

Pengaruh *Front Time* terhadap Tegangan Residu Arester ZnO 18 kV

Riky Dwi Puriyanto¹, Avrin Nur Widiastuti²

Abstract— Electrical system in Indonesia has two main parts that cannot be separated, the source (provider) and the load (end user). Various attempts have been taken to comply with the load requirement, one of them is by creating a reliable system. The reliability of the system can be achieved by protecting component system from power disturbances, e.g., overvoltage (surge). The characteristic of an surge is hard to define. Overvoltage that travels in the transmission line is affected by the line impedance and may cause an alteration in the characteristics of the resulting waves. One of the alterations that may appear is front time value. This research presents a laboratory testing of an 18 kV Zinc-Oxide (ZnO) arrester with various front time values in the range of 0-30 μ s. The various front time values can affect residual voltage with the average value which is equal to 39972.25 V for input voltage (Vpi) 60 kV and 42150 V for 100 kV. The increment of front time makes the value of residual voltage decrease, but the descent is not significant. The change of front time also can affect the residual voltage waveform as output of 18 kV ZnO arrester.

Intisari—Sistem kelistrikan di Indonesia memiliki dua bagian utama yang tidak dapat dipisahkan, yaitu sumber (penyedia) dan beban (pengguna). Berbagai upaya dilakukan untuk memenuhi kebutuhan beban, salah satunya adalah menciptakan sistem yang handal. Keandalan sistem didapat salah satunya dengan melindungi peralatan sistem dari gangguan, khususnya tegangan lebih (surja). Karakteristik surja sulit untuk diprediksi. Surja yang mengalir dalam saluran dapat terpengaruh oleh impedans saluran dan mengakibatkan perubahan karakteristik gelombang yang dihasilkan. Salah satu perubahan yang mungkin muncul adalah perubahan nilai waktu muka (*front time*). Penelitian ini merupakan kegiatan pengujian skala laboratorium terhadap arester ZnO 18 kV dengan *front time* yang bervariasi antara 0-30 μ s. Variasi *front time* dapat mempengaruhi nilai tegangan residu dengan nilai tegangan residu rata-rata arester ZnO 18 kV sebesar 39972.25 V untuk tegangan masukan Vpi 60 kV dan 42150 V untuk tegangan masukan 100 kV. Semakin besar nilai *front time* akan mengakibatkan penurunan tegangan residu, namun nilainya tidak terlalu signifikan. Perubahan *front time* juga mempengaruhi bentuk gelombang yang dihasilkan arester ZnO 18 kV.

Kata Kunci— tegangan lebih, arester ZnO, *front time*, tegangan residu.

I. PENDAHULUAN

Sistem kelistrikan di Indonesia memiliki dua bagian utama yang tidak dapat dipisahkan, yaitu sumber (penyedia) dan

beban (pengguna). Dari sisi penyedia terdapat peralatan yang berfungsi membangkitkan daya listrik serta peralatan lain yang menunjang keberhasilan pihak penyedia dalam memenuhi kebutuhan pengguna akan daya listrik. Peralatan yang sangat penting dalam proses pembangkitan daya listrik adalah transformator. Oleh karena itu, berbagai upaya dilakukan untuk melindungi transformator dari gangguan yang dapat membahayakannya. Hal ini bertujuan agar tercapai keandalan sistem dalam menjalankan proses penyaluran daya listrik dari sumber kepada beban.

Banyak jenis gangguan yang dapat mempengaruhi keandalan penyaluran daya listrik dari sumber kepada pengguna, salah satunya adalah tegangan lebih (surja) petir dan hubung (*switching*). Indonesia berpeluang untuk memiliki kerapatan petir yang tinggi karena letak geografis Indonesia yang dikelilingi lautan. Kerapatan petir di Indonesia mencapai 10 sambaran/km²/tahun [1]. Petir juga menjadi penyebab mayoritas kegagalan yang terjadi pada sistem daya listrik [2]. Surja hubung terjadi saat proses penyaklaran dan memiliki karakteristik tegangan dengan waktu muka (*front time*) yang lebih besar. Hal ini disebabkan karena sulitnya menentukan secara pasti karakteristik petir yang terjadi. Salah satu karakteristik yang perlu diperhatikan adalah pengaruh besarnya nilai waktu muka (*front time*) pada gelombang surja yang berbentuk impuls.

Petir dapat menyambar secara langsung pada saluran maupun tidak langsung atau pada obyek di dekat saluran. Gelombang berjalan (*travelling wave*) dapat mengalir dari jarak yang cukup jauh pada peralatan sistem pembangkit daya listrik. Gelombang berjalan yang melewati saluran tentunya dipengaruhi oleh impedans saluran yang dilewati. Akibatnya bentuk gelombang surja dapat mengalami pelemahan (*attenuation*) dan rusak (*distortion*). Perubahan tersebut tentunya akan mempengaruhi karakteristik kinerja peralatan pelindung surja, dalam hal ini adalah arester surja.

Arester *metal-oxide* (ZnO) tanpa sela telah banyak digunakan sejak tahun 1980an. Arester dengan blok varistor ZnO ini telah menggantikan fungsi arester bersela dengan blok resistor *silicon-carbide* (SiC) yang dinilai memiliki keandalan yang kurang baik [3], [4], [5]. Varistor ZnO memiliki karakteristik V-I yang baik, sehingga pada keadaan tegangan jaringan normal, arester berperan sebagai isolator, tetapi ketika terjadi surja pada terminal arester maka arester akan berubah menjadi penghantar dan mengalirkan muatan surja tersebut ke tanah.

Penelitian berkaitan dengan kinerja arester telah banyak dilakukan. Penelitian dengan nilai *front time* yang tidak sesuai standard banyak dilakukan secara simulasi dengan perangkat lunak yang tersedia [6]. Penelitian yang dilakukan terbatas pada penggunaan satu atau dua buah nilai *front time* yang berbeda [7],[8]. Oleh karena itu, penelitian terhadap arester yang dialiri gelombang dengan variasi nilai *front time* yang

¹Mahasiswa Pascasarjana Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi FT UGM, Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (e-mail: riky.dp@gmail.com)

²Dosen Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Jalan Grafika no.2 Yogyakarta, 55281, INDONESIA

menggunakan metode pengujian skala laboratorium diyakini masih belum dilakukan.

Dengan melakukan pengujian terhadap arester surja ZnO 18 kV, kita dapat melihat pengaruh perubahan *front time* terhadap besarnya tegangan residu yang dihasilkan oleh arester surja ZnO 18 kV. Hasil pengujian diharapkan juga dapat menunjukkan persentase waktu potong atau waktu menghasilkan tegangan residu terhadap nilai *front time* yang digunakan. Ini bertujuan untuk mengetahui kehandalan arester surja ZnO 18 kV dalam memberikan perlindungan terhadap bahaya petir. Perubahan nilai *front time* diperkirakan tidak akan berdampak besar terhadap kinerja arester surja ZnO 18 kV. Kehandalan arester diharapkan masih dalam batas normal dan memiliki persentase yang sama dalam menghasilkan waktu pemotongan tegangan residu.

II. IMPULS

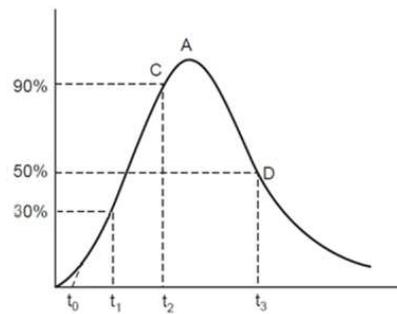
A. Gelombang Impuls

Gelombang yang dihasilkan oleh sambaran petir merupakan salah satu penyebab gelombang berjalan (*travelling wave*). Adanya surja petir pada kawat saluran udara akan menimbulkan energi yang mengalir pada kawat tersebut secara tiba-tiba. Energi yang merambat melalui kawat terdiri dari arus dan tegangan yang nilainya besar. Kecepatan rambatan gelombang ini bergantung pada konstanta kawat penghantar. Kawat saluran udara kecepatan merambat mampu mencapai 360.000 m/detik.

Gelombang berjalan yang terjadi akibat surja petir berbentuk gelombang impuls. Tegangan impuls seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 1 merupakan tegangan satu arah yang tanpa adanya osilasi yang cukup berarti, naik menuju nilai maksimum dengan cepat, dan turun menuju nilai nol lebih cepat atau dapat juga lebih lambat [9]. Nilai maksimum berada di puncak tegangan impuls tersebut. Jika tegangan impuls mengalami osilasi, nilai toleransi yang diperbolehkan adalah 5% dari nilai puncak tegangan impuls.

Referensi [9] menyebutkan bahwa jika tegangan impuls yang muncul tidak menimbulkan *flash over*, maka disebut tegangan impuls penuh, namun jika *flash over* terjadi dan menyebabkan hilangnya tegangan impuls secara tiba-tiba, maka disebut tegangan impuls terpotong (*chopped impulse voltage*). Pada impuls tegangan penuh terdapat dua interval waktu, yaitu muka gelombang (*wave front*) dan ekor gelombang (*wave tail*).

Sesuai Gbr. 1, waktu muka (*front time*) gelombang impuls didapatkan saat gelombang mencapai nilai puncak atau nilai maksimum dari nilai awal nol (posisi A). Untuk mendapatkan nilai awal dan nilai puncak biasanya sulit, namun demikian *front time* dapat didapatkan dari 1,67 kali ($t_2 - t_1$), dengan t_2 adalah waktu gelombang mencapai 90% (posisi C) nilai puncak dan t_1 adalah saat mencapai 30% nilai puncak. Dengan jarak 30% sampai 90% adalah 60%, maka untuk mencapai nilai penuh, digunakan faktor pengali sebesar 1,67.



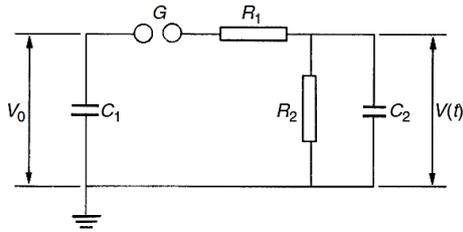
Gbr. 1 Gelombang impuls petir

Nilai waktu ekor gelombang (posisi D) untuk gelombang impuls adalah sebesar ($t_3 - t_0$) yang diekspresikan pada Gbr. 1. Nilai tersebut didapatkan pada saat gelombang turun dan mencapai nilai 50% nilai puncak gelombang. Sesuai standard IEEE [10], nilai *front time* dan *tail time* tegangan impuls adalah 1,2 dan 50 μ s. Pada tegangan impuls nilai tersebut diekspresikan menjadi 1,2/50 μ s sesuai kesepakatan yang berlaku. Pada penelitian ini akan digunakan nilai *front time* yang bervariasi dengan rentang waktu dari 0 s/d 30 μ s sebagai representasi nilai *front time* surja petir.

B. Rangkaian Pembangkit Tegangan Impuls

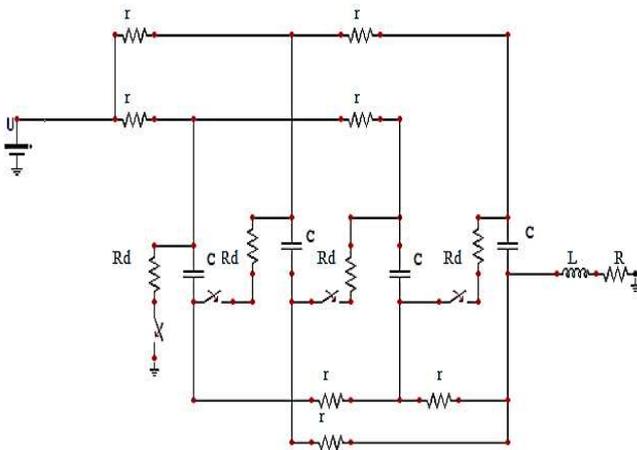
Pembangkit gelombang impuls (generator impuls) dapat dibuat dengan menggunakan rangkaian yang terdiri dari resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C). Dengan mengkombinasikan nilai ketiga komponen tersebut akan dihasilkan gelombang yang diinginkan. Untuk membangkitkan gelombang tegangan lebih yang jauh lebih besar dari tegangan masukan, diperlukan kapasitor sebagai penyimpan muatan. Dengan memberikan *trigger* pada rangkaian, maka muatan pada kapasitor akan membentuk tegangan lebih berbentuk impuls.

Awal pembangkitan gelombang impuls adalah dengan menggunakan rangkaian *single-stage* yang terdiri dari dua kapasitor, dua resistor, dan sebuah sela percik yang masing-masing memiliki fungsi khusus dalam pembentukan gelombang impuls. Sesuai Gbr. 2 kapasitor C_1 terisi dari sumber DC secara perlahan sampai dinilai cukup atau penuh dan akhirnya sela G terhubung. Sela G berfungsi sebagai pembatas tegangan dan saklar dengan waktu pengapian yang sangat singkat. Pengapian pada G didasarkan pada kemampuan udara untuk dapat menahan arus yang mengalir di antara sela G yang biasanya berbentuk bola. Ketika kegagalan isolator udara terjadi, arus akan mengalir dan menghubungkan sela SG . R_1 , R_2 , dan C_2 berfungsi membentuk gelombang. R_1 berfungsi meredam dan mengendalikan *front time*. R_2 berpengaruh pada peluruhan kapasitor membentuk *tail time*. Resistor ini mampu mengatur lamanya waktu pelepasan muatan kapasitor C_2 . Kapasitor C_2 mewakili beban penuh, yaitu obyek yang akan diteliti. pada jenis pembangkit tegangan *single stage* ini induktans dalam pendekatannya ditiadakan atau dijaga pada nilai serendah mungkin.



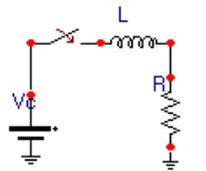
Gbr. 2 Rangkaian pembangkit tegangan impuls *single-stage*

Terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan saat melakukan pengujian tegangan tinggi dalam skala laboratorium. Untuk menghasilkan impuls tegangan tinggi tentunya diperlukan rangkaian ukurannya yang lebih besar. Selain itu kesulitan yang dihadapi pada sela percikan untuk penyaklaran tegangan tinggi, adanya upaya memperoleh tegangan DC yang tinggi untuk pengisian kapasitor C_1 , serta sulit untuk menekan korona yang terjadi pada periode pengisian kapasitor membuat penggunaan pembangkit impuls *single stage* kurang efisien. Dengan berdasar pada rangkaian *single stage*, dibuat rangkaian pembangkit impuls *multy stage*, salah satu implementasinya seperti pada Gbr. 3 yang mampu menjawab kelemahan yang ada pada rangkaian *single stage* di atas.



Gbr. 3 Rangkaian pembangkit tegangan impuls *multy-stage*

Dengan menyederhanakan rangkaian pada Gbr. 3 menjadi Gbr. 4, maka dapat diperoleh persamaan arus yang pada rangkaian Gbr. 4.



Gbr. 4 Rangkaian RL

Dari rangkaian Gbr. 4 didapatkan persamaan:

$$V = R \cdot i + L \frac{di}{dt} \tag{1}$$

Dengan Transformasi Laplace didapatkan persamaan:

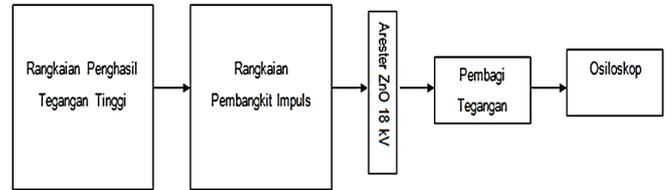
$$V(s) = R I(s) + L[-i(0^+) + s I(s)] \tag{2}$$

Persamaan arus hasil transformasi balik Laplace menghasilkan persamaan:

$$i(t) = \frac{V}{R} - \left(x + \frac{V}{R}\right) e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \tag{3}$$

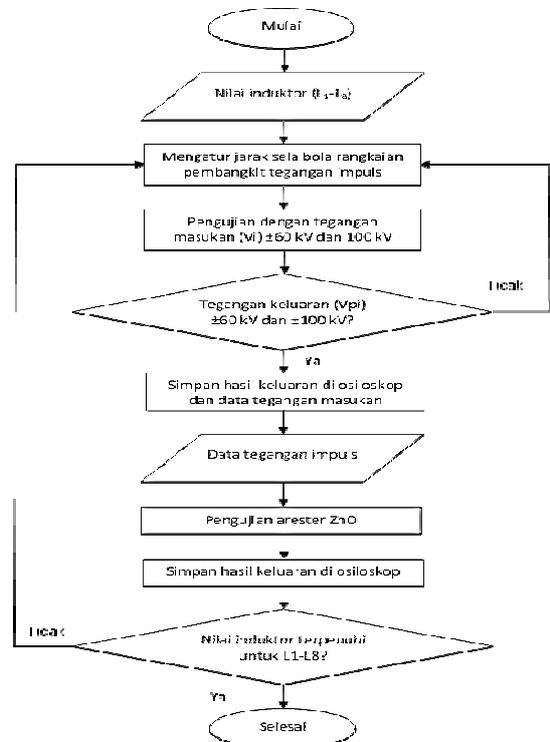
Dimana x merupakan arus (i_0^+) saat $t = 0$.

III. METODOLOGI



Gbr. 5 Blok pengujian arester ZnO 18kV

Untuk mengetahui kinerja arester ZnO dalam menanggulangi gangguan impuls petir dengan karakteristik nilai *front time* yang berbeda-beda, akan dilakukan pengujian dengan skala laboratorium. Pengujian sistem menggunakan rangkaian yang terdiri dari pembangkit tegangan impuls yang terhubung secara paralel dengan arester ZnO. Hasil pengukuran akan ditampilkan pada osiloskop yang terhubung dengan rangkaian pembagi tegangan. Rangkaian pembagi tegangan berfungsi untuk mengukur tegangan tinggi dengan membagi tegangan menjadi nilai yang lebih rendah sehingga tidak membahayakan alat untuk menampilkan gelombang hasil pengujian (osiloskop). Gbr. 5 merupakan representasi sistem pengujian yang akan dilakukan.



Gbr. 6 Diagram alir pengujian arester ZnO 18kV

Gbr. 6 merupakan diagram alir yang menjelaskan langkah-langkah pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini. Langkah-langkah pengujian yang dilakukan adalah:

- Pengujian dimulai dengan mempersiapkan induktor dengan nilai yang bervariasi (L_1 sampai L_8) untuk dapat menghasilkan keluaran rangkaian pembangkit tegangan impuls dengan *front time* yang bervariasi.
- Sebelum melakukan pengujian, jarak sela bola pada rangkaian pembangkit tegangan impuls diatur agar dapat menghasilkan nilai tegangan keluaran yang diinginkan. Dengan jarak sela bola yang optimal kita mampu melakukan proses *trigger* atau pelepasan muatan kapasitor pada nilai tegangan yang diinginkan.
- Pengujian diawali dengan memberikan tegangan masukan (V_i) pada rangkaian pembangkit tegangan impuls dengan cara memutar triac pada panel kendali dan mengamati nilai tegangan yang mengalir pada multimeter.
- Tegangan keluaran (V_{pi}) yang diinginkan pada pengujian sebesar ± 60 kV dan ± 100 kV. Apabila nilai puncak tegangan keluaran belum mencapai nilai tersebut, akan dilakukan pengujian ulang dengan mengubah nilai tegangan masukan hingga mendapatkan nilai tegangan keluaran yang diinginkan.
- Setelah mendapatkan nilai tegangan keluaran yang diinginkan, maka gelombang tegangan yang tampil pada osiloskop dan data tegangan masukan disimpan sebagai dasar pengujian selanjutnya.
- Hasil pengujian sebelumnya digunakan untuk pengujian arrester ZnO. Pengujian dilakukan pada sebuah arrester ZnO 18 kV.
- Gelombang tegangan residu (V_{pr}) ZnO yang tampil di osiloskop disimpan untuk dilakukan analisis.
- Pengujian akan diulangi sampai nilai induktor habis (L_1 sampai L_8).

Arrester berfungsi memberikan perlindungan terhadap peralatan listrik, khususnya transformator dengan membatasi tegangan yang mengalir melalui terminal peralatan. Tegangan residu (*residual voltage*) merupakan tegangan yang mengalir melalui arrester selama surja berlangsung. Pada penelitian ini, surja petir dihasilkan melalui rangkaian pembangkit gelombang impuls yang keluarannya dihubungkan melalui arrester ZnO 18 kV. Pengujian dilakukan terhadap sebuah arrester ZnO 18 kV dengan memberikan tegangan impuls 60 kV dan 100 kV. Karakteristik bentuk gelombang tegangan residu keluaran arrester yang dialiri surja dengan *front time* yang bervariasi akan dilihat pada osiloskop dan akan dianalisis lebih lanjut.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pembangkitan Tegangan Impuls

Tegangan impuls dibentuk oleh rangkaian pembangkit tegangan impuls. Tegangan impuls akan direkam oleh osiloskop untuk diperoleh data-data yang diperlukan untuk analisis seperti puncak tegangan impuls dan waktu tegangan puncak (*time to crest*). Berdasarkan persamaan (1) dan (3),

untuk mendapatkan nilai tegangan pada resistor (V_{pi}) dengan nilai yang sebanding diperlukan variasi nilai tegangan masukan (V_i). Tegangan keluaran berupa impuls (V_{pi}) yang dibangkitkan akan digunakan sebagai masukan arrester ZnO. Puncak tegangan V_{pi} rangkaian pembangkit tegangan impuls diharapkan dapat sebanding atau mendekati agar tegangan keluaran arrester dapat dibandingkan. Dengan demikian perlu dilakukan variasi nilai tegangan V_i untuk menghasilkan puncak tegangan V_{pi} yang sama.

Tabel I menunjukkan hasil pengujian perubahan nilai tegangan masukan (V_i). Hasil pengujian menunjukkan nilai tegangan keluaran (V_{pi}) yang sebanding pada seluruh nilai induktor yang digunakan. Tegangan V_{pi} diharapkan bernilai 60 kV dan 100 kV dengan toleransi kurang dari 5%. Pada Tabel I terlihat bahwa seluruh tegangan V_{pi} nilainya tidak melebihi batas toleransi yang diizinkan, sehingga data tersebut nantinya dapat digunakan untuk pengujian selanjutnya pada pengujian arrester.

TABEL I
PENGARUH PERUBAHAN NILAI TEGANGAN MASUKAN (V_i)

Tegangan Masukan V_i (V)	Induktor L (mH)	Tegangan Keluaran V_{pi} (V)	Waktu Puncak t_p (μ s)	Front Time t_f (μ s)
64000	0.66	60134	4	2.95
72000	2.882	61258	9	4.94
76000	5.76	60696	17	9.94
84000	8.795	61820	21	12.45
88000	11.89	61820	26	18.11
88000	14.95	60134	28	18.81
96000	17.95	60134	34	26.26
96000	20.98	60134	37	28.73
116000	0.66	103408	4	2.58
124000	2.882	102284	9	5.83
136000	5.76	101160	17	11.04
144000	8.795	103408	21	15.33
156000	11.89	103408	26	19.91
156000	14.95	103408	28	22.09
160000	17.95	101160	34	24.41
160000	20.98	103408	37	27.83

Berdasarkan Tabel I di atas dapat diketahui bahwa untuk menghasilkan tegangan V_{pi} yang sebanding dengan nilai induktor yang semakin besar perlu menaikkan tegangan V_i sampai 60% nilai tegangan V_{pi} . Meskipun nilai *front time* yang dihasilkan antara tegangan V_{pi} 60 kV dan 100 kV berbeda, nilai waktu puncak yang dihasilkan adalah sama. Perbedaan nilai *front time* didapat dari perbedaan nilai *sampling* data tegangan dan waktu pada hasil pengujian.

B. Tegangan Residu Arrester ZnO 18 kV

Dengan menggunakan data pada Tabel I, hasil pengujian terhadap arrester ZnO 18 kV dapat dilihat pada Tabel II. Besar nilai tegangan residu arrester ZnO yang dihasilkan pada masing-masing pengujian menunjukkan nilai yang hampir sama. Namun demikian, besar tegangan residu pada nilai *front time* 2.95 μ s paling besar di antara hasil pengujian yang lain. Nilai tegangan residu cenderung semakin menurun pada

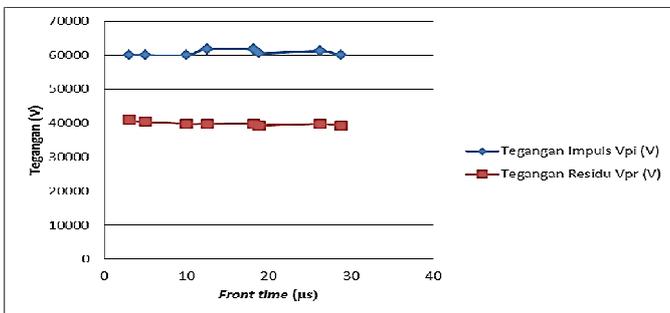
pengujian ke 2 dan 3. Nilai puncak tegangan residu arester ZnO pada pengujian 3 sampai 8 menunjukkan nilai yang hampir sama. Pada pengujian dengan tegangan Vpi 60 kV menunjukkan bahwa *front time* berpengaruh dalam pembentukan tegangan residu arester ZnO. Semakin besar nilai *front time* akan menyebabkan penurunan pada tegangan residu hingga nilai *front time* 9.94 μ s atau setara dengan waktu puncak 17 μ s. Pada *front time* di atas 9.94 μ s tegangan residu yang dihasilkan arester ZnO lebih stabil.

TABEL II
TEGANGAN RESIDU ARESTER ZNO (Vpi=60 kV)

Pengujian	Front time ft (μ s)	Tegangan Impuls Vpi (V)	Tegangan Residu Vpr (V)
1	2.95	60134	41026
2	4.94	60134	40464
3	9.94	60134	39902
4	12.45	61820	39902
5	18.11	61820	39902
6	18.81	60696	39340
7	26.26	61258	39902
8	28.73	60134	39340

Dari hasil pengujian tegangan residu Tabel II, rata-rata nilai tegangan residu yang dihasilkan oleh arester ZnO adalah 39972.25 V. Berdasarkan nilai tersebut dapat diartikan bahwa arester yang dialiri surja petir dengan *front time* yang bervariasi antara 2.95 sampai 28.73 μ s mampu untuk menghasilkan tegangan residu \pm 39972.25 V. Nilai tegangan ini bernilai lebih kecil dibanding BIL yang ditetapkan, yaitu 95 kV. Dengan demikian dapat disimpulkan perubahan *front time* pada surja dapat mempengaruhi nilai tegangan residu yang dihasilkan namun arester ZnO masih mampu melindungi transformator dari bahaya surja dengan amplitudo 60 kV.

Berdasarkan Tabel II, perbandingan tegangan impuls dan tegangan residu ditampilkan pada Gbr. 7. Dari gambar dapat diketahui bahwa hasil tegangan residu cukup stabil. Penurunan nilai tegangan residu pada nilai waktu puncak di bawah 17 μ s tidak terlalu signifikan. Hal tersebut disebabkan oleh kinerja varistor ZnO yang baik dalam memotong tegangan impuls. Nilai pemotongan varistor ZnO pada pengujian dengan tegangan 60 kV sebesar \pm 39972.25 V.



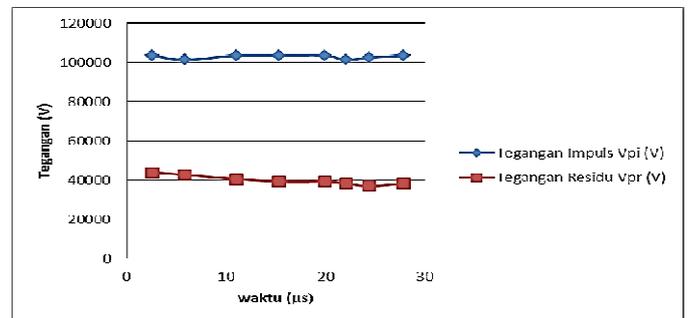
Gbr. 7 Perbandingan tegangan impuls dengan tegangan residu (Vpi=60 kV)

TABEL III
TEGANGAN RESIDU ARESTER ZNO (Vpi=100 kV)

Pengujian	Front time ft (μ s)	Tegangan Impuls Vpi (V)	Tegangan Residu Vpr (V)
1	2.58	103408	44960
2	5.83	101160	42712
3	11.04	103408	41588
4	15.33	103408	41588
5	19.91	103408	41588
6	22.09	101160	41588
7	24.41	102284	41588
8	27.83	103408	41588

Pengaruh perubahan *front time* pada tegangan Vpi 100 kV dapat dilihat pada Tabel III. Kenaikan *front time* mengakibatkan perubahan pada tegangan residu arester ZnO. Hasil pengujian tegangan residu yang didapatkan pada Tabel III hampir sama dengan hasil pengujian tegangan residu Tabel II. Pada pengujian dengan tegangan Vpi 100 kV arester ZnO menghasilkan rentang nilai puncak tegangan residu antara 41588 V- 44960 V dengan rata-rata 42150 V.

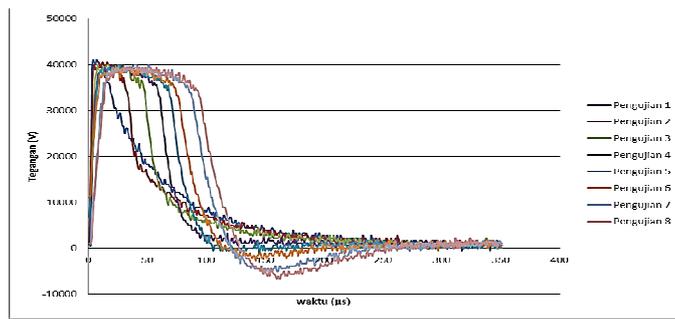
Berdasarkan Tabel III, perbandingan tegangan impuls dan tegangan residu ditampilkan pada Gbr. 8. Dari gambar dapat diketahui bahwa hasil tegangan residu cukup stabil. Penurunan nilai tegangan residu pada nilai waktu puncak di bawah 17 μ s tidak terlalu signifikan. Hal tersebut disebabkan oleh kinerja varistor ZnO yang baik dalam memotong tegangan impuls. Nilai pemotongan varistor ZnO pada pengujian dengan tegangan 100 kV sebesar \pm 42150 V.



Gbr. 8 Perbandingan tegangan impuls dengan tegangan residu (Vpi=100 kV)

Perubahan *front time* yang semakin besar cenderung mengakibatkan tegangan residu juga semakin menurun. Penurunan ini hanya sampai pada pengujian ke 3. Pengujian ke 3 sampai 8 menunjukkan nilai tegangan residu yang stabil pada nilai 41588 V. Dengan melihat kembali pada Tabel I bahwa pengujian dengan tegangan Vpi 60 kV dan 100 kV memiliki nilai waktu puncak (*time to crest*) yang sama. Untuk nilai waktu puncak 17 μ s ke atas akan menghasilkan nilai tegangan residu yang stabil. Dari kedua pengujian, dengan Vpi 60 kV dan 100 kV, perubahan *front time* hanya dapat mempengaruhi tegangan residu arester ZnO pada nilai waktu puncak di bawah 17 μ s.

C. Bentuk Gelombang Tegangan Residu



Gbr. 9 Bentuk gelombang tegangan residu arester ZnO

Bentuk gelombang tegangan residu pengujian 1 sampai 8 dapat dilihat pada Gbr. 9. Dari gambar tersebut tampak bahwa semakin besar *front time* mengakibatkan semakin panjang durasi puncak /"punggung" tegangan residu. Bagian tersebut merupakan bagian dari *discharge* tegangan impuls yang disebut juga sebagai tegangan residu. Dengan menetapkan rentang tegangan residu yang dihasilkan adalah dari 35000 V sampai tegangan residu maksimum, maka durasi tegangan residu sampai batas bawah (35000 V) dapat dilihat pada Tabel IV dan Tabel V.

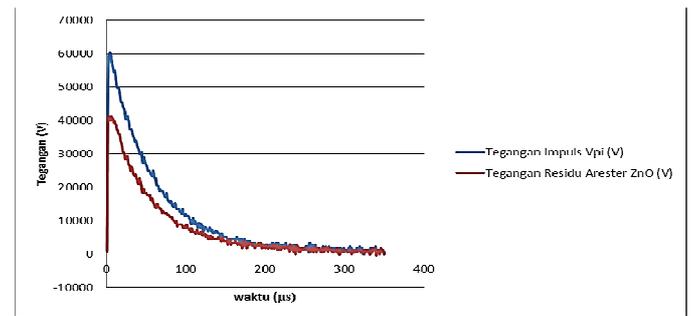
TABEL IV
DURASI TEGANGAN RESIDU ARESTER ZNO (VPI=60 kV)

Pengujian	Front time ft (µs)	Tegangan Residu Vpr (V)	Durasi (µs)
1	2.95	41026	15.00
2	4.94	40464	22.10
3	9.94	39902	40.00
4	12.45	39902	40.39
5	18.11	39902	57.20
6	18.81	39340	57.87
7	26.26	39902	67.06
8	28.73	39340	72.05

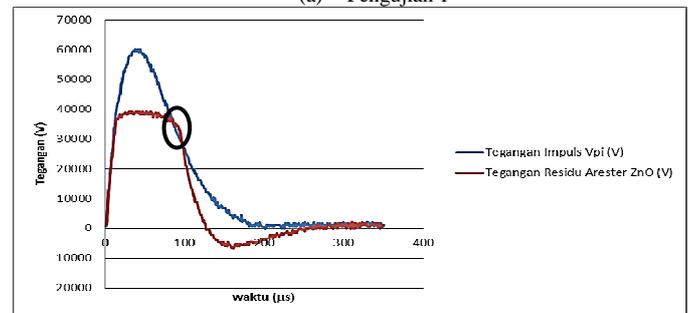
TABEL V
DURASI TEGANGAN RESIDU ARESTER ZNO (VPI=100 kV)

Pengujian	Front time ft (µs)	Tegangan Residu Vpr (V)	Durasi (µs)
1	2.58	44960	12.80
2	5.83	42712	29.70
3	11.04	41588	46.28
4	15.33	41588	58.22
5	19.91	41588	71.26
6	22.09	41588	76.27
7	24.41	41588	86.46
8	27.83	41588	88.61

Dari Tabel IV dan Tabel V dapat dilihat bahwa semakin besar nilai *front time* akan menghasilkan durasi yang semakin panjang. Dengan *front time* yang semakin besar berarti arester harus mengalirkan surja yang semakin banyak dalam waktu yang lebih lama. Dengan demikian arester ZnO akan memerlukan waktu yang lebih panjang dalam mengalirkan muatan surja. Semakin besar tegangan Vpi, dari 60 kV menjadi 100 kV, juga mengakibatkan durasi tegangan residu yang dihasilkan semakin panjang. Hal ini disebabkan tingginya muatan yang dihasilkan oleh tegangan Vpi yang mempengaruhi proses pelepasan muatan surja melalui arester ZnO.



(a) Pengujian 1



(b) Pengujian 8

Gbr. 10 Perbandingan durasi "punggung" tegangan residu pengujian 1 dan 8

Adanya "punggung" tegangan residu yang panjang ini disebabkan oleh adanya muatan yang besar dalam waktu yang cukup panjang yang tidak dapat secara langsung dilewatkan oleh varistor ZnO. Dengan kapasitas muatan terbatas, arester ZnO memerlukan waktu yang lebih panjang untuk melewati seluruh surja pada nilai *front time* yang besar. Dengan melihat Gbr. 10 (a) dan (b) yang secara berurutan menunjukkan perbedaan durasi "punggung" tegangan residu pada pengujian 1 dan 8, dapat disimpulkan bahwa dengan tingginya nilai *front time*, muatan lebih akibat surja juga akan menjadi semakin banyak, dan tidak sebanding dengan kapasitas varistor ZnO untuk melewati surja secara serentak, sehingga perlu waktu yang lebih panjang untuk melewati muatan surja tersebut. Hal ini mengakibatkan nilai "punggung" tegangan residu bertahan pada nilai yang tinggi dalam waktu yang cukup lama. Semakin besar *front time* dapat menghasilkan durasi "punggung" yang semakin panjang, dan pada nilai *front time* yang tinggi durasi "punggung" tegangan residu mampu melebihi waktu *discharge* tegangan impuls sehingga nampak tonjolan seperti pada Gbr. 10 (b).

V. KESIMPULAN

Kenaikan nilai *front time* cenderung menyebabkan penurunan tegangan residu arester ZnO 18 kV. Arester ZnO akan menghasilkan tegangan residu yang cenderung menurun pada tegangan impuls (V_{pi}) dengan karakteristik waktu puncak (*time to crest*) di bawah 17 μ s dan akan cenderung stabil pada nilai waktu puncak di atas 17 μ s. Semakin besar nilai *front time* akan menghasilkan durasi “punggung” gelombang tegangan residu yang semakin panjang.

REFERENSI

- [1] T. Haryono and K. T. Sirait, “Watak perlindungan blok ZnO yang digunakan pada arester 20 kV terhadap sambaran arus impuls berulang,” Universitas Gadjah Mada, 2011.
- [2] Y. Miyakawa, T. Sakoda, M. Otsubo, and M. Ikuta, “Influence of temperature variation on characteristics of ZnO elements,” in International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2008. (ISEIM 2008), 2008, pp. 119–122.
- [3] D. B. Miller, H. B. Fan, and P. R. Barnes, “The response of MOV and SiC arresters to steep-front longer duration current pulses,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 2, pp. 666–671, 1991.
- [4] K. Kannus and K. Lahti, “Evaluation of the operational condition and reliability of surge arresters used on medium voltage networks,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 745–750, 2005.
- [5] G. L. Goedde, L. A. Kojovic, and J. J. Woodworth, “Surge arrester characteristics that provide reliable overvoltage protection in distribution and low-voltage systems,” in IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2000, vol. 4, pp. 2375–2380 vol. 4.
- [6] A. Bayadi, “Parameter identification of ZnO surge arrester models based on genetic algorithms,” Electric Power Systems Research, vol. 78, no. 7, pp. 1204–1209, Jul. 2008.
- [7] D. W. Lenk, “Application Considerations for Gapped Silicon-Carbide Arresters Currently Installed on Utility High Voltage Installations,” in Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES, 2006, pp. 613–620.
- [8] C. A. Christodoulou, F. A. Assimakopoulou, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, “Simulation of metal oxide surge arresters behavior,” in IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008, 2008, pp. 1862–1866.
- [9] C. L. Wadhwa, High voltage engineering. Tunbridge Wells, UK: New Age Science, 2010.
- [10] “IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques,” IEEE Std 4-2013 (Revision of IEEE Std 4-1995), pp. 1–213, 2013.