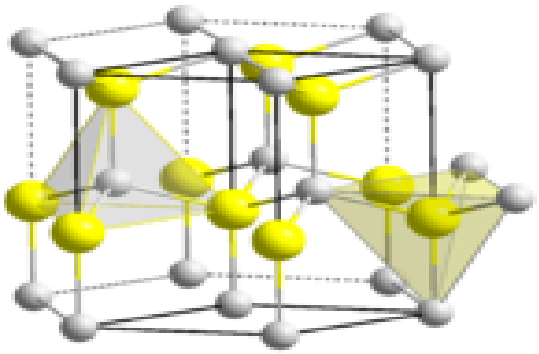
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Zinc Oxide (ZnO)

Oksida Seng adalah senyawa anorganik dengan rumus kimia ZnO dan biasanya terlihat sebagai suatu serbuk yang putih, hampir tidak dapat larut di dalam air. ZnO berwujud kristal heksagonal putih yang dapat dilihat pada gambar 1, kristal oksida seng menunjukkan efek *piezoelectric* akan berubah warna menjadi kuning saat dipanaskan dan akan kembali berwarna putih setelah didinginkan. ZnO terdapat di alam sebagai mineral *zinctie* dan merupakan semikonduktor dengan pita energi 3,3 eV. Keuntungan ZnO dengan pita energi yang besar berkemampuan untuk mendukung medan listrik yang besar, *noise* elektronik lebih rendah, dan operasi daya tinggi serta mempunyai suhu yang tinggi sekitar 1975^0C.



Gambar 1. Struktur Kristal ZnO[5]

[5] Anonim b. Zinc oxide, http://en.wikipedia.org/wiki/ Zinc_oxide, (6 November 2009)

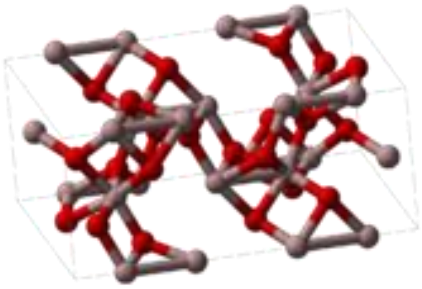
B. Aluminium Oxide (Al_2O_3)

Aluminium oksida adalah sebuah senyawa kimia dari aluminium dan oksigen, dengan rumus kimia Al_2O_3. Nama mineralnya adalah alumina, dan dalam bidang pertambangan, keramik dan teknik material senyawa ini lebih banyak disebut dengan nama alumina. Aluminium oksida adalah *insulator* (penghambat) panas dan listrik yang baik. Umumnya Al_2O_3 terdapat dalam bentuk kristalin yang disebut corundum atau α-aluminum oksida yang ditunjukkan pada gambar 2. Al_2O_3 dipakai sebagai bahan abrasif dan sebagai komponen dalam alat pemotong, karena sifat kekerasannya.

Aluminium oksida berperan penting dalam ketahanan logam aluminium terhadap perkaratan dengan udara. Logam aluminium sebenarnya sangat mudah bereaksi dengan oksigen di udara. Aluminium bereaksi dengan oksigen membentuk aluminium oksida, yang terbentuk sebagai lapisan tipis yang dengan cepat menutupi permukaan aluminium. Lapisan ini melindungi logam aluminium dari oksidasi lebih lanjut. Ketebalan lapisan ini dapat ditingkatkan melalui proses anodisasi. Beberapa *alloy* (paduan logam), seperti perunggu aluminium, memanfaatkan sifat ini dengan menambahkan aluminium pada *alloy* untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Al_2O_3 yang dihasilkan melalui anodisasi bersifat amorf, namun beberapa proses oksidasi seperti *plasma electrolytic oxydation* menghasilkan sebagian besar Al_2O_3 dalam bentuk kristalin, yang meningkatkan kekerasannya[6].

---

[6] Anonim a, Aluminium Oksida, http://id.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oksida,(6 November 2009).



Gambar 2. Al_2O_3 dalam bentuk kristal corundum[7]

C. Varistor Keramik ZnO

Varistor (*variable* resistor) dikenal juga dengan *voltage dependent resistor* (VDR). Artinya saat varistor mendeteksi kehadiran tegangan yang berlebihan, akan bersifat seperti sakelar yang membuang arus kelebihannya melalui varistor. Diharapkan tegangan turun kembali ke dalam batas normal. Varistor dipakai sebagai komponen pengaman rangkaian dan komponen yang peka atau kritis terhadap tegangan transien yang muncul secara tiba-tiba. Tegangan transien memicu varistor bekerja membuang arus transien yang timbul. Rangkaian elektronika terhindar dari kerusakan. Tegangan transien dapat memasuki rangkaian karena energi misalnya petir, terjadi di dekat rangkaian. Energi transien yang terlampau besar akan menyebabkan varistor rusak. Varistor yang terbuat dari bahan oksida metal disebut MOV (*metal oxide varistor*)[8].

Jika suatu surja petir tiba pada terminal varistor dan membuat sela varistor terpercik, maka gambar rangkaian ekivalen varistor adalah seperti ditunjukkan pada gambar 3 a. Tegangan pada terminal varistor saat mengalir arus surja adalah:

---

[7] Anonim 2, Aluminium Oksida, http://id.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oksida,(6 November 2009).

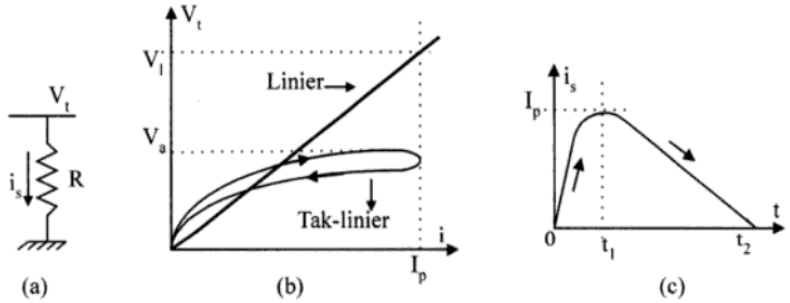
[8] seto y, rio, Kuliah Elektronika Industri (2009). h. 9

$V_t = i_s \times R$ ..... (1)

Dimana :

i_s = arus surja (A)

R = tahanan resistor tak linier (ohm)



Gambar 3. Rangkaian ekivalen dan karakteristik varistor[9]

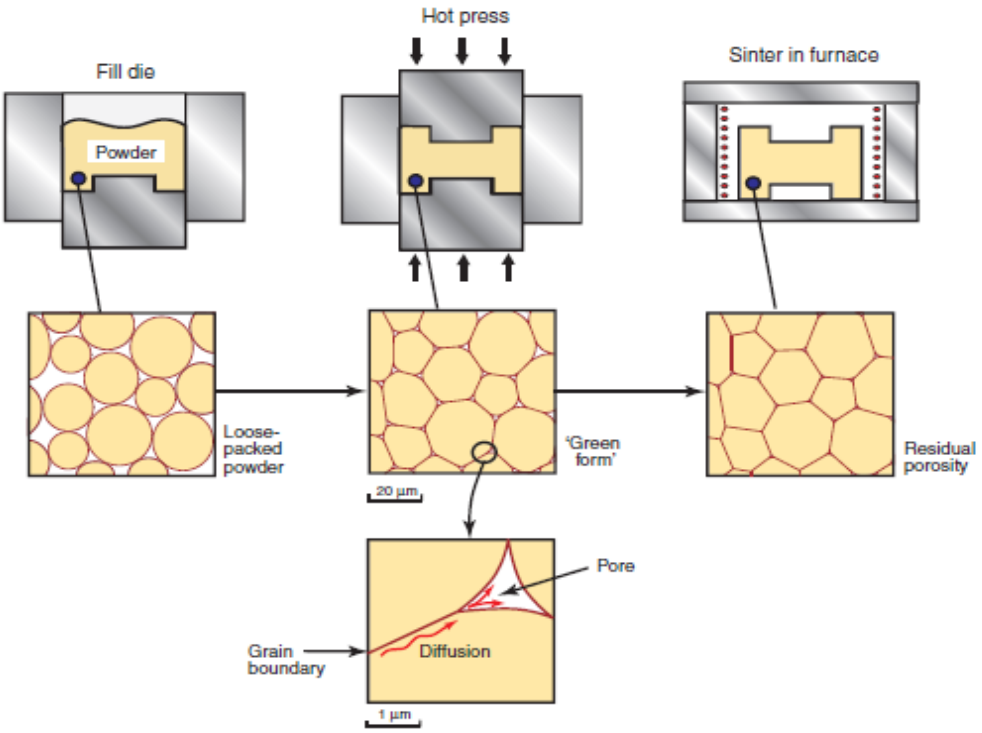
Misalkan karakteristik dari resistor tak linier adalah seperti pada gambar 3.b dan arus surja yang mengalir pada varistor adalah seperti pada gambar 3.c. Dalam selang waktu 0 sampai dengan t_1, arus surja naik dan mencapai nilai puncak $i_s = i_p$. Dalam selang waktu ini tahanan R mengecil, sehingga kenaikkan tegangan varistor dibatasi sampai V_a. Seandainya tahanan resistor R konstan, maka saat arus surja mencapai nilai puncak, tegangan di terminal varistor adalah $V_t = V_1$. Artinya tegangan sistem tetap tinggi, sehingga tujuan perlindungan tidak tercapai. Dalam selang waktu t_1 sampai dengan t_2, arus surja menurun, tahanan resistor R membesar. Saat arus surja menjadi nol, masih tersisa arus susulan yang relatif kecil. Arus susulan ini juga akan semakin kecil karena tahanan R semakin membesar, hingga akhirnya juga tersisa arus kecil yang disebut arus kendali[10].

[9] Tobing, L. Bonggas, Peralatan Tegangan Tinggi, (Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama 2003) h. 68

Biasanya arus kendali ini kurang lebih 50 A. Saat tegangan sistem nol, percikan pada sela padam, sehingga arus kendali menjadi nol dan tidak berlanjut lagi.

D. Proses Pembuatan Material Varistor

Proses pembuatan keramik varistor tidak jauh berbeda dengan teknik pembuatan keramik pada umumnya. Tahapan dasar dalam pembuatan keramik dengan cara pengelompokan partikel adalah preparasi material, pembentukan, dan perlakuan penyinteran.



Gambar 4. Mekanisme pengepresan kering pada serbuk dan penyinterannya[10]

[10] Ashby, Michael, Shercliff, Hugh and Cebon, David, Materials Engineering, Science, Processing and Design, (Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, 2007), h. 460

1. Preparasi Material

Ada beberapa zat yang digunakan untuk membuat keramik varistor, namun yang sudah banyak diteliti adalah varistor dengan bahan dasar ZnO. untuk menghasilkan karakteristik non-linier yang baik, dalam pembuatan varistor dapat ditambahkan zat oksida logam sebagai dopan. Preparasi material dilakukan untuk menyiapkan material dasar maupun dopan yang akan digunakan untuk membuat keramik varistor. Perhitungan bahan kimia ZnO dan Al_2O_3 yang digunakan untuk mengkonversi % mol dalam bentuk gram, dapat dicari dengan hubungan antara massa(m), jumlah mol(n) dan massa molekul relatif (M_r) suatu zat[11].

$$m = M_r \cdot \% n \qquad \text{.....(2)}$$

Dimana :

m = massa molekul (gram)

M_r = molekul relatif (gram/mol)

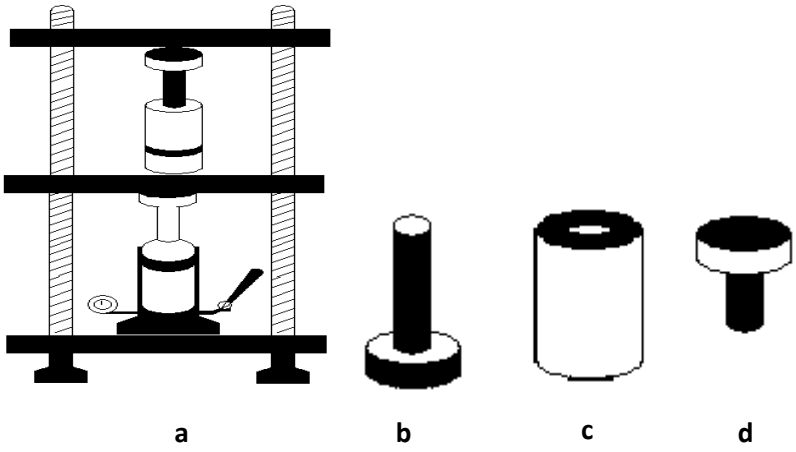
% n = jumlah mol (mol)

2. Pembentukan atau pencetakan

Produk keramik yang dibuat dengan cara aglomerasi partikel dapat dibentuk dengan berbagai metode baik dalam keadaan kering atau cair. Salah satu metode pembentukan produk keramik yang biasa digunakan adalah teknik pengepresan. Metode pembentukan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode pengepresan kering (*dry pressing*). Pengepresan kering dapat didefinisikan sebagai pengepakan uniaksial secara simultan dan pembentukan butiran bubuk dengan bahan pengikat dalam sebuah cetakan (*die*).

---

[11] Petrucci, Ralp H- Suminar, Kimia Dasar Prinsip dan Terapan Modern, (Jakarta : Erlangga 1999).



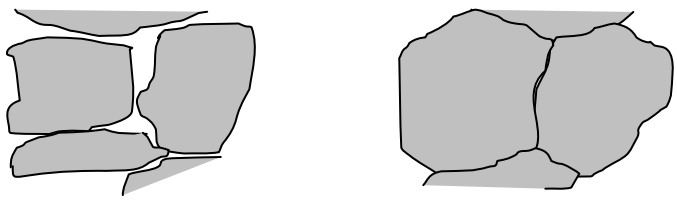
Gambar 5. (a) Posisi alat press hidrolik dan die pada proses pengepresan, dan bagian-bagian die, (b) bagaian atas, (c) bagian tengah, dan, (d) bagian bawah.

3. Perlakuan Penyinteran

Sintering adalah proses pembakaran dan pemadatan sesuatu yang dibentuk dari partikel serbuk. Pada pemadatan terjadi proses ikatan antar partikel dan partikel yang sudah berikatan tumbuh bergerak mendesak porositas atau rongga antar partikel. Pembakaran dimaksudkan untuk meningkatkan energi aktivitasi dan energi transportasi atom. Semakin tinggi suhu sintering dimungkinkan semakin cepat proses pembentukan kristal tersebut. Tinggi rendahnya suhu juga berpengaruh pada bentuk serta ukuran celah dan juga berpengaruh pada struktur pertumbuhan kristal. Prinsip yang melandasi proses sintering dapat diilustrasikan seperti gambar 6.

Proses sintering dipakai untuk pemadatan pelet mentah, Pelet ini berbentuk silinder yang mempunyai rasio tinggi pelet terhadap garis tengahnya sama dengan

satu. Jika energi aktivasi berasal dari panas maka terjadi pemindahan massa antar butir melalui mekanisme difusi dengan pergerakan loncatan acak. Partikel atau butir yang sudah bergabung akan tumbuh dan menuju suatu bentuk yang mempunyai luas permukaan terendah, misalnya bentuk bola, yang merupakan suatu bentuk ideal, dan bentuk poligon yang mempunyai sisi paling banyak. Parameter yang digunakah untuk mengendalikan proses sintering adalah densitas, laju pemanasan, suhu, dan waktu sintering. Densitas adalah ciri karakteristik pemadatan, pengkerutan merupakan karakteristik bahan, dan mikrostruktur adalah visualisasi karakteristik bahan secara menyeluruh.



(a) **(b)**

Gambar 6. (a) Sebelum disintering, permukaan tidak menyatu. (b) Setelah disintering butiran-butiran hanya ada satu permukaan saja.

Tujuan sintering adalah untuk memperkuat ikatan partikel hasil pengompakan melalui perpindahan atom. Perpindaham atom terjadi karena adanya difusi atom, aliran panas, susunan kristal dan pertumbuhan butir. Difusi yang dimaksud adalah pergerakan atom atau kekosongan sepanjang permukaan atau batas butir atau menembus volume bahan. Daya dorong sintering adalah perbedaan energi bebas

atau potensial kimia antar permukaan partikel, yang dipusatkan pada titik kontak partikel berdekatan[12].

F. Karakteristik Volt-waktu (V-t) dan Volt-Ampere (V-I) Varistor

1. Pengukuran Tegangan Impuls Menggunakan Pembagi Tegangan Resistif

Dalam sistem pengukuran dengan pembagi resistif (gambar 7.a) sebaiknya kabel ukur K dihubungkan pada CRO dengan impedansi surya Z sehingga membebani pembagi dengan resistansi efektif yang sama. Gangguan terpenting dari prilaku ideal pembagi diakibatkan oleh kapasitansi bumi dari cabang tegangan tinggi R, yang harus panjang untuk mengisolasi tegangan lebih tinggi. Kapasitansi C dalam rangkaian ekivaken dalam gambar 7.b yang dihubungkan ditengah-tengah R_1. Dengan menggunakan persamaan maka respon satuan dari rangkaian ini dapat diturunkan sebagai :

$$w(t) = 1 - e^{-t/T_R} \qquad \text{..... (3)}$$

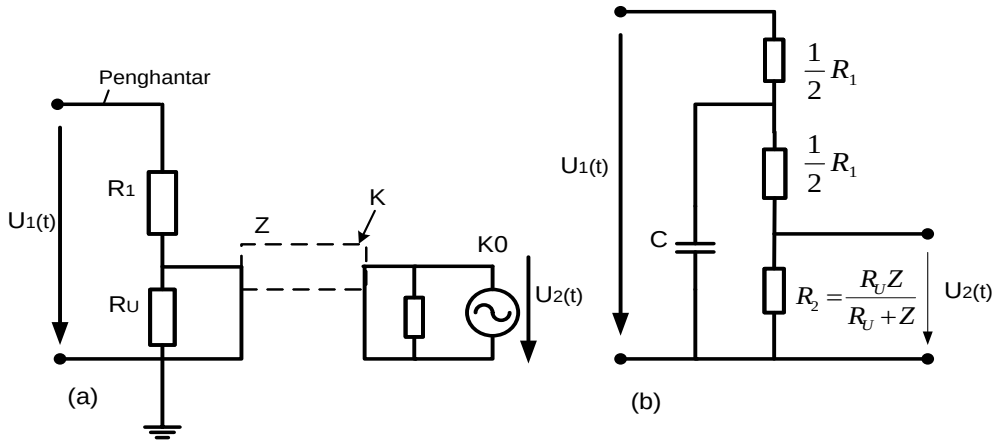
Dengan pendekatan ($R_1 = R_1 + R_2$) » R_2 diperoleh nilai konstan waktu T :

$$\mathbf{T_R \approx \frac{1}{4} RC} \qquad \text{..... (4)}$$

Pembagi resistif sangat menguntungkan digunakan untuk mengukur tegangan impuls yang curam dengan waktu yang tidak terlalu panjang. Pembagi untuk tegangan impuls terpa hubung harus dibuat dengan resistansi R yang besar karena pemanasan dan pembebanan dari sumber tegangan, yang menghasilkan respon transien kurang menguntungkan pada perubahan tegangan yang cepat.

---

[12] Sugindo, Analisis pemadatan, pengkerutan, dan Pertumbuhan butir sintering UO_2, Journal URANIA No. 21-22/Thn.VI (Januari-April 2000)



Gambar 7. Sistem pengukuran tegangan impuls dengan pembagi resistif
(a) diagram rangkaian
(b) rangkaian ekivalen dengan kapasitansi bumi[13]

Tegangan keluaran akan menuju suatu nilai batas :

$$U_{2\sim} = U_{1\sim} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \qquad \text{..... (5)}$$

Untuk tegangan diatas 1MV maka konstruksi pembagi resistif respon cepat menjadi semakin sulit, dikarenakan pengaruh kapasitansi bumi harus dikompensasi dengan meningkatkan kapasitansi gandeng pada elektroda tegangan tinggi. Karena itu lalu diperoleh pembagi resitif yang dikehendaki.

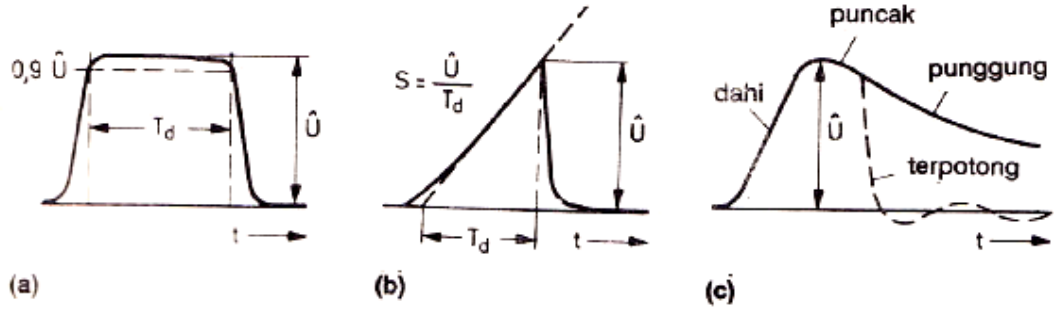
2. Pembangkit Impuls Tegangan Kapasitif

Umumnya tegangan impuls dibangkitkan dengan meluahkan muatan kapasitor tegangan tinggi (melalui sela atau switching) pada suatu rangkaian kapasitor, dan sering digunakan sebagai rangkaian pengali tegangan. Nilai puncak dari tegangan impuls dapat ditentukan dengan bantuan sela ukur atau dengan rangkian elektronik dikombinasikan dengan pembagi tegangan. Alat ukur tegangan impuls

[13] Kind, Dieter, Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi, (Bandung : ITB, 1993), h. 47

yang terpenting adalah osiloskop sinar katoda yang memungkinkan penentuan nilai-nilai sesaat melalui pembagi tegangan.

Pada gambar 8 menunjukkan tiga contoh tegangan impuls dengan parameter-parameternya. Ketergantungan terhadap waktu maupun tempo tegangan impuls tergantung pada cara pembangkitannya. Untuk percobaan dasar maka sering digunakan tegangan impuls persegi yang melonjak hingga nilai yang hampir konstan, maupun tegangan impuls berbentuk baji yang cirikan dengan suatu kenaikan yang selinier mungkin hingga terjadi tembus dan digambarkan dengan kecuraman S.



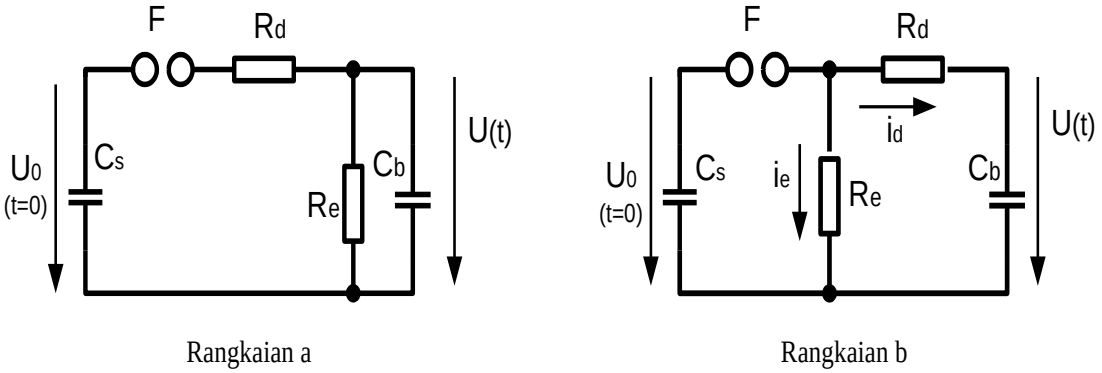
Gambar 8. Contoh tegangan impuls (a) tegangan impuls persegi, (b) tegangan impuls berbentuk baji, (c) tegangan impuls eksponensial ganda[14]

Untuk keperluaan pengujiaan maka tegangan impuls dibakukan, tanpa isolasi yang cukup berarti maka tegangan impuls ini cepat mencapai nilai maksimum, nilai puncak Û, dan kemudiaan meluruh perlahan menuju nol. Jika terjadi tembus secara sengaja ataupun tidak disengaja dalam rangkaian tegangan tinggi selama penerapan impuls (yang menyebabkan hilang secara mendadak), maka tegangan terjadi disebut sebagai tegangan impuls yang dipotong. Pemotongan dapat terjadi pada bagian depan, pada puncak atau pada punggung dari tegangan impuls.

[14] Kind, Dieter, Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi, (Bandung : ITB, 1993), h. 32

Dengan demikian gejala transien yang diinduksikan merupakan penyebab dari osilasi yang ditunjukkan pada gambar 8.c.

Gambar 9 menunjukkan dua rangkaian dasar untuk membangkitkan tegangan impuls yakni rangkaian a dan rangkaian b.



Gambar 9. Diagram rangkaian pembangkit tegangan impuls[15]

Kapasitor implus (C_s) dimuati melalui suatu resistansi dengan tegangan searah U_0 ($U_0 = V_0$) dan kemudian diluahkan dengan menyalakan sela (F) tegangan impuls $U(t)$ akan muncul pada kapasitor beban (C_b). Kedua rangkaian berbeda dalam hal penempatan resistor peluahan (R_e) terhadap resistor rendaman (R_d). Nilai elemen rangkaian menentukan bentuk kurva tegangan impuls. Prinsip kerja kedua rangkaian cukup mudah untuk dipahami. Waktu dahi yang singkat membutuhkan pengisian muatan yang cepat pada C_b hingga nilai puncak ($\hat{U}$) sedangkan waktu punggung yang panjang berarti peluahan yang lambat dan ini dicapai dengan $R_e \gg R_d$. Segera setelah penyalaan F pada t = 0 maka hampir seluruh tegangan U_0 muncul pada rangkaian R_d C_b dalam kedua rangkaian. Semakin kecil nilai R_d C_b maka akan semakin cepat tegangan $U(t)$ mencapai nilai puncak. Nilai puncak $\hat{U}$

[15] Kind, Dieter, Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi, (Bandung : ITB, 1993), h. 35

akan selalu kurang dari nilai tegangan yang dapat dihasilkan dengan muatan awal U_0 C_s yang terbagi pada $C_s + C_b$. untuk nilai efisien medan (η) berlaku persamaan berikut :

$$\eta = \frac{\hat{U}}{U_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \qquad \text{..... (6)}$$

C_s ›› C_b harus dipilih untuk mendapatkan $\hat{U}$ yang setinggi mungkin (untuk U_0 tertentu). Peluruhan tegangan impuls dalam rangkaian a terjadi dengan konstanta waktu C_s (R_d + R_e) dan dalam rangkaian b dengan konstanta waktu C_s R_e. Energi impuls yang diubah dalam sebuah peluahan dinyatakan dengan persamaan berikut:

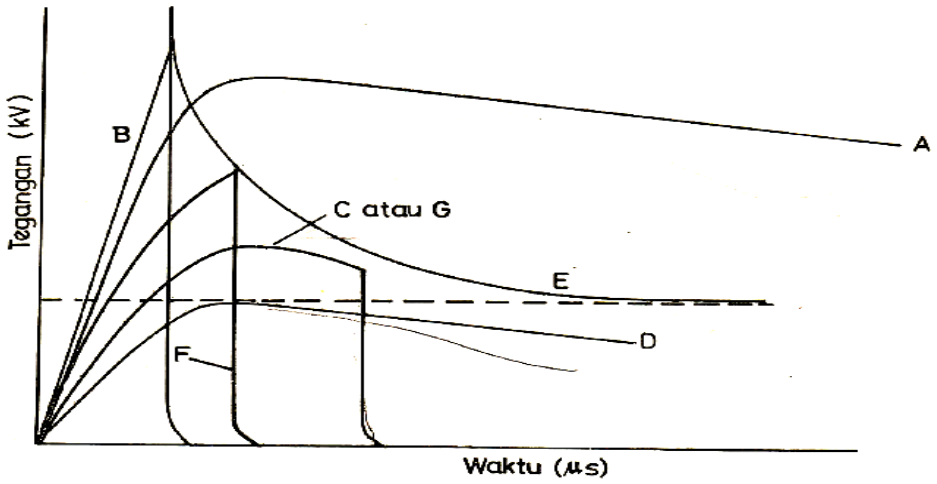
$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \qquad \text{..... (7)}$$

Jika dalam persamaan diatas nilai U_0 diganti dengan tegangan pengisian terbesar yang mungkin terjadi maka diperoleh energi impuls maksimum yang merupakan parameter penting untuk pembangkit tegangan impuls.

3. Karakteristik Volt-Waktu (*Volt-time Characteristic*)

Karakteristik volt-waktu adalah karakteristik yang menyatakan hubungan tegangan percikan sela pelindung tegangan lebih dan waktu percikan karakteristik ini dibutuhkan untuk melihat keberhasilan pelindung tegangan lebih dalam melindungi peralatan listrik. Pada gambar 10 dapat dilihat, lengkung A adalah surja pada kawat transmisi jika ia sampai pada suatu gardu. Tergantung pada besarnya surja yang datang, maka ia dapat datang kepada gardu sebagai gelombang yang curam terpotong pada mukanya (Lengkung B), atau sebagai gelombang curam yang terpotong kira-kira 3μs pada ekornya (Lengkung C), atau ia dapat datang berbentuk gelombang penuh (Lengkung D). Lengkung E yang

didapat dengan menghubungkan ketiga puncak dari tiga gelombang di atas, merupakan karakteristik volt-waktu dari isolasi yang harus menahan bermacam-macam gelombang tegangan yang datang pada gardu. Lengkung ini juga melalui titik-titik lompatan api pada puncak (Lengkung F) dan lompatan api 50% (Lengkung G).



Gambar 10. Karakteristik volt- waktu[16]

Keterangan gambar 10, sebagai berikut :

A = Gelombang impuls yang datang
B = Gelombang cepat, terpotong pada muka
C = Gelombang terpotong pada ekor
D = Gelombang penuh
E = Lengkung volt-waktu
F = Gelombang terpotong pada puncak
G = Gelombang terpotong pada ekor dengan kemungkinan lompatan 50%

Jadi, lengkung volt-waktu adalah lengkung yang menghubungkan puncak-puncak tegangan lompatan api bila sejumlah impuls dengan bentuk tertentu ditrapkan

[16] Arismunandar, Artono, Teknik Tegangan Tinggi, (Jakarta : Pratnya Paramita, 1984), h. 115

pada isolasi, dengan kata lain lengkung volt-waktu adalah tempat kedudukan titik dengan koordinat ($t_{lompatan,}$ V_{maks}).

4. Karakteristik Volt-Ampere Varistor

Karakteristik varistor ZnO terdiri dari 3 (tiga) daerah tegangan kerja yang dibentuk oleh adanya hubungan tegangan dan arus yang dapat melawati varistor ZnO seperti pada gambar 11. Daerah tegangan kerja yang menggambarkan karakteristik volt-ampere antara lain daerah arus bocor, daerah kerja tegangan normal dan daerah kerja tegangan lebih.

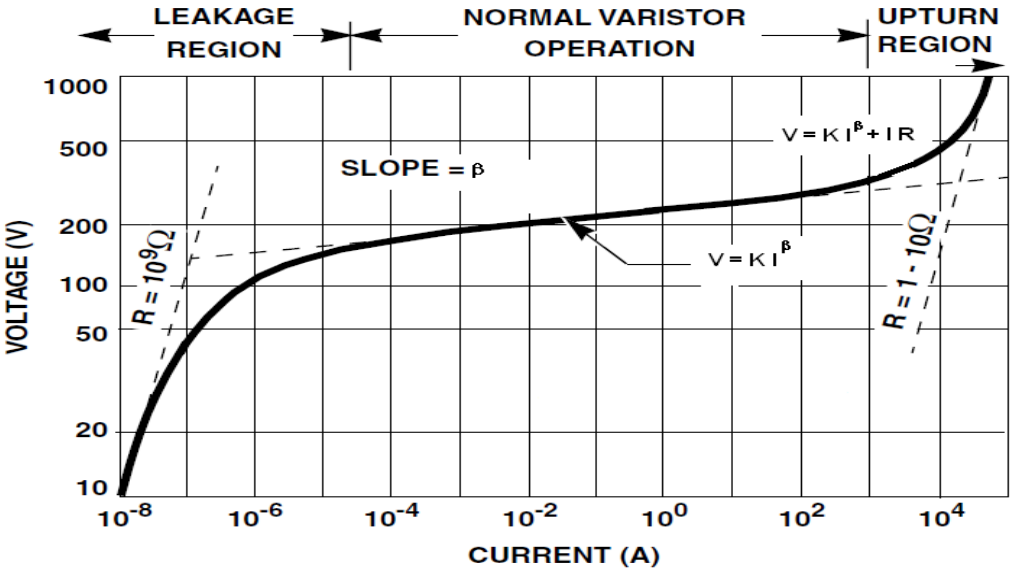
a. Daerah Arus Bocor (*Leakage Region*)

Pada gambar 11 operasi daerah arus bocor menunjukan kurva V-I mendekati garis linier dan arus yang mengalir pada varistor tergantung temperatur. Nilai resitansi varistor tinggi mendekati 10^9 ohm dan kelihatan sebagai rangkaian terbuka. Resistansi varistor akan naik jika arus yang mengalir bertambah, sehingga tegangan pada varistor akan naik juga.

Berdasarkan rekomendasi IEC-352 (*International Electronical Comision*) bahwa daerah arus bocor tersebut kira-kira antara 10 µA sampai dengan 300 µA.

b. Daerah Kerja Tegangan Normal (*Normal Varistor Operation*)

Daerah kerja tegangan normal atau disebut juga sebagai daerah *breakdown* merupakan daerah dimana varistor bekerja memberikan perlindungan terhadap tegangan lebih. Kenaikkan arus yang mengalir pada varistor dapat naik secara dratis dengan magnitude 5 : 6 kali dengan hanya menaikkan tegangan sebesar 50% dari kerja tegangan normal.



Gambar 11. Karakteristik volt-ampere varistor[17]

Pada daerah breakdown ini, resistansi varistor akan menurun dalam bentuk linier pada skala logaritmik bersamaan dengan bertambahnya arus, sedangkan tegangan varistor akan cenderung stabil. Pada gambar 11 daerah kerja tegangan normal terbentuk landaian (*slope*) yang besarnya sama dengan β (*koefisien nonlinier*). Hubungan antara tegangan normal dan arus varistor pada daerah kerja tegangan normal dengan persamaan berikut:

$V = K I^{\beta}$ Volt ..... (7)

Dimana: K = Konstanta Varistor

I = Arus yang mengalir (mA)

β = *Koefisien nonlinier* varistor

[17] Anonim, Littelfuse Varistor-Basic Propertis, Terminology and Theory, Journal Harris Suppression Products, Copyright Littelfuse, Inc, Juli 2009, h. 10-95

Nilai konstanta nonlinier (β) varitor yang diproduksi oleh pabrik berbeda beda. Untuk menentukan koefisien nonlinier (β) varistor dengan cara menetapkan tangen arah kurva karakteristik V-I pada arus sebesar 1 mA.

Nilai β tersebut sepenuhnya tergantung atas perlakuan-perlakuan dalam poses pembuatannya dan nilai-nilai tipikal yang dikeluarkan berbagai pabarik sebagai berikut :

- Temperatur sintering T = 1100 - 1400 ^{0}C
- Waktu penahanan sintering t = 1 - 4 jam
- Tekanan pada saat pencetakan P = 100 - 400 kg/cm^2

c. Daerah Kerja Tegangan Lebih (*Up turn Region*)

Daerah kerja tegangan lebih atau disebut juga sebagai daerah *up turn*, dimana perubahan arus varistor tidak linier lagi melainkan berbentuk parabolik. Dalam hal ini perubahan resistansi varistor tidak saja disebabkan oleh besarnya arus, tetapi juga oleh kenaikan temperatur varistor yang sebabkan oleh efek joule.

Karakteristik varistor pada *up turn*, dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$V = K I^{\beta} + I R \qquad \text{.....(8)}$$

dimana : R = resistansi yang ditentukan oleh butiran ZnO dan berkisar antara 10 ohm – 1 ohm.

I = Arus varistor dengan *range* antara 100A – 100 kA.