

KINERJA RANGKAIAN R-C DAN R-L-C DALAM PEMBANGKITAN TEGANGAN TINGGI IMPULS

Tofan Bimatara^{*)}, Juningtyastuti, and Mochammad Facta

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

^{*)}E-mail: *bimatara.tofan@gmail.com*

Abstrak

Tegangan impuls merupakan gelombang tegangan yang besarnya naik secara pesat mencapai nilai tertentu kemudian drop menuju nilai nol. Tegangan impuls merupakan hal yang penting dalam pengujian isolasi dari sebuah sistem. Karakteristik tegangan impuls yang sesuai dengan standart diperlukan untuk menjamin keberhasilan pengujian isolasi sebuah sistem. Pembangkitan tegangan impuls dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian R-C dan R-L-C. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai pembangkitan tegangan impuls berbasis rangkaian R-C dan rangkaian R-L-C yang akan digunakan untuk praktikum gejala medan tinggi. Masing – masing rangkaian akan disusun untuk membentuk gelombang impulse yang sesuai standar IEC 60060-1. Pembangkit impuls berbasis rangkaian R-C dan R-L-C akan dibandingkan efisiensi tegangan serta kesesuaian bentuk gelombang tegangan keluarannya dengan standart gelombang tegangan impuls IEC 60060-1. Rangkaian R-L-C memiliki efisiensi tegangan yang lebih baik daripada rangkaian R-C. Masing-masing rangkaian mampu menghasilkan gelombang tegangan impuls 1,2/50 yang sesuai dengan standar IEC 60060-1..

Kata kunci — pembangkit tegangan tinggi impuls, rangkaian R-C, rangkaian R-L-C, IEC 60060-1

Abstract

Impuls voltage is voltage waveshape which rises rapidly to a peak value then decays relatively slowly to zero. Impulse voltage is important for isolation testing of power system. Standart impulse voltage is required to provide success isolation testing. Impulse voltage generation may be obtained in the laboratory by R-C circuit or by a series R-L-C circuit under overdamped condition. This paper provides design details for R-C and R-L-C impuls generator for modul of laboratory.. Each circuit are developed to create impulse voltage wave according to IEC 60060-1 standart. R-L-C and R-C impulse generator voltage efficiency is compared, then the output waveform is compared to IEC 60060-1 standart. R-L-C circuit had better efficiencies than R-C circuit. Each circuit are capable to generate IEC 60060-1 1,2/50 impuls voltage.

Keywords: high voltage impulse generator, R-C circuit, R-L-C circuit, IEC 60060-1

1. Pendahuluan

Sambaran petir pada saluran transmisi akan menyebabkan kenaikan tegangan pada saluran dan menghasilkan gelombang berjalan pada saluran yang akan membahayakan isolasi dari system[1]. Besarnya tegangan yang dihasilkan dapat mencapai nilai lebih dari 1000 kilovolt[2]. Karakter dari gelombang tegangan yang dihasilkan memiliki durasi muka yang pendek, berkisar antara nilai pecahan dengan satuan mikro detik sampai beberapa puluh mikro detik dan kemudian berkurang secara perlahan menuju nilai nol[3]. Tegangan impuls petir standart telah ditetapkan oleh IEC sebagai impuls aperiodik yang mencapai nilai puncak pada waktu 1.2 mikro detik kemudian nilainya akan turun secara perlahan

(berkisar antara 50 mikro detik) sampai setengah dari nilai puncaknya[4].

Pengujian sistem isolasi sangatlah penting supaya sistem isolasi dapat bertahan dari sambaran petir. Oleh karena itu dibuatlah rangkaian pembangkit tegangan impuls untuk menggantikan sambaran petir. Bentuk gelombang yang dihasilkan sangatlah penting untuk menentukan keberhasilan pengujian.

Pada skala laboratorium, pembangkitan tegangan impuls dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian R-C dan dengan menggunakan rangkaian R-L-C[5]. Keluaran dari rangkaian R-C dan rangkaian R-L-C merupakan gelombang eksponensial ganda yang berbentuk

menyerupai tegangan impuls. Nilai-nilai dari komponen penyusunan rangkaian akan menentukan bentuk gelombang keluaran yang dihasilkan.

Pada penelitian ini akan dirancang rangkaian pembangkitan tegangan impuls berbasis rangkaian $R-C$ dan rangkaian $R-L-C$ yang akan digunakan pada praktikum gejala medan tinggi. Masing-masing rangkaian akan disusun sehingga dapat menghasilkan tegangan impuls petir yang sesuai standart IEC 60060-1, kemudian gelombang keluaran dari kedua rangkaian tersebut akan dibandingkan efisiensi tegangan serta kesesuaian bentuk gelombang yang dihasilkan.

2. Metode

2.1. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras terdiri dari rangkaian sumber tegangan AC 1 fasa, rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC dan rangkaian pembangkit tegangan tinggi impuls. Diagram blok perangkat keras yang dirancang pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Perangkat Keras

Spesifikasi perangkat keras yang telah dirancang pada penelitian ini berdasarkan Gambar 1 adalah sebagai berikut :

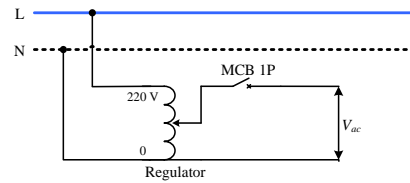
1. Sumber tegangan AC 1 Fasa sebagai sumber tegangan masukan untuk rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC dengan menggunakan regulator tegangan.
2. Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC digunakan untuk menghasilkan tegangan tinggi DC yang akan menjadi suplai bagi blok rangkaian pembangkitan tegangan tinggi impuls.
3. Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi impuls sebagai pembentuk gelombang impuls.

2.1.1. Sumber Tegangan AC 1 Fasa

Suplai AC satu fasa yang digunakan berasal dari jala – jala PLN dengan tegangan 220 V Line to Netral dengan frekuensi 50 Hz seperti Gambar 2. Regulator digunakan untuk memvariasikan tegangan. Regulator yang digunakan memiliki spesifikasi tegangan masukan maksimal 250 V dengan arus maksimal 5 A. Sumber tegangan AC satu fasa digunakan sebagai sumber tegangan untuk mensuplai rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC.

Elektroda yang digunakan untuk membuat sela udara berbentuk setengah bola pada sisi yang terhubung dengan kapasitor pengisian dan berbentuk bola pada sisi yang

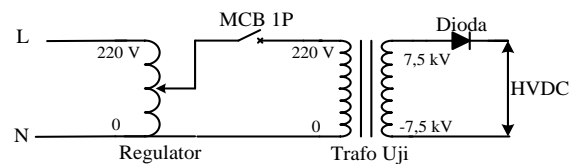
terhubung dengan resistor R_1 .



Gambar 2. Rangkaian suplai tegangan 1 fasa

2.1.2. Pembangkitan Tegangan Tinggi DC

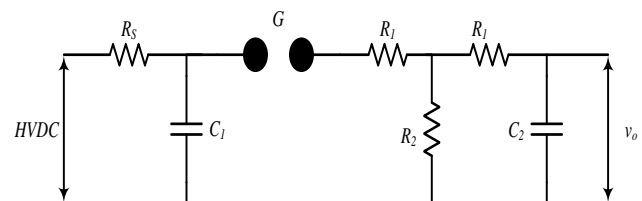
Pada penelitian ini digunakan rangkaian penyearah setengah gelombang dengan tegangan output akan dibatasi pada nilai 8 kV. Gambar 3 menunjukkan rangkaian penyearah setengah gelombang. Pada rangkaian digunakan sebuah diode tegangan tinggi. Sumber tegangan tinggi AC 1 fasa yang digunakan diperoleh dari trafo uji yang terhubung dengan regulator tegangan.



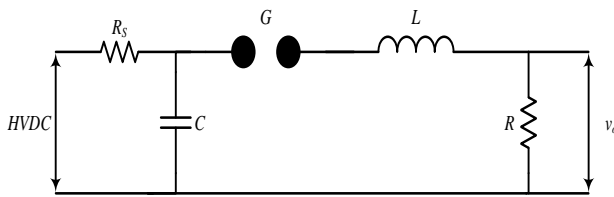
Gambar 3. Penggunaan suplai AC 1 fasa untuk sumber HVDC

2.1.3. Pembangkitan Tegangan Tinggi Impuls

Pembangkitan Tegangan tinggi impuls dapat dihasilkan melalui berbagai topologi. Pada penelitian ini akan dibahas dan dibuat rangkaian pembangkit tegangan tinggi impuls berbasis rangkaian $R-C$ dan $R-L-C$ [3]. Gambar 4 dan Gambar 5 merupakan rangkaian yang akan direalisasikan menjadi perangkat keras. Masing-masing rangkaian terhubung dengan rangkaian pembangkit tegangan tinggi DC melalui tahanan pengisian R_S . R_S berfungsi untuk membatasi muatan dari sumber tegangan tinggi DC supaya tidak mengisi kapasitor pengisian saat terjadi *breakdown* pada sela udara G , sehingga muatan yang mengalir menuju rangkaian pembentuk gelombang hanya muatan yang berasal dari kapasitor pengisian. Besarnya R_S dapat diperoleh melalui simulasi.



Gambar 4. Rangkaian pembangkit tegangan tinggi impuls $R-C$



Gambar 5. Rangkaian pembangkit tegangan tinggi impuls R-L-C

Tabel 1. Daftar nilai parameter komponen penyusun rangkaian pembangkit gelombang tegangan tinggi impuls [10]

Impulse Shape (μs)	C_1 (nF)	C_2 (nF)
1,2/50	10	1,2
1,2/50	25	1,2
1,2/50	50	1,2

Tegangan impuls yang dibangkitkan adalah tegangan impuls petir yang sesuai dengan standar IEC, yaitu memiliki waktu muka (t_r) 1,2 μs dan waktu ekor (t_f) 50 μs . Berdasarkan Tabel 1, ditetapkan nilai variasi kapasitor yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu sebesar 10 nF, 25 nF, dan 50 nF dengan perbandingan waktu muka dan waktu ekor sebesar 1,2/50 μs , sedangkan nilai resistornya akan didapatkan melalui perhitungan.

2.2. Menentukan Nilai Komponen Rangkaian Pembangkitan Tegangan Tinggi Impuls

2.2.1. Perhitungan Nilai Komponen Rangkaian Pembangkit Tegangan Impuls R-C

Perhitungan pada rangkaian R-C dengan nilai $C_1 = 10$ nF, $C_2 = 1,2$ nF, $\alpha = 6,4$ dan $\theta = 5,26$ μs .

Perhitungan nilai X

$$X = \frac{1}{4\alpha^2} \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right) \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right)$$

$$X = 0,2667$$

Perhitungan nilai R_1

$$R_1 = \frac{2\alpha\theta}{C_1 + C_2} (1 - \sqrt{1 - X})$$

$$R_1 = 188,9 \Omega$$

Perhitungan nilai R_2

$$R_2 = \frac{2\alpha\theta}{C_1 + C_2} \sqrt{1 - X}$$

$$R_2 = 1126,1 \Omega$$

Dengan menggunakan cara yang sama seperti perhitungan diatas, diperoleh hasil perhitungan R_1 dan R_2 menggunakan nilai kapasitor 25 nF dan 10 nF pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan komponen R_1 dan R_2 rangkaian R-C

C_1 (nF)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)
10	190	1125
25	190	2380
50	190	5820

2.2.2. Perhitungan Nilai Komponen Rangkaian Pembangkit Tegangan Impuls R-L-C

Perhitungan pada rangkaian R-C dengan nilai $C = 50$ nF, $\alpha = 6,4$ dan $\theta = 5,26$ μs .

Perhitungan nilai L

$$L = \frac{\theta^2}{C}$$

$$L = 553 \mu H$$

Perhitungan nilai R

$$R = \frac{2\alpha\theta}{C}$$

$$R = 1346 \Omega$$

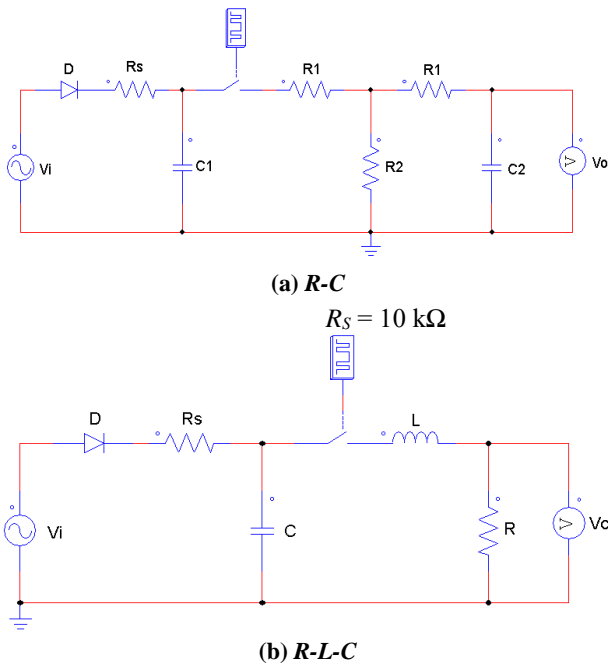
Dengan menggunakan cara yang sama seperti perhitungan diatas, diperoleh hasil perhitungan R dan L menggunakan nilai kapasitor 25nF dan 10 nF pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil perhitungan komponen R_1 dan R_2 topologi C

C (nF)	L (μH)	R (Ω)
10	550	1350
25	1100	2700
50	2770	6730

2.2.3. Simulasi Rangkaian Pembangkitan Tegangan Tinggi Impuls

Software PSIM dapat digunakan untuk mengetahui kinerja rangkaian dan untuk menentukan komponen R_s . Pada kondisi ideal sumber tegangan arus searah harus terlepas dari kapasitor pengisian saat proses *discharge* pembentukan gelombang terjadi. Namun hal tersebut sulit dilaksanakan karena waktu switching yang sangat cepat dan tegangan yang relatif tinggi. Untuk mengatasi hal tersebut dapat dilakukan dengan menempatkan resistor di antara sumber tegangan tinggi DC dan kapasitor pengisian. Resistor akan menahan muatan yang mengalir menuju ke kapasitor pengisian. Namun penambahan resistor akan menyebabkan perubahan pada bentuk gelombang tegangan impuls. Diperlukan pemilihan yang tepat supaya gelombang yang dihasilkan tetap sesuai.



Gambar 6. Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi impuls

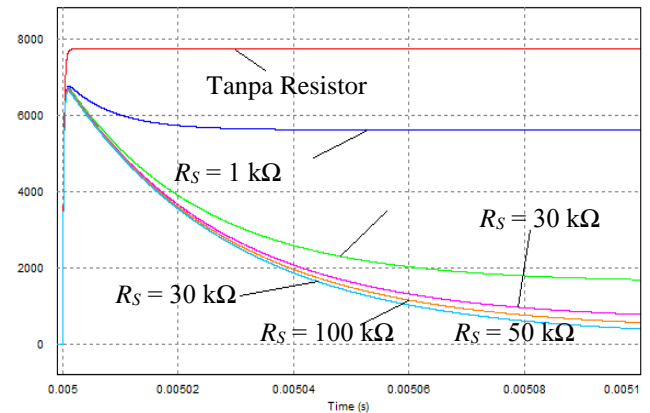
Pada simulasi dilakukan variasi nilai R_S dan nilai C_1 dengan nilai C_2 tetap sebesar 1,2 nF. Variasi nilai R_S antara lain sebesar 0 Ohm, 1 kilo Ohm, 10 kilo Ohm, 30 kilo Ohm, dan 50 kilo Ohm. Variasi nilai C_1 yang digunakan antara lain sebesar 10 nF, 25 nF, dan 50 nF. Besar nilai R_1 dan nilai R_2 yang disimulasikan menyesuaikan besar nilai C_1 dan C_2 sesuai hasil perhitungan yang sudah dilakukan sebelumnya.

Tabel 4 merupakan tabel yang berisi rangkuman parameter tegangan impuls hasil simulasi. Pada tabel tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar R_S maka tegangan maksimal akan semakin turun, dan waktu ekor pada awalnya akan naik secara drastis kemudian akan turun mendekati nilai ideal.

Tabel 4 Parameter hasil simulasi dengan variasi nilai R_S

C (nF)	R_S (Ω)	V_M (Volt)		t_f (μ s)		t_r (μ s)	
		R-L-C	R-C	R-L-C	R-C	R-L-C	R-C
10	1k	7810	6859	1,2	1,2	-	-
	10k	7792	6750	1,2	1,2	79	90
	30k	7758	6714	1,2	1,2	55	56
	50k	7734	6693	1,2	1,2	52	53
	100k	7706	6667	1,2	1,2	50	50
25	1k	7804	6909	1,2	1,2	-	-
	10k	7779	6871	1,2	1,2	56	57
	30k	7760	6854	1,2	1,2	51	51
	50k	7755	6849	1,2	1,2	50	50
	100k	7750	6844	1,2	1,2	49	49
50	1k	7801	6519	1,2	1,2	-	-
	10k	7781	6499	1,2	1,2	53	52
	30k	7775	6494	1,2	1,2	50	50
	50k	7774	6493	1,2	1,2	49	49
	100k	7773	6492	1,2	1,2	49	49

Dengan mempertimbangkan nilai tegangan maksimal (V_{max}), waktu muka (t_f) dan waktu ekor (t_r) dipilih $R_S = 30 \text{ k}\Omega$ untuk masing masing rangkaian.



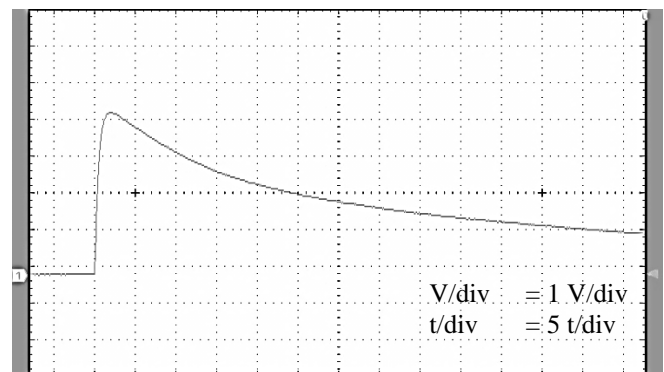
Gambar 7. Gelombang keluaran impuls hasil simulasi dengan software PSIM

3. Hasil dan Analisa

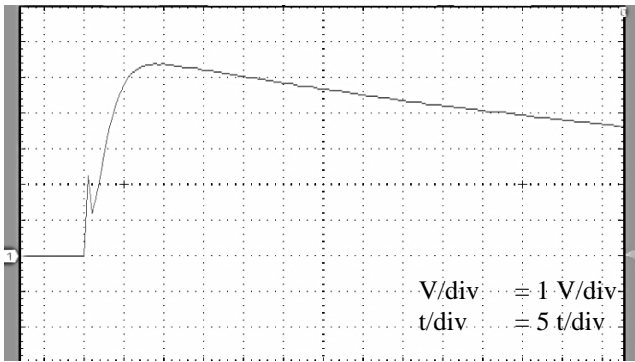
3.1. Pengujian dengan Tegangan Masukan 4 kV

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi kapasitor terhadap gelombang keluaran rangkaian pembangkit tegangan impuls. Kemudian akan dianalisa pula perbandingan gelombang keluaran antara rangkaian pembangkit tegangan impuls R-C dan R-L-C

Gambar 8 dan Gambar 9 adalah gelombang keluaran tegangan impuls yang dihasilkan dari rangkaian pengujian. Dalam pengujian juga dilakukan variasi nilai kapasitor pengisian yaitu sebesar 10 nF, 25 nF, dan 50 nF. Data hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 5.



Gambar 8. Gelombang keluaran rangkaian pembangkit tegangan impuls R-C dengan kapasitor pengisian 50 nF



Gambar 9. Gelombang keluaran rangkaian pembangkit tegangan impuls R-L-C dengan kapasitor pengisian 50 nF

Tabel 5. Hasil pengujian tegangan impuls dengan tegangan masukan 4 kV

Topologi Rangkaian	C (nF)	V _{in} (V)	V _{DC} (kV)	V _{M Imp} (kV)	t _r (μs)	t _f (μs)	d (mm)
R-C	10	88,4	4,01	4,80	1,17	23,65	0,80
	25	88,7	4,02	4,80	1,15	25,14	0,80
	50	88,3	4,04	4,40	1,25	24,13	0,80
R-L-C	10	89,2	4,12	6	2,58	25,72	0,09
	25	90,0	4,15	5,6	1,58	25,32	0,08
	50	87,5	4,01	5,4	1,50	25,35	0,08

Berdasarkan Tabel 5 didapatkan perbandingan data hasil pengujian dimana pada tegangan masukan searah yang relatif sama, rangkaian R-L-C menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar daripada rangkaian R-C, sehingga rangkaian R-L-C memiliki efisiensi tegangan yang lebih baik daripada rangkaian R-C. Nilai waktu ekor yang dihasilkan pada kedua rangkaian dengan masing-masing variasi kapasitornya cenderung sama pada kisaran 24 μs – 25 μs. Rangkaian R-C dapat menghasilkan gelombang dengan waktu muka yang relatif bernilai sama pada masing-masing variasi kapasitor, sedangkan rangkaian R-L-C menghasilkan gelombang dengan waktu muka yang relatif sama pada variasi kapasitor pengisian 25 dan 50 nF.

Pada gelombang keluaran rangkaian R-L-C terdapat osilasi yang cukup besar. Osilasi tersebut mempengaruhi waktu muka dari gelombang keluaran rangkaian R-L-C. Pada rangkaian R-C terbentuk gelombang keluaran tanpa adanya osilasi pada muka, puncak maupun ekor gelombang, sehingga rangkaian R-C memiliki bentuk gelombang keluaran yang lebih baik dari rangkaian R-L-C.

3.2. Pengujian dengan Variasi Tegangan Masukan

Pengujian dengan variasi tegangan masukan bertujuan untuk mengetahui pengaruh tegangan terhadap waktu muka dan waktu ekor dari gelombang keluaran. Pengujian dilakukan pada masing-masing rangkaian.

Tabel 6. Rekapitulasi parameter hasil pengujian variasi tegangan pada rangkaian pembangkit tegangan impuls R-C

V _{in} (V)	V _{DC} (kV)	V _{M Impuls} (kV)	t _r (μs)	t _f (μs)	d (mm)
65,5	3,01	3,4	1,25	24,18	0,50
88,3	4,04	4,4	1,25	24,13	0,80
113,8	5,01	5,6	1,25	26,18	1,00
136,2	6,01	6,8	1,25	25,18	1,30
162,7	7,04	7,8	1,25	25,18	1,60

Tabel 6 berisi rekapitulasi parameter hasil pengujian rangkaian pembangkit tegangan impuls R-C dengan kapasitor pengisian 50 nF. Pada Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa seiring dengan naiknya tegangan masukan, maka tegangan keluaran juga akan bertambah. Jarak pada sela udara juga bertambah lebar seiring dengan naiknya tegangan masukan. Fenomena tegangan keluaran lebih besar dari tegangan masukan masih terjadi pada tegangan lebih dari 4 kV maupun kurang dari 4 kV. Waktu muka (t_r) pada pengujian dengan variasi tegangan memiliki nilai yang tidak berubah, begitu pula dengan waktu ekor (t_f). Waktu muka tetap bernilai rata-rata 1,25 μs pada masing-masing variasi tegangan sedangkan waktu ekor bernilai rata-rata 25,16 μs, sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi tegangan tidak mempengaruhi waktu muka dan waktu ekor pada rangkaian pembangkit tegangan impuls R-C.

Tabel 4.5 berisi rekapitulasi parameter hasil pengujian rangkaian pembangkit tegangan impuls R-C dengan kapasitor pengisian 50 nF.

Tabel 7. Rekapitulasi parameter pengujian rangkaian pembangkit tegangan impuls R-C

V _{in} (V)	V _{DC} (kV)	V _{M Impuls} (kV)	t _r (μs)	t _f (μs)	d (mm)
65,66	3,01	3,165	1,56	24,43	0,05
87,5	4,01	4,218	1,50	25,35	0,08
110,5	5,01	5,327	1,34	25,20	1,00
133,9	6,11	6,455	1,39	26,40	1,30
164,7	7,02	7,939	1,25	25,33	1,60

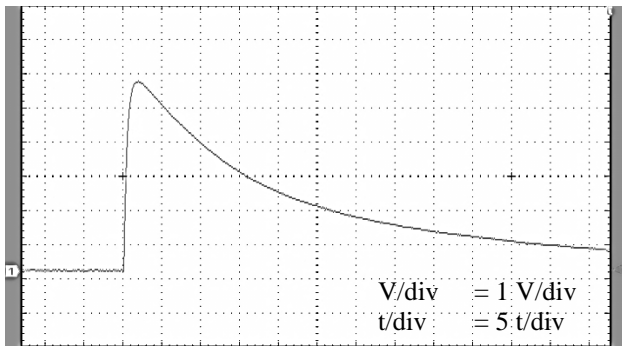
Pada Tabel 7 dapat dilihat bahwa seiring dengan naiknya tegangan masukan, maka tegangan keluaran juga akan bertambah. Jarak pada sela udara juga bertambah lebar seiring dengan naiknya tegangan masukan. Waktu muka (t_r) memiliki nilai yang berubah ubah pada variasi tegangan, namun masih berada pada batas toleransi standart IEC 60060-1. Waktu ekor (t_f) pada pengujian dengan variasi tegangan memiliki nilai yang tidak berubah. Waktu ekor tetap bernilai rata-rata 25 μs pada masing-masing variasi tegangan, sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi tegangan tidak mempengaruhi waktu ekor pada rangkaian pembangkit tegangan impuls R-L-C.

3.4. Pengujian dengan Variasi Resistor Pembentuk Gelombang

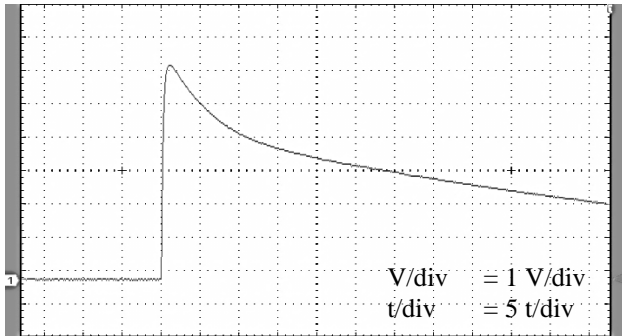
Pengujian dengan variasi resistor pembentuk gelombang bertujuan untuk mengetahui pengaruh resistor pembentuk

gelombang terhadap gelombang keluaran yang dihasilkan. Pengujian dilakukan pada masing-masing rangkaian. Pengujian akan dilakukan dengan tegangan masukan 5 kV. Resistor yang divariasikan pada rangkaian R-C adalah R_2 . Pengujian dilakukan pada kapasitor 25 nF dengan nilai resistor dibuat lebih besar dari hasil perhitungan dan lebih kecil dari perhitungan, sehingga terdapat 4 pengujian yang dilakukan yaitu :

- A. Rangkaian R-C dengan kapasitor pengisian 25 nF dan $R_2 = 1125 \Omega$
- B. Rangkaian R-C dengan kapasitor pengisian 25 nF dan $R_2 = 5820 \Omega$
- C. Rangkaian R-L-C dengan kapasitor pengisian 25 nF dan $R_2 = 1280 \Omega$
- D. Rangkaian R-L-C dengan kapasitor pengisian 25 nF dan $R_2 = 6130 \Omega$



Gambar 10. Gelombang keluaran rangkaian R-C dengan $R_2 = 1125 \Omega$



Gambar 11. Gelombang keluaran rangkaian R-C dengan $R_2 = 5820 \Omega$

Gambar 10 dan Gambar 11 merupakan hasil pengujian dengan variasi R_2 pada rangkaian R-C. Gambar 10 merupakan hasil pengujian dengan menggunakan $R_2 = 1125 \Omega$, sedangkan Gambar 11 merupakan hasil pengujian dengan $R_2 = 5820 \Omega$. Hasil pengujian menunjukkan bahwa saat R_2 lebih kecil dari hasil perhitungan maka waktu ekor gelombang keluaran akan berkurang, sedangkan saat R_2 lebih besar dari hasil perhitungan maka waktu ekor gelombang keluaran akan bertambah. Tidak ada perubahan yang mencolok pada waktu muka gelombang keluaran karena tidak dilakukan

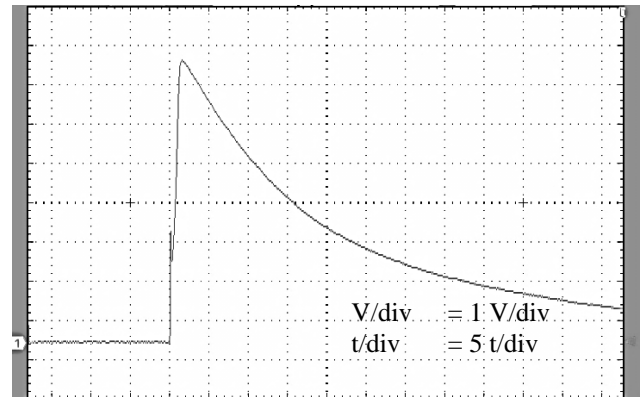
perubahan pada R_1 . Tabel 8 merupakan tabel yang berisi parameter hasil pengujian dengan variasi R_2 .

Pada Tabel 8 dapat dilihat bahwa pada variasi $R_2 = 1125 \Omega$ diperoleh waktu ekor 16,2 μs , sedangkan pada variasi $R_2 = 5820 \Omega$ diperoleh waktu ekor 57,1 μs . Keadaan tersebut sesuai dengan teori dimana semakin besar resistor R_2 maka waktu ekor akan semakin bertambah atau dengan kata lain diperlukan resistor yang lebih besar untuk memperoleh gelombang yang sama pada kapasitor pengisian yang lebih kecil.

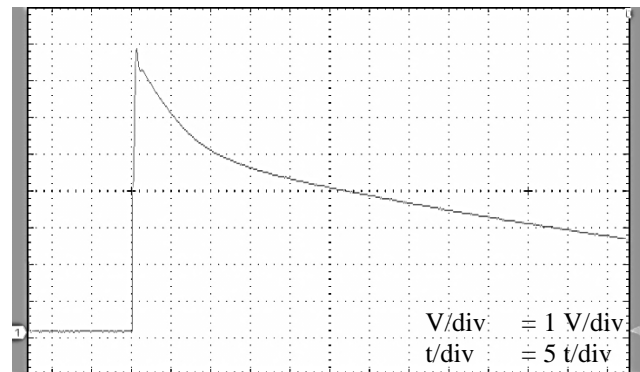
Tabel 8. Rekapitulasi parameter pengujian rangkaian pembangkit tegangan impuls R-C

$R_2 (\Omega)$	$V_{in} (V)$	$V_{DC} (kV)$	$V_{M \text{ Impuls}} (kV)$	$t_r (\mu s)$	$t_f (\mu s)$
1125	112,92	5,14	5,6	1,33	16,2
2380	113,88	5,10	6	1,33	27,1
5820	113,34	5,13	6,4	1,33	57,1

Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa terbentuk gelombang yang sesuai standar IEC 60060-1 pada saat R_2 bernilai 5820 Ω . Gelombang yang sesuai standart diperoleh saat R_2 lebih besar dari hasil perhitungan, sehingga kemungkinan terjadi penurunan kapasitansi kapasitor pengisian. Hal tersebut menjelaskan fenomena penurunan nilai waktu ekor pada rangkaian dengan komponen hasil perhitungan.



Gambar 12. Gelombang keluaran rangkaian R-L-C dengan $R_2 = 1280 \Omega$



Gambar 13. Gelombang keluaran rangkaian R-L-C dengan $R_2 = 6730 \Omega$

Gambar 12 dan Gambar 13 merupakan hasil pengujian dengan variasi R pada rangkaian $R-L-C$. Gambar 12 merupakan hasil pengujian dengan menggunakan $R = 1350 \Omega$, sedangkan Gambar 13 merupakan hasil pengujian dengan $R_2 = 6730 \Omega$. Hasil pengujian menunjukkan bahwa saat R lebih kecil dari hasil perhitungan maka waktu ekor gelombang keluaran akan berkurang, sedangkan saat R lebih besar dari hasil perhitungan maka waktu ekor gelombang keluaran akan bertambah. Tabel 9 merupakan tabel yang berisi parameter hasil pengujian dengan variasi R .

Tabel 9. Rekapitulasi parameter pengujian rangkaian pembangkit tegangan impuls $R-C$

$R_2 (\Omega)$	$V_{in} (V)$	$V_{DC} (kV)$	$V_{M Impuls} (kV)$	$t_r (\mu s)$	$t_f (\mu s)$
1350	114,44	5,31	7,2	1,67	16,4
2700	113,53	5,14	7	1,51	25,4
6730	113,92	5,26	7,8	1,17	54,2

Pada Tabel 9 dapat dilihat bahwa pada variasi $R = 1350 \Omega$ diperoleh waktu ekor 16,4 μs , sedangkan pada variasi $R = 6730 \Omega$ diperoleh waktu ekor 54,2 μs . Keadaan tersebut sesuai dengan teori dimana semakin besar resistor R maka waktu ekor akan semakin bertambah atau dengan kata lain diperlukan resistor yang lebih besar untuk memperoleh gelombang yang sama pada kapasitor pengisian yang lebih kecil.

Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa terbentuk gelombang yang sesuai standar IEC 60060-1 pada saat R bernilai 5820 Ω . Gelombang yang sesuai standart diperoleh saat R lebih besar dari hasil perhitungan, sehingga kemungkinan terjadi penurunan kapasitansi kapasitor pengisian. Hal tersebut menjelaskan fenomena penurunan nilai waktu ekor pada rangkaian dengan komponen hasil perhitungan.

4. Kesimpulan

Rangkaian pembangkit tegangan tinggi impuls $R-C$ dan $R-L-C$ yang dibuat mampu menghasilkan tegangan impuls, tetapi tidak dapat menghasilkan gelombang keluaran yang sama dengan hasil simulasi dan perhitungan. Rangkaian pembangkit tegangan impuls $R-C$ menghasilkan waktu muka $\pm 1,2 \mu s$ dan waktu ekor $\pm 25 \mu s$ sedangkan rangkaian pembangkit tegangan impuls $R-L-C$ menghasilkan waktu muka $\pm 1,6 \mu s$ dan waktu ekor $\pm 25 \mu s$. Masing-masing rangkaian dapat menghasilkan tegangan impuls yang sesuai standart IEC 60060-1 saat dilakukan penambahan nilai pada komponen R_2 (untuk rangkaian $R-C$) dan R (untuk rangkaian $R-L-C$). Rangkaian pembangkit tegangan tinggi impuls $R-L-C$ dapat menghasilkan tegangan impuls maksimal yang lebih besar dari rangkaian pembangkit tegangan tinggi impuls $R-C$ dengan tegangan masukan yang sama. Rangkaian pembangkit tegangan tinggi impuls $R-C$ memiliki bentuk gelombang yang lebih baik dari rangkaian pembangkit tegangan tinggi impuls $R-L-C$.

Referensi

- [1]. Tobing, Bonggas L, Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi, Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- [2]. Kind, Dieter, Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi. Bandung,. Indonesia: ITB, 1993.
- [3]. Salam, Mazen Abdel, dkk , High Voltage Engineering Theory and Practice. Second Edition, Revised, expanded, Marcel Dekker, Basel, 2000.
- [4]. Wadhwa, C. L. High Voltage Engineering. Second Edition. New Delhi: New Age International (P) Limited, Publisher. 2007.
- [5]. Purba, Irpan Logitra. "Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls Untuk Mengurangi Jumlah Bakteri pada Susu Perah" Laporan Tugas Akhir, Universitas Diponegoro. 2013.
- [6]. Aguet, Michel. Ianoz, Michel. Traite d'Electricite Volume XXII
- [7]. Kuffel, E, dkk, High Voltage Engineering: Fundamentals, Second Edition, Butterworth Heinemann, Oxford. 2000
- [8]. Joe Y. Zhou and Steven A. Boggs, Low Energy Single Stage High Voltage Impulse Generator, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,. 2004.
- [9]. Veisheipl, Karel, Simulation of the High Voltage Impulse Generator, University of West Bohemia.