

Desain dan Pembuatan Resistor *Shunt* Ohmik Rendah dan Aplikasinya sebagai Elemen Pengukuran Arus Tinggi *Impulse*, $8/20\mu\text{s}$

Jacob Jonas Rikumahu, Didik Rahadi Santoso, Rini Nur Hasanah dan Moch Dhofir

Abstrak— Dalam penelitian ini dikaji perancangan dan pembuatan resistor *shunt* ohmik rendah tipe koaksial sangkar bajing. Penelitian dititikberatkan pada pemilihan material dan pembuatannya dengan tujuan mengurangi efek kapasitansi dan induktansi dari resistor *shunt* pada frekuensi arus tinggi *impulse* $8/20\mu\text{s}$. Hasil pengujian atas respon frekuensi menunjukkan bahwa pada frekuensi rendah tegangan jepit resistor *shunt* adalah rendah, dan tegangan ini akan menjadi relatif stabil pada frekuensi tinggi (sekitar 8 MHz). Sementara itu, hasil uji respon transien dari resistor *shunt* menunjukkan kesesuaian antara hasil pengukuran dengan teori dan perhitungan. Pada uji dengan generator *impulse* arus tinggi didapatkan hasil karakteristik arus *impulse* yang cukup baik. Kurva arus $8/20\mu\text{s}$ dapat diukur dengan baik pada nilai $8,25/20,06\mu\text{s}$, dan puncak arus terukur sekitar 2,57kA, yang berdasarkan perhitungan nilainya adalah 3,08kA.

Kata Kunci— Desain, Pengukuran, Arus Tinggi *Impulse*

I. PENDAHULUAN

ARUS *transien* yang berubah cepat dengan amplitudo yang besar akan selalu muncul berkaitan dengan tegangan tinggi yakni melalui peluahan (*discharging*) dari piranti penyimpan energi. Jika arus terjadi pada periode yang sangat singkat dengan magnitudo yang sangat besar, serta memiliki bentuk tertentu maka disebut sebagai arus tinggi *impulse*. Arus tinggi *impulse* dapat terjadi dalam orde waktu mikro sekon (μs) dan dengan nilai puncak (*peak*) yang sangat tinggi. Arus semacam ini sering terjadi pada sambaran petir, dan juga proses alih hubung (*switching*) pada sistem tenaga listrik. Dan pada masa sekarang arus tinggi *impulse* dengan sengaja dibuat (dibangkitkan) untuk keperluan-keperluan tertentu, diantaranya adalah sebagai pembangkit plasma dan penggerak elektrodinamik sebagai sumber radiasi *impulse*. Dalam kondisi alami, arus tinggi *impulse* sering berkembang menjadi gaya mekanis yang besar dan suhu yang tinggi.

Jacob Jonas Rikumahu adalah Staf Pengajar Politeknik Negeri Ambon, Indonesia yang sedang tugas belajar di Program Magister Teknik Elektro Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (e-mail: jj.rikumahu@gmail.com)

Didik Rahadi Santoso adalah Staf Pengajar Jurusan Fisika Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (e-mail: dieks@ub.ac.id)

Rini Nur Hasanah adalah Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (e-mail: rini.hasanah@ub.ac.id)

Moch Dhofir adalah Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro

Penelitian tentang arus tinggi *impulse* umumnya dilakukan pada dua hal, yaitu pertama tentang rancang bangun generator surja (*surge generator*) tegangan atau arus tinggi *impulse*, dan yang kedua tentang sistem dan metode pengukuran arus atau tegangan tinggi *impulse* tersebut. Kedua hal ini sangat penting guna mengetahui karakteristik dari arus *impulse* untuk selanjutnya mengembangkan sistem teknologi dan proteksinya.

Pengukuran arus tinggi *impulse* yang berubah dengan sangat cepat dengan amplitudo yang sangat tinggi memerlukan teknik khusus, agar besarnya arus sebagai fungsi waktu dapat diamati dengan instrumen ukur standar misalnya osiloskop. Dua metode yang biasanya digunakan adalah metode resistor *shunt* resistansi rendah dan metode kumparan rogowski. Dari kedua metode ini, metode resistor *shunt* resistansi rendah lebih sering dipakai karena sistemnya yang sederhana dan lebih efektif. Kunci utama dalam pengukuran arus *impulse* dengan metode resistor *shunt* adalah desain dari resistor *shunt* yang digunakan sebagai rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*). Karena nilai resistor *shunt* R_s sangat rendah, maka besarnya tegangan pada ujung-ujung resistor *shunt* hanya beberapa volt sehingga dapat diukur dengan osiloskop.

Selanjutnya, karena arus *impulse* ini terjadi dalam durasi waktu yang sangat cepat, maka arus ini mempunyai frekuensi tinggi. Sementara itu, frekuensi tinggi dari arus *impulse* akan memunculkan komponen parasitik apabila tahanan *shunt* tidak didesain dengan benar. Bila induktansi dan kapasitansi parasitik hadir dalam tahanan *shunt*, maka hubungan antara arus *impulse* dan tegangan menjadi tidak linier. Untuk itu resistor *shunt* harus mempunyai komponen parasitik (L dan C) sekecil mungkin sehingga dapat diabaikan.

Dalam penelitian ini dikaji perancangan dan pembuatan resistor *shunt* ohmik rendah tipe desain koaksial sangkar bajing dengan titik-berat pada konstruksi dan pemilihan materialnya dengan tujuan mengurangi efek parasitik (kapasitansi dan induktansi) dari resistor *shunt* pada frekuensi arus tinggi *impulse* $8/20\mu\text{s}$.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Sambaran petir atau proses alih hubung (*switching*) pada sistem tenaga listrik merupakan salah satu penyebab tegangan lebih yang menghasilkan arus *impulse* dengan orde beberapa ampere sampai kilo-ampere dengan tingkat kecuraman yang tinggi [8].

Generator arus *impulse* dapat dibuat dengan cara membuat model dalam bentuk gelombang, yang dapat ditentukan oleh analisis regresi dan dievaluasi dengan menggunakan simulasi numerik. [10].

Penggunaan miniatur generator *impulse* hibrid dapat direkayasa untuk membangkitkan dua macam bentuk

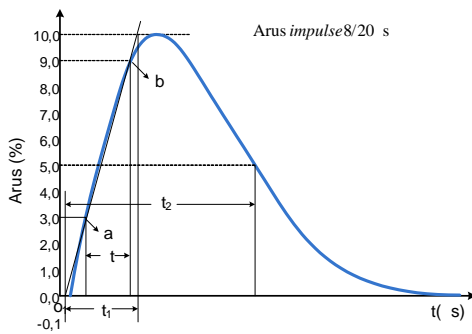
gelombang *transient* yaitu *impuls* arus dan tegangan. Bentuk gelombang tersebut bisa terjadi akibat gejala alamiah seperti sambaran petir atau proses alih hubung pada saluran daya. [1].

Bentuk arus impuls dapat diidentifikasi dengan melakukan pengujian dengan parameter uji, dan perbedaan yang terjadi tergantung pada arus *impulse* itu sendiri, seperti arus *impulse* petir, arus *impulse* ekponensial dan arus *impulse* persegi panjang. [4].

Pengujian beban resistif dan induktif serta pengamatan pengaruh cabang konduktif terhadap keluaran generator *impulse* dilakukan dalam penelitian yang lain [2]. PSpice digunakan untuk melakukan simulasi. Dari hasil pengujian tersebut diketahui bahwa impedansi *impulse* dari suatu beban resistif itu ditentukan oleh tahanan beban itu sendiri. Arus tersebut didistribusi secara merata ke semua bagian cabang konduktif dengan besar arus yang bergantung pada jarak cabang tersebut dari titik injeksi

A. Parameter Arus Tinggi Impulse

Gelombang arus *impulse* merupakan fenomena transien yang berubah secara cepat sehingga memiliki komponen frekuensi tinggi. Arus tinggi *impulse* mempunyai karakteristik tertentu, diantaranya dinyatakan dalam standar internasional IEC no.: 60060-1, 60099-4, 61643-1, dan 61312-1. Beberapa parameter penting yang harus dipenuhi, diantaranya adalah lamanya waktu muka gelombang (*front time*) dan waktu setengah puncak (*time to half value*) [5]. Salah satu dalam butir standar tersebut menyebutkan bahwa salah satu bentuk gelombang petir mempunyai parameter $8/20\mu s$, yang artinya nilai *front time* ($t_1 = 8 \mu s$) dan *time to half value* ($t_2 = 20 \mu s$).



Gambar 1. Karakteristik arus impulse

Keterangan :

- t_1 = Waktu untuk dahi.
- t_2 = Waktu untuk punggung.
- a = waktu dahi mencapai 10% dari puncak untuk arus dan untuk tegangan 30%
- b = waktu dahi mencapai 90% dari puncak
- 0_1 = Awal gelombang *impulse*
- t = waktu dahi antara a sampai b

Gelombang *impulse* tunggal sering digambarkan menggunakan fungsi eksponensial [3] menurut hubungan :

$$i(t) = A(e^{-t/t_f} - e^{-t/t_r}) \tag{1}$$

dimana t_r adalah konstanta waktu tanjak (*risetime*) dan t_f adalah konstanta waktu punggung (*falltime*). Bila $i(t)$ adalah signal dalam kawasan waktu, maka signal dalam kawasan frekuensi $I(\omega)$ dapat ditentukan menggunakan rumus integral Fourier sebagai berikut :

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t)e^{-j\omega t} dt \tag{2}$$

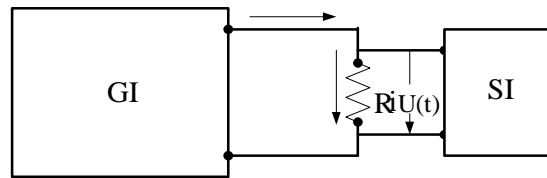
Besarnya signal arus dalam kawasan frekuensi yang dinyatakan oleh :

$$|I(\omega)| = A|t_f - t_r| \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 t_f^2} \cdot \sqrt{1 + \omega^2 t_r^2}} \tag{3}$$

Besarnya $|I(\omega)|$ mempunyai satuan ampere per Hz

B. Pengukuran Arus Tinggi Impulse Dengan Resistor Shunt

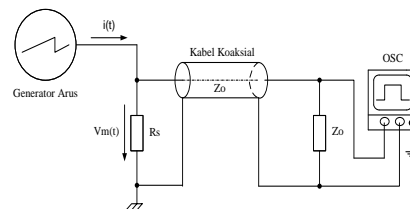
Suatu skema sistem instrumen pengukuran arus *impulse* pada generator surja arus *impulse* (GI) ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Sistem instrumen pengukuran arus impulse pada generator surja arus [11]

III. PERANCANGAN RESISTOR SHUNT

Untuk mengetahui respon langkah sebuah resistor *shunt* melalui eksperimen diperlukan masukan berupa gelombang langkah ideal dari suatu pembangkit. Generator ini memiliki induktansi rendah yang mampu membangkitkan arus langkah dengan magnetik sekitar 100A dengan waktu naik (*rise time*) sangat singkat [11]. Contoh rangkaian elementer sebuah generator yang dapat membangkitkan gelombang langkah ditunjukkan pada Gambar. 2. Rangkaian pengukuran arus tinggi dan berubah cepat menggunakan resistor *shunt* diperlihatkan pada Gambar. 3.

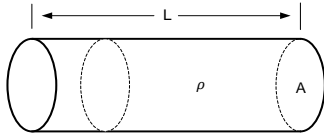


Gambar 3. Rangkaian pengukuran arus tinggi yang berubah cepat menggunakan resistor *shunt* [11]

Osiloskop pada sinar katoda umumnya ditempatkan di luar dekat resistor *shunt* ohmik rendah agar terhindar dari bahaya interferensi elektromagnetik.

C. TAHANAN DAN RESISTIVITAS

Dalam suatu kawat konduktor, elektron mengalami rintangan dari molekul-molekul dan ion-ion dalam konduktor tersebut sehingga arus listrik mengalami hambatan. Sebuah kawat dengan luas penampang A dan panjang L serta hambatan jenis (resistivitas) ρ , terlihat pada Gambar. 4.



Gambar 4. Kawat dengan luas penampang A dan panjang L

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4)$$

Dengan :

- R : Hambatan/tahanan (ohm)
 ρ : Hambatan jenis/Resistivitas (ohm meter)
 L : Panjang kawat (m)
 A : Luas penampang kawat (m²)

Resistivitas merupakan sifat dari medium, zat dengan sifat konduktivitas yang baik memiliki resistivitas yang sangat kecil, sedangkan zat yang bersifat isolator adalah sebaliknya. Tahanan juga merupakan fungsi dari temperatur dengan rumus sebagai berikut :

$$R = R_0 + \alpha \cdot R_0 \cdot (T - T_0) \quad (5)$$

Dengan :

- R : Tahanan pada temperatur T
 R_0 : Resistansi pada temperatur kamar
 α : Koefisien temperatur tahanan

Karakteristik beberapa bahan logam ditunjukkan pada Tabel I. Secara umum, nilai tahanan meningkat dengan adanya peningkatan pada temperatur. Jika terjadi kenaikan temperatur, elektron akan bergerak lebih aktif dan lebih banyak tumbukan yang terjadi sehingga arus listrik menjadi terhambat. Pada Tabel I diperlihatkan juga data resistivitas untuk beberapa bahan pada temperatur kamar (berkisar 20°C).

Total energi gelombang dapat dihitung dari persamaan sebagai berikut [11] :

$$E = \int_0^{\infty} R i^2(t) dt = \frac{q \cdot c \cdot l \cdot j^{\Delta t}}{23,9} (W_s) \quad (6)$$

Dimana q adalah luas penampang bagian aktif dalam mm², c rata-rata panas spesifik dalam J/°C gr, Δt kenaikan temperatur dalam °C, berat spesifik dalam gr/cm³, dan l panjang bagian aktif dalam cm. Kenaikan temperatur sebanding dengan energi yang dipakai, dimana

$$i(t) = 2 |A| e^{\alpha t} \sin \beta t \quad (7)$$

$$|A| = \frac{V}{2\beta L}$$

Kenaikan temperatur pada resistor *shunt* dihitung dengan persamaan :

$$\frac{E}{R} = \int_0^{\infty} i^2(t) dt \quad (8)$$

Dengan memasukkan persamaan (6) ke dalam persamaan (7) didapat :

$$\frac{E}{R} = \int_0^{\infty} 4 |A|^2 e^{2\alpha t} \sin^2 \beta t dt \quad (9)$$

Maka :

$$\frac{E}{R} = \int_0^{\infty} 2 |A|^2 e^{2\alpha t} (1 - \cos 2\beta t) dt \quad (10)$$

Perbandingan energi dengan nilai tahanan sering digunakan sebagai spesifikasi atau *rating thermal impulse* sebuah resistor *shunt*.

TABEL I.
RESISTIVITAS DAN KONSTANTA TEMPERATUR DAN NILAI TAHANAN
DARI BEBERAPA BAHAN, $T = 20^\circ\text{C}$

Bahan	Resistivitas ρ (Ωm)	Konstanta Temperatur α (1/K)
Aluminium	$2,8 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Besi	10×10^{-8}	$5,0 \times 10^{-3}$
Karbon	$3,5 \times 10^3$	$-0,5 \times 10^{-3}$
Perak	$1,6 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-3}$
Tembaga	$1,7 \times 10^{-7}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Timah	22×10^{-8}	$4,3 \times 10^{-3}$
Tungsten	$5,5 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-3}$

III. PERANCANGAN RESISTOR SHUNT

Pemilihan model sangkar bajing pada resistor *shunt*, sesuai dengan material tungsten yang digunakan mempunyai beberapa keuntungan yaitu ;

- Bentuk sangkar bajing yang merupakan bentuk paling ideal
- Susunan paralel elemen resistor *shunt* berupa tungsten yang memungkinkan pendistribusian arus menjadi lebih kecil pada masing-masing elemen
- Mudah dalam pembuatannya
- Konstruksinya sangat kuat

Bahan untuk proses pembuatan resistor *shunt* dengan menggunakan tungsten yang ada di pasaran, dengan nilai tahanan jenis sesuai hasil pengukuran dengan diameter 2,4mm maka ρ adalah $55 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$. Karakteristik material tungsten sangat baik dan tahan terhadap perubahan suhu terutama panas, karena titik didihnya mencapai 5900°C. Dengan demikian untuk pengukuran arus tinggi sangat baik, ini dikarenakan arus tinggi yang mengalir pada penghantar akan menimbulkan panas sehingga nilai resistansi pada material akan berubah pada saat terjadi pemanasan. Perubahan nilai resistansi pada material terhadap perubahan suhu akan mempengaruhi hasil pengukuran. Dengan menggunakan material *tungsten* yang sudah ditentukan, panjang elemen yang dibutuhkan untuk pembuatan resistor *shunt* relatif pendek, yaitu berkisar 80,5mm.

Dalam perencanaan perlu diperhatikan agar dimensinya tidak boleh terlalu besar yang akan

mempersulit penempatannya di dalam generator. Resistor *shunt* dalam mengalirkan arus pada setiap elemen dapat dihitung sebagai berikut :

- Maksimum nilai R_{sh} adalah $0,01\Omega$
- Energi pemanasan relatif kecil

Bila jumlah elemen pada sebuah resistor *shunt* yang akan mengukur arus $i(t)$, maka pada setiap elemen ini akan mengalir arus sebesar :

$$i_{\text{elemen}}(t) = \frac{i(t)}{n} = \frac{i(t)}{10} \quad (11)$$

dan energi pemanasan dari setiap elemen sebesar $5,4 \times 10^{-3}$ joule.

dimana :

i_{elemen} adalah arus yang mengalir pada tiap elemen

$i(t)$ adalah Arus yang mengalir pada resistor *shunt*

N adalah jumlah elemen

Dengan demikian dapat diketahui bahwa jika jumlah elemen makin banyak maka akan semakin baik karena pendistribusian arus dan panas akan semakin kecil pada tiap elemen, namun dimensinya semakin besar untuk itu perlu diperhatikan jumlah elemen dan dimensi dari R_{shunt} . Bila arus yang mengalir pada R_{shunt} $I_{maks} = 15000$ A, maka tegangan pada R_{shunt} ($I_m \cdot R_{sh}$) dan jatuh tegangan pada induktansi *shunt* L_{shunt} (V_L) adalah :

$$= R_{sh} \times I_m$$

$$V_R = 0,01 \times 15.000$$

$$= 150\text{Volt}$$

$$V_L(\%) = \frac{V_R}{I_m \cdot R_{sh}} = \frac{0,26 \cdot 10^{-3}}{150} \times 100\%$$

$$= 0,00173 \times 10^{-3} \times 100\%$$

$$= 0,000173\%$$

Hal tersebut dapat diartikan bahwa pengaruh induktansi L pada hasil rancangan tahanan shunt sangat kecil dan dapat diabaikan.

$$V_L = 0,14 \times 10^{-12} \times \frac{15}{8} \times 10^9$$

$$= 0,26\text{m} \times 10^{-3} \text{ Volt}$$

$$= 0,26\text{mV}$$

Rasio pengaruh tegangan L terhadap tegangan pada resistor *shunt* adalah :

$$V_r(\%) = \frac{V_L}{I_m \times R_{sh}}$$

$$V_r(\%) = \frac{0,002}{150}$$

$$= 1,77 \times 10^{-5} \%$$

Dalam prosentase, nilai rasio tegangan terhadap pengaruh induktansi sangat kecil yakni kurang dari 1%. Kecilnya nilai rasio ini menunjukkan bahwa untuk gelombang arus $8/20\mu\text{s}$ dengan nilai puncak 15000A pengaruh induktansi parasitik L menjadi tidak signifikan dan dapat diabaikan. Resistor *shunt* yang dihasilkan menjadi murni untuk pengukuran. Dengan pengaruh induktansi dan panas yang sangat kecil pada resistor *shunt*, maka dengan nilai resistor *shunt* dan konstruksi

sangkar bajing resistor *shunt* dapat dibuat dengan menggunakan nilai-nilai yang telah dihitung dan diukur. Untuk $R_{sh} = 0,01\Omega$ dengan menggunakan elemen $0,1\Omega$ maka dibutuhkan sebanyak 10 elemen, dan panas yang timbul sebesar $5,4 \times 10^{-3}$ joule. Dari hasil perhitungan dan pengukuran elemen maka dibuatlah resistor *shunt* dengan menggunakan material tungsten dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Diameter = 2,4mm
- Panjang = 80,5mm
- Jumlah elemen = 10 batang

Pada resistor *shunt* yang telah dibuat selanjutnya dilakukan pengujian dengan menggunakan generator *impulse*. Pengujian resistor shunt sangat penting dilakukan untuk melihat bentuk gelombang arus yang melalui resistor *shunt*.

Resistor *shunt* yang telah dibuat secara visual dapat dilihat pada Gambar 5. a dan b.



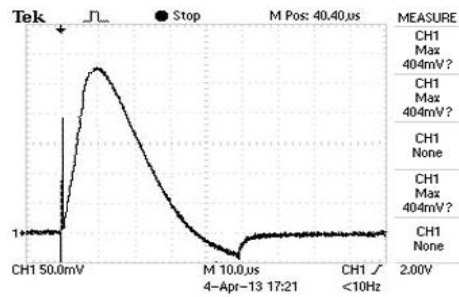
Gambar 5a. Resistor *shunt*



Gambar 5b. Konstruksi resistor *shunt* dalam kemasan

Pengujian dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang arus hubung singkatnya. *Plotting* gelombang arus *impulse* hasil pengukuran selanjutnya dianalisis untuk menentukan besarnya waktu tanggap.

Dengan R_{sh} 0,01m Ω maka faktor pengalinya adalah 100 dengan demikian maksimum arus *impulse* sama dengan 58,82 kali tegangan yang terukur dengan menggunakan R_{sh} . Hasil dari pada pengukurun dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil pengukuran gelombang arus tinggi *impulse*

Hasil pengukuran arus *impulse* yang dilakukan dengan generator *impulse* menggunakan resistor shunt sebesar 0,01m Ω ditunjukkan pada Tabel 2.

Dari Tabel 2 diperoleh bahwa hasil pengukuran arus impuls dengan menggunakan resistor *shunt* 0,01m Ω sangat baik, karena waktu dahi $t_1 = 8,2\mu s$ nilainya memenuhi karakteristik *impulse* dan waktu punggung $t_2 = 17,05\mu s$ dengan arus maksimum yang ditampilkan

TABEL II.
HASIL PENGUKURAN KARAKTERISTIK GELOMBANG ARUS IMPULSE
MENGUNAKAN RESISTOR SHUNT

Tegangan		Arus Maksimum	t_a	t_b	t_c	t_1	t_2
C45 μ F	Pengukuran						
1029	25,7V	2570A	0,2	6,4	16,8	8,2	17,05

pada osiloskop sebesar 25,7volt. Pembacaan hasil pengukuran ini menggunakan faktor pengali 100 sehingga nilai dari arus maksimum adalah : $25,7 \times 100 = 2570$ A.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan antara hasil pengukuran arus impuls menggunakan osiloskop dengan hasil perhitungan di tunjukkan pada Tabel 3.

TABEL III.
PERBANDINGAN ANTARA HASIL PENGUKURAN KARAKTERISTIK
GELOMBANG ARUS IMPULSE MENGGUNAKAN RESISTOR SHUNT

Tegangan		Arus Maks	t_a	t_b	t_c	t_1	t_2	Metode
C45 μ F	Osc							
1029	25,7	2570	0,2	6,4	16,8	8,2	17,05	Pengukuran
	3087	0,47	6,49	19,81	8,25	20,06	Perhitungan	

Arus maksimum pengukuran menggunakan osiloskop sebesar 2,57kA dan hasil perhitungan sebesar 3,08kA. Waktu dahi t_1 dari hasil perhitungan adalah $8,25\mu s$ dan waktu punggung t_2 adalah $20,06\mu s$ dan hasil pengukuran untuk t_1 adalah $8,2\mu s$ dan t_2 adalah $17,05\mu s$. Selisih dari

hasil pengukuran dan perhitungan, arus maksimum maupun waktu dahi dan waktu punggung, sebagian besar diakibatkan oleh pembangkit *impulse* karena komponen-komponen yang digunakan memerlukan ketepatan nilai dan dapat meghilangkan parasitik-parasitik yang ditimbulkan. Nilai komponen yang memiliki orde mili dan mikro sangat sensitif terhadap sambungan antara komponen maupun kontak komponen itu sendiri. Nilai komponen parasitik dari resistor *shunt* relatif tidak ada, dikarenakan bentuk sangkar baging yang simetris dimana garis-garis gaya yang ditimbulkan dari setiap elemen pada resistor *shunt* saling menghilangkan. Proses pengujian baru dapat diukur sampai 25% sehingga sesuai perhitungan $15kA \times 20,58\% = 3087A$. Nilai maksimum arus tidak terlalu mempengaruhi karakteristik dari pada nilai t_1 dan t_2 yang menjadi *instrument* utama bagi karakteristik arus *impulse* $8/20\mu s$, dengan toleransi yang diijinkan sebesar $\pm 20\%$ untuk waktu dahi t_1 dan waktu punggung t_2 . Resistor *shunt* dengan type sangkar baging, nilai induktansinya dapat diketahui menggunakan persamaan.

$$L_{shunt} = \frac{L_{elemen}}{\text{Jumlah elemen}(n)} \tag{12}$$

Dan dengan menggunakan persamaan dibawah ini maka induktansi tiap elemen dapat dihitung :

L_n = Induktansi elemen ke n, karena simetris.

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_6 = L_7 = L_8 = L_9 = L_{10}$$

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} I_n \frac{10^{+3} \cdot (10^{+3})^2 \cdot (10^{+3})^2 \cdot (10^{+3})^2 \cdot (10^{+3})^2 \cdot (10^{+3})}{r_1 \times d_{1,2} \times d_{1,3} \times d_{1,4} \times d_5 \times d_{1,6}}$$

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} I_n \frac{10^{+3} \cdot (10^{+3})^2 \cdot (10^{+3})^2 \cdot (10^{+3})^2 \cdot (10^{+3})^2 \cdot (10^{+3})}{1,2 \times 7,7^2 \times 15,4^2 \times 21,1^2 \times 23,8^2 \times 25}$$

$$r = 1,2mm = 1,2 \times 10^{-3} m$$

$$d_{1,2} = 7,7mm = 7,7 \times 10^{-3} m$$

$$I_n \frac{1}{rd_{1,2}} = I_n \frac{1}{1,2 \times 10^{-3} \times 7,7 \times 10^{-3}}$$

$$= I_n \frac{10^3 \times 10^3}{1,2 \times 7,7}$$

$$= I_n \frac{10^6}{1,2 \times 7,7}$$

$$= L I_n \frac{10}{1,2 \times 7,7}$$

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} I_n \frac{10^{30}}{1,2 (7,7)^2 (15,4)^2 (21,1)^2 (23,8)^2 (25)}$$

$$= 2 \times 10^{-7} 30 I_n \frac{10}{\omega}$$

$$= \omega I_n \frac{10^{30}}{1,089,145}$$

$$= 2 \times 10^{-7} I_n \frac{10^{-7}}{1,064 \times 10^{11}}$$

$$= 2 \times 10^{-7} I_n \frac{10^{19}}{1,064}$$

$$= 2 \times 10^{-7} \times 19 I_n \frac{10}{1,064}$$

$$= 85,14 \times 10^{-7}$$

$$= 8,514 \times 10^{-6} H$$

$$L_1 = 8,514\mu H$$

Karena induktansi *shunt* merupakan jumlah paralel dari 10 batang tungsten, maka nilainya adalah:

$$L_s = \frac{L_1}{10} = 0,85\mu\text{H}$$

Jadi resistor *shunt* merupakan resistor murni R_s dan induktansi L_s yaitu:

$$R_s = 0,01\Omega$$

$$L_s = 0,85\mu\text{H}$$

V. KESIMPULAN

Dari hasil pembuatan, pengujian, perhitungan dan analisis resistor shunt dalam penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- Sebuah resistor *shunt* yang ideal, mempunyai nilai $R_{sh} = 0.01\Omega$ dengan menggunakan elemen 0.1Ω maka dibutuhkan sebanyak 10 elemen, dan panas yang timbul sebesar $5,4 \times 10^{-3}$ joule. Dari hasil perhitungan dan pengukuran elemen, maka dibuatlah resistor *shunt* dengan menggunakan material tungsten dengan spesifikasi sebagai berikut : a). Diameter tungsten = 2,4mm, b). Panjang Tungsten = 80,5mm, c). Jumlah elemen tungsten = 10 batang.
- Hasil pengukuran selanjutnya dianalisis untuk menentukan besarnya waktu tanggap. Maka dapat dikatakan bahwa hasil pengukuran dengan menggunakan resistor *shunt* $0,01\text{m}\Omega$ sangat baik

dikarenakan waktu dahi $t_1 = 8,2\mu\text{s}$ nilainya memenuhi karakteristik *impulse* dan juga waktu punggung $t_2 = 17,05\mu\text{s}$ dan arus maksimum yang ditampilkan pada osiloskop sebesar 25,7Volt. Perbedaan pengukuran ini menggunkan faktor pengali 100 sehingga nilai dari arus maksimum adalah : $25,7 \times 100 = 2570\text{A}$.

REFERENCES

- [1] D.O. Bekak, "Generator Impuls Hibrid,"EECCIS, Fakultas Teknik Elektro Universitas Brawijaya. 2010.
- [2] Effendi Adi Hirlan, Pengukuran Distribusi Arus Impuls Untuk Kasus Injeksi Pada Struktur Model Bangunan, ITB. 2007.
- [3] J. J. Goedbloed, Electromagnetic Compatibility, Prentice Hall, New York. 1990.
- [4] Haefely dan Basel, Automatik Impulse Voltage Routine Testing of Distribution Transformers, Switzerland. 2004.
- [5] IEC Electromagnetic Compatibility (EMC) IEC, (Internasional Standard), 1000-4-1 First edition, 1992.
- [6] D. Kind, Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi, ITB, 1973.
- [7] E. Kuffel, W. S. Zaengl, High-Voltage Engineering, Pergamon Press, First edition. 1984.
- [8] Mukhtaher, Perancangan, Pembuatan Dan Pengujian Tahanan Shunt Untuk Pengukuran Arus Impuls, ITB. 1998.
- [9] M. Naidu, S. Karmaraju, High Voltage Engineering, McGraw-Hill. 1987.
- [10] S. Pack Dan S. Jaufer S, Evaluation Of An Impuls Current Test Generator Using Numerical Simulation, IPST. in Neuworlens, 2003.
- [11] A. J. Schwab. (1971), Low-Tahanan Shunt for Impuls Current, IEEE Transaction on Power