

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. *Zinc Oxide (ZnO)*

Seng merupakan logam yang berwarna putih kebiruan, berkilau, dan bersifat diamagnetik. Walau demikian, kebanyakan seng mutu komersial tidak berkilau. Seng sedikit kurang padat dari pada besi dan berstruktur kristal heksagonal.⁵

Seng mudah bereaksi dengan asam bukan pengoksida, melepaskan H₂ dan menghasilkan ion divalensi. Seng mudah bereaksi bilamana dipanaskan dalam O₂ menghasilkan oksida, seng juga dapat larut dalam basa kuat karena kemampuannya membentuk ion zinkat yang biasa ditulis ZnO₂²⁻.

Zinc oxide merupakan senyawa anorganik dengan formula ZnO. ZnO merupakan bahan semikonduktor tipe-n dengan lebar pita energi 3,2 eV – 3,3 eV pada suhu kamar. Logam ini keras dan rapuh pada kebanyakan suhu, namun dapat ditempa antara 100 sampai dengan 150 °C. Di atas 210 °C, logam ini kembali menjadi rapuh dan dapat dihancurkan menjadi bubuk dengan memukul-mukulnya. Logam ini memiliki transmisi optik yang tinggi serta mampu menghantarkan listrik.⁶

⁵ Anonim a. Seng. <http://www.ebook-search-queen.com/ebook/seng/seng.all.html>. Akses 11 November 2009. Pukul 13:39 WIB.

⁶ Bednarek, Paulina. *Ceramic Materials – Forming Methods and Properties of Final Elements*. Division of Inorganic Technology and Ceramics. Warsaw University of Technology

Kebanyakan metaloid dan *non* logam dapat membentuk senyawa biner dengan seng, terkecuali gas mulia. Oksida ZnO merupakan bubuk berwarna putih yang hampir tidak larut dalam larutan netral tetapi dapat larut di dalam basa atau asam. ZnO merupakan material unik dan menarik sehingga banyak diteliti dan dikembangkan seperti evaluasi sifat listrik, sifat fisis, struktur kristal dan struktur mikro.

Keuntungan *Zinc oxide* dari bahan-bahan semikonduktor pita lebar (*wide band* semikonduktor) yang populer sebelumnya (SiC dan GaN) adalah selain karena dia bisa dioperasikan dalam lingkungan yang keras dan bersuhu tinggi, resistansi yang lebih tinggi untuk keadaan radiasi energi tinggi.⁷



Gambar 1. Serbuk ZnO.

⁷ Nugroho, P. 2004. *Devais Mikroelektronika ZnO*. Teknik Elektro UGM. Yogyakarta.

B. *Copper Oxide* (CuO)

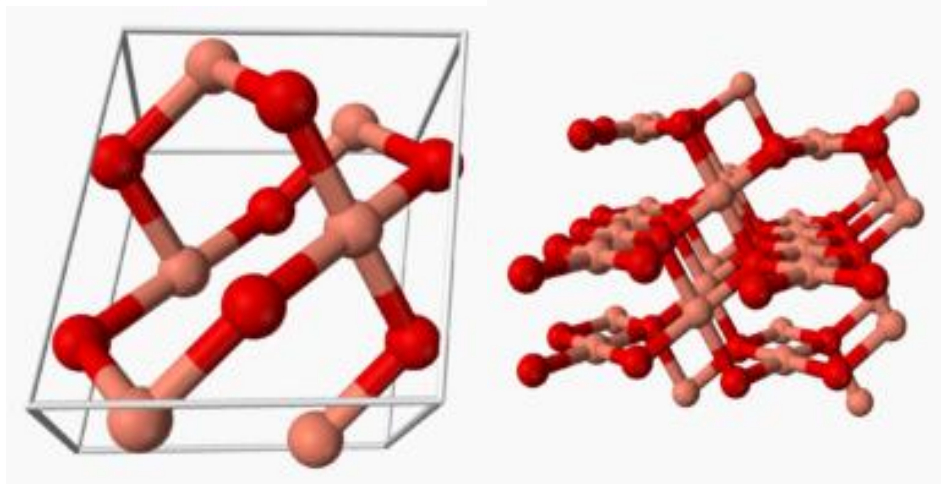
Tembaga adalah unsur kimia dengan simbol Cu memiliki inti 29 ion (+) dikelilingi 29 ion (-) dan dengan nomor atom 29. Tembaga merupakan logam elastik dengan suhu yang sangat tinggi dan memiliki daya konduksi listrik.

Tembaga *Oxide* merupakan hasil oksidasi dari tembaga yang memiliki rumus kimia CuO. Zat ini tidak dapat dilarutkan dalam air atau dalam senyawa organik. Tembaga oksida terkonsentrasi larut dalam amonia dan ditemukan sebagai mineral di beberapa batu berwarna merah. Bila terkena oksigen, tembaga akan secara alami akan teroksidasi menjadi tembaga oksida dan membutuhkan waktu yang panjang dalam proses oksidanya. Tembaga oksida merupakan substansi pertama yang ditemukan yang memiliki sifat semikonduktor tipe-p karena memiliki batas celah pita 1,2 eV.⁸



Gambar 2. Serbuk Tembaga Oksida

⁸ Anonim b.2009. http://en.wikipedia.org/wiki/Copper%28II%29_oxide. Akses 2 September 2009. Pukul 15:02 WIB.



Gambar 3. Sel Unit dan Struktur Kristal Tembaga Oksida

C. Keramik Varistor ZnO

Keramik pada awalnya berasal dari bahasa Yunani *keramikos* yang artinya suatu bentuk dari tanah liat yang telah mengalami proses pembakaran. Kamus dan ensiklopedia tahun 1950-an mendefinisikan keramik sebagai suatu hasil seni dan teknologi untuk menghasilkan barang dari tanah liat yang dibakar, seperti gerabah, genteng, porselin, dan sebagainya. Tetapi saat ini tidak semua keramik berasal dari tanah liat.

Menurut klasifikasinya, keramik terbagi atas keramik tradisional dan keramik halus. Keramik tradisional merupakan keramik yang terbuat dari tanah liat, sedangkan keramik halus atau biasa disebut keramik modern, keramik teknik, *advanced ceramic*, *engineering ceramic*, *technical ceramic* adalah keramik yang dibuat dengan menggunakan oksida-oksida logam atau logam, seperti: oksida

logam (Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , dll), yang penggunaannya sebagai elemen pemanas, semikonduktor, komponen turbin, dan pada bidang medis.⁹

Salah satu bentuk pengaplikasian dari keramik modern adalah keramik varistor (*variable resistor*) yang menggunakan bahan dasar ZnO yang digunakan sebagai komponen utama dari *arrester metal oxide* (MOA) untuk melindungi sistem tenaga listrik dari bahaya tegangan lebih yang dihasilkan petir atau akibat proses hubung singkat pada sistem tenaga listrik.

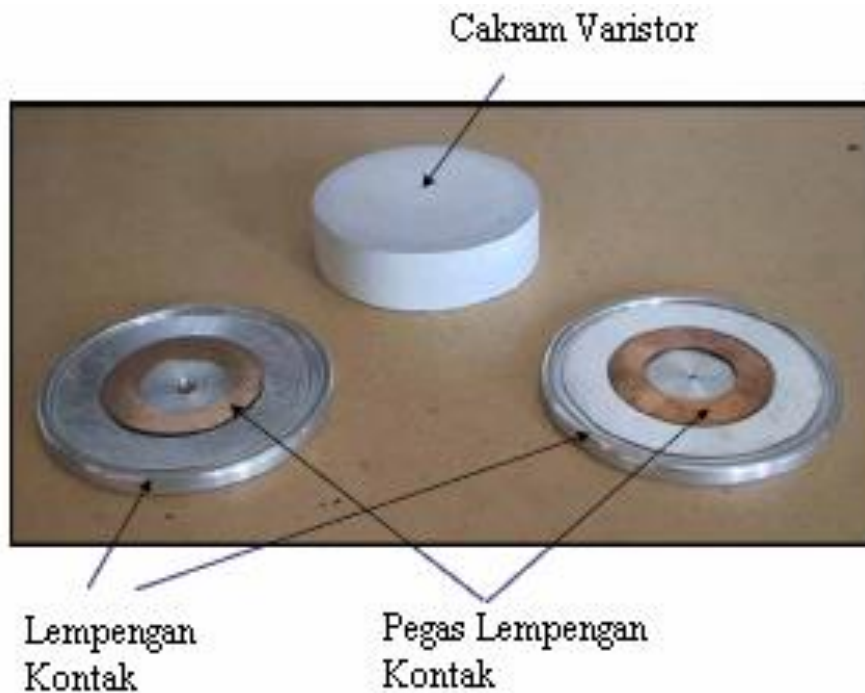
Varistor dipasang pada peralatan yang dihubungkan dari fasa konduktor ke tanah. Varistor memberikan saluran yang mudah dilalui oleh arus petir, sehingga tidak timbul tegangan lebih yang tinggi pada peralatan. Desain saluran varistor tersebut harus sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu aliran daya sistem 50 Hz. Pada kerja normal, varistor berfungsi sebagai isolator dan bila terkena sambaran petir akan berlaku sebagai konduktor yang melewatkan arus petir ke bumi. Setelah arus hilang, varistor akan cepat kembali menjadi isolator, sehingga pemutus tenaga (PMT) tidak sempat membuka.

Tujuan dari varistor ialah untuk membatasi kelebihan tegangan yang dapat muncul pada trafo dan perangkat listrik lain baik karena petir ataupun tekanan listrik lain. Pangkal bagian atas dari varistor dihubungkan pada kawat atau terminal yang harus dilindungi, dan pangkal bagian bawah dihubungkan dengan tanah.

Varistor ZnO memiliki beberapa kelebihan, yaitu memiliki koefisien ketidaklinieran yang tinggi, mampu menyerap energi yang tinggi, memiliki respon yang

⁹ Anonim c, 2009. <http://id.wikipedia.org/wiki/Keramik>. Akses 11 November 2009. Pukul 13:28 WIB.

cepat terhadap gelombang datang yang cepat, ukuran yang kecil, memiliki waktu hidup yang lebih lama pada kondisi lingkungan yang buruk dan biaya material yang dapat bersaing.¹⁰



Gambar 4. Keramik Varistor

varistor merupakan kunci dalam koordinasi isolasi suatu sistem tenaga listrik. Bila surja datang ke gardu induk, varistor bekerja melepaskan muatan listrik (*discharge*), serta mengurangi tegangan abnormal yang akan mengenai peralatan dalam gardu induk. Setelah surja (petir atau hubung) dilepaskan melalui varistor, arus masih mengalir karena adanya tegangan sistem, arus ini disebut arus dinamik atau arus susulan. Varistor harus mempunyai ketahanan yang cukup terhadap arus susulan yang terjadi, dan harus mampu memutuskannya.

¹⁰ Tobing, L. B. 2003 a. *Peralatan Tegangan Tinggi*. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.

Persyaratan yang harus dipenuhi oleh varistor adalah sebagai berikut:

1. Tegangan percikan (*sparkover voltage*) dan tegangan pelepasannya (*discharge voltage*), yaitu tegangan pada terminalnya pada waktu pelepasan harus cukup rendah, sehingga dapat mengamankan isolasi perlatan. Tegangan percikan disebut juga tegangan gagal sela (*gap breakdown voltage*). Tegangan pelepasan disebut juga tegangan sisa (*residual voltage*).
2. Arester harus mampu memutuskan arus dinamik dan dapat bekerja terus seperti semula. Batas dari tegangan sistem di mana pemutusan arus susulan ini masih mungkin, disebut tegangan dasar (*rated voltage*) dari arester.

Varistor ZnO memproteksi isolasi peralatan pada sistem kelistrikan terhadap tegangan lebih dalam dan luar. Varistor ini menunjukkan resistansi yang sangat tinggi selama operasi normal dan resistansi yang sangat rendah selama tegangan lebih transien. Sehingga karakteristik V-I varistor ini adalah tak linear.¹¹

Mikrostruktur partikel ZnO lebih kecil dibandingkan dengan partikel SiC yaitu seperduapuluh sampai empatpuluh kalinya. Komponen utama cakram ZnO adalah partikel kristal ZnO 5 sampai 10 mikro, dikelilingi oleh lapisan resistif tinggi dengan tebal 0,1 mikro. Lapisan resistansi tinggi ini membentuk ikatan antara partikel-partikel ZnO pada cakram ZnO.

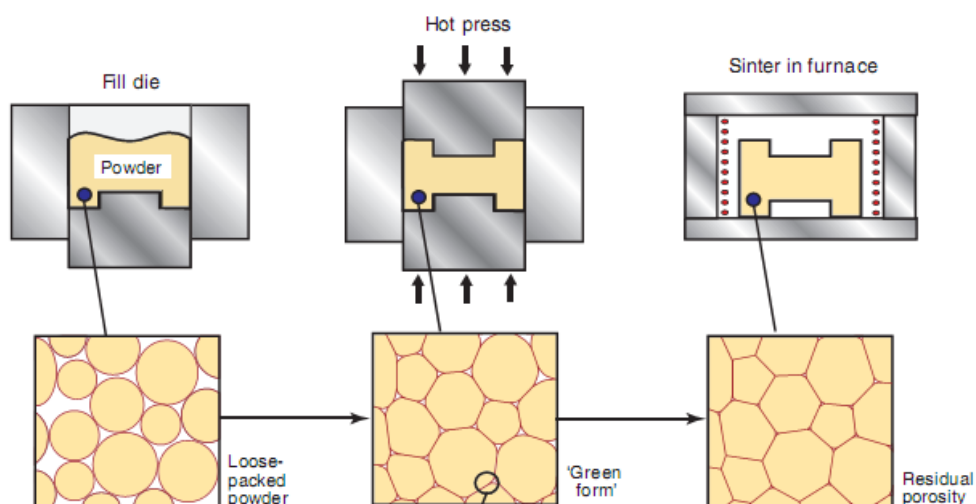
Tidak seperti SiC dimana karakteristik tidak-liniernya timbul dari partikel SiC, resistifitas partikel ZnO lebih rendah pada lapisan-lapisan batasnya. Akibatnya, ketika cakram ZnO diberikan tegangan tinggi, sebagian besar

¹¹ Kind, Dieter. 1993. *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. ITB. Bandung

tegangannya timbul di sepanjang lapisan batas tersebut, menghasilkan karakteristik tidak linier pada cakraanya. Lapisan batas juga menentukan kapasitansi cakram ZnO. Korelasi timbul antara tegangan *discharge* dan karakteristik kapasitansi sebagai hasil dari mikrostruktur kristal dan lapisan batas butir.

D. Pemrosesan Material Varistor

Pada dasarnya pembuatan keramik yang dilakukan baik yang tradisional maupun modern dapat diterapkan dalam pembuatan sebuah varistor. Proses pembuatannya yang meliputi pemilihan material yang akan dikelompokkan dengan partikel-partikel yang diinginkan yang nantinya akan diproses dengan cara pemadatan serbuk atau yang dikenal dengan reaksi padatan. Material akan dibentuk menjadi bentuk tertentu sesuai yang diinginkan, kemudian dilanjutkan dengan pemanasan pada suhu yang tinggi agar terjadi ikatan antar partikel-partikel tersebut.¹²



Gambar 5. Proses pembentukan keramik (Michael Ashby *et al*, 2007)

¹² Smith. 1990. *Principles of materials Science and Engineering*. McGraw-hill, Inc. P 864.

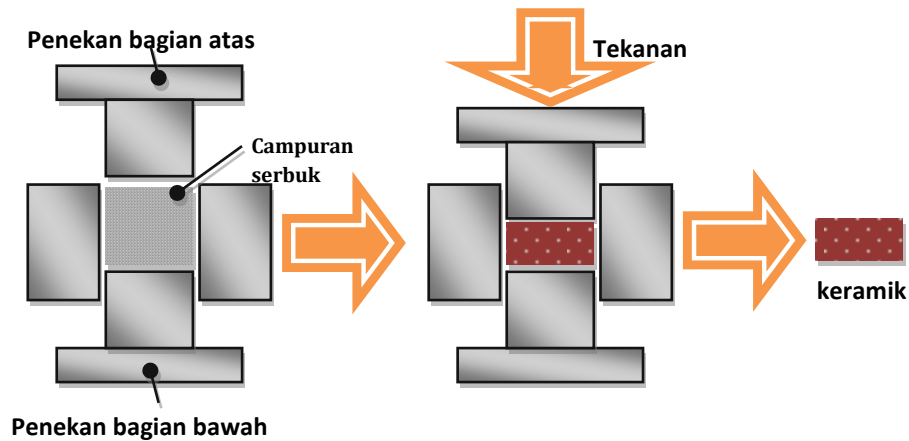
1. Pemilihan Material Dasar

Tujuan pengolahan bahan ini adalah untuk mengolah bahan baku dari berbagai material yang belum siap pakai menjadi bahan keramik yang telah siap pakai. Pengolahan bahan dapat dilakukan dengan metode basah maupun kering, dengan cara manual ataupun mesinal. Ada beberapa zat yang digunakan untuk membuat keramik varistor, namun yang telah banyak diteliti adalah varistor dengan bahan dasar ZnO. Untuk menghasilkan karakteristik tidak linier yang baik, dalam pembuatan varistor ditambahkan zat oksida sebagai dopan. Pemilihan bahan dasar ini dimaksudkan untuk menyiapkan material dasar dalam pembuatan keramik varistor.

2. Pembentukan Dengan Pengepresan

Produk keramik yang akan dibentuk dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai macam metode, baik metode pembentukan dalam keadaan kering maupun dalam keadaan cair. Salah satu metode pembentukan yang digunakan adalah dengan teknik pengepresan.

Metode pembentukan yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan metode pengepresan kering (*dry pressing*). Pengepresan kering dapat didefinisikan sebagai pengepakan dan pembentukan butiran bubuk dengan bahan pengikat dalam sebuah cetakan (*die*). Sesudah dicetak kemudian keramik dipanaskan pada suhu bertekanan tinggi dengan cara dibakar atau disintering untuk memperoleh kekerasan atau kepadatan yang diperlukan .



Gambar 6. Proses pengepresan atau pencetakan keramik

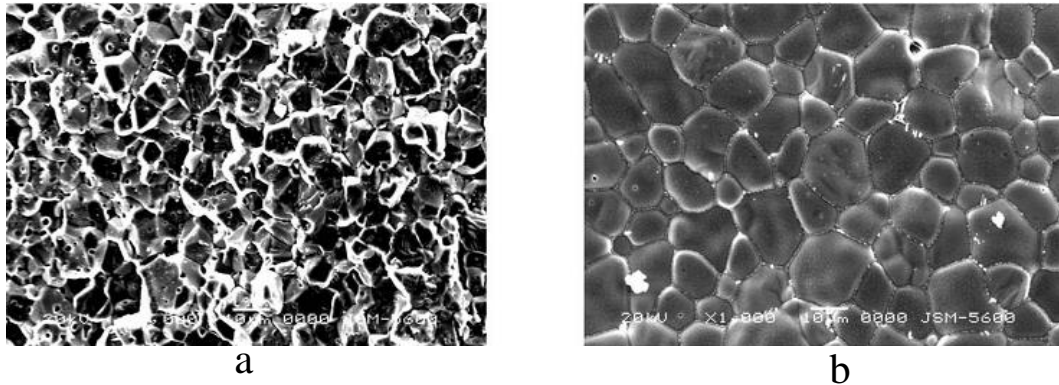
3. Sintering Pada Suhu Tinggi

Pembakaran merupakan inti dari pembuatan keramik di mana proses ini mengubah massa yang rapuh menjadi massa yang padat, keras, dan kuat. Pembakaran dilakukan dalam sebuah tungku atau *furnace* suhu tinggi. Perlakuan pemanasan dengan cara dibakar atau disintering pada suhu bertekanan tinggi merupakan tahapan yang penting dalam proses pembuatan keramik.

Proses sintering adalah pembakaran dan pemadatan sesuatu yang dibuat dari partikel serbuk. Tujuan dari pembakaran ini adalah untuk memperkuat ikatan partikel hasil pengepresan melalui perpindahan atom. Perpindahan atom terjadi akibat adanya difusi atom, aliran panas, susunan kristal dan pertumbuhan butir.¹³ Pengaruh suhu pembakaran akan mempengaruhi mikrostruktur dari sebuah keramik varistor, di mana ukuran butir partikel sebuah material akan membesar dan batas butir partikelnya akan berkurang atau semakin kecil seiring dengan semakin tingginya suhu pembakaran. Dalam pembuatan keramik varistor

¹³ Smith. 1990. *Principles of materials Science and Engineering*. McGraw-hill, Inc. P 864.

perlakuan pemanasan ini akan menghasilkan sebuah transformasi padatan berpori menjadi padatan.

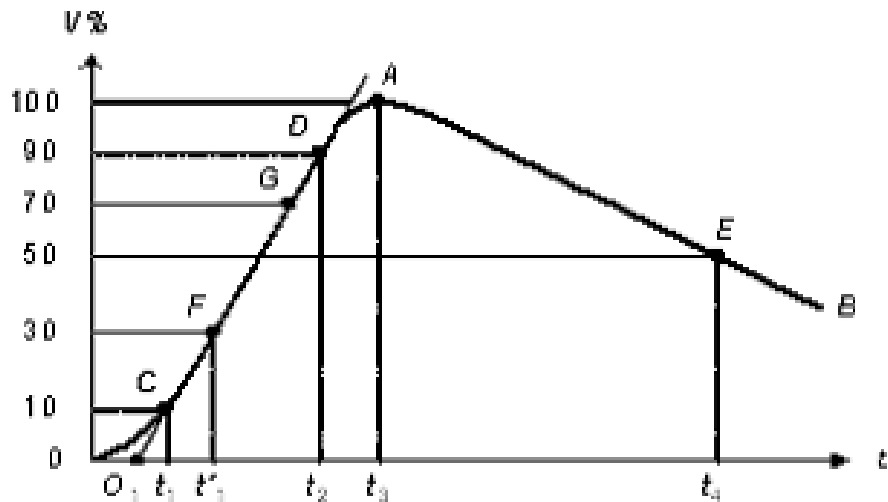


Gambar 7. (a) partikel varistor ZnO yang disinter pada suhu 1000°C , (b) varistor ZnO yang disinter pada suhu 1300°C (Apaydin *et al*, 2005)

E. Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls

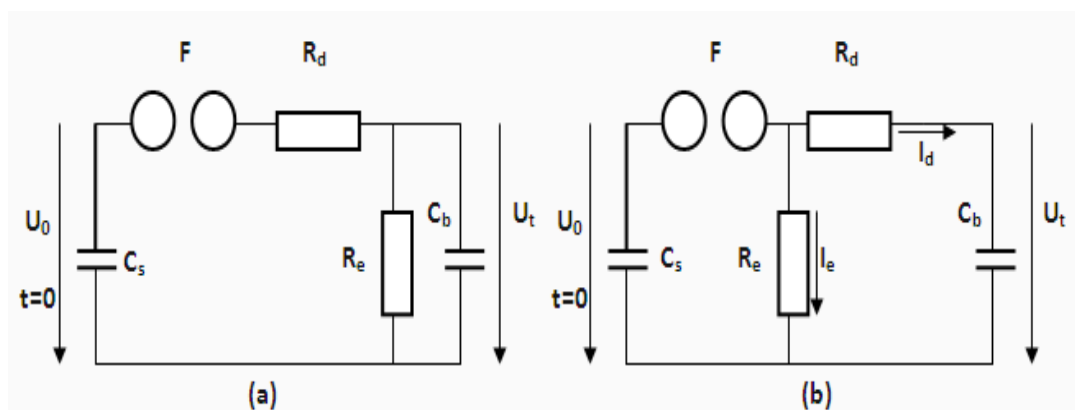
Tegangan impuls diperlukan dalam pengujian tegangan tinggi untuk mensimulasi terpaan akibat tegangan lebih dalam dan luar serta untuk meneliti mekanisme tegangan tembus. Umumnya tegangan impuls dibangkitkan dengan meluahkan muatan kapasitor tegangan tinggi (melalui sela) pada suatu rangkaian resistor dan kapasitor. Nilai puncak dari tegangan impuls dapat ditentukan dengan bantuan sela ukur atau dengan rangkaian elektronik yang dikombinasikan dengan pembagi tegangan.¹⁴

¹⁴ Kind, Dieter. 1993. *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. ITB. Bandung



Gambar 8. Bentuk gelombang impuls

Gambar 8 menunjukkan bahwa gelombang impuls ditunjukkan berdasarkan kenaikan waktu muka dan waktu penurunan atau ekor sampai 50% dari nilai puncak tegangan. Titik A adalah nilai puncak dari gelombang impuls dengan nilai 100%. Sedangkan titik C dengan nilai 10% dari tegangan puncak sampai titik D dengan nilai 90% dari tegangan puncak merupakan bagian muka gelombang dan titik E dengan nilai 50% setelah tegangan puncak merupakan bagian ekor gelombangnya.¹⁵



Gambar 9. Rangkaian pembangkit tegangan impuls

¹⁵ Hani, S. Sabdullah, M. 2007. *Studi Simulasi Transien Akibat Sambaran Petir Pada Saluran Distribusi 20 kV di Yogyakarta dengan Bantuan EMTP*. Jurnal Teknologi Academia ISTA. Vol 12. ISSN:1410-5829.

Gambar 9 menunjukkan kapasitor impuls C_s dimuati melalui suatu resistansi dengan tegangan searah U_0 dan kemudian diluahkan dengan menyalakan sela F. Tegangan impuls $u(t)$ akan muncul pada kapasitor beban C_b .¹⁶

Nilai elemen rangkaian menentukan bentuk kurva tegangan impuls. Waktu dahi yang singkat membutuhkan pengisian muatan yang cepat pada C_b hingga nilai puncak U sedangkan waktu punggung yang panjang berarti peluahan yang lambat dan ini dicapai dengan $R_e \gg R_d$. setelah penyalan F pada $t = 0$ maka hampir seluruh tegangan U_0 muncul pada rangkaian seri $R_d C_b$ dalam kedua rangkaian. Semakin kecil nilai $R_d C_b$ maka akan semakin cepat tegangan $u(t)$ mencapai nilai puncak. Nilai puncak U akan selalu kurang dari nilai tegangan yang dapat dihasilkan dengan muatan awal $U_0 C_s$ yang terbagi pada $C_s + C_b$. Untuk mendapatkan U yang setinggi mungkin (untuk U_0 tertentu) maka harus dipilih $C_s \gg C_b$. 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 (1) berikut:

$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \quad (1)$$

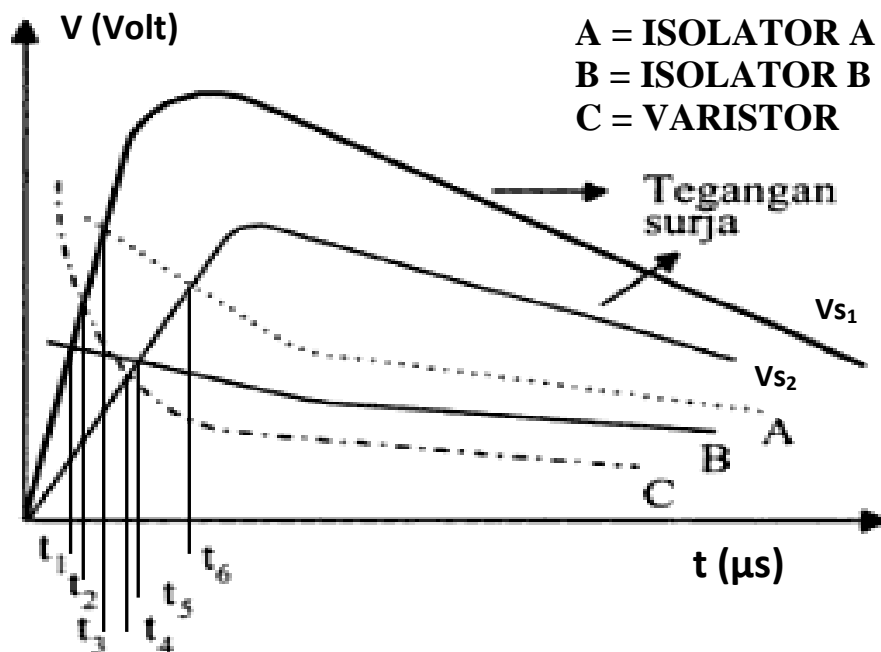
Jika dalam persamaan diatas nilai U_0 diganti dengan tegangan pengisian terbesar yang mungkin terjadi maka akan diperoleh energi impuls maksimum yang merupakan parameter penting untuk pembangkit tegangan impuls.

¹⁶ Kind, Dieter. 1993. *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. ITB. Bandung

F. Karakteristik Varistor

1. Karakteristik V-t

Salah satu karakteristik dari varistor yang perlu diperhatikan adalah karakteristik V-t. Di mana karakteristik ini menyatakan hubungan titik tegangan tembus (*breakdown voltage*) varistor dan waktu saat tegangan tembus varistor memotong tegangan impuls yang datang.¹⁷ Karakteristik ini dibutuhkan untuk melihat keberhasilan varistor dalam melindungi peralatan.



Gambar 10. Karakteristik Volt-Waktu (Bonggas L.Tobing, 2003)

Gambar 10 menunjukkan jika tegangan surja yang datang adalah V_{s1} , maka isolator B terlebih dahulu terpercik, yaitu saat $t = t_1$. Kemudian varistor akan terpercik pada saat $t = t_2$ dan isolator A terpercik pada saat $t = t_3$. Dalam hal ini varistor akan gagal melindungi isolator B, tetapi berhasil melindungi isolator A.

¹⁷ Tobing, L. B. 2003 . *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.

Jika tegangan surja yang datang adalah V_{s2} , maka varistor akan terlebih dahulu terpercik, yaitu saat $t = t_4$. Kemudian isolator B akan terpercik pada saat $t = t_5$ dan isolator A terpercik pada saat $t = t_6$. Dalam hal ini varistor berhasil melindungi kedua isolator.

Lengkung Volt-waktu adalah lengkung yang menghubungkan puncak-puncak tegangan tembus bila sejumlah impuls dengan bentuk tertentu diterapkan pada varistor, sehingga lengkung Volt-waktu adalah tempat kedudukan titik-titik dengan koordinat $(t_{\text{tembus}}, V_{\text{tembus}})$.

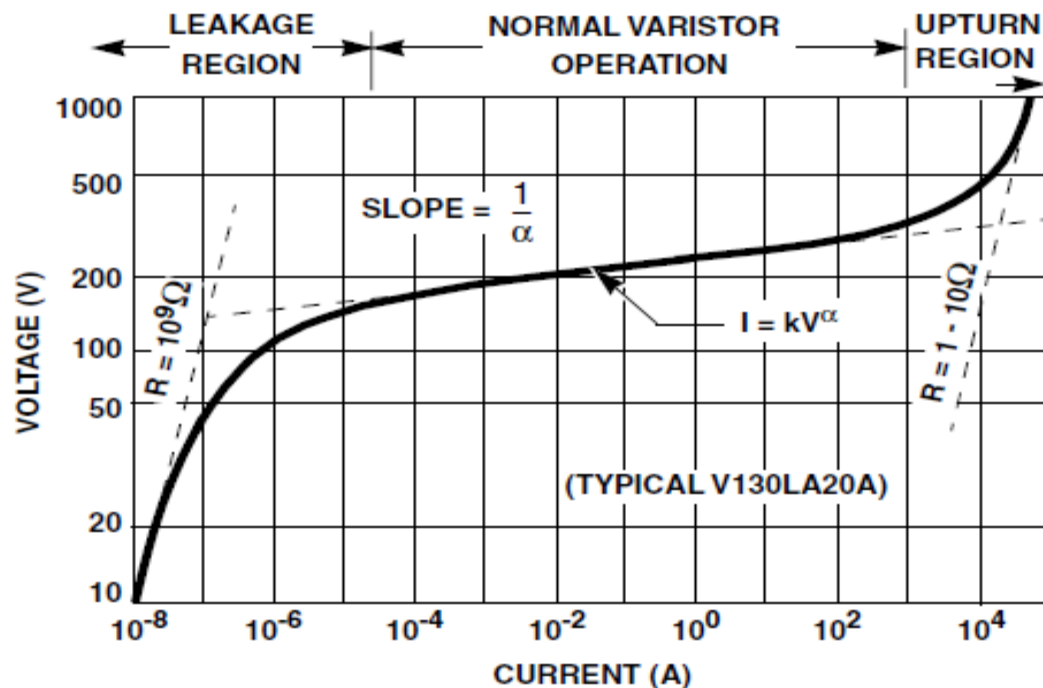
Varistor dapat dikatakan bekerja dengan baik dalam menangani masalah gangguan tegangan lebih, apabila karakteristik V-t suatu varistor berada dibawah karakteristik V-t tegangan impulsnya. Untuk aplikasi dalam sistem proteksi kelistrikan, varistor dengan karakteristik V-t yang letaknya lebih rendah akan lebih baik dalam melindungi peralatan listrik yang diproteksinya. Hal ini dikarenakan varistor tersebut akan terlebih dahulu memotong tegangan impuls sebelum tegangan tersebut mencapai nilai yang mampu ditahan oleh isolasi dari peralatan listrik.

2. Karakteristik V-I

Karakteristik tegangan-arus (V-I) merupakan kurva yang penting bagi varistor. Di mana dari kurva karakteristik tersebut, dapat dilihat sifat ketidak linieran dari varistor.

Pada gambar 11, menunjukkan kenaikan nilai tegangan varistor ZnO seiring dengan kenaikan nilai arus yang diberikan. Tetapi pada titik nilai tertentu, nilai

tegangan akan relatif konstan walaupun terjadi kenaikan pada nilai arusnya. Hal ini yang menyebabkan suatu varistor memiliki karakteristik V-I yang tidak linier.



Gambar 11. Kurva karakteristik V-I varistor ZnO (Littelfuse, Inc. 1999)

Karakteristik volt-ampere varistor terdiri dari 3 (tiga) daerah tegangan kerja yang dibentuk oleh adanya hubungan tegangan dan arus yang dapat melewati varistor tersebut.¹⁸

Daerah tegangan kerja yang menggambarkan karakteristik volt-ampere ini antara lain daerah arus bocor, daerah tegangan normal dan daerah kerja tegangan lebih.

a. Daerah arus bocor

Pada daerah bocor ini karakteristik volt-ampere pada daerah ini biasanya dapat didekati dengan garis linier. Jika arus yang mengalir pada varistor bertambah

¹⁸ Herlan, Dedeng. 1995. *Pengaruh Tekanan Kompaksi dan Temperatur Sintering Terhadap Karakteristik Volt-Ampere Pada Pembuatan Varistor Dengan Material Utama Zinc-Oxide*. (Thesis). Universitas Indonesia. Depok

maka tegangan pada varistor juga akan naik, sehingga hubungannya linear.

Berdasarkan rekomendasi IEC-352 (*International Electrotechnical Commission*)

bahwa daerah arus bocor tersebut kira-kira antara 10 μA samapai 300 μA .

b. Daerah kerja tegangan normal

Pada daerah kerja tegangan normal (*breakdown*) ini, varistor akan bekerja memberi perlindungan terhadap tegangan lebih. Kenaikan arus yang mengalir pada varistor dapat naik secara drastis dengan kenaikan tegangan yang relatif stabil

c. Daerah kerja tegangan lebih

Pada daerah kerja tegangan lebih ini, perubahan arus varistor tidak linear lagi melainkan berbentuk parabolik. Dalam daerah ini, arus yang mengalir pada varistor akan mengecil dan tegangan pada varistor akan bertambah besar. Biasanya nilai arus pada daerah ini kira-kira 100A sampai 100kA.

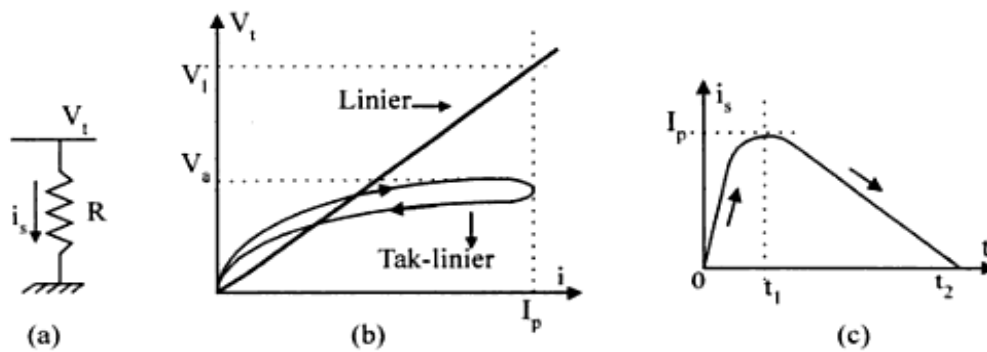
Jika suatu tegangan transien tiba pada terminal varistor dan terjadi sela percik pada varistor, maka rangkaian ekivalen varistor adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 12(a). Di mana tegangan pada terminal varistor saat mengalirkan arus lebih adalah:

$$V_t = i_s \times R \quad (2)$$

dimana:

i_s = arus surja

R = tahanan resistor tak-linier



Gambar 12. Rangkaian Ekuivalen dan Karakteristik Varistor

Misalkan karakteristik dari varistor tak-linier adalah seperti pada gambar 12(b) dan arus lebih yang mengalir pada varistor adalah seperti pada gambar 12(c). Maka dalam selang waktu 0 sampai dengan t_1 , dimana t_1 adalah waktu titik puncak arus lebih, sehingga arus lebih naik dan mencapai nilai puncak $i_s = i_p$. Dalam selang waktu tersebut tahanan R akan mengecil, sehingga kenaikan tegangan pada terminal varistor akan dibatasi hanya sampai V_a . Jika tahanan R konstan, maka nilai arus lebih mencapai titik puncak tegangan di terminal varistor adalah $V_t = V_i$, di mana V_i adalah tegangan lebih maksimum, sehingga nilai tegangan akan tinggi dan tujuan perlindungan tidak tercapai. Dalam selang waktu t_1 sampai dengan t_2 , arus lebih akan menurun dan tahanan R akan semakin membesar. Saat arus lebih menjadi nol, masih terdapat arus susulan yang relatif kecil. Arus lebih ini akan semakin kecil karena tahanan R yang semakin membesar, hingga hanya tersisa arus kecil yang disebut arus kendali. Saat tegangan sesaat sistem nol, maka percikan pada sela akan padam sehingga arus kendali akan menjadi nol dan tidak berlanjut kembali.¹⁹

¹⁹ Tobing, L. B. 2003 b. *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.