
5.3 Pembahasan Perbedaan Hasil Target dan Pengujian	34
5.3.1 Pengujian <i>Marx Generator</i> Tanpa Beban.....	34
5.3.2 Pengujian <i>Marx Generator</i> dengan <i>Storage Capacitor</i>	34
BAB VI	37
6.1 Kesimpulan	37
6.2 Saran	37
DAFTAR PUSTAKA.....	39

DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Standar Bentuk Tegangan Impuls.....	6
Tabel 2.2	Berbagai Jenis Kelas pada Standar IEC 61000-4-5.....	14
Tabel 4.1	Alat dan Bahan Pembuatan <i>Marx Generator</i>	24
Tabel 5.1	Hasil Pengujian <i>Marx Generator</i> Tanpa Beban.....	30
Tabel 5.2	Hasil Perhitungan dan Pengujian Tegangan Keluaran Rangkaian <i>Marx Generator</i> Tanpa Beban	34
Tabel 5.3	Hasil Perhitungan dan Pengujian <i>Marx Generator</i> dengan <i>Storage Capacitor</i>	35



DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Jenis-jenis Tegangan Impuls: (a) Impuls Petir; (b) Impuls Hubung Buka; (c) Impuls Terpotong	5
Gambar 2.2	Bentuk Gelombang Impuls Petir	6
Gambar 2.3	Rangkaian <i>Marx Generator</i> Empat Tingkat	7
Gambar 2.4	Rangkaian pengali tegangan <i>Marx Generator</i> Empat Tingkat: (a) Pengisian muatan; (b) Pelepasan muatan.....	9
Gambar 2.5	(a) Rangkaian Pengisian Kapasitor Dengan Kapasitor Lain; (b) Grafik Tegangan Terhadap Waktu untuk Pengisian Kapasitor dengan Kapasitor Lain; (c) Grafik Tegangan Terhadap Waktu untuk Pengisian Kapasitor Dengan Penyearahan Tegangan AC Menjadi DC	12
Gambar 2.6	Rangkaian Pembangkit Kombinasi Tegangan dan Arus.....	13
Gambar 3.1	Diagram Alir Umum Penelitian.....	15
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian	16
Gambar 4.1	Diagram Alir Perancangan <i>Marx Generator</i>	21
Gambar 4.2	Rangkaian <i>Marx Generator</i> Empat Tingkat: (a) Tanpa <i>Storage</i> <i>Capacitor</i> ; (b) Dengan <i>Storage Capacitor</i>	23
Gambar 4.3	Rangkaian <i>Marx Generator</i> Empat Tingkat yang Sudah Dibuat	25
Gambar 4.4	Rangkaian <i>Marx Generator</i> yang Sudah Dicatu Sumber Tegangan	25
Gambar 5.1	Rangkaian <i>Marx Generator</i> Pengujian Pertama Tanpa Beban	27
Gambar 5.2	Rangkaian <i>Marx Generator</i> Pengujian Kedua Tanpa Beban	29
Gambar 5.3	Rangkaian <i>Marx Generator</i> saat <i>Spark Gap</i> Tingkat Pertama Bekerja	30
Gambar 5.4	Grafik Hasil Tegangan Impuls Percobaan <i>Marx Generator</i> Tanpa Beban.....	32
Gambar 5.5	Grafik Pengisian <i>Storage Capacitor</i> Pengujian Pertama	33
Gambar 5.6	Rangkaian <i>Marx Generator</i> Pengujian Kedua dengan <i>Storage</i> <i>Capacitor</i>	33
Gambar 5.7	Grafik Pengisian <i>Storage Capacitor</i> Pengujian Kedua.....	36

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pelipat tegangan *Marx Generator* dikenalkan pertama kali oleh Erwin Otto Marx pada tahun 1924 (Young, 2005). Rangkaian ini menghasilkan tegangan tinggi impuls yang lebih besar dari tegangan input yang disediakan. Hal yang menarik dari rangkaian ini adalah ketika input yang digunakan berbentuk DC, outputnya berbentuk impuls (Huiskamp, 2016). *Marx Generator* merupakan salah satu pengali tegangan tinggi DC yang sering digunakan selain rangkaian *Cockcrof-Walton*, *Villard*, dan *Greinacher*. Rangkaian pengali *Marx Generator* merupakan rangkaian pengali tegangan unik yang menyimpan energi kapasitif yang dibebankan pada tingkat tegangan tertentu dan kemudian dilepaskan dengan cepat ke beban (Carey, 2001).

Salah satu perkembangan dalam pengetahuan mengenai tegangan tinggi yaitu tegangan tinggi impuls. Tegangan impuls adalah tegangan yang naik dalam waktu singkat sekali kemudian disusul dengan penurunan yang relatif lambat menuju nol. Ada tiga bentuk tegangan impuls yang mungkin menerpa sistem tenaga listrik yaitu tegangan impuls petir yang disebabkan oleh sambaran petir, tegangan impuls hubung buka yang disebabkan oleh adanya operasi hubung-buka dan tegangan impuls petir terpotong (Tobing, 2012). Tegangan impuls ini dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan sistem tenaga listrik. Peralatan pembangkit tegangan impuls untuk pengujian peralatan pengaman terhadap sambaran petir sangat dibutuhkan, baik pada saat pengujian maupun pada saat proses perancangan (Muskita, 2013).

Pelipat tegangan *Marx Generator* memiliki kegunaan, salah satunya adalah sebagai pengisian *storage capacitor* pada peralatan pembangkit kombinasi tegangan-arus impuls atau yang biasa disebut dengan generator surja. Generator surja masih tergolong mahal dan jarang ditemukan di Indonesia. Pada penelitian ini, akan dibuat alat pengisian *storage capacitor* pada generator surja yang memiliki energi cukup besar dan diharapkan menghasilkan tegangan hingga orde kilo Volt.

Kendala pengisian *storage capacitor* selama ini penggunaan transformator *step-up*. Transformator *step-up* memiliki berbagai kelemahan diantara lain memiliki dimensi besar,

bobot yang berat, harga yang relatif mahal, dan memiliki berbagai rugi elektrik (Anandi, S.V., 2014). Pelipat tegangan *Marx Generator* diusulkan terhadap permasalahan tersebut. Rangkaian ini memiliki dimensi yang kecil dan ringan sehingga mudah dibawa kemana-mana serta harga yang relatif murah

Pada penelitian ini, rangkaian pelipat tegangan *marx generator* didesain agar dapat mengisi *storage capacitor* hingga tegangan 4kV dalam waktu maksimal 10 detik. Tegangan tinggi impuls yang dihasilkan dapat mencapai 6 kV.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dapat dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana cara merancang dan membuat rangkaian pelipat tegangan *Marx Generator* 6kV empat tingkat yang mampu mengisi *storage capacitor* hingga tegangannya mencapai 4kV dalam waktu maksimal 10 detik.
2. Bagaimana cara menguji rangkaian pelipat tegangan *Marx Generator* tanpa beban dan berbeban.
3. Bagaimana pengaruh jarak sela antar elektroda *spark gap* pada rangkaian *Marx Generator* pada kondisi tanpa beban.

1.3 Tujuan

Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk merancang dan membuat rangkaian pengali tegangan *Marx Generator* 6 kV dengan jarak sela antar elektroda *spark gap* tertentu agar mampu mengisi *storage capacitor* hingga tegangannya mencapai 4 kV dalam waktu maksimal 10 detik.

1.4 Bidang Kajian Penelitian

Bidang kajian dalam penelitian ini adalah tegangan tinggi khususnya pelipat tegangan *Marx Generator*.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah *Marx Generator* yang dibuat dapat digunakan sebagai pelipat tegangan atau catu daya generator surja serta alat lainnya. Rangkaian *Generator* yang dibuat memiliki beberapa kelebihan yaitu ringan, *portable*, berukuran kecil, dan komponen yang relatif murah.

1.6 Sistematika Penulisan

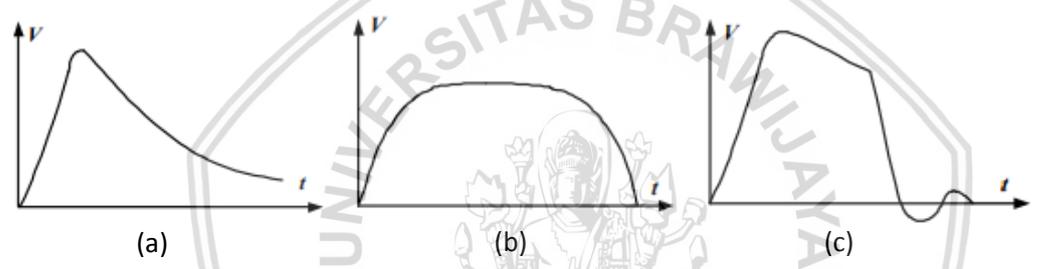
Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- BAB I : PENDAHULUAN**
Berisi latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup permasalahan, tujuan, manfaat, dan sistematika penulisan.
- BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**
Berisi dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian dan untuk mendukung permasalahan yang diungkap.
- BAB III : METODE PENELITIAN**
Berisi penjelasan tentang metode pengujian dan pengambilan data yang diperlukan dalam menyelesaikan penelitian ini.
- BAB IV : PERANCANGAN DAN PEMBUATAN**
Berisi pembahasan, analisis, dan perancangan alat yang diajukan dalam penelitian.
- BAB V : HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN**
Berisi pengujian dan pengambilan data hasil perancangan dan hasil simulasi alat yang kemudian digunakan untuk pembahasan
- BAB VI : PENUTUP**
Berisi kesimpulan dari perancangan dan pengujian alat serta saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tegangan Impuls

Tegangan impuls adalah tegangan yang naik dalam waktu singkat sekali kemudian disusul dengan penurunan yang relatif lambat menuju nol. Ada tiga bentuk tegangan impuls yang mungkin menerpa sistem tenaga listrik yaitu tegangan impuls petir yang disebabkan oleh sambaran petir, tegangan impuls hubung buka yang disebabkan oleh adanya operasi hubung-buka dan tegangan impuls petir terpotong (Tobing, 2012). Bentuk ketiga jenis tegangan impuls tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Jenis-jenis Tegangan Impuls: (a) Impuls Petir; (b) Impuls Hubung Buka; (c) Impuls Terpotong.

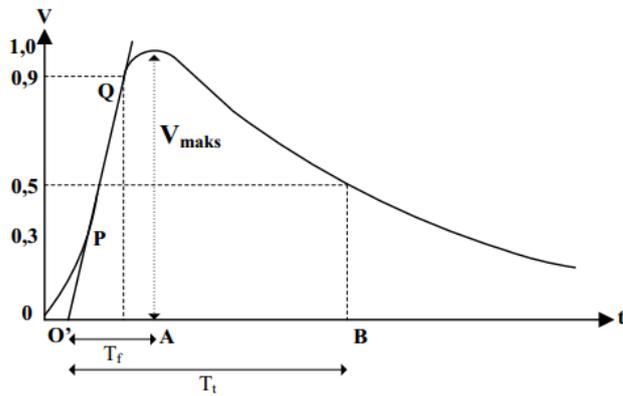
Sumber: Tobing (2012)

Persamaan 2-1 menyatakan bahwa tegangan impuls didefinisikan sebagai suatu gelombang yang berbentuk eksponensial ganda.

$$V = V_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \dots \dots \dots (2-1)$$

dengan:

- V = tegangan impuls,
- V₀ = tegangan keluaran,
- α dan β = konstanta waktu
- t = nilai waktu



Gambar 2.2 Bentuk Gelombang Impuls Petir

Sumber: Hastanto dan Syakur (2011)

Definisi bentuk gelombang impuls pada Gambar 2.2:

1. Bentuk dan waktu gelombang impuls dapat diatur dengan mengubah nilai komponen rangkaian generator impuls.
2. Nilai puncak (*peak value*) merupakan nilai maksimum gelombang impuls.
3. Muka gelombang (*wave front*) didefinisikan sebagai bagian gelombang yang dimulai dari titik nol sampai titik puncak. Waktu muka (T_f) adalah waktu yang dimulai dari titik nol sampai titik puncak gelombang.
4. Ekor gelombang (*wave tail*) didefinisikan sebagai bagian gelombang yang dimulai dari titik puncak sampai akhir gelombang. Waktu ekor (T_t) adalah waktu yang dimulai dari titik nol sampai setengah puncak pada ekor gelombang (Arismunandar, 1984).

Pada tabel 2.1 ditunjukkan standar bentuk gelombang impuls petir yang dipakai oleh beberapa negara.

Tabel 2.1
Standar Bentuk Tegangan Impuls Petir

Standar	$T_f \times T_t$
Jepang	$1 \times 40 \mu s$
Jerman dan Inggris	$1 \times 50 \mu s$
Amerika	$1,5 \times 40 \mu s$
IEC	$1,2 \times 50 \mu s$

Sumber: Arismunandar (1984).

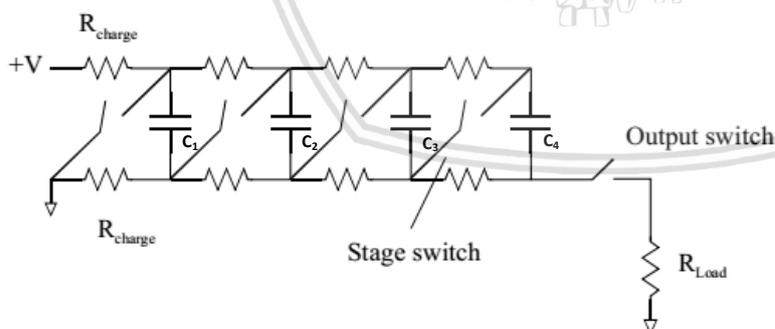
Nilai toleransi waktu muka dan waktu ekor gelombang untuk standar Jepang adalah $0,5 - 2 \mu\text{s}$ dan $35 - 50 \mu\text{s}$, standar Inggris $0,5 - 1,5 \mu\text{s}$ dan $40 - 60 \mu\text{s}$, sedangkan untuk standar Amerika adalah $1,0 - 2,0 \mu\text{s}$ dan $30 - 50 \mu\text{s}$. Untuk tegangan impuls petir berdasarkan standar IEC, penyimpangan waktu muka (T_f) yang ditolerir adalah $\pm 30\%$, sedang penyimpangan waktu ekor (T_r) yang ditolerir adalah $\pm 20\%$ (Arismunandar, 1984).

Alat pembangkit tegangan tinggi impuls di antaranya adalah Generator impuls RLC, Generator impuls RC, dan Generator *Marx* (Hastanto dan Syukur, 2011).

2.2 Rangkaian Pelipat Tegangan *Marx Generator*

Rangkaian *Marx Generator* bekerja dengan cara pengisian kapasitor secara paralel melalui resistor kemudian melepaskannya secara seri melalui *spark gap*. Pelipat tegangan ini dikenalkan pertama kali oleh Erwin Otto Marx pada tahun 1924 (Young, 2005). Rangkaian ini menghasilkan tegangan tinggi impuls yang lebih besar dari tegangan input yang diberikan. Hal yang menarik dari rangkaian ini adalah ketika input yang digunakan berbentuk DC, outputnya berbentuk impuls (Huiskamp, 2016).

Pengali tegangan ini tersusun dari kapasitor, resistor dan *spark gap* yang disusun secara bertingkat seperti pada Gambar 2.3 sehingga mampu menghasilkan tegangan tinggi impuls yang menghasilkan percikan api (Carey & Mayes, 2001). Pada setiap tingkatnya, rangkaian *Marx Generator* terdiri dari dua buah resistor, satu buah kapasitor dan satu buah *spark gap*. (Barsoum, N., 2015).



Gambar 2.3 Rangkaian *Marx Generator* Empat Tingkat.

Sumber: Carey (2001).

Rangkaian kaskade fasa tunggal banyak tingkat (*multistage*) pada Gambar 2.3 merupakan pengembangan dari tipe generator impuls satu tingkat. Rangkaian ini mampu menghasilkan output tegangan impuls hingga n kali jumlah tingkatnya (Huiskamp, 2016). Tegangan pada semua kapasitor adalah nV_{max} , kecuali untuk C_1 dimana hanya V_{in} . Pada

persamaan 2-2 disajikan rumus tegangan output pada rangkaian pelipat tegangan *Marx Generator*.

$$V_o = nV_{in} \dots\dots\dots (2-2)$$

dengan:

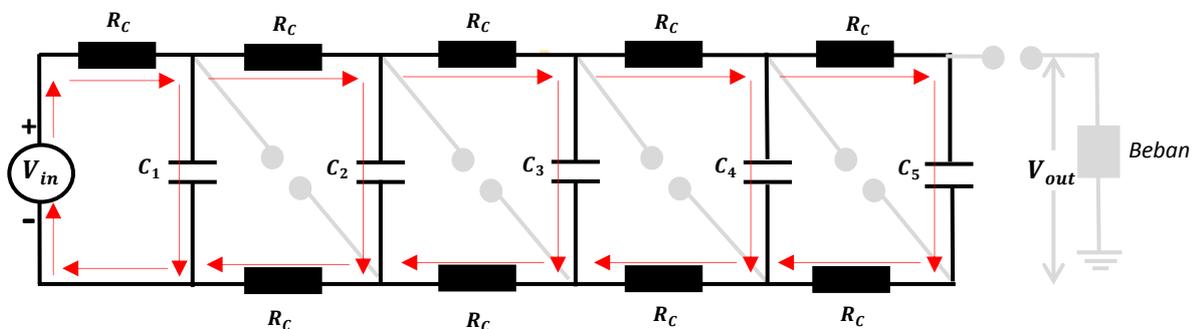
V_o : Tegangan maksimum keluaran *Marx Generator*

n : Banyak tingkatan rangkain *Marx Generator*

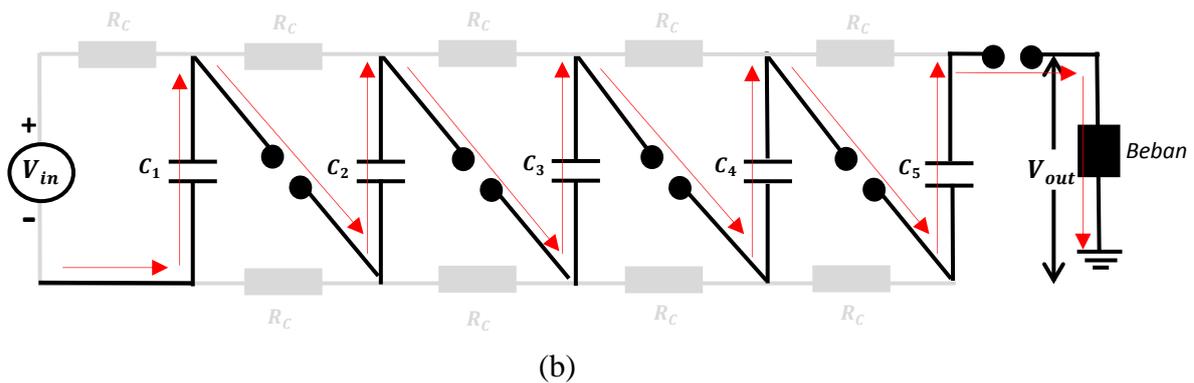
V_{in} : Tegangan input *Marx Generator*

2.2.1 Prinsip Kerja Rangkaian Pelipat Tegangan *Marx Generator*

Marx Generator adalah rangkaian penyimpanan energi kapasitif yang dibebankan pada tingkat tegangan tertentu dan kemudian dilepaskan energinya dengan cepat ke beban pada tingkat daya yang sangat tinggi (Carey, 2001). Prinsip dasar rangkaian pelipat tegangan *Generator* adalah bahwa sumber tegangan DC yang telah diberikan pada rangkaian akan mengisi semua kapasitor secara paralel. Proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.4 (a). Kemudian pada level tegangan tertentu atau ketika V mencapai nilai tegangan tembusnya, maka elektroda *spark gap* akan bekerja / mengalami tembus dan menyebabkan kapasitor pada tingkat pertama akan terhubung secara seri dengan kapasitor tingkat kedua. Begitu pula untuk tingkat selanjutnya. Dalam kondisi ini *spark gap* berfungsi sebagai saklar yang tertutup. Setelah terjadi *spark*, tegangan setiap tingkat akan ditambahkan dengan tingkat berikutnya karena seri. Kapasitor sekarang bekerja seperti sumber tegangan yang diseri sehingga V_{output} akan sama dengan $n \times V_c$. Proses pelepasan muatan ini ditunjukkan pada Gambar 2.4 (b). Dengan mengabaikan *drop* tegangan dan kondisi lingkungan sekitar pengujian, dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan *output* akan sama dengan n kali nilai tegangan *input* (Bangwar, 2016).



(a)



Gambar 2.4 Rangkaian pengali tegangan Marx Generator Empat Tingkat: (a) Pengisian muatan; (b) Pelepasan muatan.

Sumber: Hadi (2016).

2.3 Spark Gap

Spark gap terdiri dari dua elektroda yang keduanya dipisahkan oleh bahan isolasi. Bahan isolasi ini bisa berupa gas, cairan, atau padat, namun gas adalah bahan yang paling banyak digunakan (Simcik & Christensen, 2007).

Pada penelitian dengan bahan isolasi udara, tegangan yang diterapkan di *spark gap*, lebih rendah dari tegangan *breakdown* udara. Ketika perbedaan voltase antara dua elektroda tersebut melebihi nilai tegangan *breakdown* udara tersebut maka terbentuklah percikan listrik yang mengionisasi udara pada gap sehingga menyebabkan tahanan listrik gap tersebut menurun drastis dan membuat arus listrik dapat mengalir hingga ionisasi udara mulai menurun atau mencapai nilai minimum arus yang dapat mengalir yang disebut dengan “ *Holding Current*”. Untuk elektroda *spark gap* yang terpisah berjarak 1 cm dengan tekanan gas 1 atm, tegangan *breakdown* nya 1,3 kV untuk neon, 3,4 kV untuk argon, 12 kV untuk hidrogen, 22,8 kV untuk nitrogen dan 23 kV untuk udara. Nilai ini lebih rendah untuk elektroda runcing (Simcik & Christensen, 2007).

2.3.1 Tembus pada *Spark Gap*

Tegangan tembus (*breakdown*) merupakan suatu peristiwa apabila medan magnet dinaikkan (tegangan terus-menerus dinaikkan), atom-atom udara akan terionisasi dan sampai batas kemampuan isolator tersebut menahan tegangan maka isolator tersebut akan berubah menjadi konduktor. Tegangan tembus terjadi karena terjaidnya ionisasi.

Ion merupakan atom atau gabungan atom yang memiliki muatan listrik, ion terbentuk apabila pada peristiwa kimia suatu atom unsur menangkap atau melepaskan elektron. Proses terbentuknya ion dinamai dengan ionisasi. (Dedy, 2004).

Jika dua elektroda yang dimasukkan dalam media gas dikenakan tegangan V maka akan timbul suatu medan listrik E yang mempunyai besar dan arah tertentu yang akan mengakibatkan elektron bebas mendapatkan energi yang cukup kuat menuju kearah anoda sehingga dapat merangsang timbulnya proses ionisasi. (Arismunandar, 1983). Jika gradien tegangan yang ada cukup tinggi maka jumlah elektron yang diionisasikan akan lebih banyak dibandingkan dengan jumlah ion yang ditangkap molekul oksigen. Tiap-tiap elektron ini kemudian akan berjalan menuju anoda secara kontinu sambil membuat benturan-benturan yang akan membebaskan elektron lebih banyak lagi. Ionisasi karena benturan ini merupakan proses dasar yang penting dalam kegagalan udara atau gas.

Proses kegagalan dalam gas ditandai dengan adanya percikan secara tiba-tiba, percikan ini dapat terjadi karena adanya pelepasan yang terjadi pada gas tersebut. Mekanisme kegagalan gas yang disebut percikan adalah peralihan dari pelepasan tak bertahan sendiri ke berbagai pelepasan yang bertahan sendiri. (Arismunandar, A, 1983). Proses dasar yang paling penting dalam kegagalan gas adalah proses ionisasi karena benturan, tetapi proses ini tidak cukup untuk menghasilkan kegagalan. Proses lain yang terjadi dalam kegagalan gas adalah proses atau mekanisme primer dan proses atau mekanisme sekunder. Proses yang terpenting dalam mekanisme primer adalah proses katoda, pada proses ini diawali dengan pelepasan elektron oleh suatu elektroda yang diuji, peristiwa ini akan mengawali terjadinya kegagalan percikan (*spark breakdown*). Elektroda yang memiliki potensial rendah (katoda) akan menjadi elektroda yang melepaskan elektron. Elektron awal yang dibebaskan (dilepaskan) oleh katoda akan memulai terjadinya banjir elektron dari permukaan katoda. Jika jumlah elektron yang dibebaskan makin lama makin banyak atau terjadinya peningkatan banjir. Dan elektron-elektron tersebut akan membentuk suatu jembatan konduktor yang biasa disebut dengan *spark*.

2.4 Pengisian *Storage Capacitor*

Terdapat dua cara dalam pengisian *storage capacitor* yaitu pengisian dengan penyearahan tegangan tinggi arus bolak-balik (AC) dan pengisian dengan kapasitor lain (*flash charging*). Kedua cara tersebut memiliki syarat utama agar dapat mengisi *storage capacitor* yaitu potensial kedua sumber tersebut harus lebih besar daripada potensial *storage capacitor*. Hal tersebut bertujuan agar arus dapat mengalir dari potensial tinggi ke potensial yang lebih rendah.

Pengisian *storage capacitor* yang pertama adalah dengan penyearahan tegangan arus bolak-balik (AC) yang berasal dari transformator *step-up* menjadi tegangan arus searah (DC). Namun cara ini memiliki berbagai kekurangan khususnya pada transformator. Transformator *step-up* memiliki berbagai kelemahan yaitu harga yang mahal, berat yang besar, dimensi yang lebar, dan memiliki berbagai rugi-rugi elektik.

Pengisian yang kedua adalah dengan kapasitor lain yang memiliki tegangan lebih tinggi. Cara ini memiliki keunggulan dalam waktu pengisian. Untuk tegangan yang sama pengisian dengan kapasitor lebih cepat daripada pengisian menggunakan rangkaian cara pertama seperti pada grafik tegangan terhadap waktu Gambar 2.5 (b), karena kapasitor memiliki karakteristik cepat melepaskan muatan. Grafik tegangan terhadap waktu untuk pengisian kapasitor dengan cara pertama dapat dilihat pada Gambar 2.5 (c).

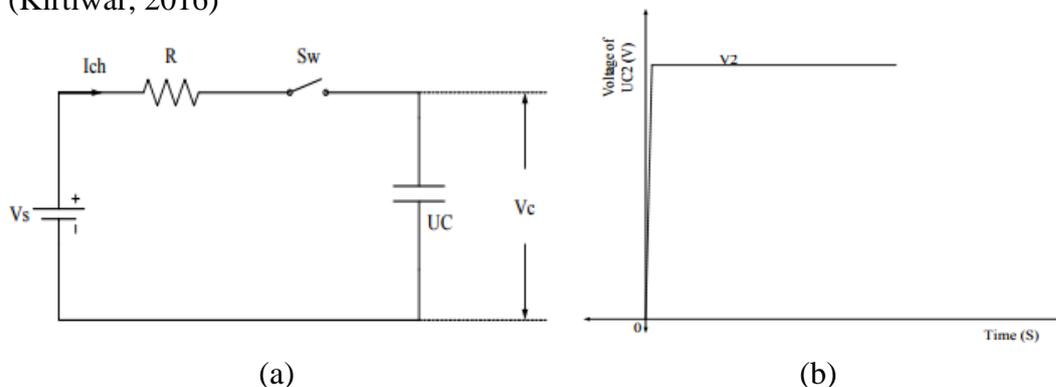
Perhitungan waktu pengisian kapasitor pada dengan sumber arus searah didapatkan dari Persamaan 2-3 yang berasal dari analisis rangkaian RC. Ketika sakelar sw terbuka seperti pada Gambar 2.5 (a) maka tidak ada muatan yang tersimpan pada kapasitor, oleh karena itu tegangan pada kapasitor adalah nol. Ketika sakelar sw tertutup maka Persamaan tegangan terhadap waktu pengisian diberikan:

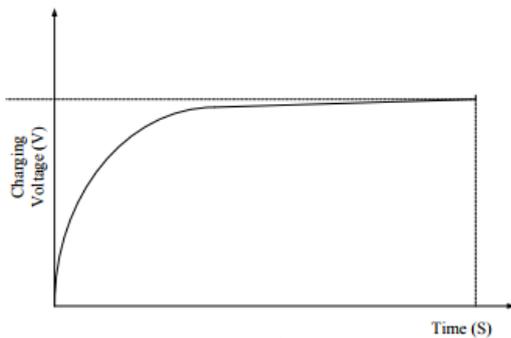
$$V_c(t) = V_{maks} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \dots \dots \dots (2-3)$$

dengan:

- $V_c(t)$: Tegangan pada *storage capacitor* (Volt)
- V_{maks} : Nilai tegangan *input* (Volt)
- C : Nilai kapasitansi pada kapasitor pelipat (F)
- R : Nilai resistansi pada resistor (Ω)
- t : Waktu pengisian *storage capacitor*.

(Kirtiwar, 2016)





(c)

Gambar 2.5 (a) Rangkaian Pengisian Kapasitor dengan Kapasitor Lain; (b) Grafik Tegangan Terhadap Waktu untuk Pengisian Kapasitor dengan Kapasitor Lain; (c) Grafik Tegangan Terhadap Waktu untuk Pengisian Kapasitor dengan Penyearahan Tegangan AC Menjadi DC.

Sumber: Kirtiwar A. (2016)

Persamaan tegangan gambar rangkaian 2.5 (a), ketika saklar tepat setelah tertutup t (0^+), diberikan:

$$\sum v = 0$$

$$V_s - V_R - V_C = 0$$

$$V_s = V_R + V_C$$

$$V_s = i(t) \cdot R + \frac{q(t)}{C}$$

$$\frac{V_s}{R} = i(t) + \frac{q(t)}{RC}$$

$$\frac{V_s}{R} \times \frac{C}{C} = i(t) + \frac{q(t)}{RC}$$

karena $Q_{maks} = V_s \times C$ dan $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$, maka

$$\frac{Q_{maks}}{RC} = \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{RC}$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = \frac{Q_{maks}}{RC} - \frac{q(t)}{RC}$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = \frac{-1}{RC} (q(t) - Q_{maks})$$

$$\frac{dq(t)}{(q(t) - Q_{maks})} = \frac{-dt}{RC}$$

$$\int_0^{q(t)} \frac{dq(t)}{(q(t) - Q_{maks})} = - \int_0^t \frac{dt}{RC}$$

$$\ln \frac{(q(t) - Q_{maks})}{-Q_{maks}} = -\frac{t}{RC}$$

$$\frac{q(t) - Q_{maks}}{-Q_{maks}} = e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$\frac{q(t)}{-Q_{maks}} + 1 = e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$\frac{q(t)}{-Q_{maks}} = e^{\frac{-t}{RC}} - 1$$

$$q(t) = Q_{maks} \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}} \right)$$

$$q(t) \cdot C = Q_{maks} \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}} \right) \cdot C$$

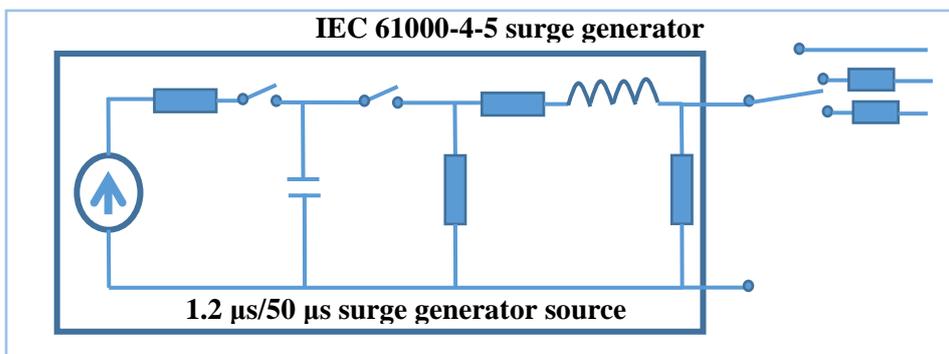
$$V_c(t) = Q_{maks} \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}} \right) \cdot C$$

$$V_c(t) = V_{maks} \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}} \right)$$

2.5 Standar Storage Capacitor

Pembangkit kombinasi tegangan-arus impuls atau generator surja harus mengikuti standar yang ditetapkan yaitu IEC (*International Electrotechnical Commission*) 61000-4-5, Standar ini menetapkan bentuk gelombang tegangan impuls adalah 1.2/50 μ s dan bentuk gelombang arus impuls 8/20 μ s. Parameter-parameter utama yang perlu ditetapkan di dalam perancangan sumber pembangkit arus impuls antara lain adalah waktu muka dan waktu punggung (Muskita, 2013).

Peralatan yang dibutuhkan untuk membentuk gelombang impuls tersebut terdapat pada Gambar 2.6. Terlihat pada Gambar tersebut ada salah satu komponen yang memiliki syarat khusus yaitu nilai rating tegangan dan energi pada komponen *storage capacitor*. Nilai tegangan *storage capacitor* dibagi menjadi berbagai kelas seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.



Gambar 2.6 Rangkaian Pembangkit Kombinasi Tegangan dan Arus.
Sumber: IEC 61000-4-5

Pada Tabel 2.2 terlihat setiap kelas memiliki fungsi masing-masing. Semakin tinggi kelasnya maka level tegangan dan alat yang diuji akan juga semakin besar. Untuk membangkitkan kombinasi tegangan-arus impuls dibutuhkan energi 100 Joule, 200 Joule, dan 360 Joule (Maytum, 2012).

Tabel 2.2
Berbagai Jenis Kelas pada Standar IEC 61000-4-5

Class	Environment	Voltage level
0	Well protected environment, often in a special room	25 V
1	Partially protected environment	500 V
2	Electrical environment where the cables are well separated, even at short runs	1 kV
3	Electrical environment where power and signal cables run in parallel	2 kV
4	Electrical environment where the interconnections include outdoor cables along with the power cable, and cables are used for both electronics and electric circuits	4 kV
5	Electrical environment for electronic equipment connected to telecommunication cables and overhead power lines in a non-densely populated area	Test level 4

Sumber: IEC 61000-4-5

2.6 Stray Capacitance

Stray capacitance atau juga bisa disebut *parasitic capacitance* adalah sebuah kapasitansi yang tidak diinginkan, terjadi diantara dua titik yang berbeda potensial yang pisahkan oleh udara atau isolator. Pada frekuensi rendah *stray capacitance* dapat diabaikan karena nilai yang kecil namun jika pada frekuensi tinggi *stray capacitance* adalah masalah utama.

2.7 Seri dan Parallel Kapasitor

Kapasitor dapat dihubungkan seri maupun parallel, keduanya memiliki kegunaan masing masing. Kapasitor diseri berfungsi untuk menambah rating tegangan, atau mengurangi nilai kapasitansi kapasitor. Kapasitor jika diparalel berguna untuk menambah nilai kapasitansi dan tidak merubah nilai tegangan.

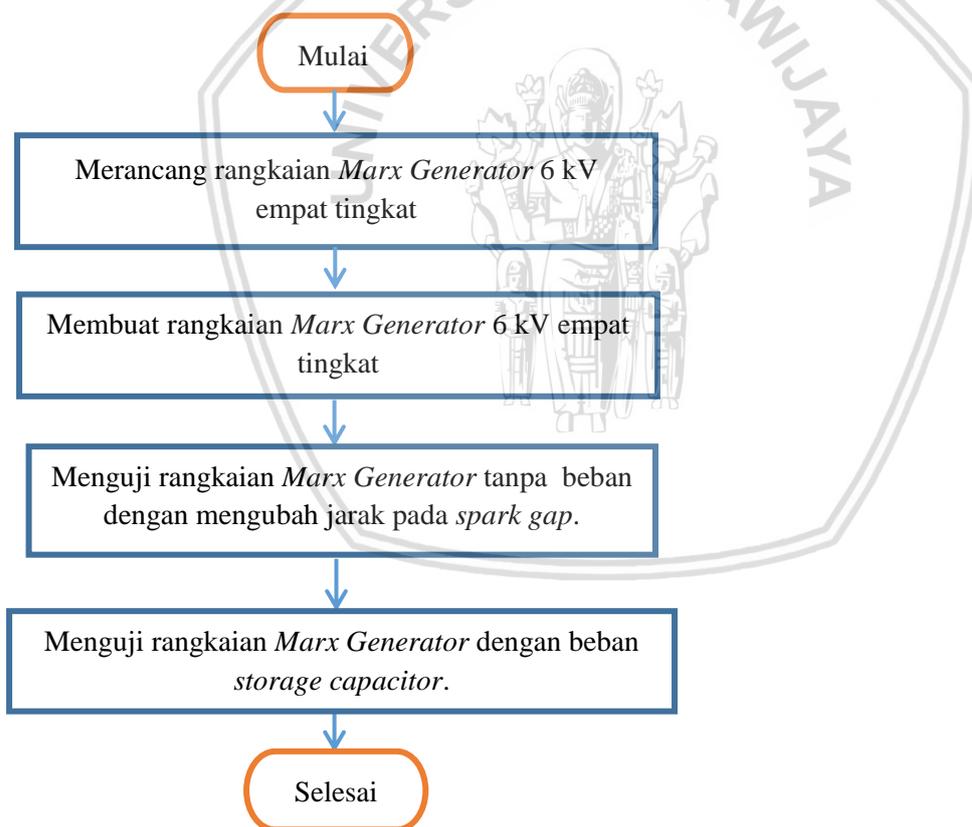
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

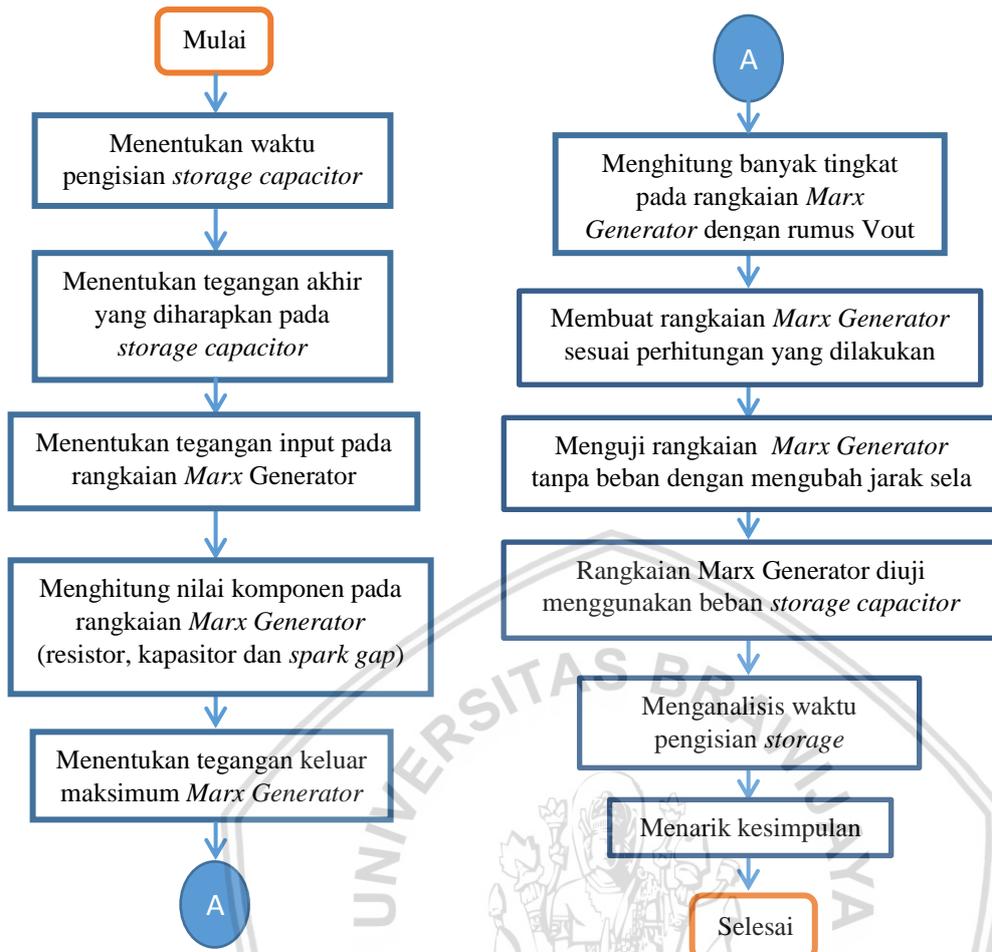
Metodologi penelitian yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah dengan merancang rangkaian *Marx Generator* 6 kV empat tingkat yang dapat mengisi muatan *storage capacitor* dengan waktu maksimal sepuluh detik. Untuk itu langkah-langkah pelaksanaan penelitian ini akan mencakup perancangan dan pembuatan alat, pengujian dan analisis, serta penarikan kesimpulan.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini disajikan pada Gambar 3.2 dan secara umum disajikan dalam Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Umum Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

3.1.1 Penentuan Waktu Pengisian *Storage Capacitor*

Pembangkit impuls kombinasi tegangan dan arus bekerja berulang-ulang dalam waktu yang singkat. Sistem pengisian ini diharapkan dapat mencapai tegangan tersebut dalam waktu maksimal seperti alat yang sudah ada dan memenuhi standar yaitu 10 detik. Alat tersebut yaitu *havely hipotronics 1.2/50us* dan *8/20us Combination Wave Impulse Module*.

3.1.2 Penentuan Tegangan Akhir yang Diharapkan pada *Storage Capacitor*

Penentuan tegangan akhir yang diharapkan pada *storage capacitor* berdasarkan standar pembangkit kombinasi tegangan dan arus impuls. Standar yang dimaksud yaitu IEC (International Electrotechnical Commission) 61000-4-5. Standar ini menetapkan bentuk gelombang tegangan impuls adalah $1.2/50 \mu\text{s}$ dan bentuk gelombang arus impuls $8/20 \mu\text{s}$. Selain bentuk gelombang juga ditetapkan nilai komponen-komponen pembentuk gelombang. Komponen-komponen yang dimaksud adalah kapasitor dan resistor.

Pada penelitian ini dipilih standar kelas 4. Kelas yang dipilih yaitu kelas yang memiliki rating tegangan terbesar dibandingkan kelas yang lain yaitu 4 kV. Dengan

merancang kelas ini maka alat pengisian dapat pula digunakan untuk pengisian kelas yang lain.

3.1.3 Penentuan Tegangan *Input* pada Rangkaian Pelipat Tegangan *Marx Generator*

Tegangan *input* yang digunakan menyesuaikan ketersediaan catu daya di laboratorium. Catu daya ini terdiri dari sumber jala-jala PT. PLN yang terhubung pada AC *voltage regulator* dan *transformator microwave*.

Catu tegangan pada rangkaian pelipat *Marx Generator* berasal dari tegangan arus bolak-balik (AC). Tegangan AC ini akan disearahkan terlebih dahulu menjadi tegangan DC menggunakan penyearah yang sudah tersedia di Laboratorium. Tegangan DC ini dilipatgandakan menjadi tegangan impuls yang lebih tinggi dengan rangkaian *Generator*.

Tegangan maksimal transformator pada Laboratorium adalah 2 kV. Nilai tegangan *input* ini berbanding lurus pada tegangan maksimum kapasitor pelipat yang dibutuhkan, tegangan *output*, serta jumlah tingkat pada rangkaian *Generator*. Oleh karena itu, penulis menggunakan nilai 1,5 kV sebagai tegangan *input Generator*.

3.1.4 Penentuan Nilai Komponen Rangkaian *Marx Generator*

Nilai komponen yang ditentukan yaitu kapasitor pelipat, resistor dan *spark gap*. Kapasitansi kapasitor pelipat yang digunakan berorde sama dengan *storage capacitor*. Hal tersebut bertujuan untuk mengalirkan arus yang cukup besar dari kapasitor pelipat menuju *storage capacitor*.

A. Penentuan Nilai Kapasitor

Kapasitor pelipat yang digunakan memiliki nilai kapasitansi dan nilai tegangan maksimum. Dengan mempertimbangkan nilai kapasitansi dari *storage capacitor*, yaitu 25 μF maka kapasitor yang digunakan juga harus memiliki orde yang sama dengan *storage capacitor*. Jenis kapasitor pelipat tegangan yang digunakan pada rangkaian ini adalah kapasitor tegangan tinggi yang memiliki nilai kapasitansi 10 nF. Sepuluh buah kapasitor akan disusun secara paralel untuk menghasilkan nilai kapasitansi yang lebih besar, sehingga nilai kapasitansi menjadi 100 nF atau 0,1 μF .

Nilai tegangan maksimum pada rangkaian *Marx Generator* bergantung pada tegangan input yang digunakan. Pada penelitian ini, input yang digunakan adalah 1,5 kV. Maka tegangan efektif yang harus dimiliki oleh kapasitor pelipat adalah $\sqrt{2} \times 1,5 \text{ kV}$. Sehingga, kapasitor pelipat yang digunakan adalah 100nF/3kV.

B. Penentuan Nilai Resistor

Resistor yang akan digunakan memiliki nilai resistansi dan daya yang harus ditentukan. Berdasarkan jurnal yang ditulis oleh M.S Naidu dan V. Kamaraju pada tahun 2009 resistor yang digunakan memiliki *range* nilai resistansi antara 10 Ω sampai 100 k Ω . Penulis menggunakan resistor yang memiliki resistansi 10 k Ω dengan pertimbangan agar tidak terjadi peluahan muatan karena nilai resistansi yang terlalu kecil serta agar mempercepat pengisian *storage capacitor* karena resistansi yang tidak terlalu besar.

Penentuan nilai daya resistor adalah berdasarkan analisis rangkaian elektrik menggunakan Laplace yang dijabarkan pada Lampiran 3. Nilai daya maksimal berdasarkan perhitungan adalah 0,003979 Watt. Pada penelitian ini penulis menggunakan resistor yang memiliki nilai resistansi 10 k Ω dengan daya maksimum 5 Watt.

C. Penentuan Spark Gap

Spark gap yang digunakan berupa dua elektroda baut yang keduanya dipisahkan oleh bahan isolasi berupa gas (udara). Elektroda baut yang digunakan untuk *spark gap* pada penelitian ini memiliki diameter 5 mm dengan panjang 5 cm dan 6 cm.

3.1.5 Penentuan Tegangan Keluaran Maksimum pada Rangkaian Pelipat Tegangan Marx Generator

Tegangan keluaran yang dihasilkan rangkaian *Marx Generator* berbentuk impuls yang sangat singkat. Nilai tegangan keluaran maksimum yang diharapkan pada rangkaian pelipat tegangan ini adalah 6 kV.

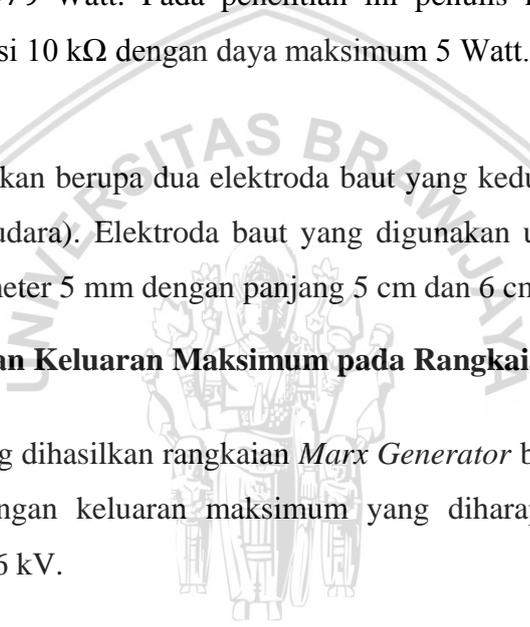
3.1.6 Perhitungan Banyak Tingkat pada Rangkaian Pelipat Tegangan Marx Generator

Berdasarkan nilai tegangan *input* dan tegangan maksimum diatas, maka banyak tingkat dari rangkaian pelipat tegangan *Marx Generator* dapat ditentukan. Penentuan ini dengan menganggap komponen-komponen penyusun ideal. Penentuan komponen ideal dikarenakan tidak tersedianya datasheet pada komponen yang digunakan.

Pada penelitian ini, sumber catu tegangan yang digunakan adalah 1,5 kV, maka untuk mencapai 6 kV diperlukan empat tingkat sesuai persamaan 2-2 yaitu $V_o = n \times V_{in}$.

3.1.7 Pengukuran Tegangan Maksimum pada Pelipat Tegangan Marx Generator dan Waktu Pengisian Storage Capacitor

Pengambilan data tegangan maksimum pada *Marx Generator* dilakukan dengan mengubah parameter jarak antar elektroda *spark gap* pada kondisi *Marx Generator* tanpa beban. Pengukuran parameter-parameter tegangan tinggi dapat dilakukan dengan



menggunakan probe tegangan tinggi. Hasil tegangan maksimum pada pelipat tegangan *Marx Generator* dan waktu pengisian *storage capacitor* diukur dengan probe tegangan tinggi yang dihubungkan dengan osiloskop.

3.2 Target Penelitian

Berdasarkan teori yang ada, maka target dalam penelitian ini antara lain:

- 1).Tegangan *output* pelipat tegangan *Marx Generator* pada kondisi tanpa *storage capacitor* adalah 6 kV.
- 2).Durasi waktu pengisian *storage capacitor* maksimum sebesar sepuluh detik.
- 3).Jarak antar elektroda *spark gap* berpengaruh terhadap nilai tegangan tembus pada *spark gap*.

3.3 Pengujian dan Pengambilan Data

Terdapat dua kali pengujian untuk pengambilan data, pengambilan data yang pertama ialah pengambilan data tegangan keluaran maksimum tanpa beban pada tiap tingkatan dengan mengubah jarak *spark gap*. Pengambilan data kedua ialah pengambilan data tegangan maksimum dan durasi waktu pengisian *storage capacitor* 25 μ F.

3.4 Perhitungan dan Analisis

Setelah melakukan pengujian didapat data berupa nilai tegangan *output* maksimum rangkaian *Marx Generator* kondisi tanpa beban dengan variasi jarak antar elektroda *spark gap*. Saat *Generator* diuji menggunakan beban *storage capacitor*, diperoleh nilai tegangan dan durasi waktu pengisian *storage capacitor*. Pada penelitian ini data yang telah didapat dari percobaan tanpa beban dan berbeban dimasukkan ke dalam tabel dan grafik. Data yang diperoleh kemudian dianalisis dan dibahas mengapa terjadi perbedaan tegangan maksimum secara teori dan percobaan jika terjadi perbedaan.

3.5 Penarikan Kesimpulan dan Saran

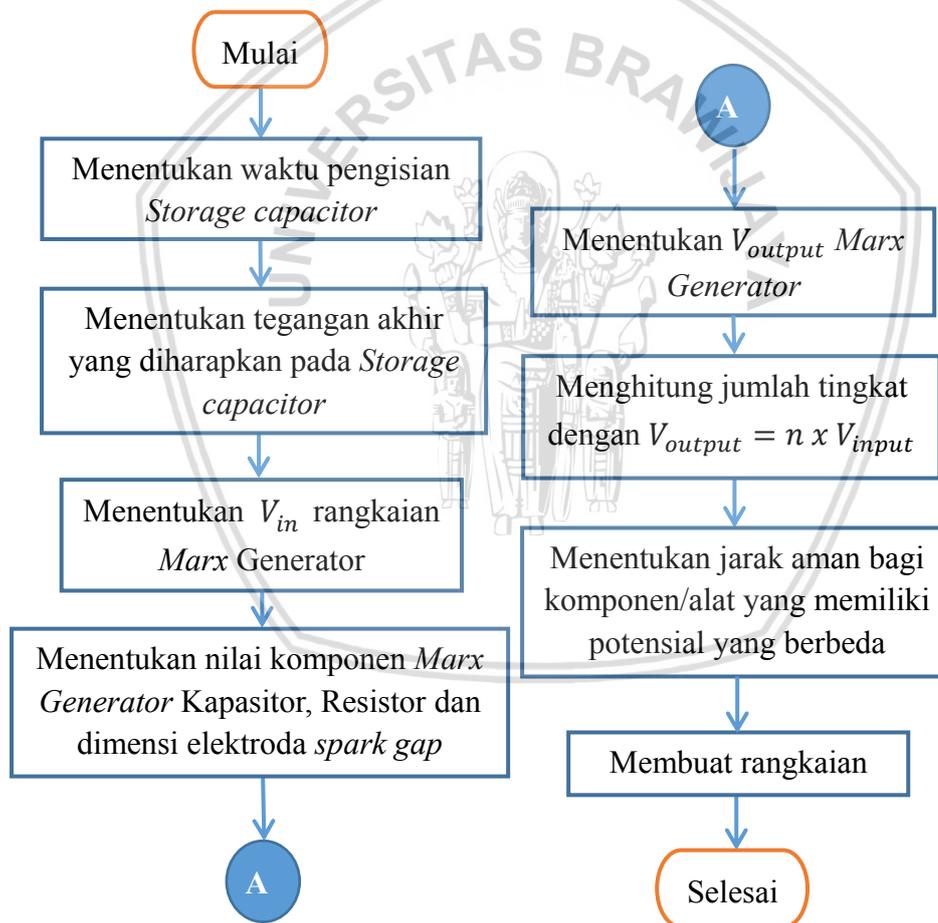
Dari analisis dan pembahasan dapat ditarik suatu kesimpulan yang merupakan intisari dari penulisan skripsi ini dan disertakan pula saran dari penulis untuk mengembangkan penelitian ke depan yang terkait dengan permasalahan ini dan menemukan solusi untuk permasalahan ini.

BAB IV

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN

4.1 Perancangan Rangkaian Pelipat Tegangan Marx Generator

Pada tahap ini, dilakukan perancangan pelipat tegangan tinggi *Marx Generator* untuk mengisi *storage capacitor* dalam waktu pengisian maksimal sepuluh detik. Untuk mencapai target tersebut maka dilakukan perhitungan dan analisis dalam penentuan tegangan input, tegangan output, nilai komponen, serta jumlah tingkat pada rangkaian *Marx Generator*. Urutan perancangan dijelaskan pada diagram alir Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Diagram Alir Perancangan *Marx Generator*

Pembangkit impuls kombinasi tegangan dan arus atau generator surja bekerja berulang-ulang dalam waktu yang singkat, maka sistem pengisian ini diharapkan dapat

mencapai tegangan tersebut dalam waktu maksimal 10 detik. Waktu tersebut diadopsi dari alat uji kombinasi tegangan dan arus impuls yang sudah ada (*havelly hipotronics PIM datasheet*). Pada penelitian ini dipilih standar kelas 4. Standar pada kelas ini menetapkan tegangan *storage capacitor* adalah 4 kV. Kelas ini dipilih karena memiliki *rating* tegangan terbesar dibandingkan kelas yang lain. Dengan merancang kelas ini maka alat pengisian dapat pula digunakan untuk pengisian kelas yang lain. Dari nilai parameter yang telah ditentukan diatas, maka tegangan keluaran maksimum pelipat tegangan dapat pula ditentukan yaitu 6 kV.

Tegangan input yang digunakan untuk mencatu rangkaian *Marx Generator* sebesar 1,5 kV. Catu tegangan ini menggunakan transformator *step up* dengan perbandingan lilitan 220/2000 untuk menaikkan tegangan 165 Volt menjadi 1,5 kV. Untuk mengatur tegangan input 165 Volt maka diperlukan AC *voltage regulator*.

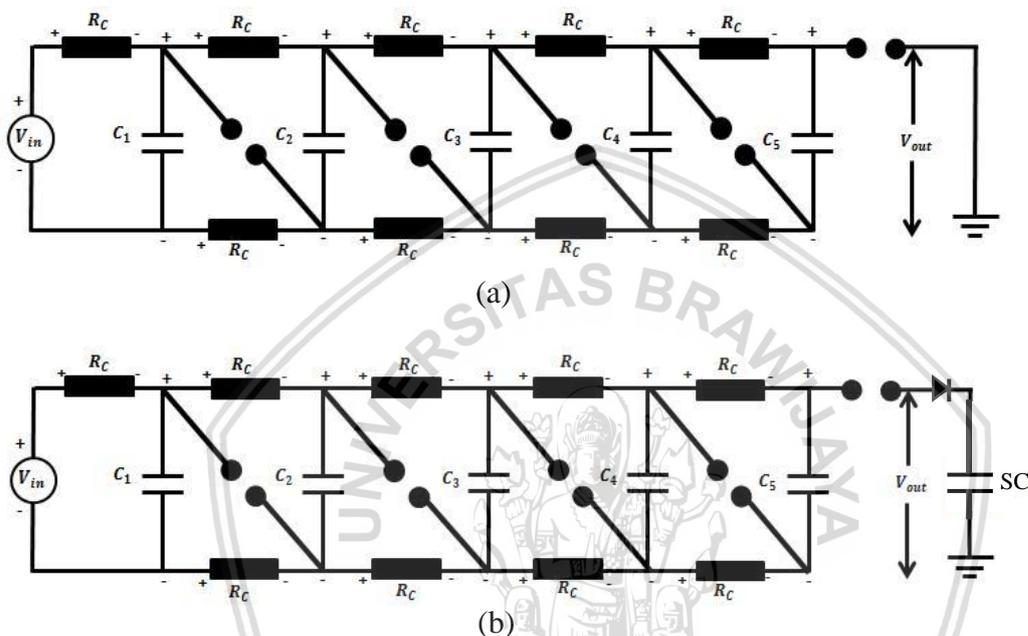
Setelah menentukan nilai tegangan input, maka dilakukan penentuan nilai komponen pada rangkaian *Marx Generator*. Kapasitor pelipat yang digunakan pada rangkaian *Generator* yaitu memiliki nilai kapasitansi minimal 0,1 nF agar tidak terjadi stagnasi tegangan (Babaji,G., 2009). Maka kapasitor pelipat harus memiliki kapasitansi berorde sama dengan *storage capacitor*. Oleh karena itu pada penelitian ini dipilih kapasitor pada rangkaian *Generator* dengan kapasitansi 0.1 μ F dengan tegangan maksimum 3 kV. Dipilih tegangan 3 kV pada setiap kapasitor pelipat karena tegangan masukan DC sebesar 1,5 kV, maka tegangan puncak pada setiap kapasitor $2\sqrt{2}$ kV atau 2,8 kV.

Penentuan nilai komponen yang kedua adalah penentuan nilai resistor pada rangkaian *Marx Generator* yaitu dengan resistansi 10k Ω . Penentuan nilai daya resistor adalah berdasarkan rumus $P = I^2 \times R$. Nilai I yang dimaksud adalah *charging current* dari rangkaian *Generator* yaitu $0,007833e^{-677,12307t}$. Maka pada penelitian ini digunakan resistor yang memiliki daya maksimum 5 Watt.

Spark gap yang digunakan berupa dua elektroda baut yang keduanya dipisahkan oleh bahan isolasi berupa gas (udara). Elektroda baut yang digunakan untuk *spark gap* pada penelitian ini memiliki diameter 5 mm dengan panjang 5 cm dan 6 cm.

Pada penelitian ini sumber catu tegangan yang digunakan adalah 1,5 kV, maka untuk mencapai 6 kV diperlukan rangkaian *Marx Generator* empat tingkat sesuai Persamaan (2-2).

Terdapat dua cara pengoperasian rangkaian pada penelitian ini. Pengoperasian pertama seperti pada Gambar 4.2(a), keluaran rangkaian ini tidak dihubungkan dengan beban *storage capacitor*. Pengoperasian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya tegangan maksimum *Marx Generator*. Pengoperasian kedua seperti pada Gambar 4.2(b), keluaran rangkaian ini dihubungkan dengan *storage capacitor*. Pengoperasian ini bertujuan untuk menguji beban. Dengan memasang beban, maka dapat diperoleh nilai tegangan dan durasi pengisian *storage capacitor*.



Gambar 4.2. Rangkaian *Marx Generator* Empat Tingkat: (a) Tanpa *Storage Capacitor*; (b) Dengan *Storage Capacitor*.

Sebelum rangkaian *Marx Generator* dihubungkan langsung dengan *storage capacitor*, terdapat dioda tegangan tinggi 20 kV agar tidak terjadi tegangan balik dari *storage capacitor* menuju rangkaian. Kondisi ini dapat terjadi ketika tegangan input *Generator* bernilai nol. Oleh karena itu digunakan dioda agar tidak merusak rangkaian *Generator*.

Jarak setiap komponen, kabel dan potensial listrik dirancang berjauhan seperti Gambar 4.4 untuk menghindari terjadinya *breakdown voltage*. Jarak minimal tersebut menggunakan perbandingan medan listrik sebesar 357 kV/m pada setiap titik yang berpotensi listrik berbeda, oleh karena itu potensial 6 kV dengan 0 volt harus diberi jarak minimal sebesar 2 cm (Kiouisis,2013).

4.2 Pembuatan Rangkaian Pelipat Tegangan *Marx Generator*

Pada tahap ini, dilakukan pembuatan rangkaian pelipat tegangan *Marx Generator* 6 kV empat tingkat. Pembuatan rangkaian ini berdasarkan perancangan yang sudah dilakukan sebelumnya.

4.2.1 Alat dan Bahan Pembuatan *Marx Generator*

Alat dan bahan yang digunakan dalam pembuatan rangkaian pelipat tegangan marx generator ditunjukkan dalam tabel 4.1.

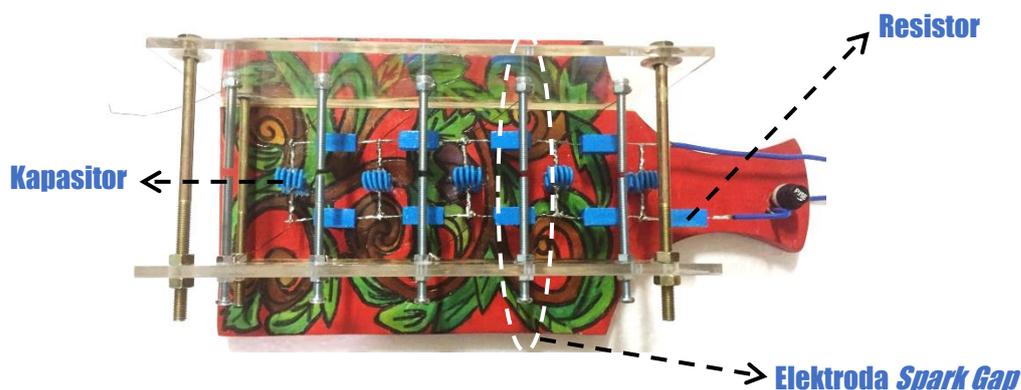
Tabel 4.1

Alat dan Bahan Pembuatan *Marx Generator*

N0	Alat dan Bahan	Jumlah
1.	Papan Kayu	1 buah
2.	Resistor 10 k Ω / 5 Watt	9 buah
3.	Kapasitor high voltage 10 nF / 3 kV	50 buah
4.	Baut dan mur diameter 5 mm panjang 6 cm dan 5 cm	@5 buah
5.	Baut dan mur diameter 6 mm panjang 12 cm	3 buah
6.	Akrilik diameter 5 mm (10x24 cm)	2 buah
7.	Lem G	1 buah
8.	Fuse 0,1 Ampere dan Rumah fuse	1 buah
9.	Kabel	Secukupnya
10.	Kawat tembaga	Secukupnya
11.	Timah	Secukupnya
12.	Solder, Tang potong, Tang Jepit	@1 buah

4.2.2 Foto Alat *Marx Generator*

Berdasarkan hasil perancangan rangkaian elektrik *Marx Generator* seperti Gambar 4.2(a) maka hasil pembuatan *Generator* dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Rangkaian Marx Generator Empat Tingkat yang Sudah Dibuat

Pada Gambar 4.4 terlihat Gambar rangkaian Marx Generator yang sudah dicatu sumber tegangan. Jarak aman pemasangan komponen satu dengan komponen lain yang memiliki potensial berbeda terlihat lebih dari 2 cm.



Gambar 4.4 Rangkaian Marx Generator yang Sudah Dicatu Sumber Tegangan

4.3 Prosedur Pengujian

4.3.1 Prosedur Pengujian Rangkaian Marx Generator Sebelum Dihubungkan Storage Capacitor

- Mengatur jarak antar elektroda *spark gap* menggunakan mikrometer sekrup.
- Mencatat nilai temperatur dan tekanan udara tempat pengujian.
- Menghubungkan rangkaian sesuai Gambar 4.2 (a).
- Menghubungkan keluaran rangkaian dengan osiloskop.
- Menghidupkan AC *voltage regulator* dan osiloskop.
- Mengatur tegangan input sebesar 165 volt dengan AC *voltage regulator*.
- Mencatat nilai tegangan tembus awal pada *spark gap*.
- Menyimpan hasil tegangan *output* yang ditunjukkan osiloskop di *flash disk*.
- Mematikan AC *voltage regulator*.
- Melakukan prosedur b-i dengan jarak elektroda *spark gap* yang berbeda.

4.3.2 Prosedur Pengujian Marx Generator dengan Beban Storage Capacitor

- Mengatur jarak elektroda *spark gap*.

- b) Mencatat nilai temperatur dan tekanan udara tempat pengujian.
- c) Menghubungkan rangkaian pengisian sesuai Gambar 4.3 (b).
- d) Menghubungkan kaki *storage capacitor* dengan *probe* menuju osiloskop.
- e) Menghidupkan AC *voltage regulator* dan osiloskop.
- f) Mengatur tegangan input sebesar 165 volt dengan AC *voltage regulator*.
- g) Menyimpan hasil yang ditunjukkan osiloskop di *flash disk* dan mencatat waktu pengisian *storage capacitor*.
- h) Mematikan AC *voltage regulator*.
- i) Menghubungkan rangkaian pelepasan muatan *storage capacitor* dengan rangkaian yang ada.
- j) Menyimpan hasil yang ditunjukkan osiloskop di *flash disk*



BAB V

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan perancangan dan pembuatan rangkaian *Marx Generator*, langkah selanjutnya adalah pengujian rangkaian yang sudah dibuat. Pengujian dan pengambilan data ini dilakukan di Laboratorium Elektronika Proses Universitas Brawijaya. Terdapat dua macam pengujian yang dilakukan pada penelitian ini, yaitu pengujian *Generator* tanpa beban dan pengujian dengan menggunakan beban *storage capacitor*.

5.1 Pengujian Tanpa Beban

Pengujian rangkaian *Marx Generator* tanpa beban dilakukan dua kali. Hal ini dikarenakan terdapat kesalahan perhitungan komponen pada pengujian pertama. Sehingga dilakukan pengujian kedua.

5.1.1 Pengujian Pertama *Marx Generator* Tanpa Beban

Pengujian pertama menggunakan rangkaian seperti pada Gambar 5.1. Pada rangkaian ini, di setiap tingkat *Marx Generator* menggunakan resistor dengan resistansi 10 k Ω dan daya 5 Watt.



Gambar 5.1. Rangkaian *Marx Generator* Pengujian Pertama Tanpa Beban

A. Hasil dan Analisis Pengujian

Pada pengujian pertama yang dilakukan, rangkaian *Marx Generator* pada Gambar 5.1 belum bekerja dengan baik dan sesuai teori. Saat *spark gap* tingkat pertama rangkaian bekerja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3, *spark gap* akan terhubung singkat sehingga kapasitor 1 akan bernilai 0 Volt. Hal ini menyebabkan resistor pada tingkat pertama rangkaian tidak mampu menahan arus yang melewatinya sehingga resistor pun

sudah berasap pada saat tegangan *input* baru mencapai 727,27 Volt. Perhitungan arus yang melewati resistor ketika spark gap tingkat pertama bekerja dapat dilihat dibawah ini :

$$V_{in} = i \times (R_1 + R_2)$$

$$727,27 = i \times (10.000 + 10.000)$$

$$i = \frac{727,27}{20.000}$$

$$i = 0,03636 \text{ Ampere}$$

Jadi, daya yang disipasi oleh R_1 yaitu:

$$P = I^2 \times R_1$$

$$P = 0,03636^2 \times 10.000$$

$$P = 13,22 \text{ Watt}$$

Dapat disimpulkan, daya yang diserap oleh R_1 sangat besar sedangkan daya yang dimiliki oleh R_1 hanya 5 Watt. Hal ini yang menjadi penyebab R_1 sudah berasap ketika tegangan *input Marx Generator* baru mencapai 727,27 Volt. Oleh karena itu perlu dilakukan penggantian resistor pada tingkat pertama.

5.1.2 Pengujian Marx Generator Kedua Tanpa Beban

Karena pada pengujian pertama resistor tingkat awal sudah berasap sebelum berhasil melipatkan tegangan, maka dilakukan pengujian kedua *Marx Generator* tanpa beban. Resistor pada tingkat pertama rangkaian diganti dengan resistor yang memiliki resistansi 1 M Ω dan daya 1 Watt seperti yang terlihat pada Gambar 5.2. Pengujian dilakukan dengan suhu ruang 26,2 $^{\circ}$ C dan tekanan udara 953 mbar. Rangkaian *Marx Generator* dihubungkan dengan sumber tegangan DC 1500 Volt yang dinaikkan secara bertahap. Kemudian hasil keluaran tegangan dilihat pada osiloskop menggunakan *probe* tegangan tinggi yang sudah dipasang pada elektroda *spark gap* terakhir. Pada saat kondisi tanpa beban, jarak antar elektroda (sela) pada seluruh tingkatnya dibuat berubah. Pengujian dilakukan dengan menggunakan variasi jarak antar elektroda (sela) sebesar 0,2 mm, 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm dan 2 mm. Pengukuran jarak ini menggunakan alat mikrometer sekrup dengan ketelitian 0,01 mm.



Gambar 5.2. Rangkaian Marx Generator Pengujian Kedua Tanpa Beban

A. Hasil dan Analisis Pengujian

Pada pengujian kedua, resistor pada tingkat pertama rangkaian diganti dengan resistor yang memiliki nilai resistansi 1 M Ω dan daya 1 Watt dengan pertimbangan agar arus yang melewati resistor tidak terlalu besar. Resistor berfungsi sebagai *current limiter* saat *spark gap* rangkaian tingkat pertama bekerja seperti pada Gambar 5.3.

Dengan menggunakan resistor yang memiliki nilai resistansi 1 M Ω dan daya 1 Watt pada tingkat pertama maka perhitungan arus yang melewati resistor dengan tegangan input 1500 Volt pada saat tingkat pertama Marx Generator bekerja yaitu:

$$V_{in} = i \times (R_1 + R_2)$$

$$1500 = i \times (1.000.000 + 1.000.000)$$

$$i = \frac{1500}{2.000.000}$$

$$i = 0,00075 \text{ Ampere}$$

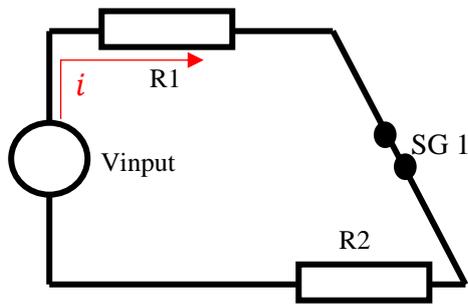
Maka daya yang disipasi oleh R₁ adalah:

$$P = I^2 \times R_1$$

$$P = 0,00075^2 \times 1.000.000$$

$$P = 0,5625 \text{ Watt}$$

Jadi, berdasarkan perhitungan tersebut resistor dengan resistansi 1 M Ω dan daya 1 Watt dapat digunakan pada tingkat pertama rangkaian Marx Generator.



Gambar 5.3. Rangkaian Marx Generator saat Spark Gap Tingkat Pertama Bekerja

Tabel 5.1 menunjukkan hasil tegangan keluaran dan analisis *spark* pada rangkaian Marx Generator tanpa beban. Hasil data dari tabel 5.1 digambarkan pada Grafik 5.1. Berdasarkan Tabel dan Grafik 5.1a ditunjukkan bahwa ketika jarak (sela) pada elektroda *spark gap* dinaikkan, maka tegangan *input* yang dibutuhkan untuk terjadi *spark* pertama kali semakin besar pula. Pada jarak sela 0,2 mm tegangan tembus yang dibutuhkan untuk *spark* pertama kali adalah 318,18 Volt. Begitu pula ketika jarak sela dinaikkan hingga 2 mm, tegangan tembus pertama kalinya semakin besar dan melebihi nilai 1500 Volt. Jadi, pada jarak sela 2 mm tidak terjadi *spark* sama sekali hingga tegangan input yang diberikan 1500 Volt. Grafik 5.1(b) menggambarkan hubungan antara tegangan *input* dan *output* pada rangkaian Marx Generator tanpa beban dengan variasi jarak 0,2 mm, 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, dan 2 mm. Berdasarkan hasil grafik jarak antar elektroda tidak berpengaruh terhadap nilai tegangan *output*, kecuali pada saat jarak elektroda 2 mm.

Nilai *output* tegangan impuls maksimum Marx Generator tanpa beban sebesar 6,8 kV *peak* diperoleh saat jarak sela 0,5 mm ditunjukkan pada Gambar 5.4. Sebagai catatan, ketika tegangan *input* dinaikkan *spark* yang terjadi juga semakin rapat.

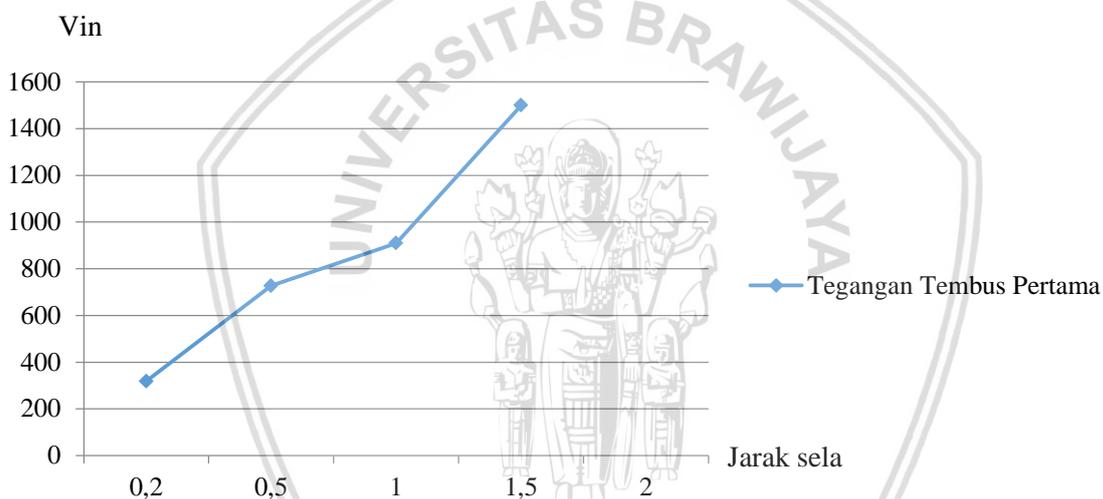
Tabel 5.1
Tabel Hasil Pengujian Marx Generator Tanpa Beban

No	Sela	V input		V impuls (Volt peak)	Spark
		VR (Volt)	Input Marx (Volt)		
1	0,2 mm	35	318	800	√
		60	545	2200	√
		80	727	3400	√
		100	909	4600	√
		165	1500	5800	√
2	0,5 mm	35	318	600	
		60	545	1600	
		80	727	3800	√
		100	909	4200	√
		165	1500	6800	√

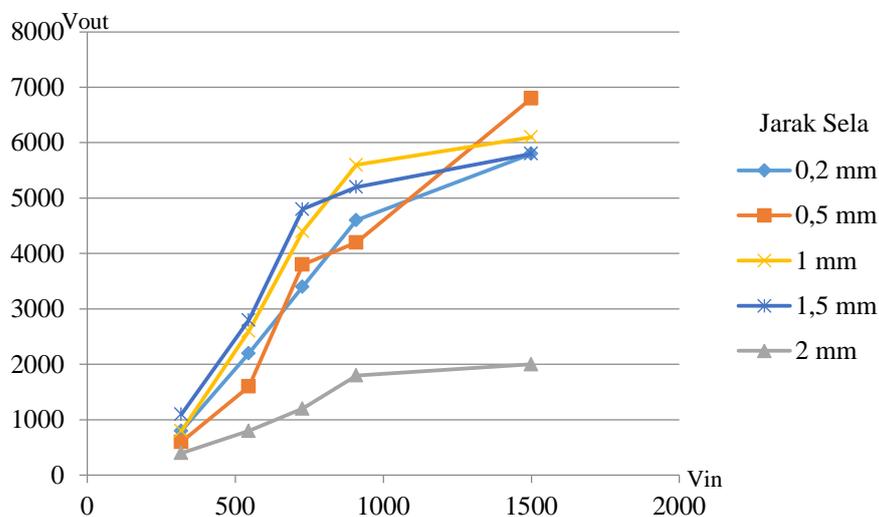
3	1 mm	35	318	800	
		60	545	2600	
		80	727	4400	
		100	909	5600	√
		165	1500	6100	√
4	1,5 mm	35	318	1100	
		60	545	2800	
		80	727	4800	
		100	909	5200	
		165	1500	5800	√
5	2 mm	35	318	400	
		60	545	800	
		80	727	1200	
		100	909	1800	
		165	1500	2000	

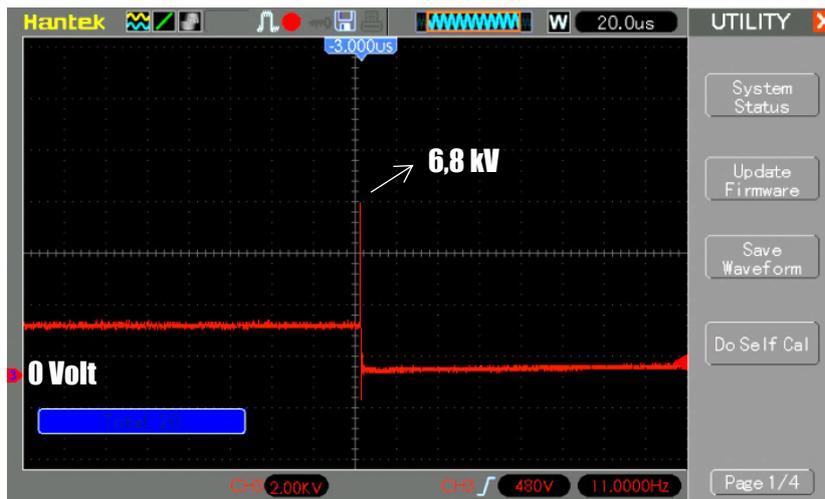
Grafik 5.1

(a) Grafik Tegangan Tembus Pertama pada Marx Generator Tanpa Beban



(b) Grafik Hubungan Tegangan input dan output pada Marx Generator Tanpa Beban





Gambar 5.4. Grafik Hasil Tegangan Impuls Percobaan *Marx Generator* Tanpa Beban

5.2 Pengujian *Marx Generator* dengan *Storage Capacitor*

Pengujian rangkaian *Marx Generator* dengan *storage capacitor* dilakukan dua kali. Pada pengujian pertama dan kedua terdapat perbedaan nilai kapasitor yang digunakan.

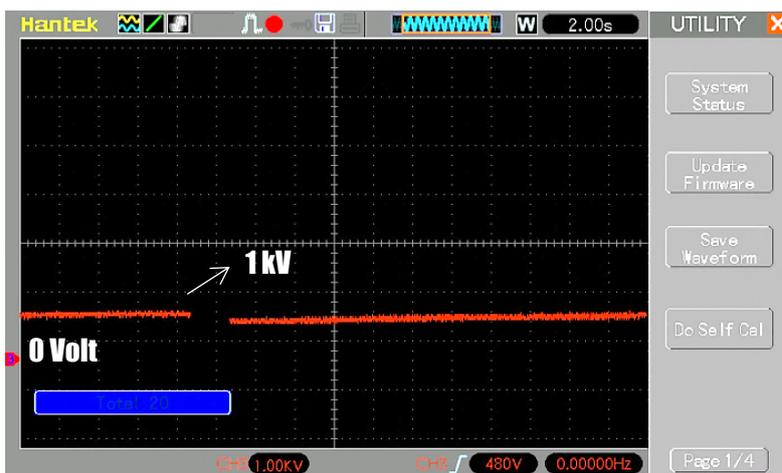
5.2.1 Pengujian Pertama *Marx Generator* dengan *Storage Capacitor*

Pengujian pertama *Marx Generator* berbeban dilakukan dengan menghubungkan rangkaian yang sudah diberi dioda tegangan tinggi 20 kV dengan *storage capacitor* yang memiliki kapasitansi 25 μF . Dengan menggunakan rangkaian seperti Gambar 5.2 dimana resistor pada tingkat pertama *Marx Generator* sudah diganti dengan nilai 1 M Ω /1 Watt pengujian pertama dilakukan. Pada saat pengujian, suhu dan tekanan udara yang terukur adalah 25,5° C dan 955 mbar. Jarak sela yang digunakan pada pengujian ini adalah 0,5 mm. Pengujian dengan *storage capacitor* dilakukan dengan mencatat waktu yang diperlukan untuk mencapai tegangan 4 kV atau hingga sudah tidak terjadi *spark* pada rangkaian *Marx Generator*.

A. Hasil dan Analisis Pengujian

Gambar 5.5 menunjukkan hasil tegangan *storage capacitor* ketika dicatu rangkaian pelipat tegangan *Marx Generator* dengan jarak sela 0,5 mm. *Storage capacitor* terisi muatan hingga tegangannya mencapai 1 kV dalam waktu 20 detik.

Setelah *storage capacitor* telah mencapai 1 kV dan tidak terjadi *spark* pada rangkaian *Marx Generator*, maka *input* dimatikan agar muatan pada *storage capacitor* dapat dibuang melalui alat pelepas muatan yang sudah ada. Ketika *input* dimatikan, penurunan tegangan sangatlah lambat.



Gambar 5.5. Grafik Pengisian *Storage capacitor* Pengujian Pertama

5.2.2 Pengujian Kedua *Marx Generator* dengan *Storage Capacitor*

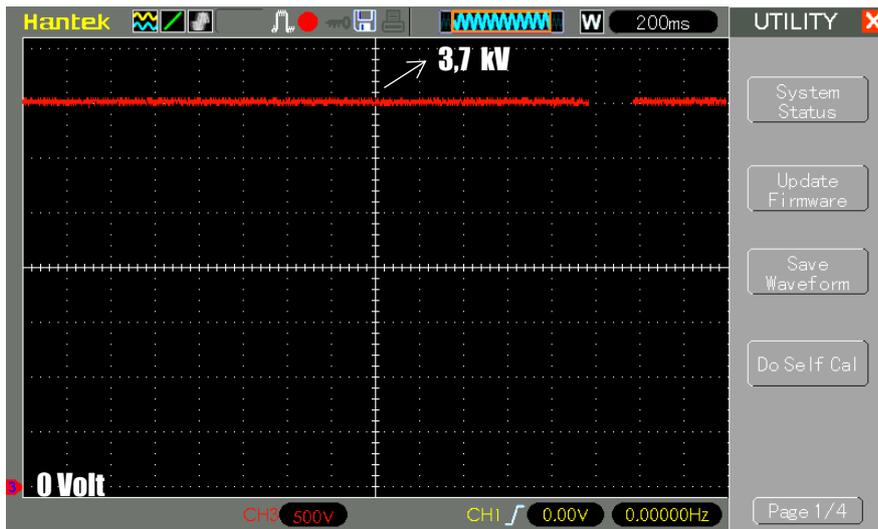
Terdapat perbedaan nilai tegangan yang cukup jauh dari target, sehingga dilakukan penggantian resistor pada semua tingkat dengan resistor yang memiliki resistansi $1\text{ M}\Omega$ sehingga rangkaian menjadi seperti Gambar 5.6. Rangkaian *Marx Generator* diuji hingga tegangan *storage capacitor* mencapai 4 kV atau ketika tidak terjadi *spark* lagi pada *Marx Generator*. Pengujian kedua *Marx Generator* dengan *storage capacitor* ini dilakukan pada ruangan dengan suhu $26,1^{\circ}\text{C}$ dan tekanan udara 953 mbar . Jarak sela yang digunakan dalam pengujian ini adalah $0,5\text{ mm}$.



Gambar 5.6. Rangkaian *Marx Generator* Pengujian Kedua dengan *Storage Capacitor*

A. Hasil dan Analisis Pengujian

Hasil dari penggantian resistor pada semua tingkat rangkaian *Marx Generator* mengakibatkan perubahan tegangan *storage capacitor* menjadi seperti Gambar 5.7. Pada Gambar 5.7 terlihat bahwa *storage capacitor* terisi muatan hingga tegangannya mencapai $3,7\text{ kV}$. Tegangan yang mengisi *storage capacitor* naik secara sangat perlahan. Pada menit ke 98 pengisian, sudah tidak terjadi *spark* pada setiap tingkat *Marx Generator*. Sehingga, tegangan maksimum yang berhasil disimpan oleh *storage capacitor* adalah $3,7\text{ kV}$.



Gambar 5.7. Grafik Pengisian *Storage Capacitor* Pengujian Kedua

5.3 Pembahasan Perbedaan Hasil Target dan Pengujian

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, hasil perhitungan dan pengujian memiliki perbedaan nilai yang akan dibahas penyebabnya. Hasil pengujian ini yaitu ketika pengoperasian *Marx Generator* tanpa beban dan dengan beban *storage capacitor*.

5.3.1 Pengujian *Marx Generator* Tanpa Beban

Setelah melakukan perhitungan dan pengujian tegangan keluaran rangkaian *Marx Generator* sebelum dihubungkan *storage capacitor*, maka hasil perhitungan dan pengujian tersebut dicatat seperti pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2.

Hasil Perhitungan dan Pengujian Tegangan Keluaran Rangkaian *Marx Generator* Tanpa Beban.

Hasil Data	Target	Pengujian
Output <i>Marx Generator</i>	6kV	6,8kV

Pengujian *Marx Generator* tanpa beban berhasil dilakukan. Rangkaian *marx generator* sudah mampu menghasilkan tegangan *output* berbentuk impuls sebesar 6,8 kV *peak*.

5.3.2 Pengujian *Marx Generator* dengan *Storage Capacitor*

Setelah melakukan perhitungan dan pengujian tegangan keluaran rangkaian *Marx Generator* setelah dihubungkan *storage capacitor*, maka hasil perhitungan dan pengujian tersebut dicatat seperti pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3.

Hasil Perhitungan dan Pengujian *Marx Generator* dengan *Storage Capacitor*

Hasil Data	Target	Pengujian	
		1	2
Pengisian Muatan SC	4 kV	1 kV	3,7 kV
Waktu Pengisian Muatan	10s	20s	98 menit

Terlihat pada Tabel 5.3 terdapat perbedaan nilai tegangan dan waktu antara target dan hasil pengujian. Pada pengujian pertama rangkaian *Marx Generator* hanya mampu mengisi *storage capacitor* hingga 1 kV. Ini karena adanya perbedaan nilai resistor pada setiap tingkatnya sehingga pada kondisi berbeban ini, tidak terjadi *spark* di semua tingkat *Marx Generator*.

Pada pengujian kedua, *Generator* ini berhasil mengisi *storage capacitor* hingga tegangannya mencapai 3,7 kV. Akan tetapi waktu yang diperlukan untuk pengisian ini masih jauh dari target yaitu 98 menit. Hal ini disebabkan oleh tegangan keluaran yang dihasilkan oleh *Generator* adalah berbentuk impuls yang sangat sempit. Sehingga nilai tegangan rata-rata yang digunakan untuk pengisian *storage capacitor* sangat kecil. Selain itu, nilai kapasitansi dari *storage capacitor* sangat besar yaitu 25 μ F, sehingga energi yang dibutuhkan oleh *Generator* seharusnya juga lebih besar pula.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Pengali tegangan *Marx Generator* 6 kV telah berhasil dibuat. Hasil pengujian menunjukkan tegangan keluaran tanpa beban mencapai nilai yang ditargetkan.

Pada kondisi berbeban, tegangan yang dihasilkan masih relatif rendah karena tegangan impuls keluaran yang dihasilkan sangat sempit. Hal ini menyebabkan jatuh tegangan pada *storage capacitor* menjadi besar. Tegangan impuls yang sempit tersebut juga menyebabkan waktu pengisian *storage capacitor* sebesar 98 menit.

Pengaturan jarak antar elektroda *spark gap* memberikan perubahan nilai tegangan tembus. Jarak antar elektroda tidak berpengaruh terhadap tegangan *output*, kecuali pada jarak 2 mm. Hal ini dikarenakan pada jarak tersebut sudah tidak terjadi tembus pada *spark gap*.

6.2 Saran

Pembuatan *Marx Generator* dapat diperbaiki dengan mengevaluasi penentuan nilai resistor sehingga mendapatkan nilai yang optimal. Selain itu perlu dibuat *Marx Generator* dengan energi yang lebih besar agar pengisian *storage capacitor* lebih cepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Anandi, S.V., Maheshwari, M. (2014). Analysis and Design Of Closed Loop Cascade Voltage Multiplier Applied to Transformer Less High Step Up Dc-Dc Converter with PID Controller. *International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE)*. 11 (1): 101-106
- Arismunandar, A. 1984. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT Pradnya Paramita
- Babaji, G. (2009). Design and Construction of a 12 kV D.C. Power Supply. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 2(2): 175 - 184
- Barsoum, N., Stanley, G. I. (2015). Design of High Voltage Low Power Supply Device. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 3(1): 6-12, 2015
- Carey, W. J., Mayes, J. R. (2001). Marx Generator Design and Performance. *IEEE International Pulsed Power Conference*
- Dedy, K.S. (2004). *Studi Pengaruh Temperatur terhadap Karakteristik Dielektrik Minyak Transformator Jenis Shell Diala B*. Bandung: ITB.
- Hadi, N.M., Hubeatir, K.A., Khudair, G.H., Hamza, S.F. (2016). Design and Implementation of 8-Stage Marx Generator Used for Gas Lasers. *Innovative Systems Design and Engineering*. Vol.7, No.5, 2016.
- Huiskamp, T. (2017). 15-Stage Compact Marx Generator Using 2N5551 Avalanche Transistors. *IEEE* : 421-425
- Hastanto, A., Syakur, A. (2011). Pengujian Recloser Tegangan Menengah Menggunakan Tegangan Tinggi Impuls
- IEC 61000-4-5 (2013) standard overview: “ Lightning and industrial surges model”
- Kiousis, K., Moronis, A., & Fruh, W-G. (2013). Analysis of the electric field distribution in a wire-cylinder electrode configuration. *Proceedings of the 2013 International Conference on Applied Mathematics and Computational Methods in Engineering* : 164-170.
- Kirtiwar, A. (2016). Ultracapacitor Charging Methods. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 3 (2): 1637-1640
- Kuffel, E., Zaengl, W.S., & Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering Fundamental*. Great Britain. Butterworth-Heinemann
- Maytum, M. J. (2012). Impulse generators used for testing low-voltage equipment. *IEEE PES-SPDC*

- Muskita, H. M., Wijono, Suyono, H., Dhofir, M. (2013). Rancang Bangun Generator Arus Impuls Tipe 8/20 μ s. *Jurnal EECCIS*. 7 (2): 137-140
- Simcik, J., Christensen, C. (2007). Gas Laser Power Supplies. *Texas State Technical, Collage Waco, Course Director*
- Tobing, B. L. 2012. *Dasar-Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Edisi Kedua. Jakarta: Erlangga
- Young, J.C. (2005). Compact Repetitive Marx Generator and HPM Generation with the Vircator. *MSc Thesis, Texas Tech University*

