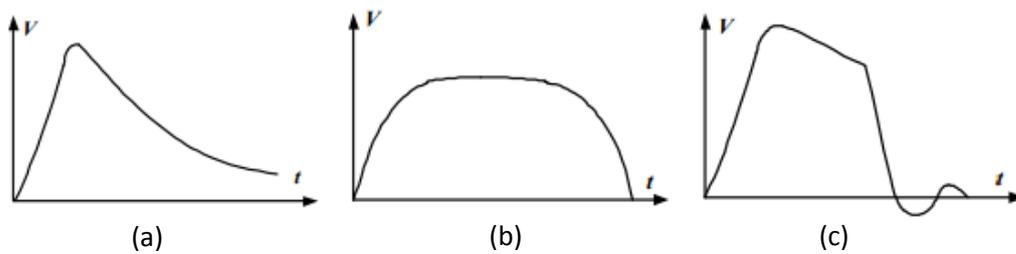


BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

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.

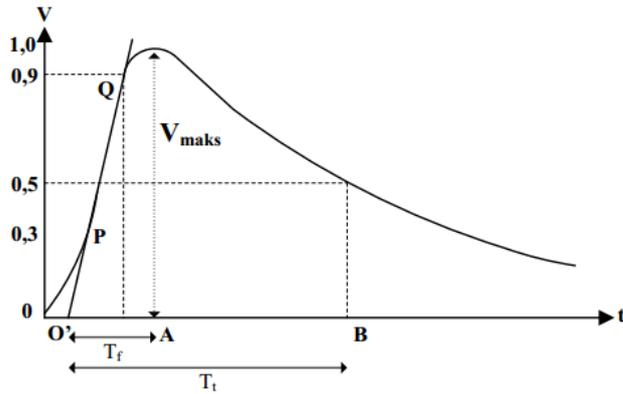
Sumber: Tobing (2012)

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 x 40 μs
Jerman dan Inggris	1 x 50 μs
Amerika	1,5 x 40 μs
IEC	1,2 x 50 μs

Sumber: Arismunandar (1984).

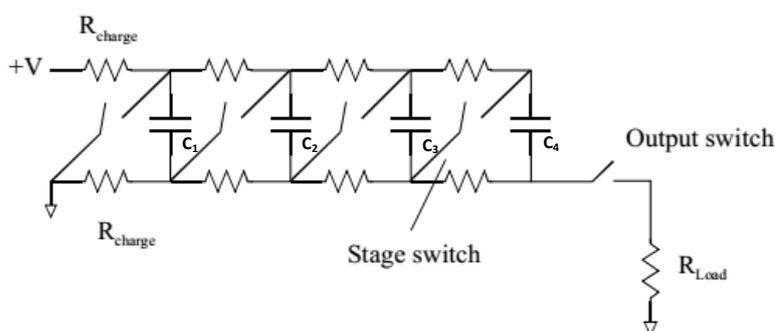
Nilai toleransi waktu muka dan waktu ekor gelombang untuk standar Jepang adalah $0,5 - 2 \mu\text{s}$ dan $35 - 50 \mu\text{s}$, standar Inggris $0,5 - 1,5 \mu\text{s}$ dan $40 - 60 \mu\text{s}$, sedangkan untuk standar Amerika adalah $1,0 - 2,0 \mu\text{s}$ dan $30 - 50 \mu\text{s}$. Untuk tegangan 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:

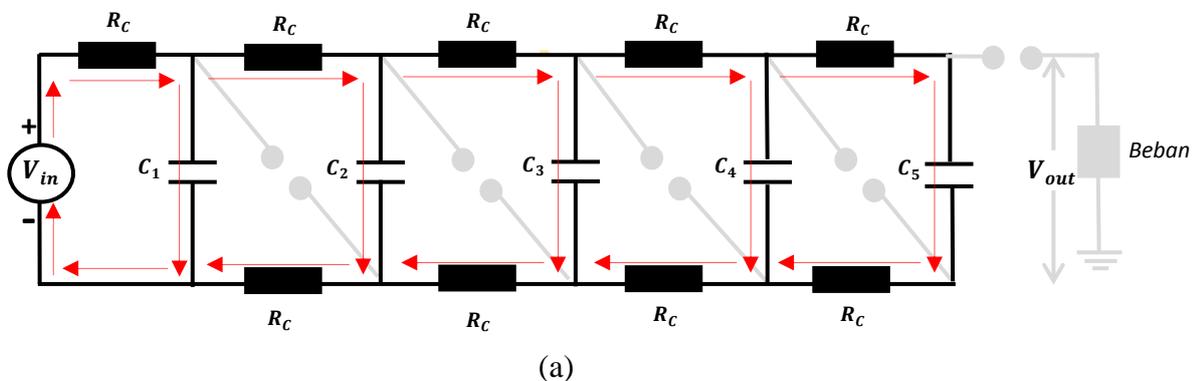
V_o : Tegangan maksimum keluaran *Marx Generator*

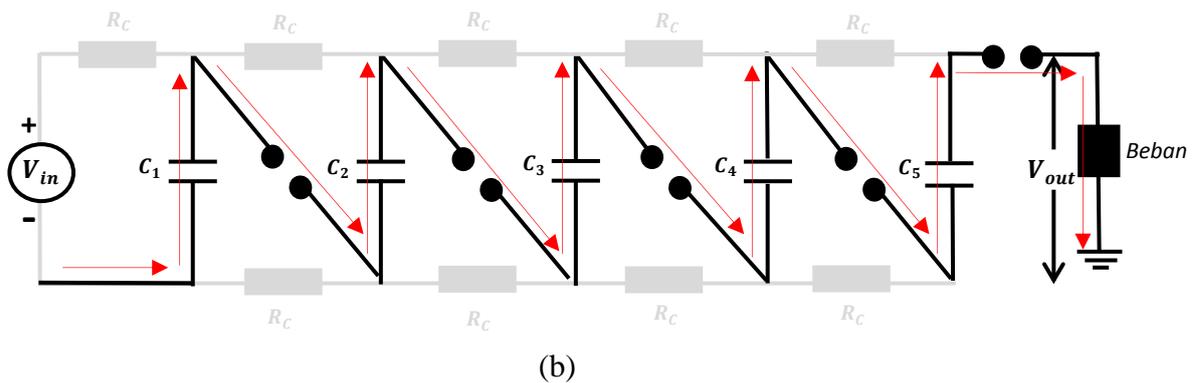
n : Banyak tingkatan rangkain *Marx Generator*

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).





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).

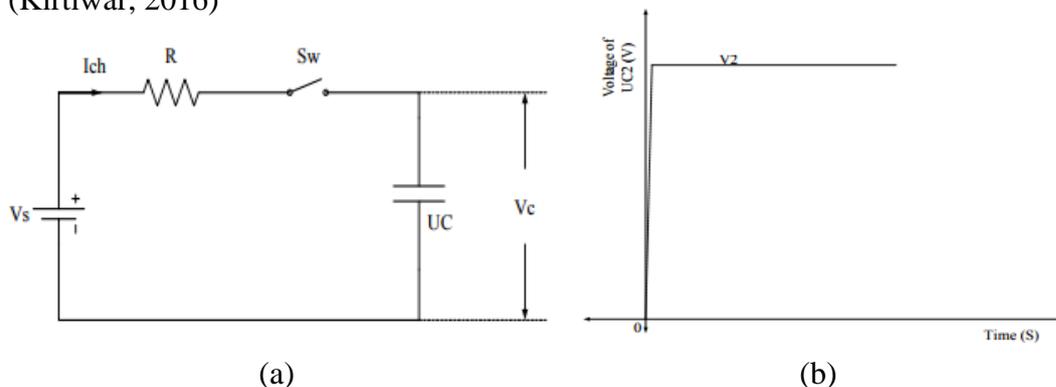
Perhitungan waktu pengisian kapasitor pada dengan sumber arus searah didapatkan dari Persamaan 2-3 yang berasal dari analisis rangkaian RC. Ketika sakelar sw terbuka seperti pada Gambar 2.5 (a) maka tidak ada muatan yang tersimpan pada kapasitor, oleh karena itu tegangan pada kapasitor adalah nol. Ketika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

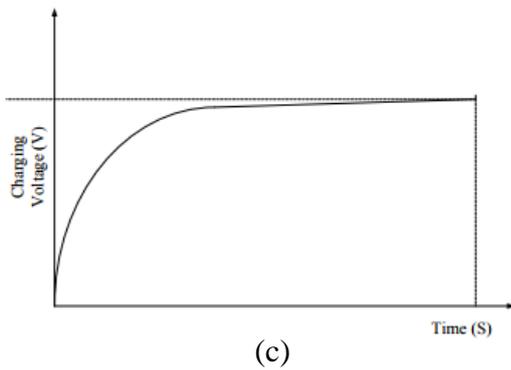
$$V_c(t) = V_{maks} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \dots\dots\dots (2-3)$$

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)





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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

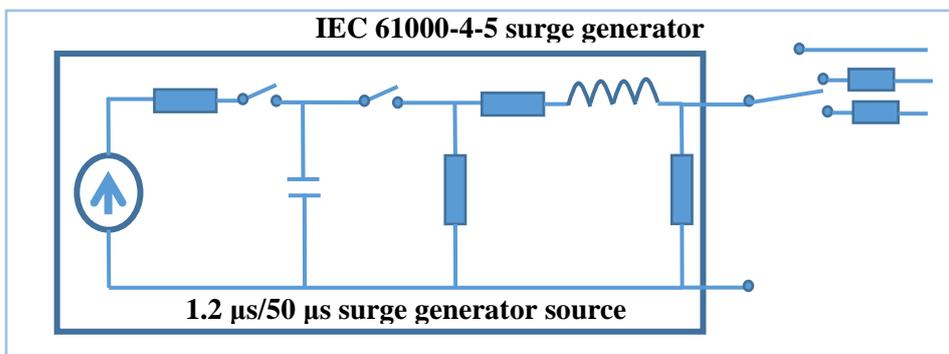
$$V_c(t) = Q_{maks} \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right) \cdot C$$

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

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.