

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pembuatan Varistor

Proses Pembuatan varistor meliputi preparasi, pembentukan atau pencetakan, dan penyinteran. Pada tahap preparasi ini terlebih dahulu dilakukan penimbangan komposisi campuran ZnO-MnO₂ sesuai dengan tabel 1. Penimbangan ini menggunakan neraca digital yang memiliki ketelitian yang cukup tinggi sehingga hasil penimbangan komposisi sesuai dengan yang diinginkan. Tahap berikutnya adalah proses pencampuran antara ZnO dan MnO₂ yang ditambahkan *acetone* (CH₃COCH₃) sebagai media pencampurnya, selanjutnya dilakukan pengadukan dengan menggunakan alat *hot plate dan magnetic stirrer*. Pengadukan ini dilakukan selama 4 jam agar ZnO dan MnO₂ tercampur secara merata. Tahap terakhir pada proses preparasi ini adalah pengeringan *acetone* dengan menggunakan oven pada suhu 80 °C selama 24 jam, waktu pengeringan dapat ditambah bila dipastikan campuran belum benar-benar kering. campuran yang telah dikeringkan, kemudian digerus terlebih dahulu selama 1 jam.

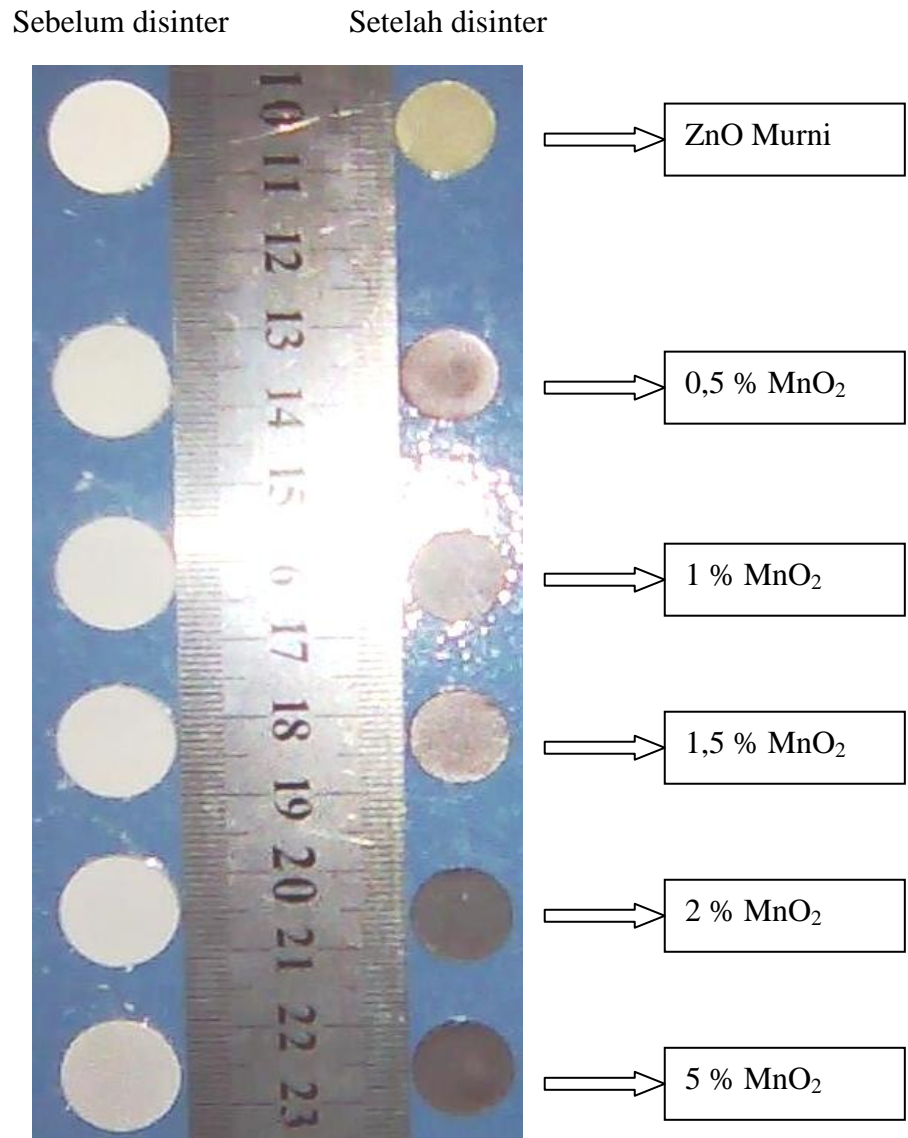
Proses selanjutnya adalah pencetakan varistor dengan menggunakan alat bantu *press hidrolis*. Alat ini mempunyai range tekanan antara 0-300 kg/cm². Proses

ini dimaksudkan untuk memampatkan serbuk ZnO dan ZnO-MnO₂ yang akan dibuat menjadi varistor, sehingga diperoleh struktur varistor yang lebih padat dan mempermudah proses sintering. Pengepresan pada sampel yang akan dicetak dilakukan pada tekanan 200 kg/cm², hal ini dikarenakan besar tekanan tersebut cukup untuk membuat keramik varistor. Dan jika tekanan terlalu besar dikhawatirkan akan merusak alat cetak (*die*) yang digunakan.

Proses terakhir pada pembuatan varistor ini adalah penyinteran varistor pada suhu 1300 °C. Kenaikkan suhu pembakaran sebesar 5 °C/menit, kenaikan suhu yang bertahap ini dilakukan untuk mencegah terjadinya keretakan maupun pecahnya varistor akibat lonjakan suhu pembakaran yang terlalu drastis. Setelah melewati proses sintering selanjutnya varistor didinginkan sampai suhu ruang ± 24 jam. Dalam proses penyinteran partikel halus dari keramik mulai menyatu pada suhu tinggi. Kerapatan material meningkat ketika rongga diantara butiran-butiran terisi sebagian. Sehingga penyinteran ini dapat menyebabkan menyusutnya ukuran pelet varistor.

Gambar 23 menunjukkan hasil pembuatan varistor ZnO dan ZnO-MnO₂ sebelum dan sesudah *disinter*. Tampak pada gambar Varistor ZnO yang sudah *disintering* berwarna hijau kekuning-kuningan. Sedangkan untuk varistor ZnO-MnO₂ berubah warnanya menjadi coklat dan kehitam-hitaman. Perubahan warna pada varistor ZnO ini terjadi karena pada ZnO mempunyai sifat *thermochromic* yang artinya warna senyawa tersebut berubah jika dikenai temperatur tertentu.

Varistor ZnO dan ZnO-MnO₂ baik sebelum disinter maupun yang telah disinter, diukur dimensinya menggunakan jangka sorong. Serta ditimbang massanya dengan menggunakan *neraca digital*. Untuk melihat hasil pengukuran dimensi dan massanya dapat dilihat pada tabel 7 dan 8.



Gambar 23. Pelet varistor sebelum dan sesudah disintering

Tabel 7. Data hasil pencetakan varistor sebelum *disintering*

| No. | Sampel Varistor | Tebal (mm) | Diameter (mm) | Massa (gr) |
|-----|-----------------|------------|---------------|------------|
| 1 | ZnO Murni | 2 | 14 | 1 |
| 2 | ZnMn 0,5 % | 2 | 14 | 1 |
| 3 | ZnMn 1 % | 2 | 14 | 1 |
| 4 | ZnMn 1,5 % | 2 | 14 | 1 |
| 5 | ZnMn 2,0 % | 2 | 14 | 1 |
| 6 | ZnMn 5 % | 2 | 14 | 1 |

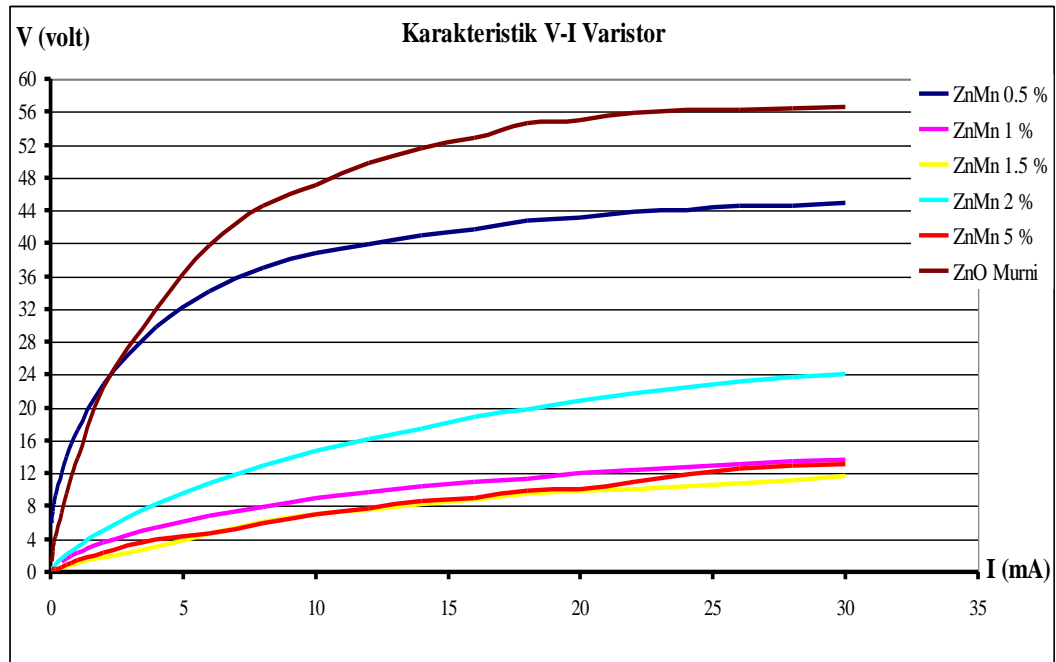
Tabel 8. Data hasil varistor setelah *disintering*

| No. | Sampel Varistor | Tebal (mm) | Diameter (mm) | Massa (gr) |
|-----|-----------------|------------|---------------|------------|
| 1 | ZnO Murni | 1,7 | 12 | 0,936 |
| 2 | ZnMn 0,5 % | 1,4 | 11,2 | 0,997 |
| 3 | ZnMn 1 % | 1,5 | 11,2 | 0,978 |
| 4 | ZnMn 1,5 % | 1,4 | 12 | 0,962 |
| 5 | ZnMn 2,0 % | 1,5 | 11,5 | 0,960 |
| 6 | ZnMn 5 % | 1,5 | 12 | 0,978 |

B. Hasil Pengujian Karakterisasi Sifat Listrik Volt-Ampere (V-I) Pada Varistor dan Analisisnya

1. Hasil Pengukuran Karakteristik Sifat Listrik Volt-Ampere (V-I) Varistor

Data-data hasil pengukuran karakteristik V-I berdasarkan rangkaian gambar 21 ditunjukkan pada tabel 9. Pengukuran dilakukan dengan cara mengatur regulator tegangan untuk mendapatkan nilai arus yang diinginkan. Adapun *range* arus yang ingin diujikan adalah 0.05-30 mA.



Gambar 24. Karakteristik *volt-ampere* (V-I) varistor

Karakteristik V-I tiap-tiap spesimen setelah diujikan maka didapatkan hasil yang berbeda antara spesimen yang satu dengan spesimen yang lainnya. Seperti yang ditunjukkan oleh gambar 24. Pada gambar jelas terlihat bahwa tanggapan tegangan awal varistor ZnMn 0.5 % lebih tinggi dibandingkan dengan sampel varistor yang lainnya . Kemudian diurutkan berikutnya adalah ZnO murni, ZnMn 2% , ZnMn 1.5 % dan yang terkecil tanggapan awalnya adalah sampel ZnMn 5 % . Nilai tegangan dan arus terukur yang tercantum didalam tabel 9 akan digunakan untuk menentukan nilai koefisien *non-linear* (β) dan konstanta (k) varistor.

Tabel 9. Data hasil pengukuran karakteristik volt-ampere (V-I)

| I (mA) | V (Volt) | | | | | |
|---------|---------------|------------|---------------|-------------|------------|--------------|
| | ZnMn 0.5 % | ZnMn 1% | ZnMn 1.5 % | ZnMn 2 % | ZnMn 5% | ZnO Murni |
| 0,05 | 6 | | 0,115 | 0,362 | 0,115 | 1,235 |
| 0,1 | 7,31 | | 0,211 | 0,55 | 0,199 | 2,583 |
| 0,15 | 8,35 | | 0,276 | 0,78 | 0,273 | 3,516 |
| 0,2 | 9,3 | | 0,345 | 0,961 | 0,33 | 4,35 |
| 0,4 | 12,04 | 1,209 | 0,58 | 1,599 | 0,587 | 7,25 |
| 0,6 | 13,96 | 1,674 | 0,78 | 2,073 | 0,857 | 9,58 |
| 0,8 | 15,7 | 2,052 | 0,961 | 2,54 | 1,156 | 11,76 |
| 1 | 17,3 | 2,4 | 113 | 3,105 | 1,375 | 13,87 |
| 2 | 22,85 | 3,672 | 1,866 | 5,1 | 2,313 | 22,4 |
| 4 | 29,75 | 5,32 | 3,126 | 8,3 | 3,87 | 31,96 |
| 6 | 34,18 | 6,75 | 4,65 | 10,72 | 4,72 | 39,7 |
| 8 | 36,94 | 7,9 | 6,16 | 12,86 | 6 | 44,5 |
| 10 | 38,8 | 8,9 | 7,01 | 14,66 | 6,96 | 47,1 |
| 12 | 39,9 | 9,7 | 7,55 | 16,14 | 7,81 | 49,7 |
| 14 | 41 | 10,4 | 8,2 | 1746 | 8,61 | 51,5 |
| 16 | 41,7 | 10,88 | 8,89 | 18,78 | 9,07 | 52,8 |
| 18 | 42,7 | 11,4 | 9,48 | 19,81 | 9,8 | 54,6 |
| 20 | 43,2 | 11,95 | 9,94 | 20,81 | 10,13 | 54,9 |
| 22 | 43,8 | 12,42 | 10,11 | 21,65 | 11,01 | 55,8 |
| 24 | 44 | 12,8 | 10,34 | 22,37 | 11,94 | 56,2 |
| 26 | 44,5 | 13,16 | 10,72 | 23,1 | 12,57 | 56,3 |
| 28 | 44,5 | 13,41 | 11,09 | 23,63 | 12,97 | 56,4 |
| 30 | 45 | 13,63 | 11,6 | 24,05 | 13,19 | 56,6 |

2. Hasil Perhitungan Koefisien *Non-Linear* β dan Konstanta k Varistor

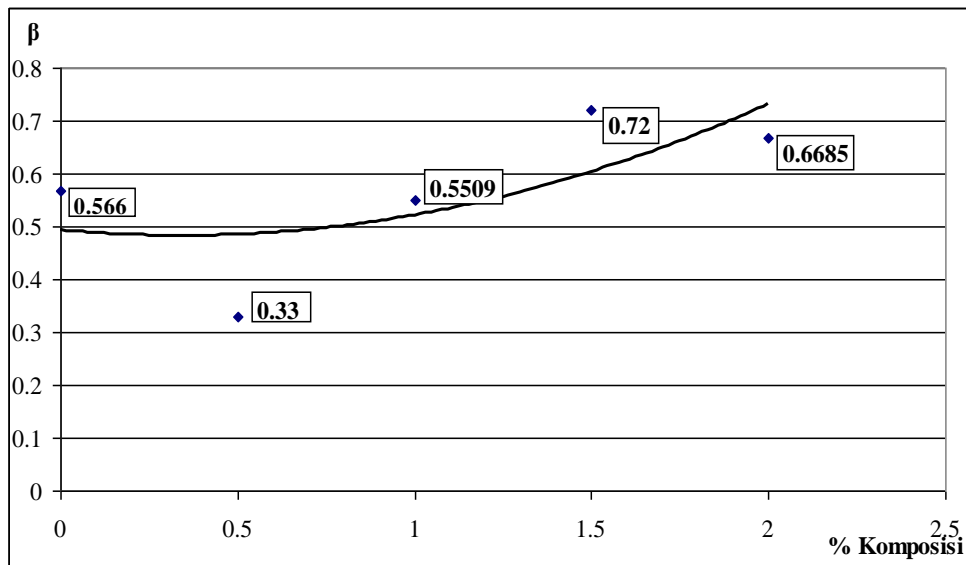
Koefisien non-linear β dan konstanta k untuk seluruh spesimen ditunjukkan pada tabel 10. Nilai-nilai tersebut merupakan hasil perhitungan berdasarkan data pengukuran pada tabel 9. Data-data tersebut kemudian diolah dengan metode kuadrat terkecil pada lampiran B.

Tabel 10. Nilai koefisien *non-linear* β dan konstanta k varistor

| No. | Nama Spesimen | β | k |
|-----|---------------|---------|---------|
| 1. | ZnO Murni | 0,5662 | 11,087 |
| 2. | ZnMn 0.5 % | 0,33 | 16,6 |
| 3. | ZnMn 1 % | 0,5509 | 2,34423 |
| 4. | ZnMn 1.5 % | 0,72 | 1,1376 |
| 5. | ZnMn 2 % | 0,6685 | 2,884 |
| 6. | ZnMn 5 % | 0,74 | 1,191 |

Pada penelittian kali ini diperoleh nilai koefisien non-linear untuk varistor ZnO adalah sebesar 0,5662 dan nilai k sebesar 11,087. Bila dibandingkan antara ZnO dengan ZnO-MnO₂ terlihat dengan jelas bahwa dengan penambahan campuran MnO₂ 0.5 % mampu menurunkan nilai β dan meningkatkan konstanta k. Untuk campuran MnO₂ 1% dihasilkan β dan konstanta k yang lebih rendah. Sedangkan untuk campuran MnO₂ 1,5 %, 2 %, dan 5 % ternyata nilai koefisien β semakin bertambah besar dan konstanta k yang semakin kecil, ini artinya penambahan MnO₂ 1,5 %, 2 %, dan 5 % tidak mampu meningkatkan koefisien *non-linear* β . Sehingga pada penelitian ini hanya varistor ZnMn 0.5 % dan ZnMn 1 % yang mampu meningkatkan koefisien *non-linear*. Namun untuk varistor ZnMn 1 % tidak mampu meningkatkan nilai konstanta k.

Dengan didapatkannya nilai koefisien *non-linear* varistor ZnO murni dan ZnO-MnO₂ hal ini mengindikasikan bahwa varistor dapat bekerja memotong tegangan impuls. Namun untuk lebih membuktikan apakah varistor benar-benar akan bekreja ketika ada tegangan impuls, maka perlu dilakukan suatu pengujian pemberian tegangan impuls secara langsung kepada varistor.



Gambar 25. Grafik *trend* hubungan antara % komposisi MnO_2 - β

Gambar 25 merupakan grafik *trend* hubungan antara % komposisi- β . Garis *trend* pada gambar 25 menggunakan tipe *trendline polynomial*, hal ini bertujuan untuk memprediksikan nilai koefisien *non-linear* yang akan diperoleh selain itu juga dengan *trendline polynomial* dapat terlihat titik optimum konsentrasi komposisi yang dapat memperbaiki koefisien non linear varistor. Pada gambar di atas, secara keseluruhan *trend* yang terlihat adalah semakin besar penambahan % mol komposisi MnO_2 akan menaikkan nilai β meskipun pada komposisi 2 % mol nilai β mengalami penurunan namun bila komposisi ditambah menjadi 5 % mol maka nilai β akan kembali meningkat. Sehingga berdasarkan *trend* yang terlihat di atas maka range penambahan diantara 0-1 % mol mampu meningkatkan koefisien *non-linear* dengan titik optimumnya berada pada campuran 0.5 % MnO_2 . Sementara penambahan lebih dari 1 % tidak mampu untuk meningkatkan koefisien non-linear varistor ZnO. Berdasarkan hasil pengujian karakteristik V-I kali ini hasil yang

diperoleh tidak sesuai dengan hipotesa karena tidak semua campuran mampu meningkatkan koefisien non-linear varistor ZnO.

3. Hasil Perhitungan Resistansi Varistor

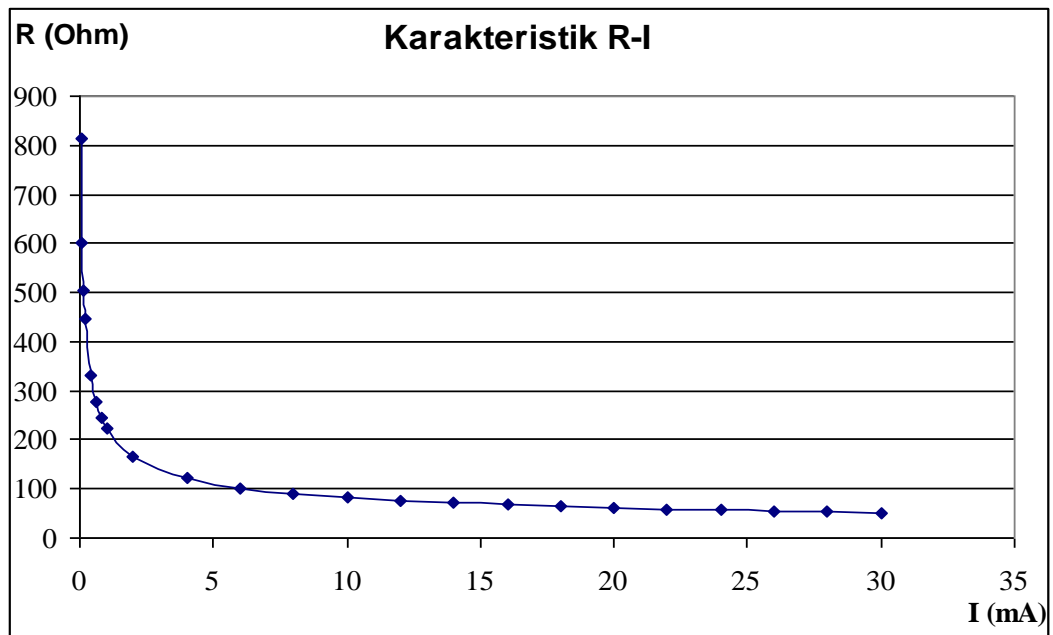
Nilai resistansi varistor untuk seluruh spesimen ditunjukkan pada tabel 19, tabel 20, tabel 21, tabel 22, tabel 23, dan tabel 24 dalam lampiran C. Nilai resistansi tersebut merupakan hasil perhitungan dengan persamaan (16), setelah nilai koefisien *non-linear* β dan konstanta k dihitung metode kuadrat terkecil seperti yang tertera dalam lampiran B.

Pada tabel 11 terlihat bahwa penambahan MnO₂ mampu memberikan pengaruh perubahan terhadap nilai resistansi varistor ZnO. Penambahan MnO₂ sebanyak 0.5 % ternyata mampu meningkatkan nilai resistansi varistor ZnO, dengan nilai resistansi tertingginya adalah sebesar 12641,49 ohm. Sedangkan untuk penambahan MnO₂ 1 %, 1.5 %, 2 %, dan 5 % memiliki resistansi yang sangat kecil dibandingkan dengan varistor ZnO. Hal ini tentunya sangat tidak baik karena dikhawatirkan dengan nilai resistansi yang sangat rendah akan mengakibatkan varistor akan bekerja pada saat tegangan normal dan kondisi ini adalah kondisi yang ingin dihindari. Namun kondisi ini dapat dihindari dengan mempertebal ukuran varistor atau varistor disusun seri sesuai dengan kebutuhan. Untuk Varistor ZnO yang diberi dopan MnO₂ pada tabel 11 terlihat bahwa varistor ZnMn 5 % memiliki resistansi yang lebih kecil dibandingkan dengan varistor campuran yang lainnya. Adapun nilai resistansi varistor ini nantinya akan mempengaruhi unjuk kerja varistor dalam hal memotong tegangan impuls yang diterapkan ke varistor. Secara teori resistansi

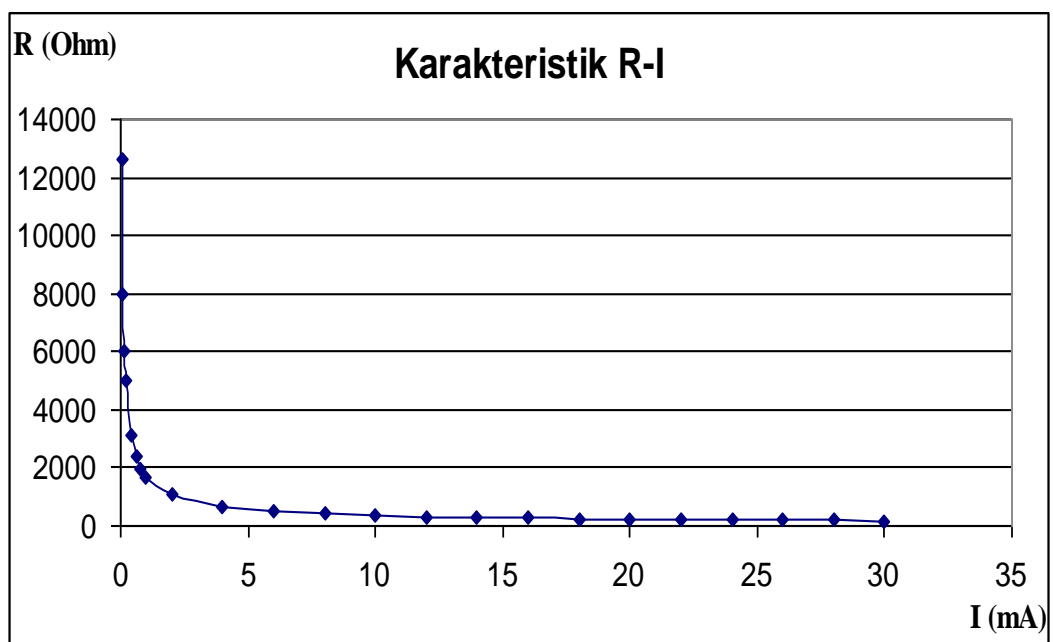
varistor merupakan halangan bagi elektron yang hendak menerobos varistor, semakin besar resistansi yang dimiliki oleh varistor maka semakin sulit bagi elektron guna menerobos varistor. Begitu juga sebaliknya semakin rendah nilai resistansi suatu varistor maka elektron akan lebih mudah untuk menerobos varistor.

Tabel 11. Data hasil perhitungan nilai resistansi varistor

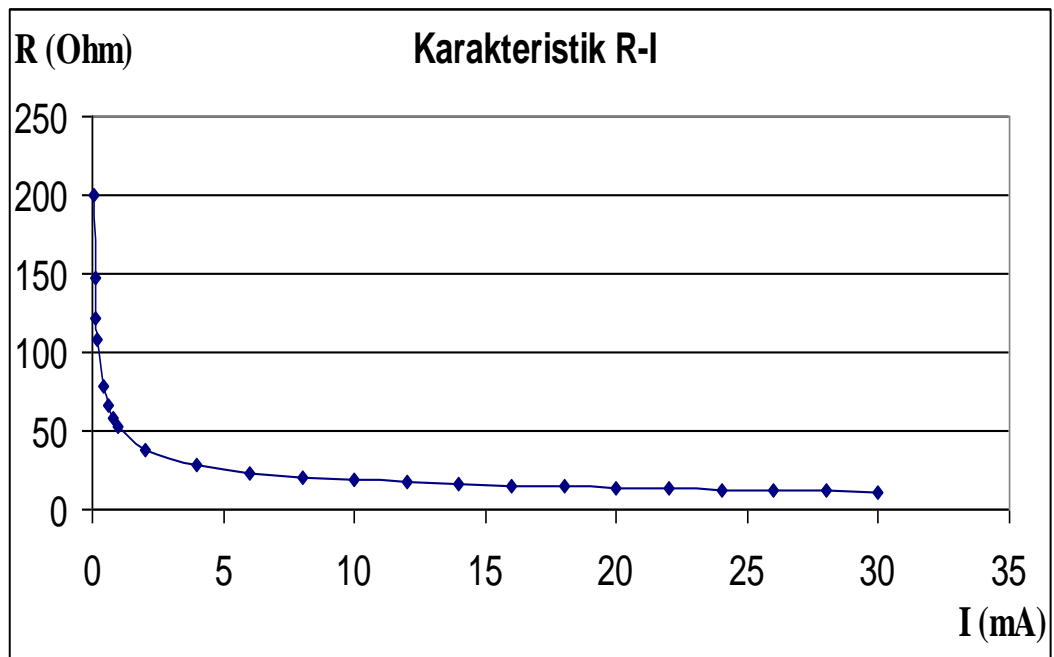
| R (Ohm) | | | | | |
|----------------|----------------------|----------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| ZnO | ZnMn 0.5% | ZnMn 1% | ZnMn 1.5% | ZnMn 2 % | ZnMn 5 % |
| 898.6926 | 12641.49 | 200.259 | 18.20866 | 76.87528 | 15.6379 |
| 660.7148 | 7945.26 | 146.69 | 14.99649 | 61.09354 | 13.0591 |
| 551.9055 | 6055.178 | 122.269 | 13.38702 | 53.40981 | 11.7524 |
| 485.7546 | 4993.649 | 107.45 | 12.35097 | 48.55163 | 10.9055 |
| 357.1246 | 3138.542 | 78.7073 | 10.17215 | 38.58445 | 9.10702 |
| 298.3119 | 2391.921 | 65.6043 | 9.080447 | 33.73169 | 8.19582 |
| 262.5565 | 1972.594 | 57.6531 | 8.377692 | 30.66344 | 7.60516 |
| 237.8012 | 1698.666 | 52.1555 | 7.870269 | 28.47707 | 7.17649 |
| 174.8304 | 1067.623 | 38.2039 | 6.481883 | 22.631 | 5.993 |
| 128.5345 | 671.0083 | 27.9843 | 5.338421 | 17.98508 | 5.00468 |
| 107.3669 | 511.3835 | 23.3256 | 4.765486 | 15.7231 | 4.50394 |
| 94.49802 | 421.7332 | 20.4985 | 4.396675 | 14.29292 | 4.17935 |
| 85.58823 | 363.1684 | 18.5439 | 4.130376 | 13.2738 | 3.94377 |
| 78.93569 | 321.408 | 17.086 | 3.924812 | 12.4953 | 3.76118 |
| 73.71611 | 289.8694 | 15.9432 | 3.759012 | 11.87282 | 3.61342 |
| 69.47453 | 265.0621 | 15.0152 | 3.621062 | 11.35872 | 3.49012 |
| 65.93623 | 244.9489 | 14.2416 | 3.50359 | 10.92377 | 3.38486 |
| 62.92409 | 228.2538 | 13.5834 | 3.401741 | 10.54882 | 3.2934 |
| 60.31799 | 214.1336 | 13.0142 | 3.312159 | 10.22074 | 3.21279 |
| 58.03317 | 202.0071 | 12.5155 | 3.23244 | 9.930137 | 3.14092 |
| 56.00785 | 191.4591 | 12.0736 | 3.1608 | 9.670114 | 3.07623 |
| 54.19576 | 182.1848 | 11.6784 | 3.095889 | 9.435445 | 3.01752 |
| 52.56149 | 173.955 | 11.3221 | 3.036656 | 9.222094 | 2.96388 |



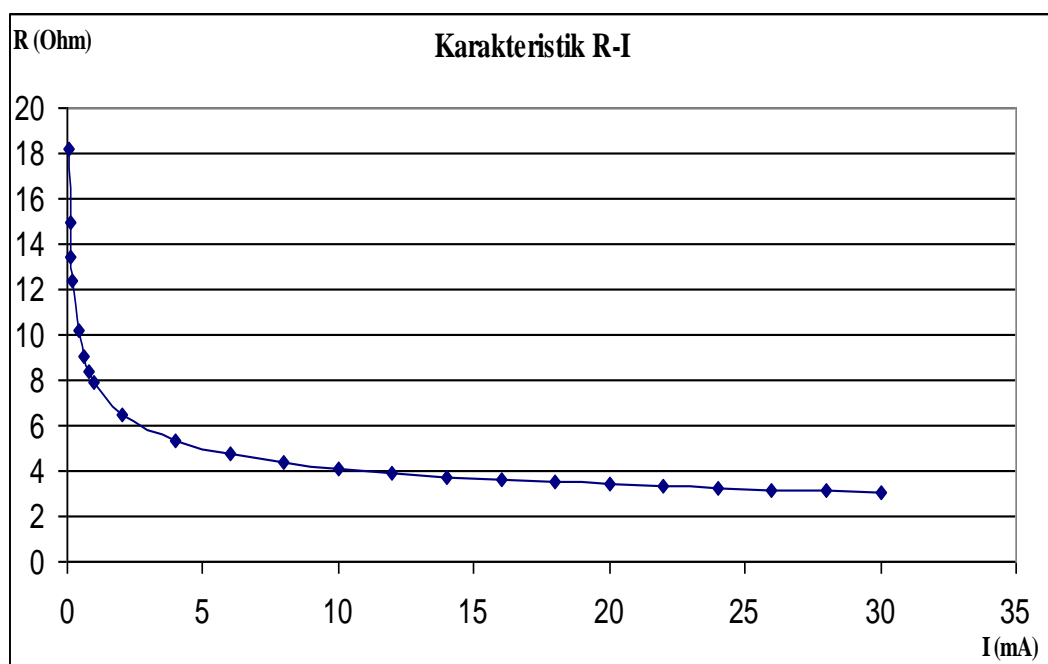
Gambar 26. Grafik hubungan resistansi dan arus varistor ZnO



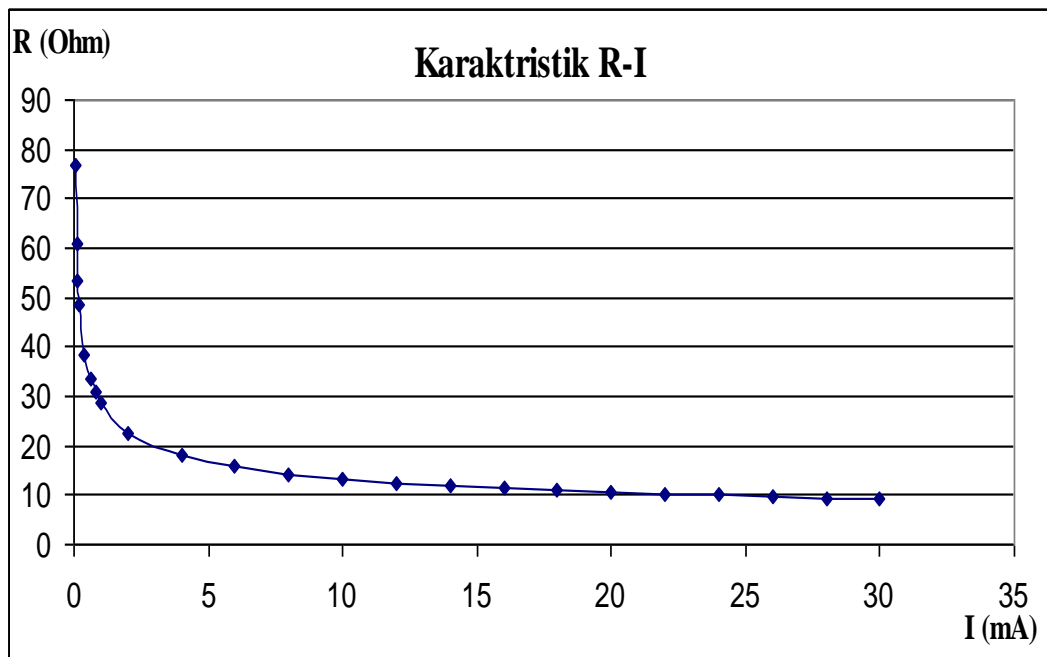
Gambar 27. Grafik hubungan resistansi dan arus varistor ZnMn 0.5 %



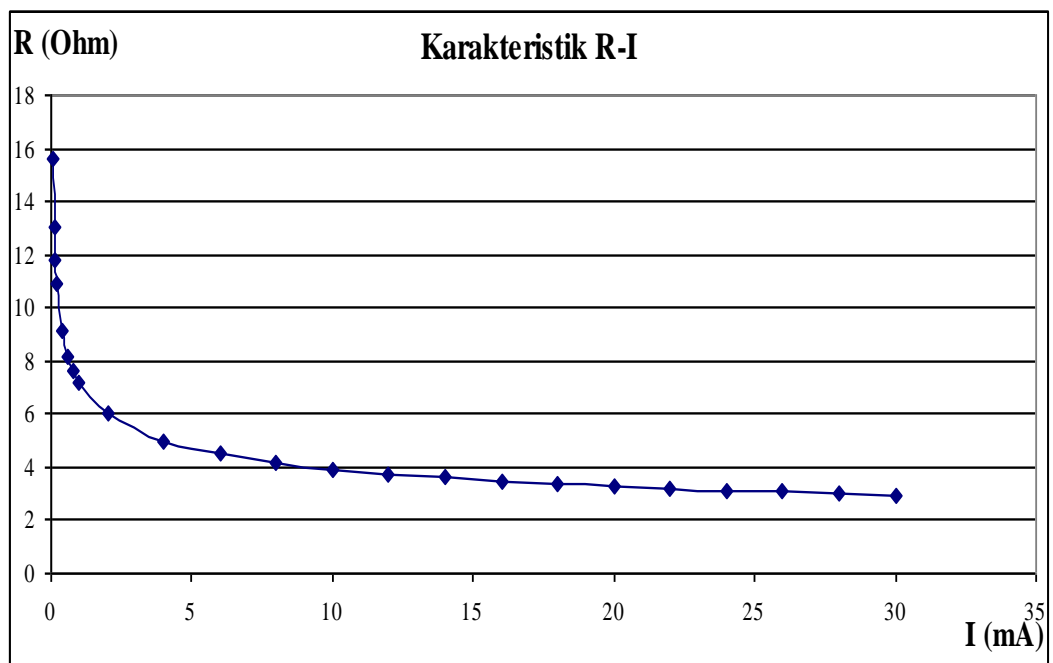
Gambar 28. Grafik hubungan resistansi dan arus varistor ZnMn 1 %



Gambar 29. Grafik hubungan resistansi dan arus varistor ZnMn 1.5 %



Gambar 30. Grafik hubungan resistansi dan arus varistor ZnMn 2 %



Gambar 31. Grafik hubungan resistansi dan arus varistor ZnMn 5 %

C. Hasil Pengujian Karakteristik Sifat Listrik Tegangan-Waktu (V-t) Varistor dan Analisisnya

1. Hasil Perhitungan Pembagi Tegangan Resistif

Dari hasil pengujian tegangan impuls, untuk mengukur nilai tegangan sebenarnya tidak dilakukan secara langsung, hal ini dikarenakan tegangan yang dihasilkan sangat besar, sehingga bila diukur secara langsung dapat mengakibatkan kerusakan pada alat ukur (osiloskop). Untuk mengantisipasi hal tersebut maka diperlukan suatu pembagi tegangan resistif. Dengan demikian, berdasarkan persamaan (5) dapat diketahui besarnya nilai faktor pengali pembagi tegangan resistif, yaitu sebesar :

$$\frac{R_L + R_H}{R_L} = \frac{1k\Omega + 200k\Omega}{1k\Omega} = 201$$

Nilai tegangan uji impuls dan tegangan tembus varistor dapat dihitung dengan mengalikan nilai pengukuran pada osiloskop dengan nilai faktor pengali pembagi tegangan resistif (201). Proses perhitungan untuk mendapatkan nilai tegangan sebenarnya dapat dilihat pada lampiran D.

2. Hasil Pengujian Pembangkitan Tegangan Impuls

Pengujian dilakukan menggunakan pembangkit tegangan impuls kapasitif yang menggunakan *input* tegangan AC dari *voltage regulator* dengan memasang tujuh variasi nilai induktansi yang berbeda untuk mendapatkan tujuh variasi waktu muka gelombang yang berbeda pula. Hal ini dilakukan untuk memperoleh tujuh nilai tegangan tembus varistor dengan koordinat

yang berbeda sehingga dengan menghubungkan ketujuh koordinat tersebut diperoleh karakteristik V-t tegangan impuls uji dan karakteristik V-t dari varistor yang diuji.

Hasil data grafik tegangan yang terukur pada osiloskop kemudian ditransfer kedalam komputer sehingga lebih mudah untuk melakukan pengolahan data tersebut. Dengan mengolah data tersebut, didapatkan nilai tegangan puncak impuls hasil pembangkitan tegangan impuls tersebut.

Tabel 12 menunjukkan nilai puncak tegangan impuls yang didapat setelah melakukan pengukuran tegangan pada R_L menggunakan osiloskop dan mengalikan hasilnya dengan faktor pengali pembagi tegangan resistif yaitu sebesar 201.

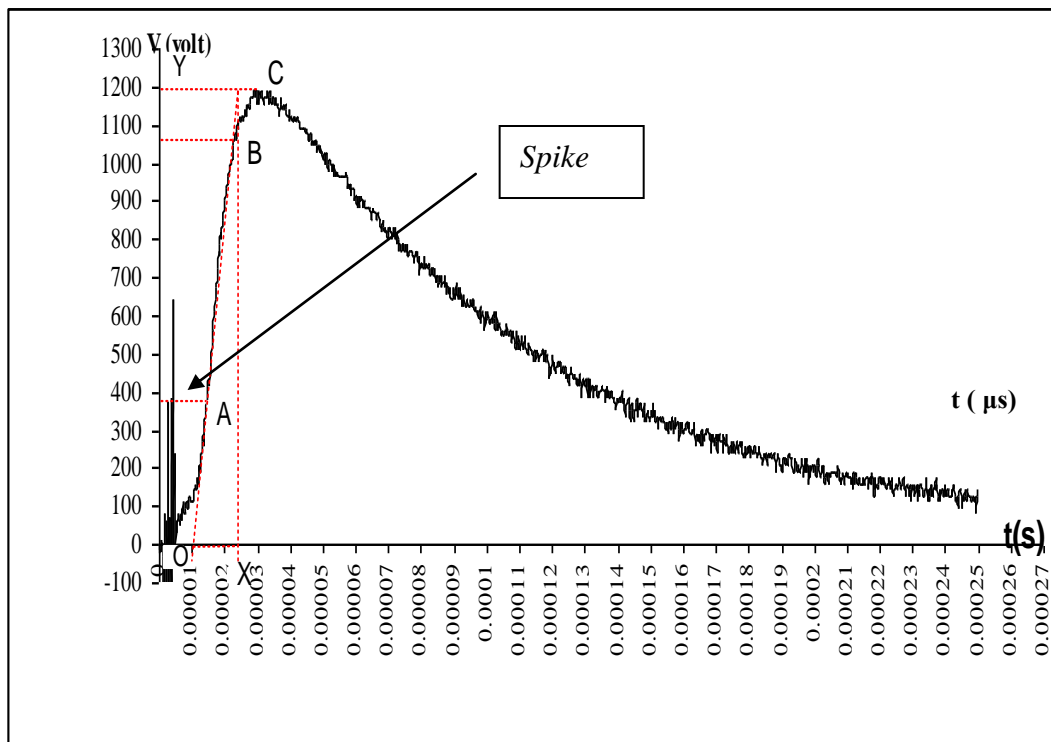
Tabel 12. Hasil pengujian tegangan Impuls

| V input (V) | Induktansi Induktor (mH) | Waktu Muka (μ s) | V Impuls terukur (Volt) | V Impuls sebenarnya (Volt) |
|-------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|
| 60 | 0,06 | 1,8 | 6 | 1206 |
| 62 | 0,3 | 5,2 | 6,16 | 1238,16 |
| 61 | 1,8 | 7,4 | 6,16 | 1238,16 |
| 61 | 3,3 | 10,4 | 6 | 1206 |
| 62 | 7,02 | 11 | 6 | 1206 |
| 63 | 13,5 | 12 | 6 | 1206 |
| 63 | 16,35 | 15,8 | 5,92 | 1189,92 |

Untuk mendapatkan nilai waktu muka (T_f) didapat dari hasil pengolahan grafik gelombang tegangan impuls dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Tentukan titik A yang besarnya 30% dari tegangan puncak dan titik B yang besarnya 90% dari tegangan puncak pada suatu kurva volt-waktu.

2. Tarik garis lurus yang menghubungkan titik A dan B.
3. Selanjutnya garis lurus AB berpotongan dengan sumbu waktu pada titik O dan berpotongan dengan garis YC pada titik C.
4. Tarik garis tegak lurus dengan sumbu X dari titik C. garis tegak lurus ini akan memotong sumbu waktu pada titik X.
5. Jarak antara titik O dan X inilah yang disebut dengan waktu muka.



Gambar 32. Cara mengukur waktu muka gelombang impuls (T_f)

Adapun referensi cara menentukan waktu muka ini diambil dari skripsi yang ditulis oleh P.H Nainggolan Teknik Elektro yang berjudul Pembuatan Pembangkit Tegangan Impuls Kapasitif.

Dari tabel 12 dapat dilihat pengaruh nilai induktansi induktor terhadap waktu muka gelombang tegangan impuls yang diukur. Semakin besar nilai induktansi induktor yang digunakan pada rangkaian, waktu muka yang

diperoleh dari gelombang tegangan impuls yang diukur juga semakin besar. Sehingga bentuk gelombang tegangan impuls yang dihasilkan semakin landai.

3. Hasil Pengujian Varistor ZnO Murni Terhadap Tegangan Uji Impuls

Pengujian varistor ZnO murni dilakukan dengan memberikan tegangan uji impuls yang dihasilkan oleh pembangkit tegangan impuls kapasitif dengan 7 variasi waktu muka yang berbeda, yaitu 0,06 μs , 0,3 μs , 1,8 μs , 3,3 μs , 7,02 μs , 13,5 μs , dan 16,35 μs . Dari pengujian ini dihasilkan data berupa grafik tegangan impuls dan tegangan *discharge*. Nilai tegangan *discharge* adalah nilai puncak gelombang impuls hasil pengujian varistor.

Tabel 13 merupakan tabel hasil perhitungan tegangan *discharge* dan tegangan impuls varistor ZnO murni. Proses perhitungan tegangan impuls dan tegangan *discharge* dapat dilihat pada lampiran D.

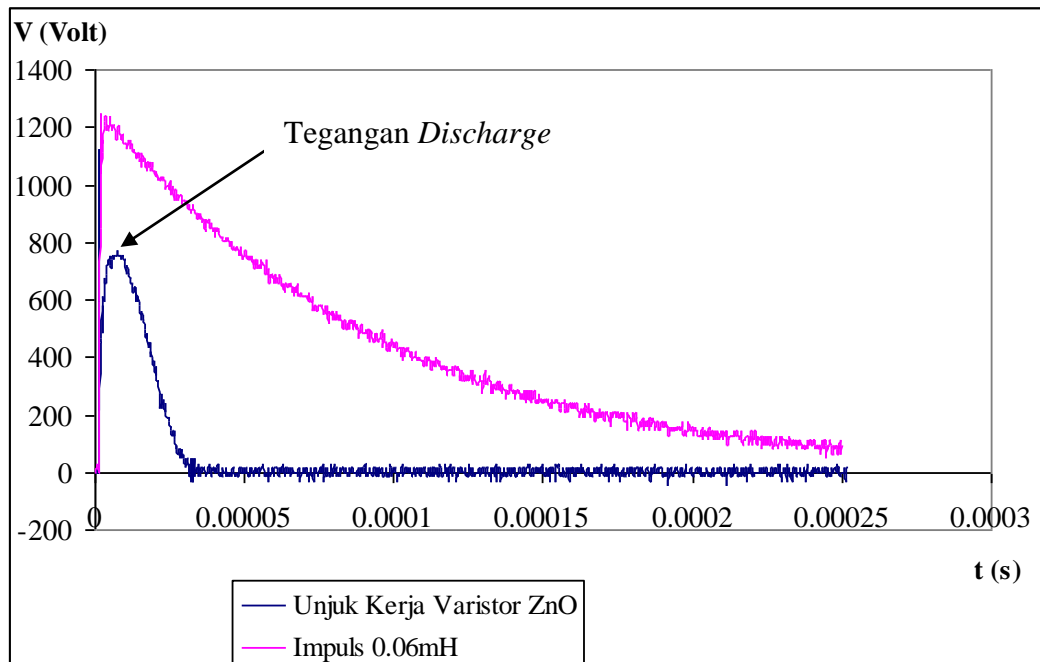
Tabel 13. Data hasil perhitungan tegangan impuls dan tegangan *discharge* sebenarnya varistor ZnO murni

| Sampel | L (mH) | Waktu Muka (μs) | V Impuls sebenarnya (Volt) | V <i>Discharge</i> sebenarnya (Volt) |
|-----------|--------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| ZnO Murni | 0,06 | 1,8 | 1206 | 755,76 |
| | 0,3 | 5,2 | 1238,16 | 594,96 |
| | 1,8 | 7,4 | 1238,16 | 707,52 |
| | 3,3 | 10,4 | 1206 | 675,36 |
| | 7,02 | 11 | 1206 | 659,28 |
| | 13,5 | 12 | 1206 | 546,72 |
| | 16,35 | 15,8 | 1189,92 | 530,64 |

Tabel 13 menunjukkan nilai tegangan impuls dan tegangan *discharge* sebenarnya dari varistor ZnO murni. Nilai tegangan tersebut didapatkan berdasarkan perkalian nilai tegangan puncak-puncak pada osiloskop dengan nilai faktor pembagi tegangan resitif, nilai tegangan hasil pengukuran dan perhitungannya dapat dilihat pada lampiran D.

Berdasarkan tabel tersebut diketahui bahwa tegangan impuls hasil pengukuran lebih besar dari pada tegangan *discharge* varistor ZnO murni. Adapun untuk dapat mengetahui apakah suatu varistor bekerja dengan baik, maka salah satu syarat yang harus dipenuhi yaitu kurva tegangan *discharge* suatu arester harus berada dibawah kurva tegangan impulsnya. Sehingga dari hasil yang diatas hal ini mengindikasikan bahwa varistor ZnO murni telah bekerja.

Gambar 37 menunjukkan unjuk kerja varistor ZnO murni terhadap tegangan impuls 1206 V dengan induktansi 0,06 mH. Pada gambar tersebut terlihat varistor ZnO murni mampu memotong tegangan impuls hingga tegangan *dicharge* sebesar 755,76 volt ketika varistor tersebut diterpa dengan tegangan impuls. Gambar yang menunjukkan unjuk kerja varistor ZnO murni pada waktu muka yang bervariasi dapat dilihat pada lampiran E.



Gambar 33. Respon varistor ZnO Murni terhadap tegangan uji impuls 1206 volt dengan $L = 0,06\text{mH}$

4. Hasil Pengujian Varistor ZnO-MnO₂ Terhadap Tegangan Uji Impuls

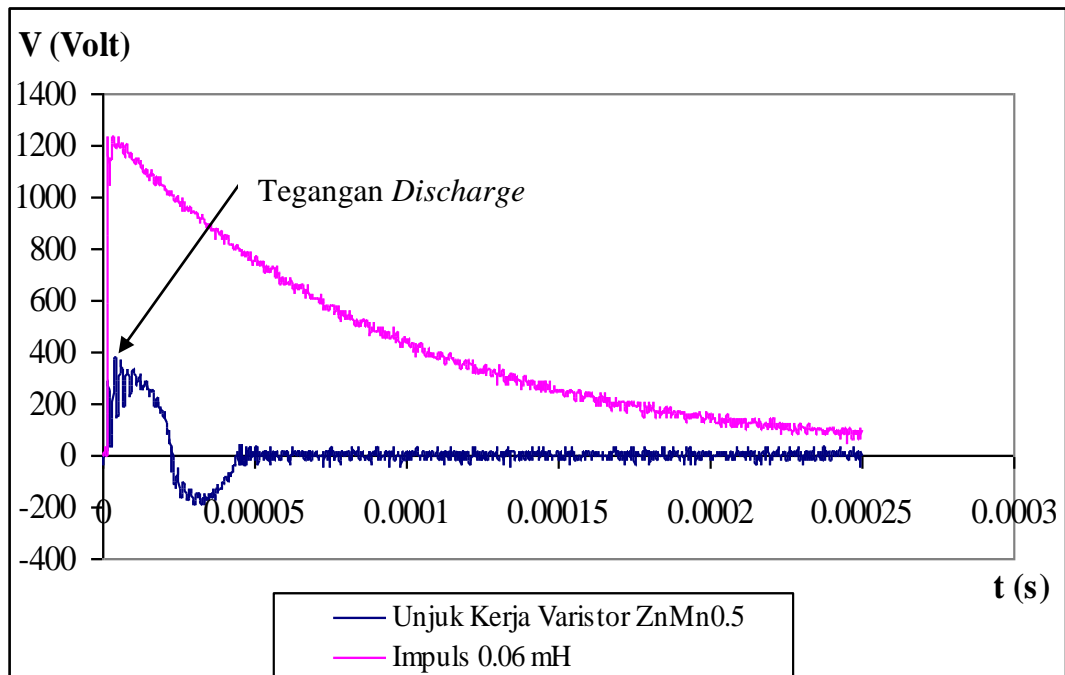
Pengujian varistor ZnO-MnO₂ dilakukan dengan perlakuan yang sama seperti pengujian varistor ZnO murni, yaitu dengan tegangan impuls dan waktu muka yang sama. Pengujian dilakukan menggunakan sampel mulai dari campuran 0.5 % mol, 1 % mol, 1.5 % mol, 2 % mol, dan 5 % mol.

Tabel 14 menunjukkan nilai tegangan impuls dan tegangan *discharge* ZnMn 0.5 %, ZnMn 1 %, ZnMn 1.5 %, ZnMn 2 %, dan ZnMn 5 %. Untuk nilai tegangan impuls dan tegangan *discharge* hasil perhitungan dapat dilihat dalam lampiran D.

Tabel 14. Tegangan Impuls dan tegangan *discharge* pada varistor ZnMn 0.5 % , ZnMn 1 % , ZnMn 1.5 % , ZnMn 2 % , dan ZnMn 5 %

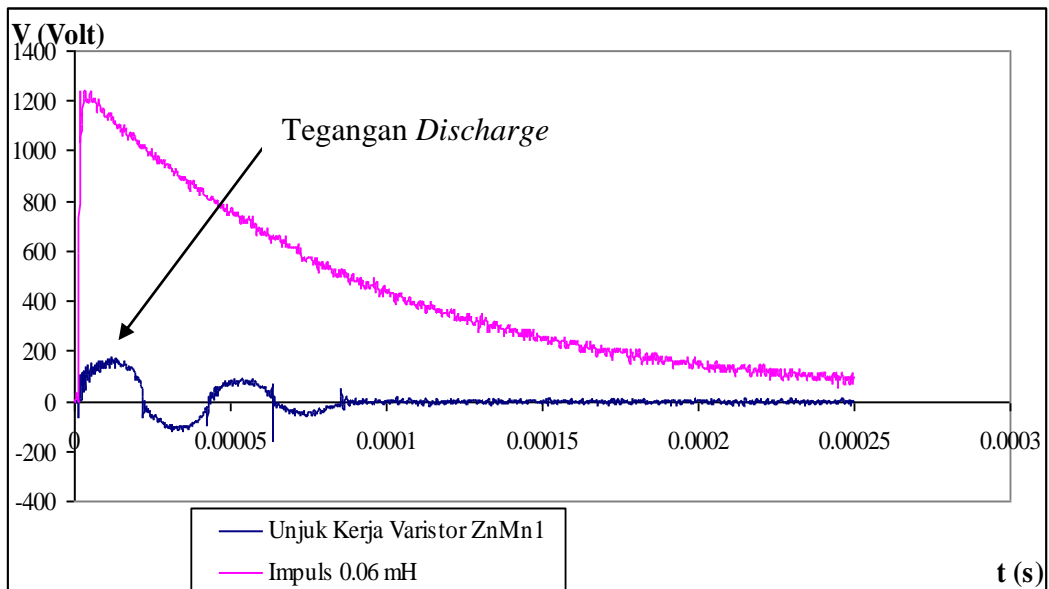
| Sampel | L (mH) | Waktu Muka (μ s) | V Impuls sebenarnya (Volt) | V _{discharge} sebenarnya (Volt) |
|------------|--------|-----------------------|----------------------------|--|
| ZnMn 0.5 % | 0,06 | 1,8 | 1206 | 385,92 |
| | 0,3 | 5,2 | 1238,16 | 249,24 |
| | 1,8 | 7,4 | 1238,16 | 257,28 |
| | 3,3 | 10,4 | 1206 | 281,14 |
| | 7,02 | 11 | 1206 | 241,2 |
| | 13,5 | 12 | 1206 | 209,04 |
| | 16,35 | 15,8 | 1189,92 | 209,04 |
| ZnMn 1 % | 0,06 | 1,8 | 1206 | 176,88 |
| | 0,3 | 5,2 | 1238,16 | 192,96 |
| | 1,8 | 7,4 | 1238,16 | 136,68 |
| | 3,3 | 10,4 | 1206 | 184,92 |
| | 7,02 | 11 | 1206 | 120,6 |
| | 13,5 | 12 | 1206 | 112,56 |
| | 16,35 | 15,8 | 1189,92 | 112,56 |
| ZnMn 1.5 % | 0,06 | 1,8 | 1206 | 209,04 |
| | 0,3 | 5,2 | 1238,16 | 160,8 |
| | 1,8 | 7,4 | 1238,16 | 160,8 |
| | 3,3 | 10,4 | 1206 | 160,8 |
| | 7,02 | 11 | 1206 | 136,68 |
| | 13,5 | 12 | 1206 | 128,64 |
| | 16,35 | 15,8 | 1189,92 | 120,6 |
| ZnMn 2 % | 0,06 | 1,8 | 1206 | 160,8 |
| | 0,3 | 5,2 | 1238,16 | 128,64 |
| | 1,8 | 7,4 | 1238,16 | 120,6 |
| | 3,3 | 10,4 | 1206 | 112,56 |
| | 7,02 | 11 | 1206 | 120,6 |
| | 13,5 | 12 | 1206 | 104,52 |
| | 16,35 | 15,8 | 1189,92 | 96,48 |
| ZnMn 5 % | 0,06 | 1,8 | 1206 | 265,32 |
| | 0,3 | 5,2 | 1238,16 | 201 |
| | 1,8 | 7,4 | 1238,16 | 201 |
| | 3,3 | 10,4 | 1206 | 201 |
| | 7,02 | 11 | 1206 | 168,84 |
| | 13,5 | 12 | 1206 | 120,6 |
| | 16,35 | 15,8 | 1189,92 | 104,2 |

a. Unjuk Kerja Varistor ZnMn 0.5 %



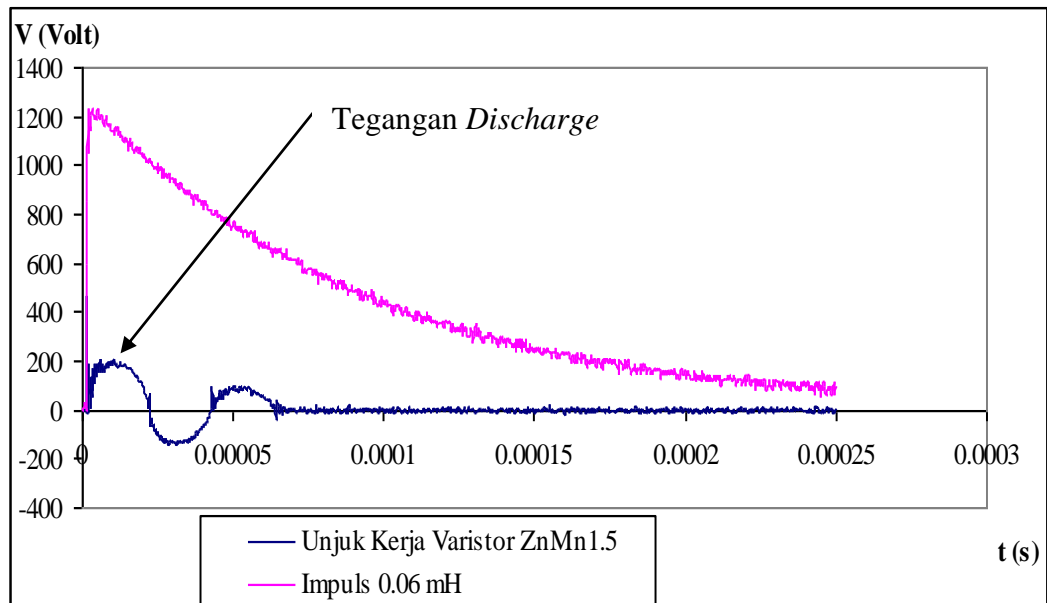
Gambar 34. Respon varistor ZnMn 0.5 % terhadap tegangan uji impuls 1206 volt dengan $L = 0.06$ mH

b. Unjuk Kerja Varistor ZnMn 1 %



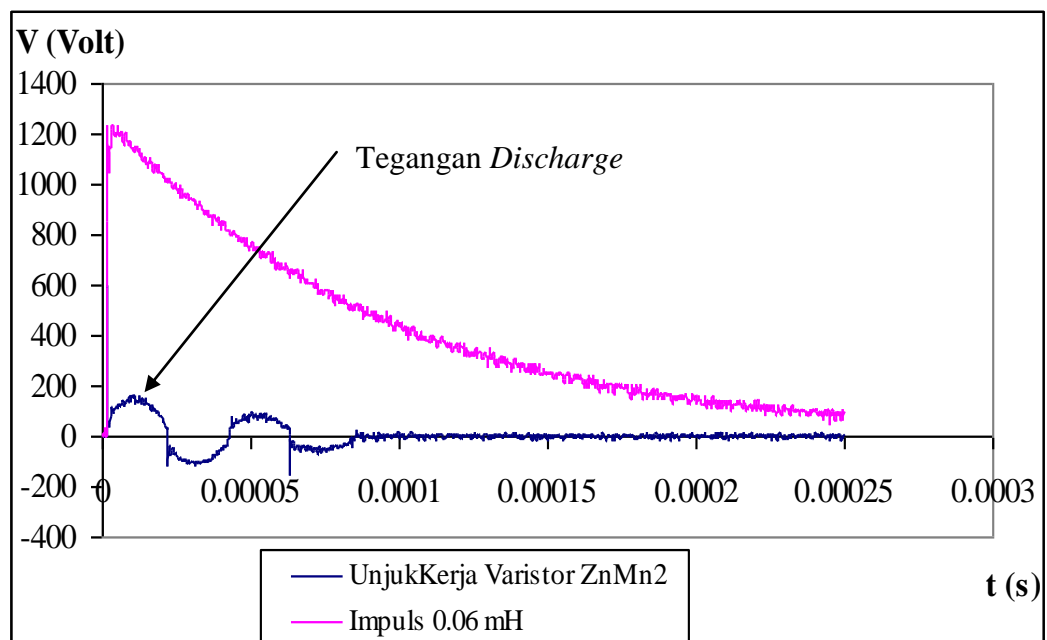
Gambar 35. Respon varistor ZnMn 1 % terhadap tegangan uji impuls 1206 Volt dengan $L = 0.06$ mH

c. Unjuk Kerja Varistor ZnMn 1.5 %



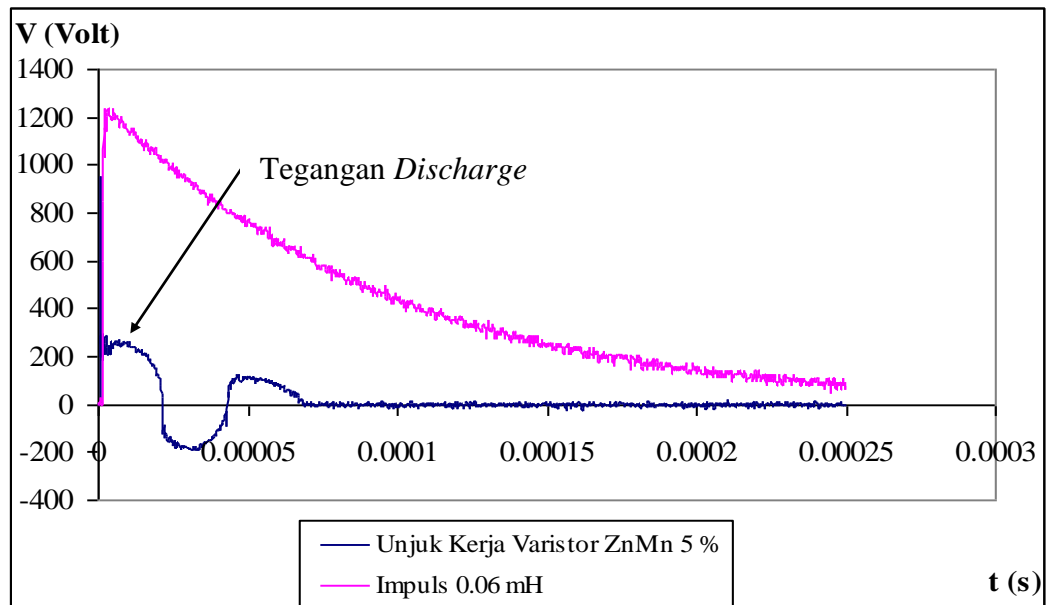
Gambar 36. Respon varistor ZnMn 1.5 % terhadap tegangan uji impuls 1206 Volt dengan $L = 0.06$ mH

d. Unjuk Kerja Varistor ZnMn 2 %



Gambar 37. Respon varistor ZnMn 2 % terhadap tegangan uji impuls 1206 Volt dengan $L = 0.06$ mH

e. Unjuk Kerja Varistor ZnMn 5 %



Gambar 38. Respon varistor ZnMn 5 % terhadap tegangan uji impuls 1206 volt dengan $L = 0.06$ mH

Gambar 34, 35, 36, 37 dan 38 merupakan salah satu sampel grafik unjuk kerja varistor ZnO-MnO₂ terhadap tegangan impuls 1206 volt dengan induktansi sebesar 0.06 mH. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan varistor dengan bahan campuran MnO₂ menunjukkan bahwa tegangan *discharge* yang dihasilkan berada di bawah kurva tegangan impulsnya. Dengan demikian varistor dengan bahan campuran ZnO dan MnO₂ dikatakan telah bekerja memotong tegangan impuls uji yang diberikan..

Apabila tegangan *discharge* antara varistor ZnO murni dan ZnO-MnO₂ dibandingkan maka hasilnya terlihat jelas bahwa tegangan *discharge* pada varistor ZnO yang telah dicampur dengan MnO₂ lebih rendah dibandingkan dengan ZnO murni. Hal ini dapat dibuktikan pada tabel 14, dimana dengan terpaan tegangan impuls dan waktu muka yang sama yaitu pada tegangan

impuls 1206 volt dengan waktu muka 1,8 μ s hasilnya terlihat pada varistor ZnO murni tegangan *dischargenya* sebesar 755,76 volt sedangkan pada ZnMn 0.5 % sebesar 385,92 volt, pada ZnMn 1 % sebesar 176,88 volt, ZnMn 1.5 % sebesar 209,04 volt, ZnMn 2 % sebesar 160,8 volt, dan pada ZnMn 5 % tegangan *dischargenya* sebesar 265,32 volt. Hal ini erat kaitannya dengan nilai resistansi atau nilai hambatan yang diperoleh pada saat pengukuran karakteristik V-I.

Sebagaimana hasil pada perhitungan resistansi yang telah dilakukan diketahui bahwa nilai resistansi ZnMn 1 %, ZnMn 1.5 %, ZnMn 2 %, dan ZnMn 5 % lebih rendah dari pada nilai resistansi ZnO murni. Sesuai dengan teori, resistansi varistor merupakan halangan bagi elektron yang hendak menerobos varistor, semakin besar resistansi yang dimiliki oleh varistor maka semakin sulit bagi elektron guna menerobos varistor. Begitu juga sebaliknya semakin rendah nilai resistansi suatu varistor maka elektron akan lebih mudah untuk menerobos varistor. Dengan semakin rendahnya nilai resistansi akan mengakibatkan nilai tegangan *discharge* varistor semakin kecil.

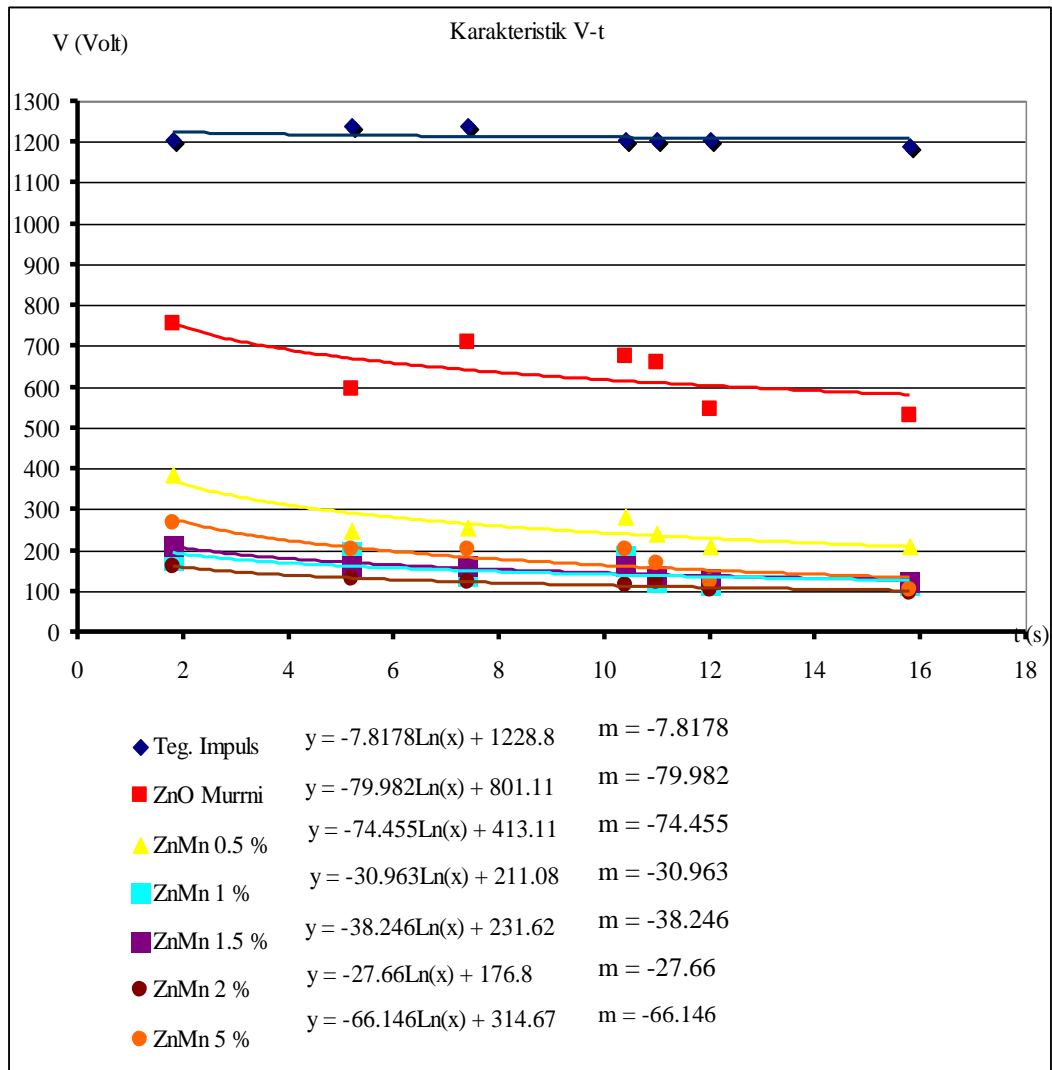
Adapun untuk varistor yang diberi dopan MnO₂ dari masing-masing campuran, terlihat pada gambar unjuk kerja varistor bahwa varistor ZnMn 2 % memiliki tegangan *discharge* yang paling kecil diantara 5 jenis campuran varistor yang ada. Hal ini tidak sesuai dengan nilai resistansi yang diperoleh, bila dihubungkan dengan nilai resistansi maka seharusnya varistor ZnMn 5 % yang memiliki tegangan *discharge* yang terkecil karena memiliki nilai resistansi yang terkecil dibandingkan dengan campuran yang lainnya. Dengan

nilai resistansi yang terkecil seharusnya elektron akan lebih mudah untuk menerobos varistor ZnMn 5 %. adapun kondisi ini dapat dikarenakan terjadinya *error* pada saat melakukan pengukuran karakteristik V-I yang disebabkan sensitifnya alat ukur multimeter digital dan regulator tegangan.

Pada gambar respon 34 sampai 38 terlihat respon varistor yang dihasilkan menyerupai gelombang bolak-balik, kondisi itu disebut dengan respon *underdamped*. Berdasarkan teori yang diambil dari buku yang berjudul *Circuit* yang dikarang oleh A. Bruce Carlson respon *underdamped* dihasilkan dari pertukaran energi antara kapasitor dan induktor pada saat operasi pensaklaran (*switching*). Sedangkan komponen resistansi akan secara terus menerus menghilangkan energi dan memperkecil gelombang, sehingga amplitudo gelombang semakin menurun. Berdasarkan teori diatas maka dapat disimpulkan bahwa terjadinya respon *underdamped* pada gambar respon varistor dikarenakan adanya nilai resistansi, kapasitansi, dan induktansi yang terdapat di dalam sampel varistor.

5. Hasil Pengujian Karakteristik V-t Varistor

Pada gambar 39 merupakan gambar grafik dari karakteristik V-t tegangan impuls uji dan varistor yang diuji. Grafik tersebut terbentuk dari 7 koordinat yang didapat dari pengujian varistor pada 7 variasi waktu muka yang berbeda. Kemudian koordinat-koordinat tersebut dihubungkan sedemikian rupa hingga menghasilkan sebuah lengkung karakteristik V-t.



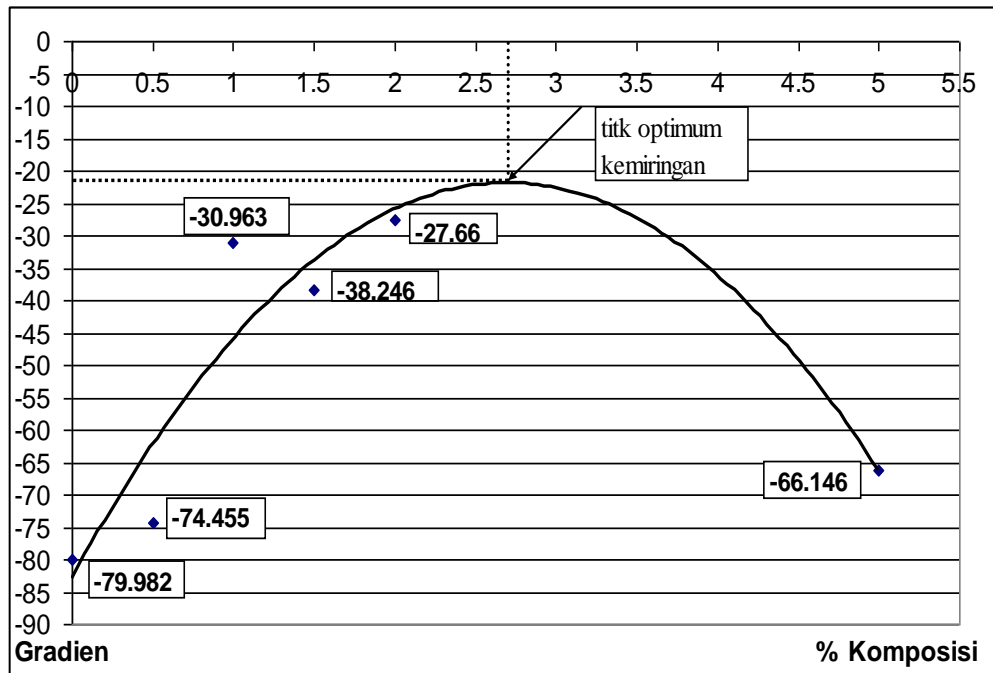
Gambar 39. Karakteristik V-t pengujian tegangan impuls dan varistor

Pada gambar 39 Lengkung yang ditunjukkan dengan warna biru tua adalah karakteristik V-t dari tegangan impuls yang digunakan dalam pengujian tanpa memasang varistor pada rangkaian uji. Lengkung yang ditunjukkan dengan warna merah adalah karakteristik V-t dari tegangan *discharge* varistor ZnO, letaknya berada dibawah lengkung tegangan impuls. Sehingga dapat dikatakan varistor ZnO dapat bekerja memotong tegangan impuls uji.

Dan lengkung yang lainnya merupakan lengkung dari karakteristik V-t varistor ZnO yang didopan dengan MnO₂, letaknya berada di bawah lengkung tegangan impuls dan varistor ZnO. Dengan lengkung ZnMn 0.5 % berada diposisi tertinggi diantara campuran yang lainnya, kemudian dibawahnya berturut-turut adalah lengkung ZnMn 5 %, ZnMn 1.5 %, ZnMn 1 % dan lengkung yang paling rendah ZnMn 2 %. Sehingga dapat dikatakan varistor ZnO yang didopan dengan MnO₂ juga dapat bekerja memotong tegangan impuls uji.

Untuk dapat mengetahui apakah suatu varistor bekerja dengan baik, maka salah satu syarat yang harus dipenuhi yaitu karakteristik V-t suatu varistor harus berada dibawah karakteristik V-t impulsnya. Terkait dengan posisi lengkung karakteristik V-t dari masing-masing varistor yang berbeda hal ini dapat dimodifikasi dengan cara mengubah ketebalan varistor sesuai kebutuhan.

Adapun tipe *trendline* yang digunakan untuk menggambarkan lengkung karakteristik V-t tegangan impuls dan varistor kali ini adalah tipe *logarithmic*. Secara teori, baik karakteristik V-t varistor maupun karakteristik V-t isolasi selalu digambarkan dengan garis lengkung sehingga pada penelitian kali ini dilakukan *trendline logarithmic* untuk menggambarkan kelengkungan karakteristik V-t varistor, karena hanya dengan *trendline logarithmic* maka akan tergambar kelengkungan karakteristiknya.



Gambar 40. grafik hubungan antara % komposisi-Gradien karakteristik V-t

Pada gambar 39 dapat diketahui pula nilai kemiringan atau gradien dari masing-masing lengkung karakteristik V-t varistor. Dengan diketahui nilai kemiringan maka akan diketahui pula karakteristik V-t varistor terbaik yang dapat digunakan untuk memproteksi peralatan listrik dengan cara terlebih dahulu mengetahui karakteristik v-t yang dimiliki oleh isolasi peralatan listrik.

Pada gambar 40 merupakan grafik hubungan antara % komposisi campuran terhadap gradien karakteristik V-t varistor. Garis *trend* yang digunakan pada gambar 40 adalah *trendline* dengan tipe *polynomial*. Tipe *polynomial* ini dipilih karena dengan tipe *polynomial* didapatkan prediksi titik optimum komposisi campuran yang memiliki gradien lengkung karakteristik yang mendekati $m = 0$. Selain itu juga dengan tipe *polynomial* dapat diprediksi *range* komposisi campuran yang masih dapat memperbaiki gradien lengkung karakteristik V-t. Dengan adanya grafik ini maka akan terlihat pengaruh

penambahan MnO_2 terhadap gradien lengkung karakteristik V-t. Dari gambar 40 *trend* yang terlihat bahwa peningkatan % komposisi campuran 0.5 -2 % mampu meningkatkan nilai gradien menjadi lebih baik hal ini ditandai dengan nilai gradien mendekati $m = 0$ sehingga dikatakan karakteristik V-t semakin baik. Namun ketika campuran yang diberikan melebihi 3 % hal ini justru akan memperkecil nilai gradien sehingga dikatakan karakteristik V-t varistor semakin buruk. Dari gambar 40 dapat diketahui pula titik optimum campuran yang masih mampu meningkatkan gradien karakteristik V-t. Dengan titik optimumnya sebesar 2.7 % mol. Dari 5 komposisi campuran yang diteliti maka pada varistor ZnMn 2 % yang paling baik karena memiliki nilai gradien yang lebih mendekati $m = 0$.

Sampel jenis ZnMn 2 % ternyata memiliki gradien lengkung garis karakteristik V-t yang paling tinggi diantara 5 jenis campuran yang ada. Sehingga dapat dikatakan tipe ZnMn 2 % bekerja lebih baik dibandingkan dengan campuran yang lainnya. Namun ZnMn 2 % memiliki nilai resistansi yang sangat kecil hal ini dikhawatirkan ZnMn 2 % akan bekerja pada kondisi tegangan normal. Sehingga perlu penyesuaian ukuran ketebalan varistor yang memiliki resistansi rendah bila ingin digunakan. Perlu pengujian lebih lanjut untuk mencari korelasi antara ukuran varistor dengan tegangan *discharge*.

Di dalam aplikasinya sebagai proteksi sistem kelistrikan, varistor dengan gradien lengkung karakteristik V-t yang tinggi dan memiliki resistansi yang cukup besar akan lebih baik dalam melindungi peralatan listrik yang diproteksinya. Hal ini dikarenakan varistor tersebut terlebih dahulu akan

memotong tegangan impuls sebelum tegangan mencapai nilai yang mampu ditahan oleh isolasi dari suatu peralatan listrik serta menghindari bekerjanya varistor pada tegangan normal.

Dari hasil analisis diatas maka pada penelitian kali ini hasil yang didapatkan belum menunjukkan suatu korelasi antara hasil pengujian V-I dengan pengujian V-t. Pada pengujian V-I didapatkan bahwa varistor ZnMn 0.5 % dan ZnMn 1 % mampu meningkatkan koefisien *non-linear* untuk campuran yang lainnya memperburuk koefisien *non-linear*. Sedangkan pada pengujian V-t didapatkan bahwa varistor ZnMn 2 % memiliki gradien lengkung karakteristik V-t varistor yang paling baik diantara varistor yang lainnya .