



Analisis Pengaruh Tekanan Gas SF₆ terhadap Laju Busur Listrik pada PMT di Gardu Induk Cilegon PT PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Barat

PANJI HARUNANDA¹, DINI FAUZIAH²

¹Panji Haryunanda (Institut Teknologi Nasional)

²Dini Fauziah (Institut Teknologi Nasional)

Email : panjiharyunanda90@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tekanan gas SF₆ terhadap busur listrik yang terjadi akibat arus gangguan ataupun arus normal pada waktu pemutusan tenaga listrik berlangsung. Busur listrik yang timbul saat terjadi pemutusan PMT bersifat dapat merusak peralatan itu sendiri. Oleh karena itu gas SF₆ yang digunakan sebagai media isolasi pada PMT yang bertujuan meredam terjadinya proses busur listrik. Analisis yang dilakukan untuk mengetahui besarnya arus gangguan yang dapat terjadi pada Gardu Induk Cilegon Banten dan perhitungan peredam busur listrik terhadap tekanan gas SF₆ pada PMT. Hasil dari analisis yang didapat besar arus gangguan pada sisi 20kV dengan gangguan 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ketsnahn dengan jarak 100% dari panjang penyulang adalah sebesar 6843,7 Ampere, 1975,6 Ampere, dan 688,8 Ampere. Berdasarkan hasil ini menunjukkan pada tekanan 6,1 bar yang tertera pada indikator tekanan gas SF₆ pada PMT mampu menghentikan busur listrik pada kecepatan 408 cm/s.

Kata kunci: busur listrik, gardu induk, gas SF₆, hubung singkat, PMT

ABSTRACT

The research of this thesis aims to analysis the effect of SF₆ pressure by the arcing fault current or disconnection of electricity. Arc at the time of termination can damage equipment. Therefore, SF₆ is used as an insulating medium in the CB aims to reduce the occurrence of the arc. The analysis conducted was to determine the magnitude of fault current that can occur in Banten Cilegon substation and the calculation of damping arc of SF₆ pressure in the CB. The results obtained from analysis of the magnitude of fault current at 20 kV with impaired hand 3 phase, 2 phase and a phase to ground with 100% of long-distance feeders amounted to 6843.7 Ampere, 1975.6 Ampere and 688.8 Ampere. Based on these results demonstrate the pressure of 6.1 bar indicated on the SF₆ pressure indicators on the CB is able to stop the arcing contact gap at 408 cm/s.

Keywords: electric arc, sub station, SF₆, short circuit, cb

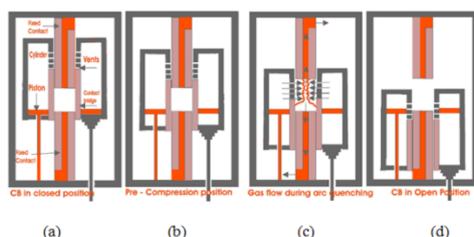
1. PENDAHULUAN

Dalam penyaluran tenaga listrik diperlukan suatu Gardu induk (GI) yang berfungsi sebagai pengatur tegangan yang disalurkan dari pembangkit ke pusat-pusat beban. Tetapi dalam penyaluran ini sering mengalami berbagai macam gangguan yang dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas penyaluran ke konsumen. Untuk menghindari akibat dari gangguan-gangguan di atas, maka diperlukan system pengaman yang baik. Salah satu pengaman yang digunakan adalah pemutus tenaga listrik (PMT). Pemutus Tenaga Listrik merupakan peralatan saklar yang mampu menutup, mengalirkan dan memutuskan arus beban dalam kondisi abnormal / gangguan seperti kondisi hubung singkat. Pemutus tenaga listrik dalam keadaan gangguan akan menimbulkan busur listrik yang relative sangat besar dan pada saat tersebut PMT bekerja sangat berat. Bila kondisi peralatan PMT menurun karena kurangnya pemeliharaan, sehingga tidak sesuai lagi kemampuan dengan daya yang diputuskan, maka PMT tersebut akan rusak bahkan bisa meledak **(Ramadhana, 2013)**.

Salah satu PMT yang digunakan adalah PMT dengan media isolasi gas SF₆ (Sulfur Hexafluoride). Dengan pengaruh tekanan gas SF₆ sebagai media isolasi pada PMT bertujuan untuk meredam busur listrik yang timbul. Sifat gas SF₆ adalah tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Pada suhu di atas 150° C, gas SF₆ mempunyai sifat tidak merusak metal, plastic dan bermacam bahan yang umumnya digunakan dalam pemutus tenaga tegangan tinggi. Laju busur listrik dapat mempengaruhi gas SF₆ yang terjadi akibat arus gangguan ataupun arus normal pada waktu pemutusan PMT berlangsung. Busur listrik yang timbul saat terjadi pemutusan PMT dapat merusak peralatan itu sendiri. Oleh karena itu gas SF₆ yang dipakai sebagai media isolasi pada PMT bertujuan untuk meredam terjadinya proses busur listrik tersebut **(Setiono, 2017)**.

1.1 Pemutus Tenaga

Pemutus tenaga adalah alat yang terpasang pada gardu induk yang berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan arus beban atau arus gangguan. Berfungsi sebagai pemutus dan penghubung arus listrik dengan cepat dalam keadaan normal maupun gangguan. Berikut pada gambar 1 penjelasan dari prinsip kerja PMT gas SF₆.



Gambar 1. Prinsip kerja PMT Gas SF₆

Sebelum terjadi gangguan atau dalam kondisi normal, PMT dalam keadaan tertutup, kontak tetap dan kontak bergerak masih terhubung (a). Saat terjadi gangguan, kontak bergerak ditarik oleh mekanik penggerak namun gas SF₆ belum dilepaskan (b). Ketika kontak bergerak dan kontak tetap benar-benar terpisah, akan muncul busur listrik akibat arus yang besar, kemudian gas SF₆ dilepaskan untuk memadamkan busur listrik tersebut (c). Beberapa saat kemudian busur listrik padam (d) **(Setiono, 2017)**.

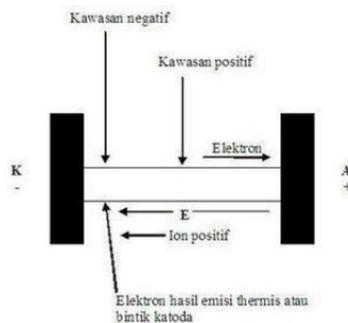
1.2 Gas SF₆

Gas SF₆ (Sulfur Heksafluorida) merupakan suatu unsur campuran gas yang di mana gas ini tidak berbau, tidak berwarna, dan tidak mudah terbakar sampai temperatur 5000C. Gas ini

jika dibandingkan dengan udara, gas SF₆ memiliki massa 5 kali lebih berat dengan sifat elektronegatif yang dimiliki pada gas ini, serta energi ikat yang tinggi, dan juga gas SF₆ memiliki kekuatan dielektrik 2 ½ sampai 3 kali dibanding udara, kekuatan dielektrik akan seiring bertambah dengan penambahan pada tekanan. Gas ini juga mempunyai susunan molekul yang sangat stabil bahkan mendekati sifat gas mulia yang tidak akan terurai dan tidak terjadi reaksi kimia dengan bahan lain.

1.3 Busur Listrik

Pada waktu pemutusan atau penghubungan suatu rangkaian sistem tenaga listrik maka pada PMT akan terjadi busur listrik, hal tersebut terjadi karena pada saat kontak PMT dipisahkan, beda potensial diantara kontak akan menimbulkan medan elektrik di antara kontak tersebut, seperti ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Proses Terjadinya Busur Listrik

Arus yang sebelumnya mengalir pada kontak akan memanaskan kontak dan menghasilkan emisi termis pada permukaan kontak. Sedangkan medan elektrik menimbulkan emisi medan tinggi pada kontak katoda (K). Kedua emisi ini menghasilkan elektron bebas yang sangat banyak dan bergerak menuju kontak anoda (A). Elektron - elektron ini membentur molekul netral media isolasi di kawasan positif, benturan-benturan ini akan menimbulkan proses ionisasi.

Dengan demikian, jumlah elektron bebas yang menuju anoda akan semakin bertambah dan muncul ion positif hasil ionisasi yang bergerak menuju katoda, perpindahan elektron bebas ke anoda menimbulkan arus dan memanaskan kontak anoda. Ion positif yang tiba di kontak katoda akan menimbulkan dua efek yang berbeda. Jika kontak terbuat dari bahan yang titik leburnya tinggi, misalnya tungsten atau karbon, maka ion positif akan menimbulkan pemanasan di katoda. Akibatnya, emisi termis semakin meningkat. Jika kontak terbuat dari bahan yang titik leburnya rendah, misal tembaga, ion positif akan menimbulkan emisi medan tinggi. Hasil emisi termis ini dan emisi medan tinggi akan melanggengkan proses ionisasi, sehingga perpindahan muatan antar kontak terus berlangsung dan inilah yang disebut busur listrik (**Setiono, 2017**).

2. METODE PENELITIAN

2.1 Data Teknis Trafo

MVA hubung singkat 461,5 MVA
 Trafo tenaga 60 MVA 150/20kV
 Impedansi trafo 13%
 Panjang penyulang 10km
 Penghantar AAAC 240 mm²

RN = 12 ohm

2.2 Uji Tahanan Isolasi PMT

Tahanan isolasi adalah ukuran kebocoran arus yang melalui isolasi. Tahanan berubah ubah karena pengaruh temperatur dan lamanya tegangan yang diterapkan. Mengetahui besarnya tahanan isolasi dari suatu peralatan listrik merupakan hal penting untuk menentukan apakah peralatan tersebut dapat dioperasikan dengan aman atau tidak. Isolasi tersebut merupakan antara bagian yang bertegangan dengan bertegangan maupun dengan bagian tidak bertegangan seperti body atau ground. Pada tabel 1 merupakan hasil dari pengujian dan hasil pengukuran dari tahanan isolasi PMT Off pada gardu induk Cilegon.

Tabel 1. Tahanan Isolasi

Tahanan Isolasi PMT Off							
Megger : 5000 V 0 - 453 GΩ							
Titik Ukur	Hasil Sebelumnya			Standart	Hasil Ukur		
	R	S	T		R	S	T
Atas - Bawah	45 GΩ	7,5 GΩ	3,6 GΩ	1KV/1MΩ	110 GΩ	9,2 GΩ	280 GΩ
Atas – Tanah	0,84 GΩ	0,94 GΩ	1,3 GΩ		32 GΩ	453 GΩ	56,8 GΩ
Bawah - Tanah	25 GΩ	61,8 GΩ	96 GΩ		6,7 GΩ	56,7 GΩ	34,1 GΩ
Fasa - Tanah	-	-	-		-	-	-

Langkah – langkah prosedur pengujian tahanan isolasi :

- Peralatan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) seperti safety helmet, safety boot, sarung tangan dan safety belt.
- Pemasangan pentanahan lokal (Local Grounding) disisi teriminal atas dan terminal bawah dengan tujuan membuang tegangan sisa (Residual) yang masih ada.
- Pembersihan permukaan porselin bushing memakai material cleaner + lap kain yang halus dan tidak merusak permukaan isolator dengan tujuan agar pengukuran memperoleh nilai yang akurat.
- Menyiapkan alat uji berupa High Voltage Insulation Tester (Megger) Kyoritsu 3125.
- Melakukan pengukuran tahanan isolasi PMT kondisi terbuka antara :
 - Terminal atas (R, S, T) terhadap body/ tanah.
 - Terminal bawah (R, S, T) terhadap body/ tanah.
 - Terminal fasa atas – bawah (R, S, T).
- Melakukan pengukuran tahanan isolasi PMT kondisi tertutup antara :
 - Terminal fasa R atas dan bawah terhadap tanah.
 - Terminal fasa S atas dan bawah terhadap tanah.
 - Terminal fasa T atas dan bawah terhadap tanah.
- Mencatat hasil pengukuran tahanan isolasi serta suhu / temperatur sekitar.
- Hasil pengukuran merupakan data terbaru hasil pengukuran dan sebagai bahan evaluasi pembanding dengan hasil pengukuran sebelumnya.
- Memasang kembali terminasi atas dan bawah seperti semula.
- Melepas pentanahan lokal.

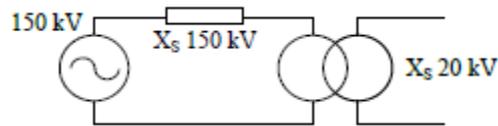
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Impedansi Sumber

Besarnya nilai impedansi sumber pada trafo dapat diketahui dengan menggunakan rumus :

$$X_S = \frac{kV^2}{MVA_{HS}} \quad X_S = \frac{150^2}{461,5} = 48,75 \text{ ohm} \quad (1)$$

Pada gambar 6 merupakan nilai impedansi sumber pada sisi 150 kV dan dikonversikan pada sisi 20 kV ke sisi sekunder :



Gambar 6. Rangkaian Konversi

Hasil perhitungan untuk impedansi sisi 150 kV, kemudian dikonversikan ke sisi 20 kV

$$\frac{kV_1^2}{Z_1} = \frac{kV_2^2}{Z_2} \quad Z_2 = \frac{kV_2^2 Z_1}{kV_1^2} = \frac{20^2 \times 48,75}{150^2} = 0,86 \Omega \quad (2)$$

3.2 Reaktansi Trafo Tenaga

Setelah dapat Impedansi Sumber berikut perhitungan reaktansi trafo tenaga menggunakan rumus :

$$Z_B = \frac{20kV^2}{60MVA} = 6,67 \Omega \quad (3)$$

Reaktansi trafo = 13%

$$\begin{aligned} XT &= 13\% \times 6,67 \Omega \\ &= 0,867 \Omega \end{aligned}$$

3.3 Reaktansi Trafo Tenaga

Impedansi penyulang berdasarkan data teknis dari Gardu Induk, impedansi yang dipakai adalah sebesar $0,1344 + j 0,3158$ dengan panjang penyulang sejauh 10km. Titik gangguan pada panjang penyulang.

- Untuk panjang 25% = $0,25 \times 10\text{km} \times (0,1344 + j 0,3158) = 0,336 + j 0,79 \Omega$
- Untuk panjang 50% = $0,5 \times 10\text{km} \times (0,1344 + j 0,3158) = 0,67 + j 1,58 \Omega$
- Untuk panjang 75% = $0,75 \times 10\text{km} \times (0,1344 + j 0,3158) = 1,008 + j 2,37 \Omega$
- Untuk panjang 100% = $1 \times 10\text{km} \times (0,1344 + j 0,3158) = 1,344 + j 3,158 \Omega$

Impedansi yang dihasilkan adalah impedansi urutan positif (Z_1) = impedansi urutan negative (Z_2).

3.4 Z1 Ekiwalen dan Z2 Ekiwalen

$Z_1 \text{ eki} = Z_2 \text{ eki} = Z_{1S} + Z_{1T} + Z_1 \text{ penyulang}$

$Z_1 \text{ eki} = Z_2 \text{ eki} = j 0,86 + j 0,867 + Z_1 \text{ penyulang}$

$Z_1 \text{ eki} = Z_2 \text{ eki} = j 1,727 + Z_1 \text{ penyulang}$

- Untuk panjang 25% = $j 1,727 + (0,336 + j 0,79) \text{ ohm} = (0,336 + j 2,517) \Omega$
- Untuk panjang 50% = $j 1,727 + (0,67 + j 1,58) \text{ ohm} = (0,67 + j 3,307) \Omega$
- Untuk panjang 75% = $j 1,727 + (1,008 + j 2,37) \text{ ohm} = (1,008 + j 4,097) \Omega$
- Untuk panjang 100% = $j 1,727 + (1,344 + j 3,158) \text{ ohm} = (1,344 + j 4,88) \Omega$

3.5 Impedansi Penyulang (Z0)

Impedansi urutan nol (Z_0) dapat diketahui berdasarkan data teknis pada Gardu Induk adalah $0,2824 + j 1,6033$.

- Untuk panjang 25% = $0,25 \times 10 \text{ km} \times (0,2824 + j 1,6033) = 0,706 + j 4 \Omega$
- Untuk panjang 50% = $0,5 \times 10 \text{ km} \times (0,2824 + j 1,6033) = 1,412 + j 8,02 \Omega$
- Untuk panjang 75% = $0,75 \times 10 \text{ km} \times (0,2824 + j 1,6033) = 2,12 + j 12,2 \Omega$
- Untuk panjang 100% = $1 \times 10 \text{ km} \times (0,2824 + j 1,6033) = 2,824 + j 16,03 \Omega$

3.6 (Z0) Ekiwalen

Hitungan berdasarkan pada system pentanahan pasokan dari gardu induk. Pada system pentanahan netral pada trafo sebesar 12 Ω .

Trafo di gardu induk mempunyai belitan delta yaitu :

$$\begin{aligned} Z_{0T} &= 3 \times Z_{1T} \\ &= 3 \times j 0,867 \\ &= j 2,601 \Omega \end{aligned}$$

$$3 R_N = 3 \times 12 = 36 \Omega$$

Maka, Z0 ekivalen

$$= Z_{0T} + 3 R_N + Z_0 \text{ penyulang}$$

$$= j 2,601 + 3 \times 12 + Z_0 \text{ penyulang}$$

a. Untuk panjang 25% = $j 2,601 + 36 + (0,706 + j 4) \Omega = 36,706 + j 6,601 \Omega$

b. Untuk panjang 50% = $j 2,601 + 36 + (1,412 + j 8,02) \Omega = 37,412 + j 10,621 \Omega$

c. Untuk panjang 75% = $j 2,601 + 36 + (2,12 + j 12,2) \Omega = 38,12 + j 14,801 \Omega$

d. Untuk panjang 100% = $j 2,601 + 36 + (2,824 + j 16,03) \Omega = 38,824 + j 18,631 \Omega$

3.7 Arus Gangguan 3 Fasa, 2 Fasa dan 1 Fasa ke Tanah

Untuk panjang 100% 3 Fasa

$$I = \frac{20000\sqrt{3}}{1,344+j 4,88} = \frac{20000\sqrt{3}}{\sqrt{1,344^2+j 4,88^2}} = 6843,7 \text{ A} \quad (4)$$

Untuk panjang 100% 2 Fasa

$$I = \frac{20000}{2 \times 1,344+j 4,88} = \frac{20000}{2,688+j 9,76} = \frac{20000}{\sqrt{2,688^2+j 9,76^2}} = 1975,6 \text{ A} \quad (5)$$

Untuk panjang 100% 1 Fasa ke Tanah

$$I = \frac{3 \times \frac{20000}{\sqrt{3}}}{2 \times (1,344+j 4,88) + (38,824+j 18,631)} = \frac{3 \times \frac{20000}{\sqrt{3}}}{41,512+j 28,391} = \frac{3 \times \frac{20000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{41,512^2+j 28,391^2}} = 688,8 \text{ A} \quad (6)$$

3.8 Kecepatan Busur Listrik pada Gas SF6

Pada tabel 2 merupakan perbandingan pengujian kecepatan busur api terhadap tekanan yang diperoleh dari gardu induk Cilegon.

Tabel 2. Perbandingan kecepatan busur Listrik terhadap tekanan

Gas	Jarak sela (cm)	Tekanan (kPa)	Pengujian Kecepatan Busur Listrik (cm/s.kA)
SF6	6,6	100	136
SF6	6,6	250	120
SF6	6,6	350	100
SF6	6,6	450	85
SF6	6,6	510	84

Berdasarkan data pada table 2 kecepatan busur listrik pada tekanan 510 kPa adalah 84 cm/s kA. Sedangkan penurunan kecepatan busur listrik adalah 0,2 cm/s kA, sehingga :

$$P = \text{PPMT} - \text{Puji} = 610 - 510 = 100 \text{ kPa}$$

Dengan faktor penurunan kecepatan busur listrik 0,2 cm/s kA, maka kecepatan berkurang sampai:

$$U/V = 100 \text{ kPa} \times 0,2 \text{ cm/s kA} = 20 \text{ cm/s kA}$$

Dari hasil penurunan tingkat kecepatan busur listrik pada tekanan 610 kPa pada PMT SF6 di gardu induk Cilegon adalah sebesar :

$$\text{UPMT} = 84 \text{ cm/s kA} - 20 \text{ cm/s kA} = 64 \text{ cm/s kA}$$

Untuk kecepatan busur listrik ketika arus gangguan terjadi :

a. Pada arus gangguan 3 fasa 100%

$$U_{arc} = UPMT \times IF = 64 \text{ cm/s kA} \times 6,843 \text{ kA} = 408 \text{ cm/s}$$

b. Pada arus gangguan 2 fasa 100%

$$U_{arc} = UPMT \times IF = 64 \text{ cm/s kA} \times 1,975 \text{ kA} = 126,4 \text{ cm/s}$$

c. Pada arus gangguan 1 fasa ketanah 100%

$$U_{arc} = UPMT \times IF = 64 \text{ cm/s kA} \times 0,688 \text{ kA} = 44 \text{ cm/s}$$

Tekanan gas SF₆ pada PMT memiliki pengaruh terhadap busur listrik, pada tekanan 610 kPa sebesar 408 cm/s, 126,4 cm/s dan 44 cm/s. dan dibandingkan dengan tekanan 510 kPa sebesar 499,5 cm/s, 144,1 cm/s dan 50,2 cm/s. Dengan demikian besar tekanan gas SF₆ mempengaruhi kecepatan busur listrik di mana semakin besar tekanan gas SF₆ maka semakin kecil kecepatan laju busur listrik yang terjadi pada pemutusan PMT.

Pada hasil perhitungan arus gangguan 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa ke tanah, arus gangguan yang memiliki nilai paling besar adalah arus gangguan 3 fasa yaitu 6,843 kA dan besarnya arus gangguan dapat mempengaruhi laju busur listrik yang dikeluarkan di mana semakin besar arus gangguan yang dikeluarkan maka laju busur listrik akan semakin cepat. Dengan demikian media isolasi gas SF₆ pada PMT akan berkerja

4. KESIMPULAN

Pada hasil besar arus gangguan yang terjadi pada Gardu Induk Cilegon pada sisi 20 kV pada PMT dengan gangguan 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa ke tanah dengan jarak panjang penyulang 10 km sebesar 6,843 kA, 1,975 kA dan 0,688 Ka. Tekanan gas SF₆ pada PMT memiliki pengaruh terhadap busur listrik, pada tekanan 610 kPa sebesar 408 cm/s, 126,4 cm/s dan 44 cm/s. dan dibandingkan dengan tekanan 510 kPa sebesar 499,5 cm/s, 144,1 cm/s dan 50,2 cm/s. Dengan demikian besar tekanan gas SF₆ mempengaruhi kecepatan busur listrik di mana semakin besar tekanan gas SF₆ maka semakin kecil kecepatan laju busur listrik yang terjadi pada pemutusan PMT. Pada hasil perhitungan arus gangguan 3 fasa, 2 fasa dan 1 fasa ke tanah, arus gangguan yang memiliki nilai paling besar adalah arus gangguan 3 fasa yaitu 6,843 kA dan busur listrik yang terjadi sebesar 408 cm/s. Besarnya arus gangguan dapat mempengaruhi laju busur listrik yang dikeluarkan di mana semakin besar arus gangguan yang dikeluarkan maka laju busur listrik akan semakin cepat. Dengan demikian media isolasi gas SF₆ pada PMT akan berkerja.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya ucapkan terimakasih kepada pihak PT.PLN Cilegon yang telah mengizinkan saya untuk melakukan penelitian.

DAFTAR RUJUKAN

Ramadhana, Taufik Ardian. (2013). Pemeliharaan Pemutus Tenaga Tipe Gas SF₆ Gardu Induk 150 KV Ungaran. Semarang. Laporan Kerja Praktek Teknik Elektro. Universitas Diponegoro.

Analisis Pengaruh Tekanan Gas SF₆ terhadap Laju Busur Listrik pada PMT di Gardu Induk Cilegon PT
PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Barat

Setiono, Iman. (2017). Gas SF₆ (Sulfur Hexa Fluorida) Sebagai Pemadam Busur Api Pada Pemutus Tenaga (PMT) Di Saluran Transmisi Tegangan Tinggi (hlm. 1-6). Semarang: Teknik Elektro Universitas Diponegoro.
