

# PERANCANGAN PROTEKSI DAN MONITORING GENERATOR SINKRON TIGA FASE BERBASIS ARDUINO MEGA 2560

## Design Of Protection And Monitoring A Three Phase Synchronous Generator Based On Arduino Mega 2560

Surya Hidayat<sup>1</sup>, I Made Ari Nrartha<sup>2</sup>, dan Ida Bagus Fery Citarsa<sup>3</sup>

E-mail : [suryahidayat59@gmail.com](mailto:suryahidayat59@gmail.com), [nrartha@te.ftunram.ac.id](mailto:nrartha@te.ftunram.ac.id), [ferycitarsa@unram.ac.id](mailto:ferycitarsa@unram.ac.id)

### Abstrak

Gangguan pada generator sinkron tiga fase seperti tegangan lebih, tegangan kurang, tegangan tak seimbang, arus tak seimbang, beban lebih, hubung singkat satu fase ke tanah, hubung singkat dua fase ke tanah, hubung singkat tiga fase, suhu lebih dan kecepatan lebih perlu diproteksi dengan cara melepaskan generator dari sistem melalui pemutus tenaga, melepas supply arus eksitasi dan mematikan mesin penggerak. Sistem pengaman dirancang menggunakan sensor arus ACS712-20A-T, sensor tegangan ZMPT101B, sensor suhu LM35 dan sensor kecepatan tachometer generator. Arduino mega 2560 digunakan sebagai ADC sensor, pengiriman data ke *personal computer* (PC) dan interface pengukuran yang ditampilkan pada Matlab 2013a. Hasil pengujian, diperoleh error hasil pengukuran sensor arus dengan multimeter Lucas-Null pada fase A, B, C, dan arus eksitasi berturut-turut adalah 1.71%, 1.28%, 1.71%, 1.71%. Error pengukuran Sensor tegangan dengan multimeter Lucas-Null pada fase A, B, C, berturut-turut adalah 1.314%, 1.291%, 1.057%. Error pengukuran sensor suhu LM35 dengan Minitemp Raytek sebesar 0.464%. Error pengukuran sensor kecepatan dengan tachometer sebesar 0.378%. Diperoleh pula waktu relay memutus generator dari sistem saat terjadi gangguan memiliki rata-rata waktu pemutusan 0.697 detik.

**Kata Kunci** : Generator, Proteksi, Arduino

### Abstract

*Disorders of three phase sync generators such as over voltage, under voltage, unbalanced voltage, unbalanced current, overload, single-phase to ground connection, short-circuit two-phase to ground, three phase short circuit, over heat and over speed need to be protected how to remove the generator from the circuit breaker system, remove the excitation current supply and turn off the driving machine. The security system is designed using ACS712-20A-T current sensor, ZMPT101B voltage sensor, LM35 temperature sensor and tachometer generator speed sensor. Arduino mega 2560A as ADC sensor, data transmission to personal computer (PC) and measurement interface loaded on Matlab 2013a. The result of the test, obtained error measurement of current sensor with Lucas-Null multimeter in phase A, B, C, and excitation current are 1.71%, 1.28%, 1.71%, 1.71%, respectively. Measurement error Sensors with Lucas-null multimeters in phases A, B, C, are 1.314%, 1.291%, 1.057%, respectively. Error measuring LM35 temperature sensor with Minitemp Raytek of 0.464%. Error measuring the speed sensor with tachometer of 0.378%. Also available relay time to disconnect the generator from the system when the interference has an average breaking time of 0.697 seconds.*

**Keywords**: Generator, Protection, Arduino.

### PENDAHULUAN

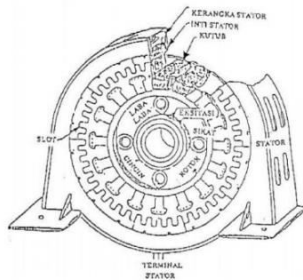
Generator sebagai sumber energi listrik dalam sistem perlu diamankan agar tidak mengalami kerusakan. Kerusakan generator akan mengganggu jalannya operasi sistem tenaga listrik. Generator merupakan peralatan yang penting dan nilainya juga cukup mahal, sehingga diusahakan untuk mencegah gangguan dengan secara cepat dan tepat.

Jenis gangguan pada generator antara lain hubung singkat, tegangan lebih (*over voltage*), tegangan kurang (*under voltage*), tegangan tidak seimbang, arus tidak seimbang, beban lebih, hilangnya medan eksitasi, panas lebih (*over heat*), kecepatan putaran lebih (*over speed*).

Gangguan-gangguan pada generator perlu diproteksi dengan cara melepaskan generator dari sistem melalui pemutus tenaga dan melepas sistem eksitasi. Untuk jenis gangguan tertentu selain cara di atas, mesin penggerak dihentikan beroperasi. Untuk mengetahui jenis gangguan, dilakukan analisis terhadap nilai kerja generator (tegangan, arus, suhu, kecepatan putaran) saat gangguan terjadi.

**Generator sinkron.** merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses

dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya.



Gambar 1. Konstruksi Generator Sinkron (Sunil, 1978)

**Gangguan pada generator.** antara lain dapat disebabkan oleh hubung singkat antar lilitan stator, beban lebih, panas lebih, tegangan, kecepatan lebih, kehilangan medan dan arus tidak seimbang.

### Persamaan Hubung Singkat Pada Generator

#### 1. Hubung singkat tiga fase

Gambar 2 adalah gambar hubung singkat tiga fase dimana fase A, B, dan C terhubung secara langsung.



Gambar 2. Hubung singkat tiga fase

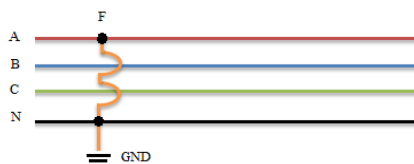
Kondisi awal pada titik gangguan:

$$V_A = V_B = V_C = 0 \quad (1)$$

$V_A, V_B, V_C$ , berturut-turut adalah tegangan fase A, fase B, dan fase C.

#### 2. Hubung singkat satu fase ke tanah

Gambar 3 adalah gambar hubung singkat satu fase ke tanah dimana fase A, N dan GND terhubung secara langsung.



Gambar 3. Hubung singkat satu fase ke tanah

Kondisi awal pada titik gangguan:

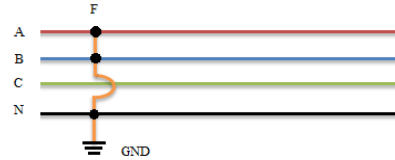
$$I_b = I_c = 0 \quad (2)$$

$$V_a = 0 \quad (3)$$

$I_b, I_c$  berturut-turut adalah arus pada fase A dan fase C.

### 3. Hubung singkat dua fase ke tanah

Gambar 4 adalah gambar hubung singkat dua fase ke tanah dimana fase A, B, N dan GND terhubung secara langsung.

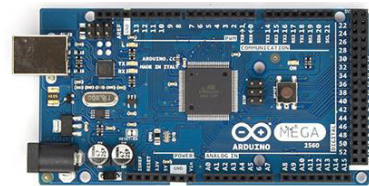


Gambar 4. Hubung singkat dua fase ke tanah  
Kondisi awal pada titik gangguan:

$$I_c = 0 \quad (4)$$

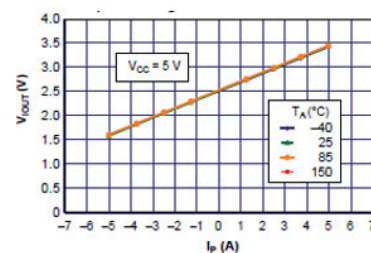
$$V_a = V_b = 0 \quad (5)$$

**Arduino Mega 2560.** Merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega 2560 (datasheet ATmega 2560). Arduino Mega 2560 memiliki 54 pin digital input/output, dimana 15 pin dapat digunakan sebagai output PWM, 16 pin sebagai input analog, dan 4 pin sebagai UART (port serial hardware), 16 MHz kristal osilator, koneksi USB, jack power, header ICSP, dan tombol reset.



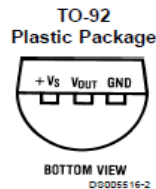
Gambar 5. Minimum Sistem Arduino (Datasheet Arduino)

**Sensor Arus ACS712.** Perangkat terdiri dari rangkaian sensor efek-hall yang linier, low-offset, dan presisi. Saat arus mengalir di jalur tembaga pada bagian pin 1-4, maka rangkaian sensor efek-hall akan mendeteksinya dan mengubahnya menjadi tegangan yang proporsional. Sensor ACS712 ini pada saat tidak ada arus yang terdeteksi, maka keluaran sensor adalah 2,5 V. Dan saat arus mengalir dari IP+ ke IP-, maka keluaran akan >2,5 V. Sedangkan ketika arus listrik mengalir terbalik dari IP- ke IP+, maka keluaran akan <2,5 V



Gambar 6. Perbandingan tegangan keluaran terhadap arus dari sensor arus ACS712 (ACS712 datasheet)

**Sensor suhu LM35** adalah sensor suhu LM35 Outputnya berupa tegangan analog dan memiliki jangkauan pengukuran  $-55^{\circ}\text{C}$  hingga  $+150^{\circ}\text{C}$  dengan akurasi  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Tegangan output adalah  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ .

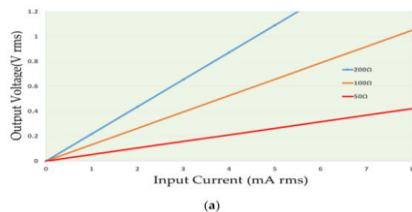


Gambar 7. Tampak atas sensor suhu

**Sensor Tegangan ZMPT101B.** Sensor ini memiliki bentuk Ultra Micro Voltage Transformator ukuran kecil, akurasi tinggi, konsistensi yang baik, untuk tegangan dan pengukuran daya. Sensor ini memiliki spesifikasi elektrik arus primer-skunder 2mA:2ma, Rasio balik 1000:1000, linearitas 0.1%, range frekuensi 50-60 Hz dengan tingkat akurasi 0.2.



Gambar 8 Sensor tegangan ZMPT101B (Datasheet ZMPT101B)



Gambar 9. Output karakteristik ZMPT101B (Datasheet ZMPT101B)

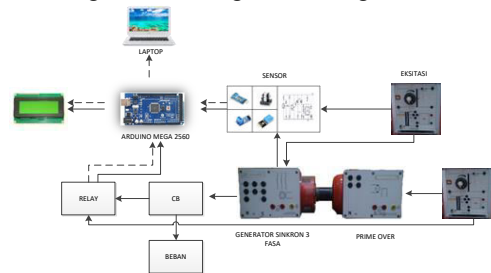
**Sensor Kecepatan Putaran.** Sensor kecepatan tacho generator yang digunakan memiliki keluaran berupa tegangan DC yang nilainya linear terhadap masukan kecepatan putaran yang diukur yaitu apabila kecepatan putaran dari tacho generator adalah 1000 rpm maka keluaran tegangannya adalah 1 Vdc.



Gambar 10. Tacho generator DC

## METODELOGI PENELITIAN.

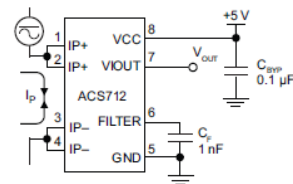
Penelitian ini melakukan analisis arus starting dan torsi dari motor induksi tiga fasa terhadap pemasangan kapasitor, untuk mendukung penelitian ini peneliti membuat sensor untuk membaca nilai starting dari motor secara *real time*, Arduino Mega digunakan sebagai interface yang memproses sensor dan ditampilkan pada matlab sebagai tampilan interface. Maka dalam perancangan perangkat keras pada tugas akhir ini akan dibangun sebuah sistem dengan blok diagram sebagai berikut:



Gambar 11. Blok diagram rancangan

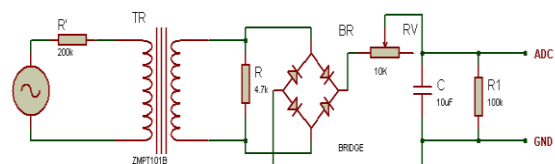
**Perancangan Perangkat Keras.** Perancangan dan pembuatan perangkat keras (*hardware*) meliputi : Sensor arus, tegangan, suhu dan kecepatan.

**Sensor Arus ACS712-20A-T.** Sensor arus yang digunakan pada penelitian ini adalah ACS712-20A-T. Sensor ini memiliki pembacaan dengan ketepatan yang tinggi, karena di dalamnya terdapat rangkaian low-offset linear hall dengan satu lintasan yang terbuat dari tembaga. batas arus masukan dari sensor ini minimum -20A dan maksimal 20A yang mewakili tegangan keluaran 0-5V (ACS712 *datasheet*).



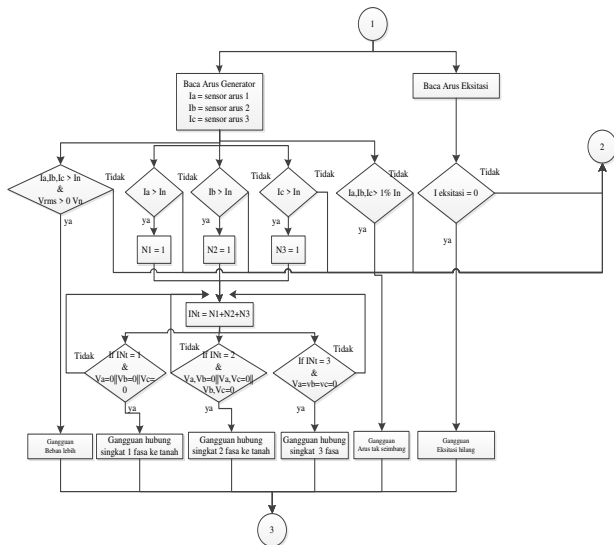
Gambar 12. Pin input dan output sensor arus ACS712 (ACS712 *datasheet*)

**Sensor Tegangan.** Sensor tegangan yang digunakan pada penelitian ini adalah *single phase voltage transformer* jenis ZMPT101B, dan penyearah gelombang penuh.

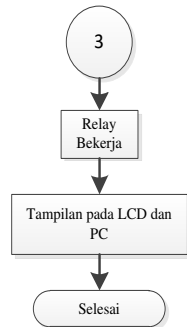


Gambar 13. Rangkaian Sensor Tegangan





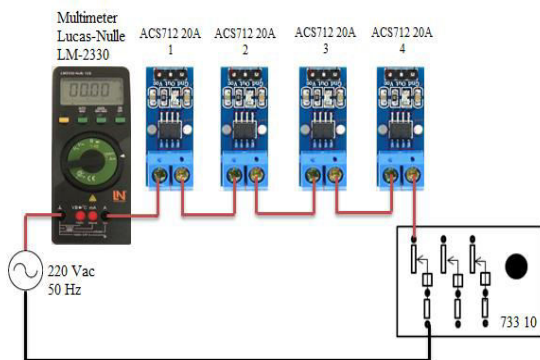
Gambar 17. Diagram alir program (Bagian II)



Gambar 18. Diagram alir program (Bagian III)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

**Pengujian Sensor Arus.** Pengujian rangkaian sensor arus, Ke empat sensor arus diuji secara seri dengan sumber tegangan 220 VAC, amperemeter Lucas- Nulle LM-2330, dan beban resistor variable DL tipe 733 10, Gambar 19.



Gambar 19. Rangkaian pengujian sensor arus

Setelah semua perangkat dirangkai, selanjutnya nilai resistor variable di ubah-ubah untuk mendapatkan nilai arus dan tegangan keluaran sensor arus seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai arus *input* dan tegangan *output* sensor arus

Arus Input (A <sub>AC</sub> )	Tegangan Output (V <sub>DC</sub> )			
	Sensor arus 1	Sensor arus 2	Sensor arus 3	Sensor arus 4
0	2.462	2.472	2.462	2.463
0.25	2.488	2.489	2.488	2.488
0.5	2.511	2.519	2.511	2.511
0.75	2.538	2.533	2.537	2.538
1	2.561	2.565	2.561	2.564
1.25	2.587	2.591	2.587	2.582
1.5	2.612	2.618	2.612	2.617
1.75	2.636	2.640	2.636	2.636
2	2.663	2.666	2.663	2.664

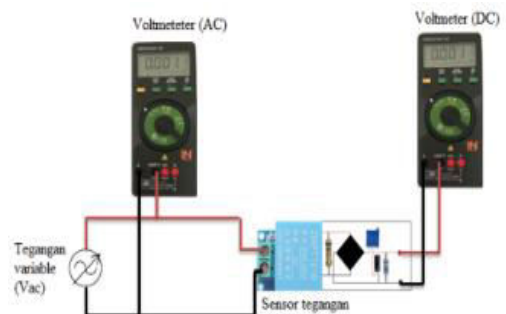
Dengan diperolehnya tegangan output sensor, maka dapat dibuat persamaan liner antara arus input dengan tegangan keluaran sensor yang kemudian dapat dimasukkan kedalam program IDE arduino. Berikut hasil pengukuran arus yang diperoleh dari tiap sensor.

Tabel 2. Hasil pengukuran sensor arus dengan amperemeter

Arus Input (A)	Pengukuran sensor arus (A)				Error (%)			
	arus 1	arus 2	arus 3	arus 4	arus 1	arus 2	arus 3	arus 4
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.25	0.25	0.26	0.25	0.25	0	3.85	0	0
0.50	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0
0.75	0.74	0.75	0.75	0.75	0	0	0	0
1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	3.85	0	3.85	3.85
1.25	1.24	1.24	1.24	1.24	3.85	3.85	3.85	3.85
1.50	1.49	1.50	1.49	1.49	3.85	0	3.85	3.85
1.75	1.74	1.75	1.74	1.74	3.85	3.85	3.85	3.85
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0	0	0	0
	Minimal				0	0	0	0
	Maksimal				3.85	3.85	3.85	3.85
	Rata-rata Error				1.71	1.28	1.71	1.71

Dari Tabel 2 dapat dilihat pengukuran sensor arus memiliki rata-rata error pengukuran yang relatif kecil, yaitu 1.71%, 1.28%, 1.71%, 1.71% sehingga sensor arus yang dipakai dapat digunakan untuk mengukur arus keluaran generator sinkron tiga fase.

**Pengujian Rangkaian Sensor Tegangan.** Untuk mengukur tegangan keluaran generator tiga fase, maka digunakan 3 buah potensial transformer ZMPT101B dengan tegangan primer 220 Vac dan tegangan sekunder 5 Vdc, berikut adalah gambar rangkaian yang digunakan.



Gambar 20. Pengujian sensor tegangan

Selanjutnya dilakukan pengukuran tegangan output sensor tegangan dengan cara memberi input nilai tegangan yang berbeda-beda (100-240) dengan output maksimal dari sensor tegangan sebesar 5V DC. Berikut tabel hasil pengukuran rata-rata output sensor tegangan.

Tabel 3. Nilai tegangan output sensor tegangan

Tegangan Input ( $V_{AC}$ )	Tegangan output sensor ( $V_{DC}$ )		
	Sensor tegangan 1	Sensor tegangan 2	Sensor tegangan 3
100	1.870	1.871	1.870
120	2.271	2.270	2.271
140	2.721	2.720	2.721
160	3.168	3.168	3.168
180	3.600	3.600	3.600
200	4.010	4.011	4.010
220	4.460	4.460	4.460
240	4.900	4.900	4.900

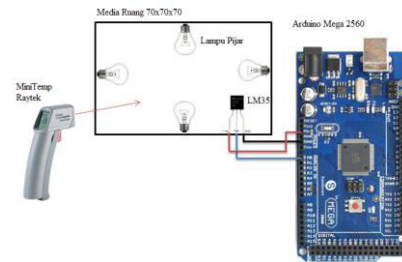
Dengan diperolehnya tegangan output sensor, maka dapat dibuat persamaan liner antara tegangan input dengan tegangan keluaran sensor yang kemudian dapat dimasukkan kedalam program IDE arduino. Berikut hasil pengukuran arus yang diperoleh dari tiap sensor.

Tabel 4. Hasil pengukuran sensor Tegangan dengan Voltmeter

Tegangan fase ke netral $V_{LN}$ (Volt)			Tegangan hasil pembacaan sensor (Volt)			Error pembacaan sensor tegangan (%)		
$V_a$ C-A-N	$V_b$ B-N	$V_c$ C-N	$V_a$ A-N	$V_b$ B-N	$V_c$ C-N	$V_a$ A-N	$V_b$ B-N	$V_c$ C-N
100	100	100	96.75	96.34	95.66	3.25	3.66	4.34
120	120	120	118.2	118.7	119.0	1.46	1.03	0.78
140	140	140	138.7	138.8	137.9	0.87	0.80	1.46
160	160	160	161.1	161.6	159.6	0.70	1.05	0.21
180	180	180	183.6	182.5	180.3	2.01	1.41	0.17
200	200	200	203.2	204.1	201.7	1.64	2.06	0.87
220	220	220	220.1	220.4	219.7	0.07	0.21	0.12
240	240	240	238.8	239.7	238.8	0.49	0.10	0.48
Minimal						1.31	1.29	1.05
Maksimal						3.25	3.66	4.34
Rata-rata						1.31	1.29	1.05

Dari Tabel 4 dapat dilihat pengukuran sensor tegangan memiliki rata-rata error pengukuran yang relatif kecil, yaitu 1.31%, 1.28%, 1.05% sehingga sensor arus yang dipakai dapat digunakan untuk mengukur tegangan keluaran generator sinkron tiga fase.

**Pengujian Sensor Suhu.** Untuk mengukur suhu dari generator sinkron tiga fase pada penelitian ini menggunakan sensor suhu LM35. Gambar 6 adalah rangkaian sensor LM35 yang akan digunakan dalam penelitian.



Gambar 21. Pengujian sensor suhu

Selanjutnya agar diperoleh nilai suhu yang berubah-ubah untuk pengujian, maka dilakukan dalam ruangan berukuran yang diberi pemanas berupa 4 buah lampu pijar. Ketika lampu pijar dinyalakan, nilai suhu akan meningkat dalam ruangan dan pada saat yang sama dilakukan pengukuran keluaran tegangan dari sensor suhu LM35 untuk tiap nilai suhu yang terukur oleh MINITEMP. Berikut tabel hasil pengukuran rata-rata output sensor suhu.

Tabel 5. Tabel nilai tegangan keluaran sensor suhu LM35

Suhu MINITEMP ( $^{\circ}C$ )	Rata-rata tegangan keluaran sensor ( $V_{dc}$ )
30	0.3
32	0.32
34	0.34
36	0.36
38	0.38
40	0.40
42	0.42
44	0.44
46	0.46
48	0.48
50	0.52

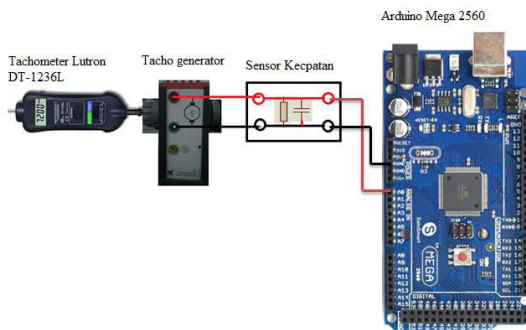
Dengan diperolehnya tegangan output sensor, maka dapat dibuat persamaan liner antara tegangan input dengan tegangan keluaran sensor yang kemudian dapat dimasukkan kedalam program IDE arduino. Berikut hasil pengukuran arus yang diperoleh dari tiap sensor.

Tabel 6. Hasil pengukuran sensor Suhu

Hasil Pengukuran Suhu ( $^{\circ}C$ )		
MINI TEMP	LM35	Error (%)
30	30.23	0.767
32	32.01	0.031
34	34.34	1.000
36	36.29	0.806
38	38.05	0.131
40	40.11	0.275
42	42.21	0.500
44	44.22	0.500
46	46.31	0.674
48	48.06	0.125
50	50.15	0.300
Minimal		0.031
Maksimal		1.000
Rata-rata Error		0.464

Dari Tabel 6 dapat dilihat pengukuran sensor suhu memiliki rata-rata error pengukuran yang relatif kecil, yaitu 0.464% sehingga sensor arus yang dipakai dapat digunakan untuk mengukur suhu generator sinkron tiga fase.

**Pengujian Rangkaian Sensor Kecepatan**  
Sensor kecepatan yang digunakan pada penelitian ini adalah tacho generator. Tacho generator dikopel langsung pada motor DC Shunt. Pada penelitian ini digunakan Motor DC Shunt sebagai objek pengujian karena lebih mudah dalam pengaturan kecepatan. Saat motor DC Shunt berputar, tachogenerator ikut berputar dan menghasilkan tegangan keluaran DC.



Gambar 22. Rangkaian pengujian sensor kecepatan

Untuk pengujian sensor kecepatan putaran menggunakan tacho generator, maka poros dari tacho generator di hubungkan dengan poros rotor dari motor DC Shunt dan rotor generator sinkron tiga fase agar diperoleh nilai putaran yang dapat diubah-ubah, dan diperoleh nilai tegangan keluaran tacho generator untuk tiap nilai kecepatan putaran generator sinkron tiga fase. Tabel 10 menunjukkan keluaran tacho generator untuk tiap nilai putaran generator sinkron tiga fase.

Tabel 7. Keluaran tacho generator untuk tiap kecepatan putar

Kecepatan Putar Generator (rpm)	Rata-rata tegangan Keluaran Tacho Generator (Volt)
466	0.410
620	0.562
805	0.737
1004	0.943
1205	1.148
1409	1.342
1602	1.536

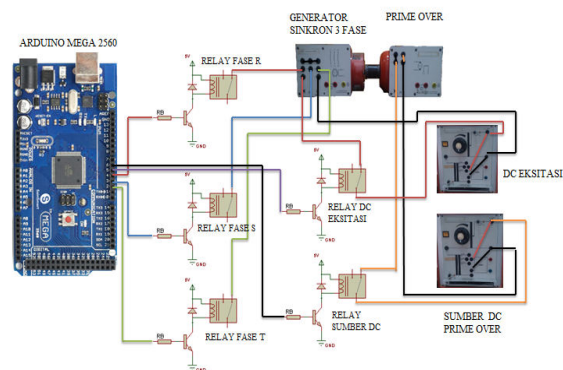
Dengan diperolehnya tegangan output sensor, maka dapat dibuat persamaan liner antara tegangan input dengan tegangan keluaran sensor yang kemudian dapat dimasukkan kedalam program IDE arduino. Berikut hasil pengukuran arus yang diperoleh dari tiap sensor.

Tabel 8. Perbandingan hasil pengukuran tachometer dan mikrokontroler

Nilai putaran generator		
Pengukuran tachometer (rpm)	Pengukuran mikrokontroler (rpm)	Error (%)
468	464	0.854
630	633	0.476
804	801	0.373
1002	999	0.299
1203	1199	0.332
1402	1402	0
1603	1598	0.312
Minimal		0
Maksimal		0.854
Rata-rata Error		0.378

Dari Tabel 8 dapat dilihat pengukuran sensor kecepatan memiliki rata-rata error pengukuran yang relatif kecil, yaitu 0.378% sehingga sensor arus yang dipakai dapat digunakan untuk mengukur kecepatan generator sinkron tiga fase.

**Rangkaian Relay sebagai pemutus.** Untuk mencegah terjadinya gangguan, maka dilakukan dengan cara memutus tegangan keluaran, eksitasi dan prime mover generator sinkron tiga fase, menggunakan relay seperti Gambar 23.

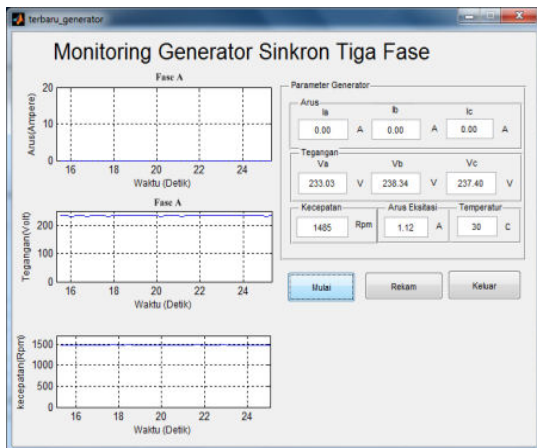


Gambar 23. Rangkaian pensaklaran sistem

Dengan menggunakan rangkaian seperti pada Gambar 23, maka generator sinkron tiga fase akan dapat dimatikan ketika terjadi gangguan.

**Proteksi dan monitoring gangguan pada Sistem.** Proteksi dan monitoring dimaksudkan untuk melihat kinerja dari setiap perangkat yang telah dirancang mulai dari perangkat keras berupa sensor untuk pengukuran, dan perangkat lunak berupa antarmuka yang dirancang pada PC, apakah telah mampu bekerja sesuai yang diinginkan. Berikut adalah hasil proteksi dan monitoring

**Proteksi dan monitoring gangguan tegangan lebih.** Tahap awal di seting nilai tegangan nominal generator, setelah itu tegangan keluaran generator dinaikkan secara bertahap hingga melebihi nilai seting tegangan nominal generator.



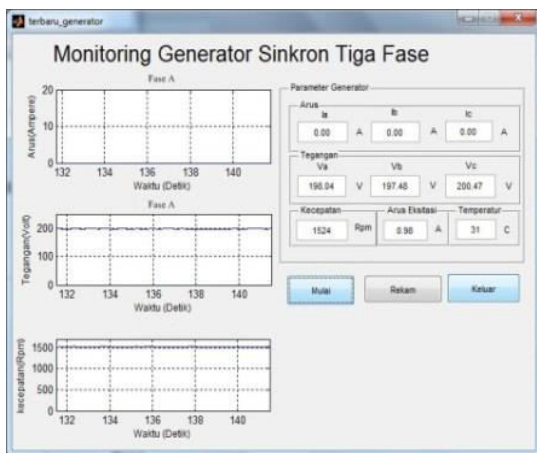
Gambar 24. Hasil monitoring gangguan tegangan lebih

Tabel 9. Hasil proteksi dan monitoring gangguan tegangan lebih

Tegangan keluaran generator (Volt)			Sett Trip (V)	Tegangan tampilan LCD (Volt)			Kondisi sistem	Waktu (s)
Va	Vb	Vc		Va	Vb	Vc		
230	231	231	232	229.66	231.92	231.97	Aman	-
230	230	231	232	229.56	230.38	230.78	Aman	-
229	230	229	232	229.14	230.43	230.88	Aman	-
228	230	230	232	227.95	230.21	230.89	Aman	-
229	231	230	232	229.86	231.05	230.97	Aman	-
231	232	232	232	232.06	232.04	232.27	Trip	0.443
231	232	232	232	231.99	232.12	232.21	Trip	0.444
232	232	232	232	232.45	232.56	232.89	Trip	0.441
234	235	235	232	233.79	235.05	235.11	Trip	0.444
233	235	235	232	233.92	235.21	235.64	Trip	0.443

Tabel 9 dapat dilihat ketika nilai tegangan melebihi nilai setting trip maka relay akan trip dengan waktu yang relatif cepat.

**Proteksi dan monitoring gangguan tegangan kurang.** Tahap awal di seting nilai tegangan nominal generator, setelah itu tegangan keluaran generator diturunkan secara bertahap hingga kurang dari nilai seting tegangan nominal generator.



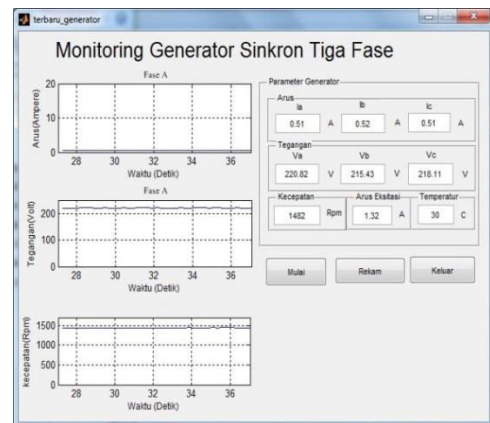
Gambar 25. Hasil monitoring gangguan tegangan kurang

Tabel 10. Hasil proteksi dan monitoring gangguan tegangan kurang

Tegangan keluaran generator (Volt)			Sett Trip (V)	Tegangan tampilan LCD (Volt)			Kondisi sistem	Waktu (s)
Va	Vb	Vc		Va	Vb	Vc		
196	197	197	198	195.78	197.96	197.87	Aman	-
196	196	197	198	195.82	196.89	197.81	Aman	-
195	196	196	198	195.01	195.66	196.43	Aman	-
194	196	195	198	193.23	195.95	195.11	Aman	-
195	197	197	198	194.87	197.02	197.65	Aman	-
198	198	198	198	198.22	198.04	198.90	Trip	0.441
198	198	198	198	198.89	198.24	198.19	Trip	0.440
198	198	198	198	198.98	198.43	198.28	Trip	0.443
199	199	200	198	198.45	199.21	200.10	Trip	0.442
198	200	200	198	198.77	200.31	200.42	Trip	0.443

Tabel 10 dapat dilihat ketika nilai tegangan melebihi nilai setting trip maka relay akan trip dengan waktu yang relatif cepat.

**Proteksi dan monitoring gangguan tegangan tak seimbang.** Proteksi gangguan ini dilakukan dengan memberi beban yang berbeda-beda dengan menggunakan resistor variable sehingga di dapatkan nilai tegangan yang tidak seimbang dan melebihi nilai setting *unbalance*.



Gambar 26. Hasil monitoring gangguan tegangan tidak seimbang

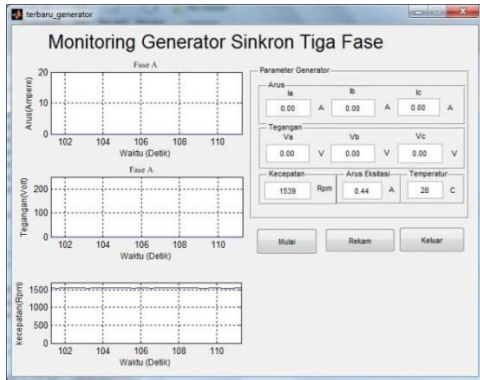
Tabel 11. Hasil proteksi dan monitoring gangguan tegangan tidak seimbang

Seting Unbalance (%)	V <sub>NA</sub> (V)	V <sub>NB</sub> (V)	V <sub>NC</sub> (V)	Unbalance (%)	Kondisi sistem	Waktu (s)
1	220.12	220.08	214.22	0.91	Aman	-
1	220.12	215.43	218.11	1.02	Trip	0.440
1	220.23	225.98	225.19	0.97	Aman	-
1	220.12	212.76	220.14	1.13	Trip	0.438
3	220.43	201.88	220.12	2.94	Aman	-
3	230.82	215.21	226.03	3.04	Trip	0.436
3	200.91	220.57	220.65	3.09	Trip	0.443
5	220.51	189.26	220.45	4.97	Aman	-
5	190.43	220.76	220.66	4.82	Aman	-
5	220.31	188.67	220.35	5.04	Trip	0.442



Tabel 11 dapat dilihat ketika nilai tegangan melebihi nilai setting trip maka relay akan trip dengan waktu yang relatif cepat.

**Proteksi dan monitoring gangguan kecepatan putaran lebih.** Proteksi gangguan ini dilakukan dengan mengubah-ubah kecepatan prime mover sampai dengan setting trip yang telah ditentukan.



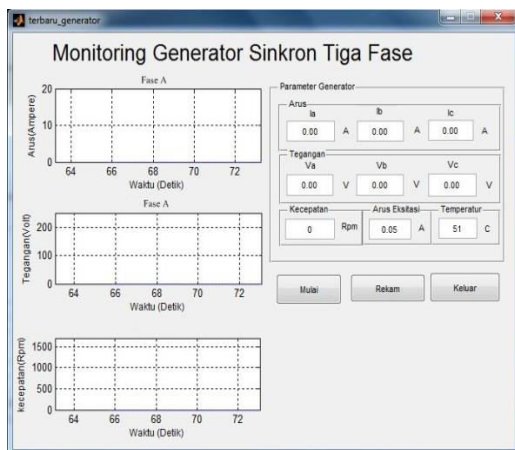
Gambar 27. Hasil monitoring gangguan kecepatan putaran lebih

Tabel 12. Hasil Proteksi dan monitoring gangguan kecepatan putaran lebih

Nilai setting kecepatan (rpm)	Nilai kecepatan Generator (rpm)	Kondisi sistem	Waktu (s)
1522.5	1500	Aman	-
1522.5	1523	Trip	0.452
1522.5	1520	Aman	-
1522.5	1525	Trip	0.449
1522.5	1521	Aman	-

Tabel 12 dapat dilihat ketika nilai tegangan melebihi nilai setting trip maka relay akan trip dengan waktu yang relatif cepat.

**Proteksi dan monitoring gangguan Panas lebih.** Proteksi panas lebih, dilakukan dengan mengatur setting suhu terlebih dahulu kemudian lampu dihidupkan sehingga didapatkan nilai suhu ruangan yang meningkat.



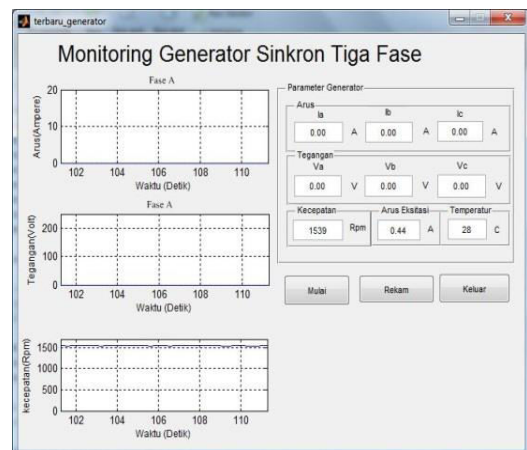
Gambar 28. Hasil monitoring gangguan kecepatan putaran lebih

Tabel 13. Hasil proteksi dan monitoring gangguan panas lebih

Nilai Setting Suhu (°C)	Nilai Suhu Pengujian (°C)	Respon Sistem	Waktu (s)
50	49.23	Aman	-
50	48.86	Aman	-
50	47.21	Aman	-
50	46.67	Aman	-
50	50.08	Trip	0.501
50	50.19	Trip	0.452
50	50.28	Trip	0.443
50	50.91	Trip	0.446

Tabel 13 dapat dilihat ketika nilai suhu melebihi nilai setting trip maka relay akan trip dengan waktu yang relatif cepat.

**Proteksi dan monitoring gangguan tegangan tak seimbang.** Proteksi gangguan ini dilakukan pembacaan arus dengan memberikan arus DC ke medan generator. Dalam pengujian, nilai seting arus nominal pada medan eksitasi generator diatur terlebih dahulu, setelah itu arus DC generator dinaikkan secara bertahap hingga melebihi nilai seting tegangan nominal generator.



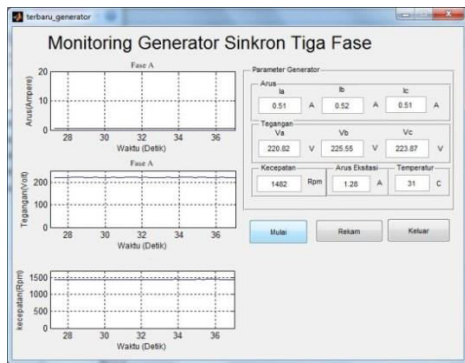
Gambar 29. Hasil monitoring gangguan hilangnya medan eksitasi

Tabel 14. Hasil proteksi dan monitoring gangguan hilangnya medan eksitasi

Arus Input eksitasi (Ampere)	Setting Trip (Ampere)	Kondisi sistem	Waktu (s)
0.99	1.5	Aman	-
1.44	1.5	Aman	-
1.22	1.5	Aman	-
0.99	1.5	Aman	-
1.04	1.5	Aman	-
1.51	1.5	Trip	0.502
1.66	1.5	Trip	0.467
1.74	1.5	Trip	0.456
1.82	1.5	Trip	0.471
1.91	1.5	Trip	0.442

Tabel 14 dapat dilihat ketika nilai arus eksitasi melebihi nilai setting trip maka relay akan trip dengan waktu yang relatif cepat.

**Proteksi dan monitoring gangguan arus tidak seimbang.** Proteksi gangguan ini dilakukan dengan memberi beban yang berbeda-beda dengan menggunakan resistor variable sehingga di dapatkan nilai arus yang tidak seimbang dan melebihi nilai setting *unbalance*.



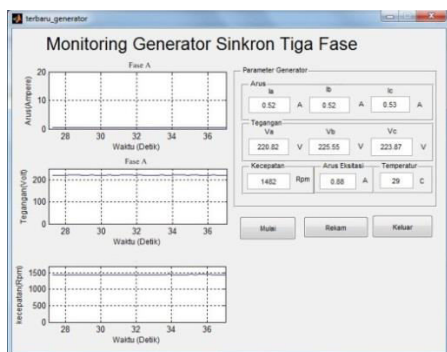
Gambar 30. Hasil monitoring gangguan arus tidak seimbang

Tabel 15. Hasil proteksi dan monitoring gangguan arus tidak seimbang

Seting Unbalance (%)	$I_{NA}$ (A)	$I_{NB}$ (A)	$I_{NC}$ (A)	Unbalance (%)	Kondisi sistem	Waktu (s)
1	0.5	0.51	0.51	0.66	Aman	-
1	0.51	0.52	0.51	1.30	Trip	0.443
1	1.5	1.48	1.5	0.89	Aman	-
1	1.5	1.5	1.45	1.12	Trip	0.440
3	0.83	0.83	0.76	2.89	Aman	-
3	0.76	0.84	0.84	3.28	Trip	0.442
3	0.85	0.92	0.91	2.99	Aman	-
5	0.91	0.78	0.91	5.00	Trip	0.444
5	1	0.94	0.9	4.93	Aman	-
5	1	1	0.92	5.48	Trip	0.444

Tabel 15 dapat dilihat ketika nilai *unbalance* arus melebihi nilai setting trip maka relay akan trip dengan waktu yang relatif cepat

**Proteksi dan monitoring gangguan beban lebih.** Proteksi ini dilakukan dengan cara mengatur beban variable berubah-ubah untuk mendapatkan nilai arus yang melebihi setting trip beban lebih.



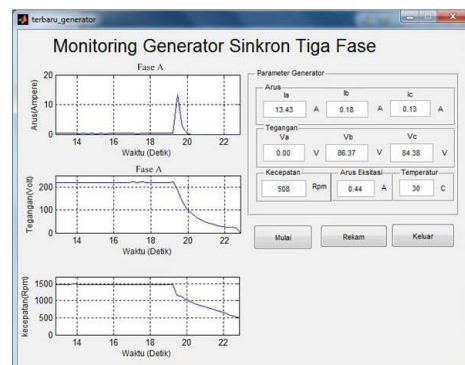
Gambar 31. Hasil monitoring gangguan beban lebih

Tabel 16. Hasil proteksi dan monitoring gangguan beban lebih

Arus keluaran generator (A)			Sett Trip (A)	Arus tampilan LCD (Volt)			Kondisi sistem	Waktu (s)
$I_A$	$I_B$	$I_C$		$I_A$	$I_B$	$I_C$		
2.90	2.91	2.90	3.00	2.94	2.96	2.97	Aman	-
2.90	2.90	2.90	3.00	2.92	2.93	2.90	Aman	-
2.82	2.80	2.80	3.00	2.89	2.85	2.89	Aman	-
2.80	2.80	2.80	3.00	2.82	2.84	2.85	Aman	-
2.70	2.70	2.71	3.00	2.73	2.78	2.77	Aman	-
3.00	3.00	3.02	3.00	3.05	3.03	3.02	Trip	0.883
3.08	3.09	3.08	3.00	3.11	3.11	3.11	Trip	0.880
3.15	3.15	3.15	3.00	3.19	3.20	3.18	Trip	0.883
3.36	3.34	3.34	3.00	3.38	3.36	3.39	Trip	0.882
3.50	3.50	3.50	3.00	3.58	3.54	3.57	Trip	0.883

Tabel 16 dapat dilihat ketika nilai arus beban lebih melebihi nilai setting trip maka relay akan trip dengan waktu yang relatif cepat.

**Proteksi dan monitoring gangguan hubung singkat satu fase ke tanah.** Proteksi gangguan ini dilakukan dengan cara tegangan di setting sampai 220 Vac, frekuensi 50 Hz, dan kecepatan 1500 rpm. kemudian menghubungkan singkat satu fase keluaran generator dengan fase netral generator yang telah ditanahkan.



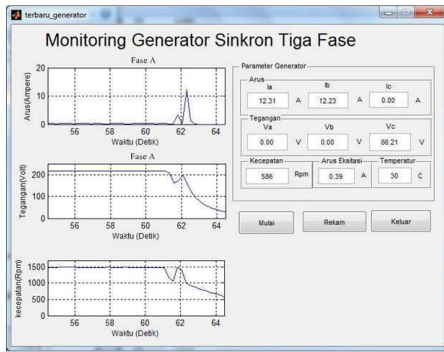
Gambar 32. Hasil monitoring gangguan hubung singkat satu fase ke tanah

Tabel 17. Hasil Proteksi dan monitoring gangguan hubung singkat satu fase ke tanah

Arus keluaran generator (A)			Tegangan tampilan LCD (Volt)			Sett Trip (A)	Kondisi sistem	Waktu (s)
$I_A$	$I_B$	$I_C$	$V_A$	$V_B$	$V_C$			
13.43	0.18	0.13	0.003	86.37	84.38	5.00	Trip	0.684

Tabel 17 dapat dilihat bahwa pada pengujian hubungan singkat satu fase ke tanah didapatkan arus gangguan yang besar dengan tegangan yang kecil, tetapi hanya terjadi pada satu fase yang di hubung singkat saja, untuk arus  $I_b = I_c = 0$  dan tegangan  $V_a=0$ , sesuai dengan karakteristik gangguan hubung singkat satu fase ke tanah.

**Proteksi dan monitoring gangguan hubung singkat dua fase ke tanah.** Proteksi gangguan ini dilakukan dengan cara tegangan di setting sampai 220 Vac, frekuensi 50 Hz, dan kecepatan 1500 rpm. Kemudian menghubungkan singkat dua fase keluaran generator dengan fase netral generator yang telah ditanahkan.



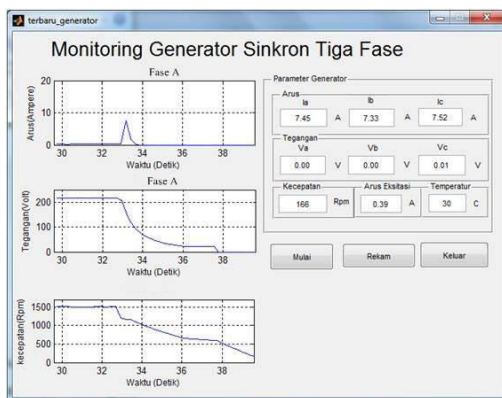
Gambar 33. Hasil monitoring gangguan hubung singkat dua fase ke tanah

Tabel 18. Hasil proteksi dan monitoring gangguan hubung singkat dua fase ke tanah

Arus keluaran generator (A)			Tegangan tampilan LCD (Volt)			Sett Trip (A)	Kondisi sistem	Waktu (s)
I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>C</sub>	V <sub>A</sub>	V <sub>B</sub>	V <sub>C</sub>			
12.31	12.23	0.00	0.00	0.00	86.21	5.00	Trip	0.663

Tabel 18 dapat dilihat bahwa pada pengujian hubungan singkat dua fase ke tanah didapatkan arus gangguan yang besar dengan tegangan yang kecil, tetapi hanya terjadi pada dua fase yang di hubung singkat saja, untuk arus  $I_c = 0$  dan tegangan  $V_a = V_b = 0$ , sesuai dengan karakteristik gangguan hubung singkat dua fase ke tanah.

**Proteksi dan monitoring gangguan hubung singkat tiga fase.** Pada pengujian gangguan ini dilakukan dengan cara tegangan di setting sampai 220 Vac, frekuensi 50 Hz, dan kecepatan 1500 rpm. Kemudian menghubungkan singkat ketiga fase keluaran generator.



Gambar 34. Hasil monitoring gangguan hubung singkat tiga fase

Tabel 19. Hasil proteksi dan monitoring gangguan hubung singkat tiga fase

Arus keluaran generator (A)			tegangan tampilan LCD (Volt)			Sett Trip (A)	Kondisi sistem	Waktu (s)
I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>C</sub>	V <sub>A</sub>	V <sub>B</sub>	V <sub>C</sub>			
7.45	7.33	7.52	0.00	0.00	0.01	5	Trip	0.648

Tabel 19 dapat dilihat bahwa pada pengujian hubungan singkat tiga fase didapatkan arus gangguan yang besar dan tegangan yang kecil pada ketiga fasenya. Dimana sesuai dengan karakteristik hubung singkat tiga fase yaitu  $V_a = V_b = V_c = 0$ .

**Kesimpulan.** penelitian yang telah dilakukan, dengan kesimpulan sebagai berikut:

Hasil pengujian sensor tiap fase mempunyai error pengukuran pada fase R sebesar 1.314%, fase S sebesar 1.291% dan fase T sebesar 1.057%, hasil pengujian sensor arus tiap fase dan eksitasi mempunyai error pengukuran untuk fase R sebesar 1.71%, fase S sebesar 1.28%, fase T sebesar 1.71% dan eksitasi sebesar 1.71%, hasil pengujian sensor suhu error pengukuran sebesar 0.464%, dan sensor kecepatan error pengukuran sebesar 0.378%.

Berhasil dirancang Interface menggunakan *software* MATLAB 2013a, untuk mengirim nilai-nilai kerja generator dari Arduino mega 2560 dan menampilkan hasil pengukuran, serta menyimpan hasil pengukuran variable generator seperti tegangan dan arus masing-masing fase, arus eksitasi, suhu dan kecepatan.

Pada pengujian gangguan sistem telah dapat bekerja memutus ketika terjadi gangguan dengan waktu pemutusan 0.697 detik.

**Saran.**

Perlu dirancang sebuah *Automatic Voltage Regulator (AVR)* eksitasi agar tegangan keluaran generator stabil.

Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui jenis sensor suhu yang bisa mengukur titik panas pada lilitan stator.

**DAFTAR PUSTAKA**

Allegro MicroSystems, 2006, *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor.*

Arduino, 2017, Arduino Board Mega, <https://www.arduino.cc/en/Main/products>, Diakses pada 12 Agustus, 2017

Ashari, S., 2014, Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Pengaman Motor Induksi Tiga Phasa Berbasis Mikrokontroler ATmega

8535, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Mataram.

Instruments, Texas, 2000, LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors, <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/517588/TI1/LM35.html>, Diakses tanggal 19 Agustus 2017

Interplus, 2017, ZMPT101B Voltage Transformer operating guide. Interplus Industry Co.Ltd.

Purnama, A., <https://elektronika-dasar.web.id/definisi-dan-konstruksi-tacho-generator/>. Diakses Agustus 2017.

Stevenson, Jr, W.D., "Analisis Sistem Tenaga Listrik", Edisi ke (4) empat, Erlangga, Jakarta, 1983.

Sunil S. R., 1978, Swith Gear and Protection, India: Khanna Publisher