

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Zinc Oxide (ZnO)

Zinc oxide merupakan sebuah senyawa kimia dengan rumus molekul ZnO, Dan termasuk kedalam material semikonduktor⁽⁸⁾. Muncul di alam sebagai mineral *zincite*. ZnO juga merupakan semikonduktor tipe-n dengan lebar pita energi 3,2 eV – 3,3 eV pada suhu kamar. ZnO pertama kali ditemukan oleh ahli kimia dari perancis yang bernama Charles Adholf Wurzt.



Gambar 1. ZnO powder

⁽⁸⁾ Ozgur,U.,Reshchikov,M.,Avrutin,V.(2005).A ComprehensiveReview of ZnO Materials and divice.*Journal of the applied Physic*

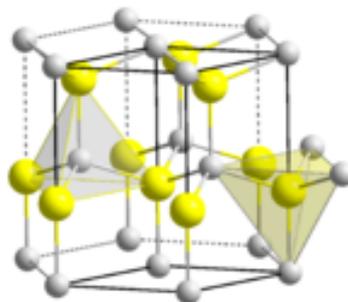
Oksida ini memiliki transmisi optik yang tinggi serta dapat menghantarkan listrik. Sifat yang unik tersebut membuat lapisan tipis ZnO menjadi pilihan utama untuk berbagai aplikasi konduktor transparan, seperti layer datar komputer laptop, sel surya, serta aplikasi lain seperti sensor gas, transducer piezoelektrik, dan lain sebagainya. Untuk mendapatkan konduktivitas listrik dan transparansi yang diinginkan dapat dilakukan penambahan doping atom logam, seperti Al, Sn, Cd, Ga, In, dll pada lapisan tipis ZnO.

Seng terdapat secara luas namun sumber utamanya adalah *sphalerite*, (ZnFe)S yang biasanya terdapat bersama galena. Seng adalah logam putih, mengkilap, namun mudah ternoda. Strukturnya berubah dari kemasannya heksagonal yang sangat baik dengan pemanjangan sepanjang seperenam sumbu⁽⁹⁾. Densitas ZnO yang dimiliki adalah sebesar 5,606 g/cm³, titik leleh 1975°C, dan massa molarnya 81,4084 g/mol. Serta memiliki sifat piezoelektrik dapat berubah warna dari putih menjadi kuning jika dipanaskan dan kembali berwarna putih saat pendinginan.

Seng mudah bereaksi dengan asam bukan pengoksidasi, melepaskan H₂ dan menghasilkan ion divalensi. Selain itu seng juga mudah bereaksi jika dipanaskan dalam O₂ menghasilkan oksida, seng juga larut dalam basa kuat karena kemampuannya membentuk ion zinkat, biasanya ditulis ZnO₂²⁻.



⁽⁹⁾ Cotton, F.A.1989. Kimia Anorganik Dasar. Universitas Indonesia –Press.Jakarta



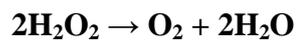
Gambar 2. Struktur kristal ZnO *hexagonal wurtzite*⁽¹⁰⁾

B. Mangan Dioksida (MnO₂)

Mangan dioksida merupakan senyawa anorganik dengan rumus kimia MnO₂. Senyawa ini berwarna kehitam-hitaman. MnO₂ dibentuk oleh unsur mangan yang banyak terdapat di alam. Penggunaan pokok MnO₂ adalah untuk sel baterai kering, seperti baterai alkaline dan baterai seng karbon. MnO₂ juga digunakan untuk memproduksi MnO₄. MnO₂ digunakan secara ekstensif sebagai zat pengoksidasi dalam proses sintesis organik sebagai contoh untuk oksidasi alkohol–alkohol *allylic*. MnO₂ memiliki massa molar sebesar 86.93689 gr/mol, dan titik leleh sebesar 535 °C . Pada penelitian yang sudah dilakukan diketahui bahwa penambahan MnO₂ sebagai dopan kedalam sistem varistor ZnO-Bi₂O₃ dapat mengurangi arus bocor dan meningkatkan koefisien *non-linear* dari varistor.

⁽¹⁰⁾ Anonim, *Zinc Oxide*, http://en.wikipedia.org/wiki/zinc_oxide. Diakses 15 November 2009

MnO₂ digunakan sebagai katalis pada beberapa reaksi yang berhubungan dengan pembentukan O₂ misalnya campuran antara *potasium chloride* dan MnO₂ yang dipanaskan akan menimbulkan oksigen yang mengumpul diatas air. MnO₂ juga sebagai katalis dekomposisi dari hidrogen peroksida menjadi oksigen (O₂) dan air (H₂O).



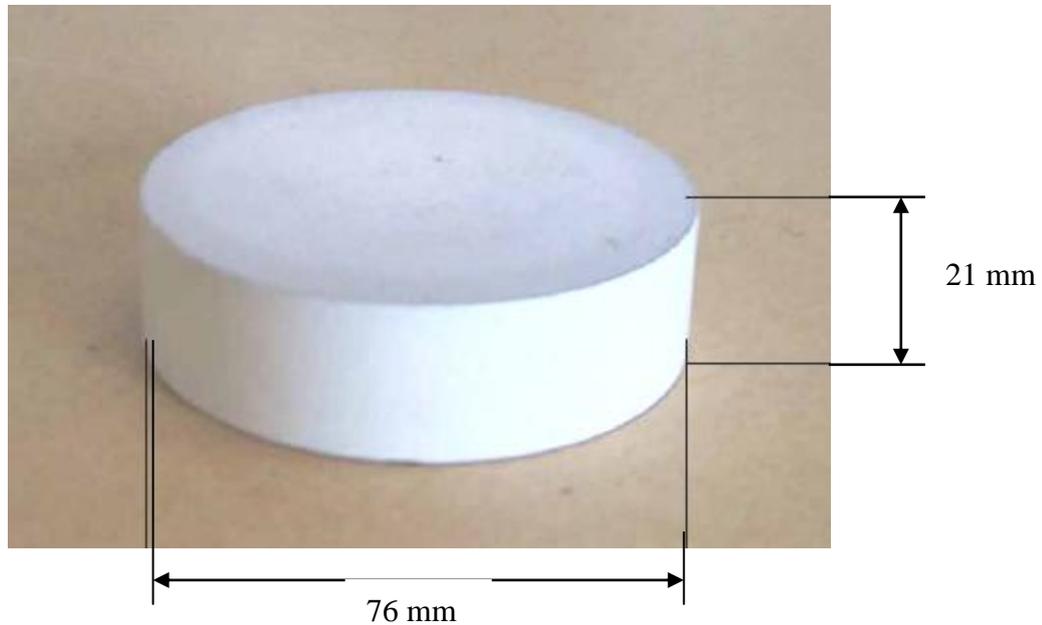
Gambar 3. Bubuk MnO₂ yang berwarna kehitam – hitaman⁽¹¹⁾

C. Varistor ZnO

Varistor ZnO merupakan peralatan listrik yang berfungsi sebagai pelindung peralatan listrik dari tegangan transien dan juga sebagai penstabil tegangan.

⁽¹¹⁾ Anonim , 2009. http://en.wikipedia.org/wiki/manganese_dioxide. Diakses 15 November 2009

Varistor ZnO merupakan salah satu bagian utama dari *metal oxide arrester* (MOA) yang saat ini paling banyak dipakai.

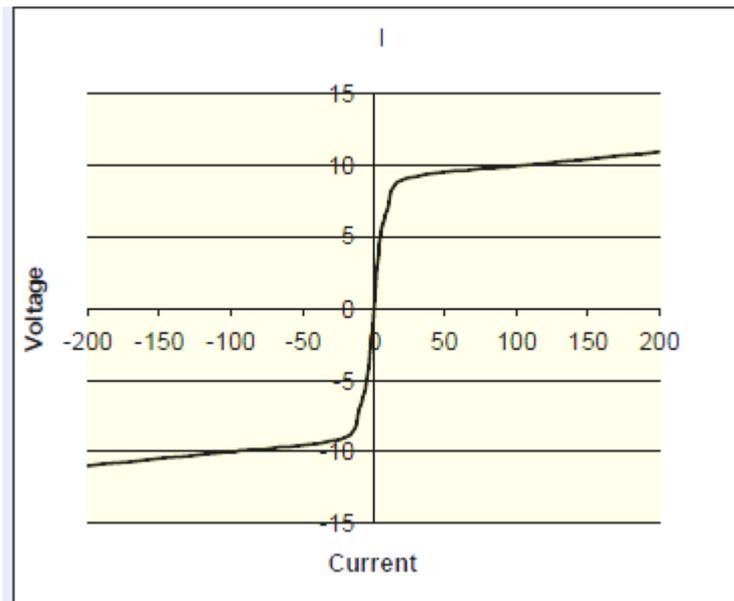


Gambar 4. Bentuk varistor ZnO

Arrester jenis MOA mampu melindungi isolasi peralatan sistem elektrik terhadap gangguan tegangan lebih internal dan eksternal. Prinsip kerja MOA adalah mampu menjadi tahanan yang sangat tinggi pada kondisi operasi normal dan menjadi tahanan yang sangat rendah ketika terjadi tegangan lebih transien. Hal ini disebabkan karakteristik V-I yang *non-linear*. Karakteristik V-I dapat dimodifikasi dengan menambahkan senyawa metal oksida lain pada varistor ZnO, pemrosesan, atau siklus penyinteran.

Metal oksida varistor ZnO merupakan bahan semikonduktor jenis baru yang memiliki karakteristik *volt-ampere non-linear* yang menyerupai dioda zener, akan tetapi mampu melewatkan arus listrik yang jauh lebih besar

dibandingkan dioda zener. Perbedaan yang menyolok atas kedua komponen tersebut antara lain pada dioda zener bahan utama baik germanium atau silikon dicampur dengan bahan logam jika campuran tadi dipanaskan maka akan terbentuk p-n persambungan.



Gambar 5. Karakteristik dioda ganda pada varistor ZnO

Sedangkan pada metal oksida varistor, meski bahan utama dan bahan oksida aditif dicampurkan satu sama lain tetapi jika *disinter* tidak membentuk p-n persambungan melainkan terbentuknya fasa-fasa sebagai berikut : fasa butiran, antar butir dan partikel. Dengan terbentuknya fasa-fasa tersebut, maka mekanisme kerja metal oksida varistor dapat menjadi dua arah atau dengan kata lain kedua permukaan metal oksida varistor dapat diberi tegangan bias

maju dan karakteristik *volt-ampere* yang ditunjukkan mempunyai respon yang sama⁽¹²⁾.

Varistor dapat juga digunakan dalam arus bolak – balik (AC) dan arus searah (DC) pada interval tegangan yang tinggi dari beberapa volt sampai kilovolt dan pada rentang arus yang besar dari mikroampere sampai kiloampere. Varistor mempunyai tambahan sifat yaitu kemampuan menyerap energi yang besar dalam interval joule sampai ribuan joule dengan beberapa kelebihan itu membuat varistor berguna dalam berbagai industri daya dan juga dalam industri semikonduktor. Adapun kelebihan varistor ZnO meliputi⁽¹³⁾ :

1. Koefisien *non-linear* tinggi
2. Kemampuan menyerap energi yang tinggi
3. Daya yang hilang rendah
4. Respon yang cepat terhadap gelombang impuls yang datang dengan cepat
5. Ukuran kecil
6. Waktu hidup yang lama pada lingkungan hidup yang buruk
7. Biaya material yang bersaing

Varistor ini menunjukkan resistansi yang sangat tinggi pada saat operasi sistem normal dan resistansi yang sangat rendah selama tegangan lebih transien. Kapasitas energi varistor ZnO adalah merupakan fungsi dari volume

⁽¹²⁾ Dedeng Herlan, 1995, Pengaruh tekanan kompaksi dan temperatur sintering terhadap karakteristik volt-ampere pada pembuatan varistor dengan material utama zinc-oxide,(Jakarta : Thesis, Universitas Indonesia)

⁽¹³⁾ Ozgur,U.,Reshchikov,M.,Avrutin,V.(2005).A Comprehensive Review of ZnO Materials and device.*Journal of the applied Physic*

varistor tersebut, yang memiliki energi konservatif adalah 200 J/cm^3 untuk operasi tunggal, bilamana energinya melebihi energi varistornya, maka akan menyebabkan kegagalan pada varistor terhaap goncangan thermal. Apabila kemampuan penyerapan energi akan bertambah, secara mekanis varistor ZnO akan menjadi retak. Setelah varistor ZnO bekerja maka varistor akan menyamakan kenaikan temperatur sepanjang luas permukaannya, kemudian operasi kedua dari kandungan energi yang sama akan dapat diserap tanpa merusak varistor. Biasanya, interval satu menit antar operasi adalah sama. Hal ini untuk memastikan penyamarataan temperatur sepanjang varistor.

Kemampuan varistor menyerap energi sebanding dengan volume varistornya, akan tetapi syarat pelepasan energi ZnO pada sistem tegangan terendah biasanya tidak sesederhana varistor-varistor pada sistem tegangan tinggi dan ekstra tinggi. Varistor dengan berbagai macam diameter dirancang untuk menghantarkan kerapatan arus sama dengan berbagai macam dengan kerapatan arus pada maksimum operasi kontinyu, yang mana tingkat tegangan maksimum operasi kontinyu varistor ZnO adalah tegangan kontinyu frekuensi daya maksimum yang dapat diberikan pada varistor ZnO, dimana cakramnya akan menjaga stabilitas sifat *thermal* serta elektrisnya. Tingkat tegangan maksimum operasi kontinyu varistor adalah 246 kV.

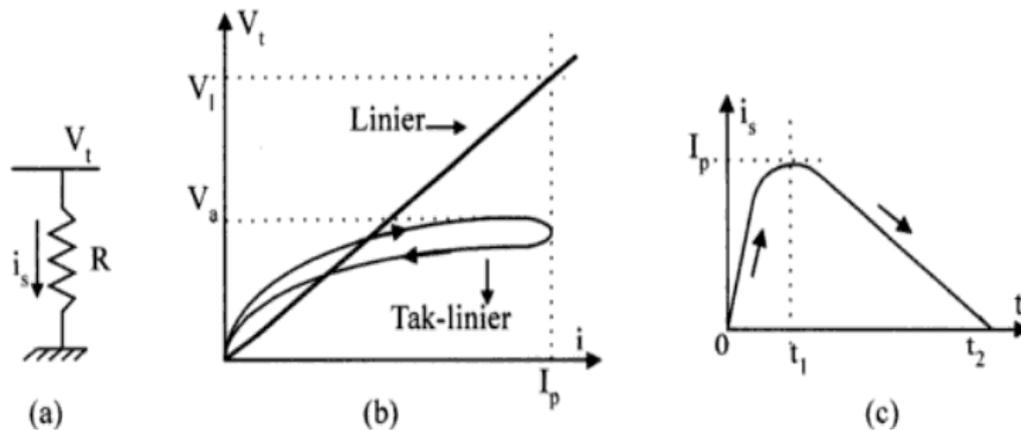
Jika suatu tegangan transien tiba pada terminal varistor dan membuat sela varistor terpercik, maka rangkaian ekuivalen varistor adalah seperti pada gambar 6a. Tegangan terminal varistor saat mengalir tegangan transien adalah

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

Keterangan :

i_s = arus impuls

R = tahanan resistor tak linear



Gambar 6. Rangkaian Ekuivalen dan karakteristik Varistor⁽¹⁴⁾

Misalkan karakteristik dari resistor tak linear adalah seperti pada gambar 6b dan arus impuls yang mengalir pada *metal oxide varistor* (MOV) adalah seperti gambar 6c dalam selang waktu 0 sampai t_1 dimana t_1 waktu titik puncak arus impuls, arus impuls naik dan mencapai nilai puncak $i_s = i_p$ dengan i_p adalah arus puncak impuls. Dalam selang waktu ini nilai tahanan resistor mengecil. Sehingga kenaikan tegangan terminal MOV hanya sampai V_a , seandainya nilai resistor konstan, maka pada saat arus impuls mencapai nilai puncak, tegangan terminal varistor adalah $V_t = V_l$ dimana V_l adalah tegangan impuls maksimum artinya tegangan sistem tetap tinggi, sehingga tujuan perlindungan tidak tercapai. Dalam selang waktu t_1 sampai dengan t_2 dimana t_2 adalah waktu arus impuls menurun, nilai tahanan resistor membesar. Saat arus impuls menjadi nol, masih tersisa arus susulan yang

⁽¹⁴⁾ Tobing, L.Bonggas.2003. *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.

relatif kecil karena nilai tahanan resistor semakin membesar, hingga akhirnya tersisa arus kecil yang disebut arus kendali. Saat tegangan sesaat sistem nol, percikan pada sela padam, hingga arus kendali menjadi nol dan tidak berlanjut lagi⁽¹⁵⁾.

D. Pembuatan dan Peranan Doping pada Varistor ZnO

Kemampuan varistor sebagai pelindung peralatan listrik dari tegangan lebih timbul karena sifat listrik varistor ZnO berubah akibat penambahan zat tertentu sebagai pendoping ke dalam ZnO pada batas butir selama proses penyinteran dan menjadi lapisan batas butir di dalam sampel hasil penyinteran. Lapisan batas butir ini kemudian mengakibatkan karakteristik varistor menjadi non-linear. Pada penelitian kali ini, mangan dioksida (MnO₂) digunakan sebagai pendoping pada varistor ZnO. Perhitungan bahan kimia ZnO dan MnO₂ yang digunakan untuk mengkonversi %mol dalam bentuk gram, dapat dicari dengan hubungan antara massa (m), jumlah mol (n), dan massa molekul relatif (Mr) suatu zat⁽¹⁶⁾.

$$m = Mr \cdot n \dots\dots\dots (2)$$

dimana :

m = massa molekul (gram)

Mr = Molekul relatif (gram/mol)

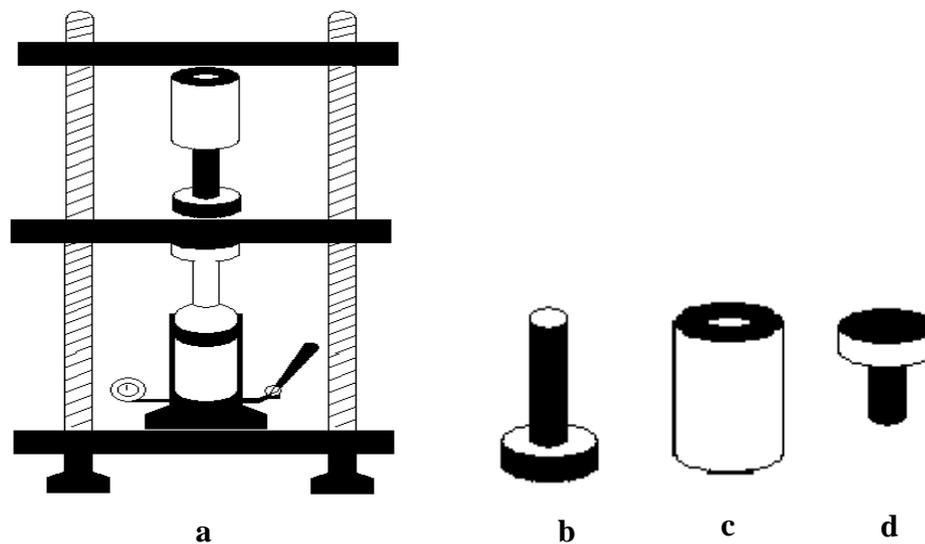
N = jumlah mol (mol)

⁽¹⁵⁾ Tobing, L.Bonggas.2003. *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.

⁽¹⁶⁾ Petrucci, Ralp H-Suminar, *Kimia Dasar Prinsip dan Terapan Modern*, (Jakarta : Erlangga 1999)

Pada dasarnya kebanyakan pembuatan keramik yang dilakukan baik yang tradisional maupun yang modern diproses dengan cara pemadatan serbuk atau yang dikenal dengan reaksi padatan, material dibentuk menjadi bentuk tertentu sesuai dengan yang diinginkan, kemudian dilanjutkan dengan pemanasan pada suhu yang tinggi agar terjadi ikatan antar partikel – partikel tersebut ⁽¹⁷⁾.

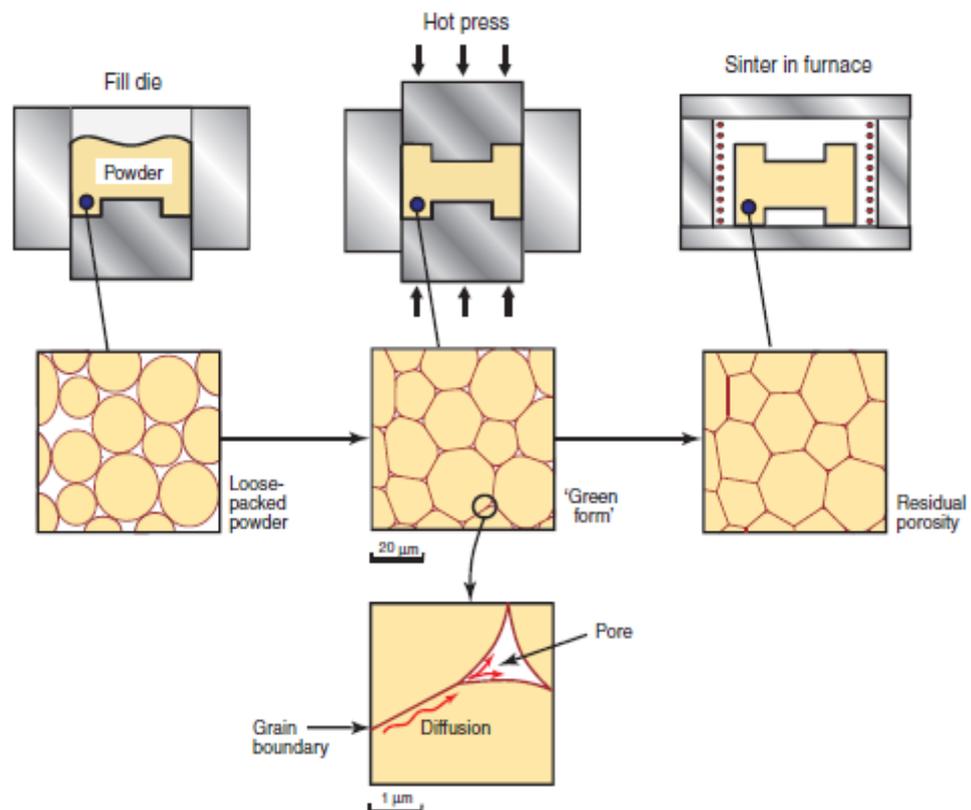
Hampir kebanyakan keramik dibuat dengan cara aglomerasi partikel. Bahan dasar yang digunakan untuk berbagai produk yang berbeda-beda sesuai dengan apa yang diinginkan dari sifat-sifat produk yang diinginkan. Sebagai contoh hasil keramik yang berbahan asar lempung seperti genteng, batu bata, ubin, pencampuran dengan air adalah hal biasa karena hasil keramik tidak mempunyai sifat yang spesifik, sedangkan untuk keramik lainnya ada yang digerus yang kemudian dicampur dengan bahan pengikat atau zat aditif.



Gambar 7. (a) posisi alat *press hidrolik* dan *die* pada proses pengepresan
(b) bagian atas *die* (c) bagian tengah *die* dan (d) bagian bawah *die*.

⁽¹⁷⁾ Smith.1990.*Principles of Materials Science and Engineering*. McGraw-Hill,Inc.

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan teknik pengepresan kering (*dry pressing*). Pengepresan merupakan pengepakan *uniaksial* secara simultan dan pembentukan dalam butir bubuk dengan bahan organik sebagai pengikatnya yang dicetak pada suatu wadah cetakan yang disebut *die*. Sesudah dicetak kemudian keramik dibakar atau *disinter* dengan suhu tinggi untuk memperoleh kekerasan/kekuatan yang diperlukan.

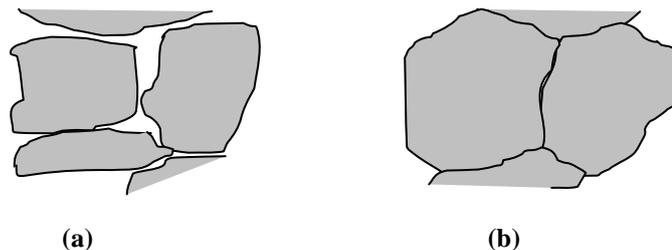


Gambar 8. Teknik pembuatan varistor ZnO

Perlakuan pemanasan perlu dilakukan dalam pembuatan keramik, dalam proses pemanasan ada beberapa tahap yang harus diperhatikan, bila tahapan demi tahapan tidak dilakukan dengan secara bertahap, maka sampel yang dihasilkan akan cacat. Bila sampel mengalami kecacatan maka akan merubah

sifat produk yang diinginkan. Adapun tahapan dalam perlakuan pemanasan yaitu pengeringan, penghilangan pengikat dan *sintering*. Pengeringan merupakan proses penghilangan air dari bodi plastik keramik sebelum dibakar pada suhu tinggi, biasanya pengeringan dilakukan dibawah suhu $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam. Kemudian pada tahapan penghilangan pengikat pada badan keramik dilakukan dengan cara dipanaskan pada suhu 200°C - 300°C , kemudian tahapan terakhir adalah proses *sintering* pada suhu $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dimana partikel-partikel kecil dari material terikat bersama secara *difusi-state*.

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. Dalam *sintering*, butiran-butiran partikel-partikel bersebelahan bereaksi dan berikatan⁽¹⁸⁾. Prinsip yang melandasi proses *sintering* dapat diilustrasikan seperti gambar 9.



Gambar 9. (a) Sebelum disintering, permukaan tidak menyatu.
(b) Setelah disintering butiran-butiran hanya ada satu permukaan saja.

E. Karakteristik Volt-Waktu (V-t Curve) Menggunakan Pembangkit

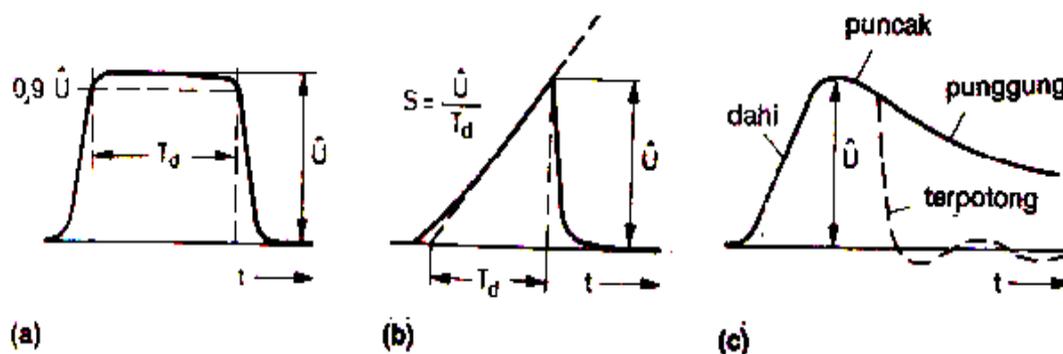
⁽¹⁸⁾ Nia Rahayu Baroroh, 2006, Pengaruh Suhu Sintering Terhadap Magnetodielektrik Senyawa Spintronik $\text{Ti}_{0,97}\text{Mn}_{0,03}\text{O}_{2\pm\delta}$, Artikel : Jurusan Fisika Universitas Negeri Malang

Tegangan Tinggi Impuls kapasitif

1. Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls Kapasitif.

Tegangan tinggi impuls diperlukan dalam pengujian tegangan tinggi untuk mensimulasi terpaan akibat tegangan lebih dalam dan luar serta untuk meneliti mekanisme tembus. Umumnya tegangan impuls dibangkitkan dengan meluahkan muatan kapasitor tegangan tinggi pada suatu rangkaian resistor dan kapasitor. Nilai puncak dari tegangan impuls dapat ditentukan dengan bantuan sela ukur dengan rangkaian elektronik yang dikombinasikan dengan pembagi tegangan. Alat ukur tegangan impuls yang terpenting adalah osiloskop sinar katoda yang memungkinkan penentuan nilai-nilai sesaat melalui pembagi tegangan⁽¹⁹⁾.

Dalam teknologi tegangan tinggi, suatu pulsa tegangan dengan polaritas tunggal dikatakan sebagai impuls dalam gambar di bawah ini ditunjukkan tiga contoh tegangan tinggi impuls.



Gambar 10. (a) tegangan impuls persegi, (b) tegangan impuls berbentuk baji, (c) tegangan impuls eksponensial ganda.

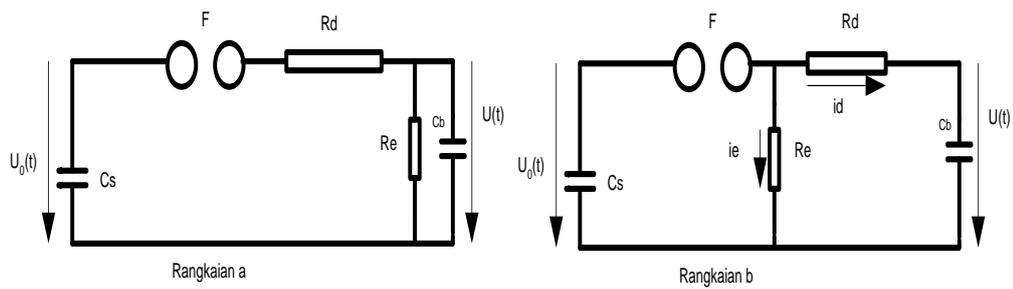
Ketergantungan terhadap waktu maupun tempo tegangan tinggi impuls bergantung pada cara pembangkitannya. Untuk percobaan dasar maka sering

⁽¹⁹⁾ Dieterkind.1993. Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi. Bandung : ITB

digunakan tegangan impuls persegi yang melonjak hingga nilai yang hampir konstan, maupun tegangan impuls berbentuk baji yang dicirikan dengan suatu kenaikan yang selinier mungkin hingga terjadi tembus dan digambarkan dengan kecuraman S . Untuk keperluan pengujian maka tegangan tinggi impuls eksponensial ganda telah dibakukan, tanpa osilasi yang cukup berarti maka tegangan impuls ini cepat mencapai nilai maksimum, nilai puncak \hat{U} dan kemudian meluruh perlahan menuju nol.

Jika terjadi tembus secara sengaja ataupun tidak sengaja dalam rangkaian tegangan tinggi selama penerapan impuls (yang menyebabkan hilang tegangan secara mendadak), maka tegangan yang terjadi disebut tegangan impuls yang dipotong. Pemotongan dapat terjadi di bagian depan, pada puncak atau pada punggung dari tegangan impuls. Dengan demikian gejala transien yang diinduksikan merupakan penyebab dari osilasi yang ditunjukkan dalam gambar 10 c.

Dalam gambar 10 ditunjukkan dua rangkaian dasar untuk membangkitkan tegangan impuls yakni rangkaian a dan rangkaian b. Kapasitor 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 . Kedua rangkaian berbeda dalam hal penempatan resistor peluahan R_e terhadap resistor reaman R_e .



Gambar 11. Diagram dasar rangkaian pembangkit tegangan impuls⁽²⁰⁾

Nilai elemen rangkaian menentukan bentuk kurva tegangan impuls. Prinsip kerja kedua elemen ini cukup mudah untuk dipahami. Waktu dahi yang singkat membutuhkan waktu pengisian 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 penyalakan 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 \hat{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 nilai efisiensi medan (η) berlaku persamaan sebagai berikut :

$$\eta = \frac{\hat{U}}{U_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (3)$$

$C_s \gg C_b$ harus dipilih untuk mendapatkan \hat{U} yang setinggi mungkin (untuk U_0 tertentu). Peluruhan tegangan impuls dalam rangkaian a terjadi dengan

⁽²⁰⁾ Dieterkind.1993. Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi. Bandung : ITB

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:

$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \quad (4)$$

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

2. Pengukuran Tegangan tinggi Impuls menggunakan pembagi tegangan Resistif

Dalam sistem pengukuran dengan pembagi resistif (gambar 11) sebaiknya kabel ukur (K) dihubungkan pada osiloskop sinar katoda (CRO) dengan impedansi surja (Z) sehingga membebani pembagi dengan resistansi efektif yang sama. Menurut Kind (1993) tegangan keluaran akan menuju suatu nilai batas, yaitu⁽²¹⁾ :

$$U_{2\sim} = U_{1\sim} x \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

Dimana :

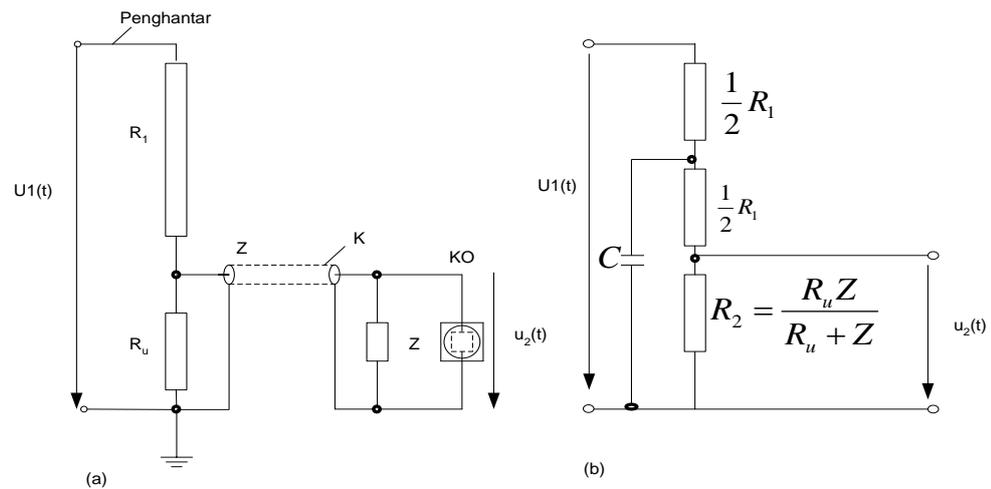
$U_{2\sim}$ = tegangan keluaran pada sisi *low* (V_L)

$U_{1\sim}$ = tegangan *input* pada sisi *high* (V_h)

R_2 = hambatan pada sisi *low* pembagi tegangan resistif (R_L)

R_1 = hambatan pada sisi *high* pembagi tegangan resistif (R_h)

⁽²¹⁾ Dieterkind.1993. Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi. Bandung : ITB

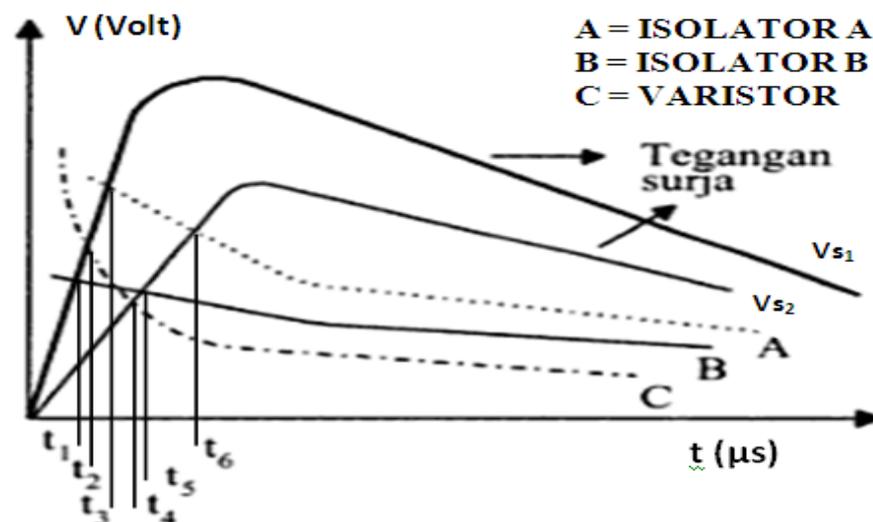


Gambar 12. Sistem pengukuran tegangan tinggi impuls dengan pembagi resistif (a) diagram rangkaian, (b) rangkaian ekivalen dengan induktansi saluran

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

Karakteristik volt-waktu (V-t) atau lengkung volt-waktu adalah karakteristik yang menyatakan hubungan tegangan *discharge* sela pelindung tegangan lebih dan waktu percikan, karakteristik ini dibutuhkan untuk melihat keberhasilan pelindung tegangan lebih dalam melindungi peralatan listrik. Jika tegangan lebih yang datang adalah V_{s1} , maka isolator peralatan listrik B terlebih dahulu terpercik, yaitu saat $t = t_1$. kemudian pelindung tegangan lebih terpercik saat $t = t_2$ dalam hal ini pelindung tegangan lebih gagal melindungi isolator peralatan listrik B, tetapi berhasil melindungi isolator peralatan listrik A.

Jika tegangan lebih yang datang adalah V_{s2} , maka pelindung tegangan lebih dahulu terpercik, yaitu saat $t = t_4$ kemudian isolator peralatan listrik B terpercik pada saat $t = t_5$ dan isolator A terpercik pada saat $t = t_6$. dalam hal ini pelindung tegangan berhasil melindungi kedua isolator peralatan listrik.



Gambar 13. Karakteristik Volt-Waktu ⁽²²⁾

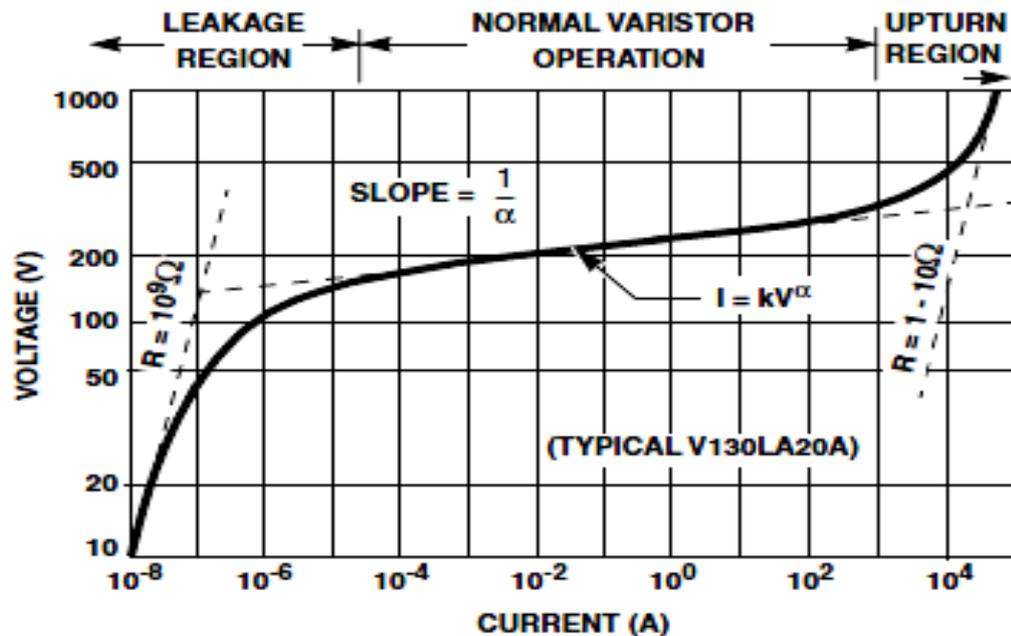
F. Karakteristik *Volt-Ampere* (V-I) Varistor

Terdapat salah satu aspek penting yang tercakup dalam mekanisme konduksi varistor yang sekaligus mewakili karakteristik varistor ZnO. Karakteristik tersebut cukup unik terdiri dari tiga daerah tegangan kerja yang dibentuk oleh adanya hubungan tegangan dan arus yang dapat melewati komponen tersebut seperti pada gambar 14.

Daerah tegangan kerja yang menggambarkan karakteristik *volt-ampere* ini antara lain daerah arus bocor, daerah kerja tegangan normal dan daerah kerja tegangan lebih. Pada operasi daerah arus bocor menunjukkan kurva V-I mendekati garis linier dan arus yang mengalir pada varistor tergantung pada temperatur. Nilai resistansi varistor tinggi mendekati 10^9 ohm. Resistansi varistor akan terus naik jika arus yang mengalir bertambah, sehingga tegangan

²² Tobing, L. Bonggas. 2003. *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.

pada varistor akan naik juga. Berdasarkan rekomendasi IEC-352 (*International Electronical Comision*) bahwa aerah arus bocor tersebut kira-kira antara 10 μ A sampai dengan 300 μ A.



Gambar 14. Karakteristik *volt-ampere* varistor⁽²³⁾

Pada model pemindahan dua langkah dijelaskan bahwa *interface* mempunyai rapat muatan yang bervariasi dengan tegangan yang diterapkan. Pemindahan yang dimaksud sebagai proses dua langkah adalah sebagai berikut : elektron bergerak dari butiran menuju *interface* pada langkah pertama dan elektron bergerak dari *interface* menuju butiran ZnO berikutnya sebagai langkah kedua. Berdasarkan model pemindahan dua langkah, perilaku varistor disebabkan oleh penciptaan *hole* di dalam butiran ZnO. *Hole* terjadi karena proses eksitasi pita antara, sebagai akibat dari rugi energi yang timbul selama proses terobosan elektron berlangsung. Pada saat elektron menyebrang dari

²³ Harris Suppression Product, 1999, *Littelfuse Varistors - Basic Properties, Terminology and Theory*, Application Note : July 1999.

interface menuju pita konduksi, beberapa diantaranya akan memiliki energi kinetik yang cukup untuk menghasilkan pasangan *hole*-elektron yang mengeksitasi pita antara. *Hole* akan muncul pada tegangan yang lebih besar dari tegangan kritis V_c . Jika E_G menyatakan energi pita antara butir ZnO maka tegangan kritis $V_c = E_G - V_B = 2,4 \text{ eV}$

Pada daerah *breakdown* ini, ketidak linearan arus disebabkan perubahan mendadak yang dilakukan *hole* terhadap bentuk pita konduksi. Perubahan bentuk pita konduksi akan mengakibatkan penipisan lapisan *barrier* sehingga terobosan elektron menjadi mudah. Daerah kerja tegangan normal atau disebut juga sebagai daerah *breakdown* merupakan daerah dimana varistor bekerja memberi perlindungan terhadap tegangan lebih. Kenaikkan arus yang mengalir pada varistor dapat naik secara drastis dengan *magnitude* 5-6 kali dengan hanya menaikkan tegangan sebesar 50% dari tegangan kerja normal.

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

Untuk mencari koefisien *non-linear* dari karakteristik sifat listrik varistor maka digunakan hubungan antara tegangan dan arus varistor pada daerah tegangan normal yang dinyatakan dengan persamaan 6⁽²⁴⁾ berikut ini :

²⁴.Dedeng Herlan, 1995, Pengaruh tekanan kompaksi dan temperatur sintering terhadap karakteristik volt-ampere pada pembuatan varistor dengan material utama zinc-oxide,(Jakarta : Thesis, Universitas Indonesia)

$$V = k \cdot (I)^\beta \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan :

k = konstanta varistor

I = Arus yang mengalir (mA)

β = Koefisien *non-linear* varistor

Untuk mencari besarnya suatu nilai koefisien *non-linear* β dan nilai konstanta k varistor maka untuk menyelesaikannya persamaan (6) diubah kedalam bentuk logaritmik, menjadi :

$$\text{Log } V = \text{Log } k I^\beta$$

$$\text{Log } V = \text{Log } k + \beta \text{Log } I$$

Misalkan :

$$Y = \text{Log } V \qquad X = \text{Log } I$$

$$B = \text{Log } k \quad \longrightarrow \quad k = 10^B \quad A = \beta$$

Sehingga persamaan logaritmik tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

$$Y = B + AX \dots\dots\dots (7)$$

Persamaan (7) menyatakan sebuah persamaan linear yang selanjutnya diselesaikan menggunakan metode kuadrat terkecil dengan Jumlah kuadrat kesalahan dihitung dengan persamaan 8⁽²⁵⁾ berikut :

$$D^2 = \sum_{i=1}^n Ei^2 = \sum_{i=1}^n \{Yi - B - AX\}^2 \dots\dots\dots (8)$$

⁽²³⁾ Metode Numerik

Agar supaya nilai D^2 adalah minimum, maka persamaan (8) diturunkan terhadap parameter A dan B, kemudian disama-dengankan nol, Syarat minimum

$$\frac{\partial D^2}{\partial A} = 0 \quad , \quad \frac{\partial D^2}{\partial B} = 0$$

Turunan pertama terhadap parameter A :

$$\frac{\partial}{\partial A} \left(\sum_{i=1}^n Y_i - AX_i - B \right)^2 = 0$$

$$-2 \sum_{i=1}^n [(Y_i - B - AX_i) X_i] = 0$$

$$\sum Y_i X_i - \sum B X_i - \sum A X_i^2 = 0$$

$$A \left(\sum X_i \right)^2 + B \left(\sum X_i \right) = \sum X_i Y_i \dots\dots\dots (9)$$

Turunan pertama terhadap parameter B :

$$\frac{\partial}{\partial B} \left(\sum_{i=1}^n Y_i - AX_i - B \right)^2 = 0$$

$$-2 \sum_{i=1}^n (Y_i - AX_i - B) = 0$$

$$\sum Y_i - \sum B - \sum A X_i = 0$$

$$A \left(\sum X_i \right) + NB = \sum Y_i \dots\dots\dots (10)$$

Lalu persamaan (9) dan (10) kita ubah kebentuk matrik :

$$\begin{vmatrix} \sum X_i^2 & \sum X_i \\ \sum X_i & N \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A \\ B \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum X_i Y_i \\ \sum Y_i \end{vmatrix}$$

$$A = \frac{\det 1}{\det} = \frac{N(\sum XiYi) - (\sum Xi).(\sum Yi)}{N.(\sum Xi^2) - (\sum Xi)^2} \dots\dots\dots(11)$$

$$B = \frac{\det 2}{\det} = \frac{(\sum Yi) - A.(\sum Xi)}{N} \dots\dots\dots(12)$$

Dari solusi persamaan (11) dan (12) diperoleh :

$$\text{Konstanta } k \text{ varistor : } k = 10^B \dots\dots\dots(13)$$

$$\text{Konstanta } \beta \text{ varistor : } \beta = A \dots\dots\dots(14)$$

Nilai-nilai koefisien *non-linear* β dan konstanta k tersebut, akan menentukan nilai resistansi varistor. Hubungan koefisien *non-linear* β dan konstanta k dengan resistansi varistor dinyatakan dengan persamaan (15) :

$$R = \frac{V}{I} \dots\dots\dots(15)$$

Substitusi persamaan (6) ke persamaan (15), maka didapatkan :

$$R = \frac{k.(I)^\beta}{I} \dots\dots\dots(16)$$

