



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PENGARUH PENYAMBUNGAN *GRID TIE*
INVERTER TERHADAP HARMONISA SISTEM SAAT
TERHUBUNG BEBAN PADA JARINGAN
TEGANGAN RENDAH**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana

**SAEFUL SULUN
0806455446**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Saeful Sulun

NPM : 0806455446

Tanda Tangan : 

Tanggal : 27 Juni 2012

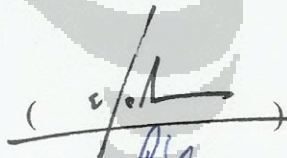




HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Saeful Sulun
NPM : 0806455446
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Penyambungan *Grid Tie Inverter* Terhadap Harmonisa Sistem Saat Terhubung Beban Pada Jaringan Tegangan Rendah

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana S1 pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ing. Eko Adhi Setiawan, S.T., M.T. ()
Penguji : Ir. I Made Ardita Y M.T. ()
Penguji : Ir. Agus R. Utomo M.T. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 27 Juni 2012

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah *robbil 'alamin*, puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penyusunan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, penyusunan skripsi ini tidak mungkin dapat berjalan dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

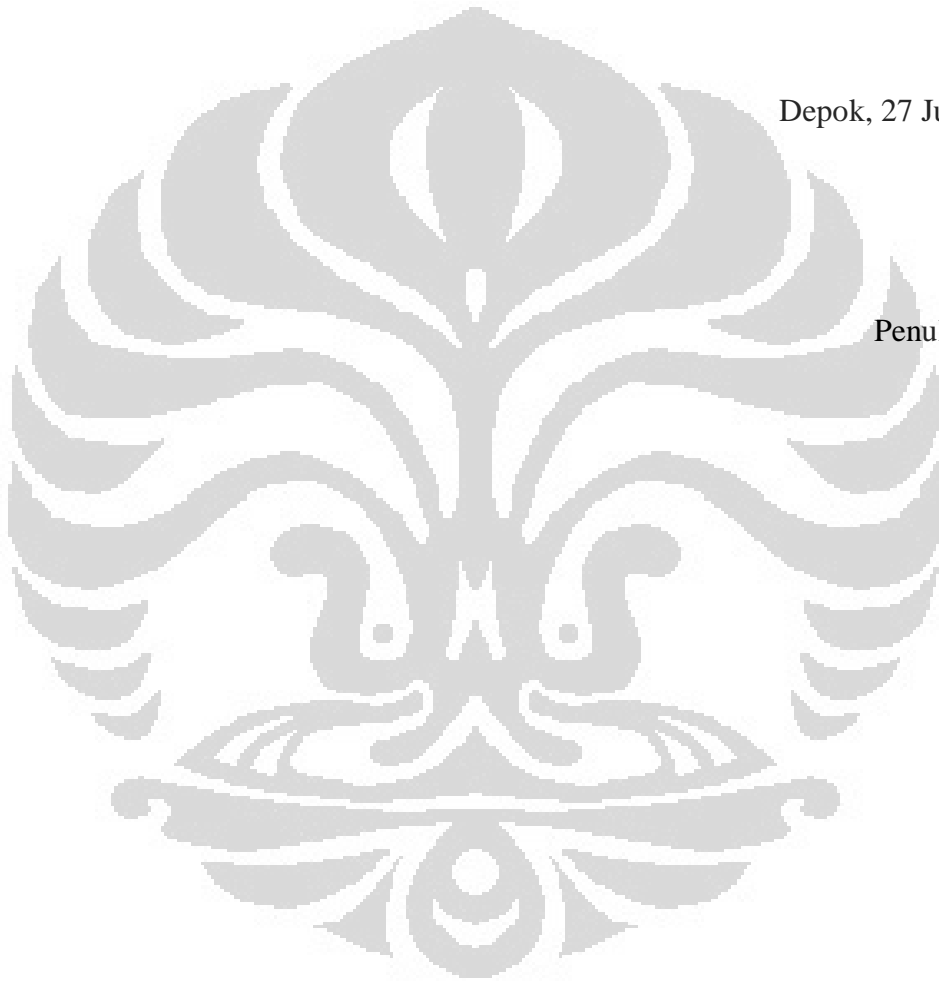
1. Bpk. Dr. Ing. Eko Adhi Setiawan, ST. MT. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, dan diskusi kepada penulis sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Keluarga penulis, Emih dan Apa, kakak-kakak penulis tercinta yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, perhatian, motivasi, masukan dan inspirasi kepada penulis.
3. Nurlaeli Ridwan yang selalu memberikan doa, dukungan dan motivasi kepada penulis selama penyusunan skripsi ini.
4. Bpk. Budiyanto, Bpk. Hartono, teman-teman satu bimbingan, Gilbert P. Sihombing, Leonardo Situmorang, Aditya Kurniawan, Akhmad Kalmin, Ainul Rohman, Mas Ari Maulana, Mas Rohmawan, Mas Atar, dan Mas Ihsan yang telah bersedia bertukar pikiran dan memberikan masukan yang berguna untuk penulis.
5. Teman-teman Lab. Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik, SC Elektro UI yang telah banyak memberikan bantuan kepada penulis.
6. Teman-teman Elektro dan Komputer angkatan 2008 atas kekeluargaan, kebersamaan dan keceriaan yang selalu menghiasi Departemen Teknik Elektro.
7. Dosen, karyawan, dan seluruh sivitas akademik Departemen Teknik Elektro.
8. Serta pihak-pihak lain yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis juga menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan dan kesalahan, dan untuk itu penulis mohon maaf yang sebesar-besarnya serta mengharapkan kritik dan saran membangun yang dapat melengkapi kekurangan tersebut agar skripsi ini menjadi lebih baik lagi.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah bersedia membantu penulis. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 27 Juni 2012

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Saeful Sulun
NPM : 0806455446
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

“Analisis Pengaruh Penyambungan Grid Tie Inverter Terhadap Harmonisa Sistem Saat Terhubung Beban Pada Jaringan Tegangan Rendah”

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilih Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 27 Juni 2012

Yang menyatakan



(Saeful Sulun)

ABSTRAK

Nama : Saeful Sulun
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisis Pengaruh Penyambungan *Grid Tie Inverter* Terhadap Harmonisa Sistem Saat Terhubung Beban Pada Jaringan Tegangan Rendah

Sistem *Solar Panel* (PV) merupakan salah satu teknologi yang memanfaatkan energi surya untuk menghasilkan energi listrik yang dapat dihubungkan langsung dengan jaringan listrik yang sudah ada (PLN). Sistem ini dapat terhubung dengan jaringan listrik PLN karena menggunakan *grid tie inverter* (GTI) sebagai konverter listrik arus searah yang dihasilkan PV menjadi listrik arus bolak balik. Penyambungan GTI pada sistem *solar panel* ini akan memberikan dampak tertentu pada jaringan yang sudah ada, khususnya harmonisa, pada saat sistem terhubung beban. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penyambungan satu atau lebih *grid tie inverter* (GTI) terhadap harmonisa sistem *solar panel* pada saat diberikan beban. Penelitian dilakukan dengan melakukan pengukuran parameter harmonisa seperti tegangan, arus, daya, THD tegangan dan THD arus sistem pada saat sistem yang tidak terhubung GTI dan terhubung GTI diberikan berbagai jenis beban. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa penyambungan GTI akan menyebabkan nilai THD tegangan sistem ini lebih besar dari THD tegangan jaringan yang sudah ada, sedangkan nilai THD arus sistem ini akan lebih kecil dari jaringan yang sudah ada jika beban yang digunakan tidak lebih besar dari kapasitas GTI dan beban yang digunakan bukan beban resistif.

Kata kunci :
Solar panel, grid tie inverter, harmonisa, THD tegangan, THD arus.

ABSTRACT

Name : Saeful Sulun
Study Programs : Electrical Engineering
Title : Analysis of Grid Tie Inverter Impact to
Harmonics Distortion of Utility Grid

Solar Panel (PV) system is one of technology that utilizing solar energy to produce electrical power that can be connected directly with utility grid (PLN). This system can be connected with utility grid (PLN) because using grid tie inverter (GTI) as a converter of electric direct current that produced by PV to electric alternating current. The connection of GTI in solar panel system will make an effect to utility grid, especially harmonic, when this system was connected to load. The purpose of this research is to find out the impact of connection one or more grid tie inverter (GTI) towards solar panel system harmonic when this system was connected to load. The research has been done by measuring harmonic parameter, such as voltage, current, power, THD voltage and THD current when system that not connected GTI and connected GTI were connected to any load. The result of this measurement shows that splicing GTI will cause value of THD voltage this system higher than value of THD voltage system before, whereas value of THD current this system smaller than system before if the capacity of load is not higher than capacity of GTI and the load is not resistive.

Keywords :

Solar panel, grid tie inverter, harmonic, THD voltage, THD current.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN.....	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penulisan.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Metodologi Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
2. DASAR TEORI.....	7
2.1 Sistem <i>Solar Panel</i>	7
2.1.1 Gambaran Umum	7
2.1.2 Karakteristik <i>Solar Panel</i>	7
2.2 Simulator <i>Solar Panel</i>	8
2.3 Inverter.....	10
2.3.1 Pengertian.....	10
2.3.2 Prinsip Kerja Inverter.....	11
2.3.3 Parameter Performa Inverter	15
2.4 <i>Grid Tie Inverter</i>	16
2.4.1 Gambaran Umum	16
2.4.2 Karakteristik <i>Grid Tie Inverter</i> (GTI).....	17
2.4.3 Topologi Rangkaian <i>Grid Tie Inverter</i> (GTI)	18
2.5 Harmonisa.....	19
2.5.1 Pengertian.....	19
2.5.2 Komponen Harmonisa	20
2.5.3 Standar Harmonisa.....	22
3. SKEMATIK RANGKAIAN PENGUKURAN.....	23
3.1 Rangkaian Sistem <i>Solar Panel</i>	23
3.1.1 Deskripsi Sistem <i>Solar Panel</i>	23
3.1.2 Parameter Simulator <i>Solar Panel</i>	24
3.1.3 <i>Programmable Power Supply</i>	25
3.1.4 <i>Grid Tie Inverter</i> (GTI).....	25
3.2 Diagram Garis Rangkaian Sistem <i>Solar Panel</i>	27
3.2.1 Diagram Garis Rangkaian Sistem Jaringan PLN	27
3.2.2 Diagram Garis Rangkaian Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung GTI ...	28

3.2.3	Diagram Garis Rangkaian Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel	29
3.3	Rangkaian Pengukuran Harmonisa Sistem <i>Solar Panel</i>	30
3.3.1	Pengukuran Harmonisa Sistem Jaringan PLN	30
3.3.2	Pengukuran Harmonisa Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung GTI	30
3.3.3	Pengukuran Harmonisa Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel	31
3.4	Pengukuran Harmonisa Sistem <i>Solar Panel</i>	32
4.	HASIL PENGUKURAN DAN ANALISIS	34
4.1	Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN	34
4.1.1	Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Tanpa Beban	34
4.1.2	Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban	35
4.2	Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung GTI	37
4.2.1	Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung GTI Tanpa Beban	37
4.2.2	Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung GTI Berbeban	38
4.3	Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel	40
4.3.1	Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Tanpa Beban	40
4.3.2	Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban	41
4.4	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Tanpa Beban	43
4.4.1	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Tanpa Beban ...	43
4.4.2	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Tanpa Beban	44
4.4.3	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Tanpa Beban	45
4.5	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Berbeban Laptop	46
4.5.1	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban Laptop	46
4.5.2	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Berbeban Laptop	47
4.5.3	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban Laptop	48
4.6	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Berbeban Lampu Hemat Energi (LHE)	49
4.6.1	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban LHE	49
4.6.2	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Berbeban LHE	50
4.6.3	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE	51
4.7	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Berbeban Lampu Hemat Energi (LHE) dan Laptop	52
4.7.1	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban LHE dan Laptop	52

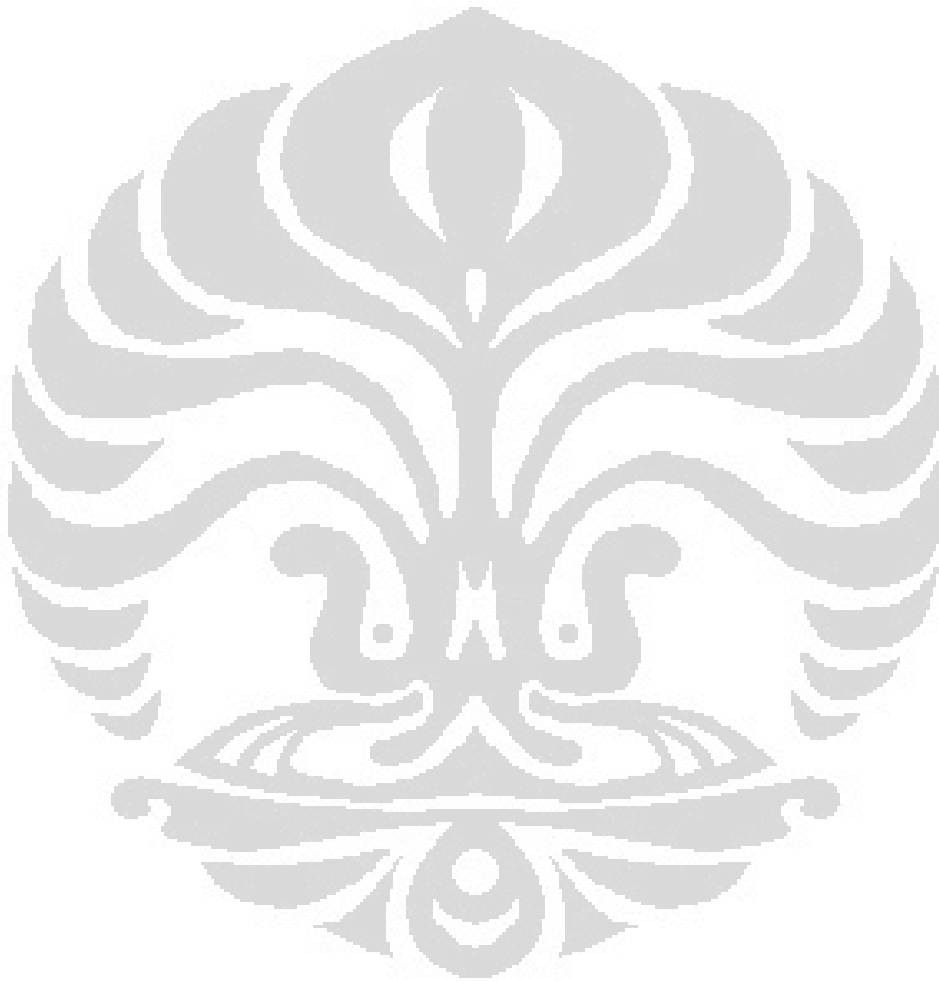
4.7.2	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Berbeban LHE dan Laptop	53
4.7.3	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE dan Laptop.....	54
4.8	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Berbeban Lampu Hemat Energi (LHE) dan Lampu Pijar	55
4.8.1	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban LHE dan Lampu Pijar.....	55
4.8.2	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Berbeban LHE dan Lampu Pijar	56
4.8.3	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE dan Lampu Pijar	57
4.9	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Berbeban Resistif.....	58
4.9.1	Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban Resistif	58
4.9.2	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Berbeban Resistif	59
4.9.3	Analisis Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban Resistif.....	60
5.	KESIMPULAN	62
6.	DAFTAR ACUAN.....	63
7.	DAFTAR PUSTAKA	64
8.	LAMPIRAN	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Solar home system grid-connected</i>	2
Gambar 1.2 Skema sistem <i>solar panel</i>	3
Gambar 2.1 Skema terjadinya <i>photocurrent</i> pada <i>solar panel</i>	7
Gambar 2.2 Karakteristik V-I pada radiasi yang berubah-ubah dan temperatur yang konstan.....	8
Gambar 2.3 Karakteristik V-I pada temperatur yang berubah-ubah dan radiasi yang konstan.....	8
Gambar 2.4 Diagram blok rangkaian simulator <i>Solar Panel</i>	9
Gambar 2.5 <i>Single-phase half-bridge inverter</i>	12
Gambar 2.6 <i>Single-phase full-bridge inverter</i>	14
Gambar 2.7 Topologi rangkaian GTI.....	18
Gambar 2.8 Gelombang fundamental dengan gelombang harmonisnya	19
Gambar 3.1 Diagram garis rangkaian sistem jaringan PLN tanpa beban	27
Gambar 3.2 Diagram garis rangkaian sistem jaringan PLN terhubung beban....	27
Gambar 3.3 Diagram garis rangkaian sistem <i>solar panel</i> terhubung GTI tanpa beban	28
Gambar 3.4 Diagram garis rangkaian sistem <i>solar panel</i> terhubung GTI berbeban	28
Gambar 3.5 Diagram garis rangkaian sistem <i>solar panel</i> terhubung dua GTI paralel tanpa beban	29
Gambar 3.6 Diagram garis rangkaian sistem <i>solar panel</i> terhubung dua GTI paralel berbeban.....	29
Gambar 3.7 Rangkaian pengukuran sistem jaringan PLN tidak terhubung beban	30
Gambar 3.8 Rangkaian pengukuran sistem jaringan PLN dan terhubung beban..	30
Gambar 3.9 Rangkaian pengukuran sistem <i>solar panel</i> terhubung GTI tanpa beban	30
Gambar 3.10 Rangkaian pengukuran sistem <i>solar panel</i> terhubung GTI berbeban	31
Gambar 3.11 Rangkaian pengukuran sistem <i>solar panel</i> terhubung dua GTI paralel tanpa beban	31
Gambar 3.12 Rangkaian pengukuran sistem <i>solar panel</i> terhubung dua GTI paralel tanpa beban	32
Gambar 4.1 Grafik tegangan dan arus sistem jaringan PLN tanpa beban	34
Gambar 4.2 Grafik tegangan dan arus sistem jaringan PLN dengan beban laptop.....	35
Gambar 4.3 Grafik tegangan dan arus sistem jaringan PLN dengan beban lampu hemat energi.....	35
Gambar 4.4 Grafik tegangan dan arus sistem jaringan PLN dengan beban lampu hemat energi dan laptop.....	36
Gambar 4.5 Grafik tegangan dan arus sistem jaringan PLN dengan beban lampu hemat energi dan lampu pijar.....	36
Gambar 4.6 Grafik tegangan dan arus sistem jaringan PLN dengan beban resistif.....	36
Gambar 4.7 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> satu GTI tanpa beban ..	37

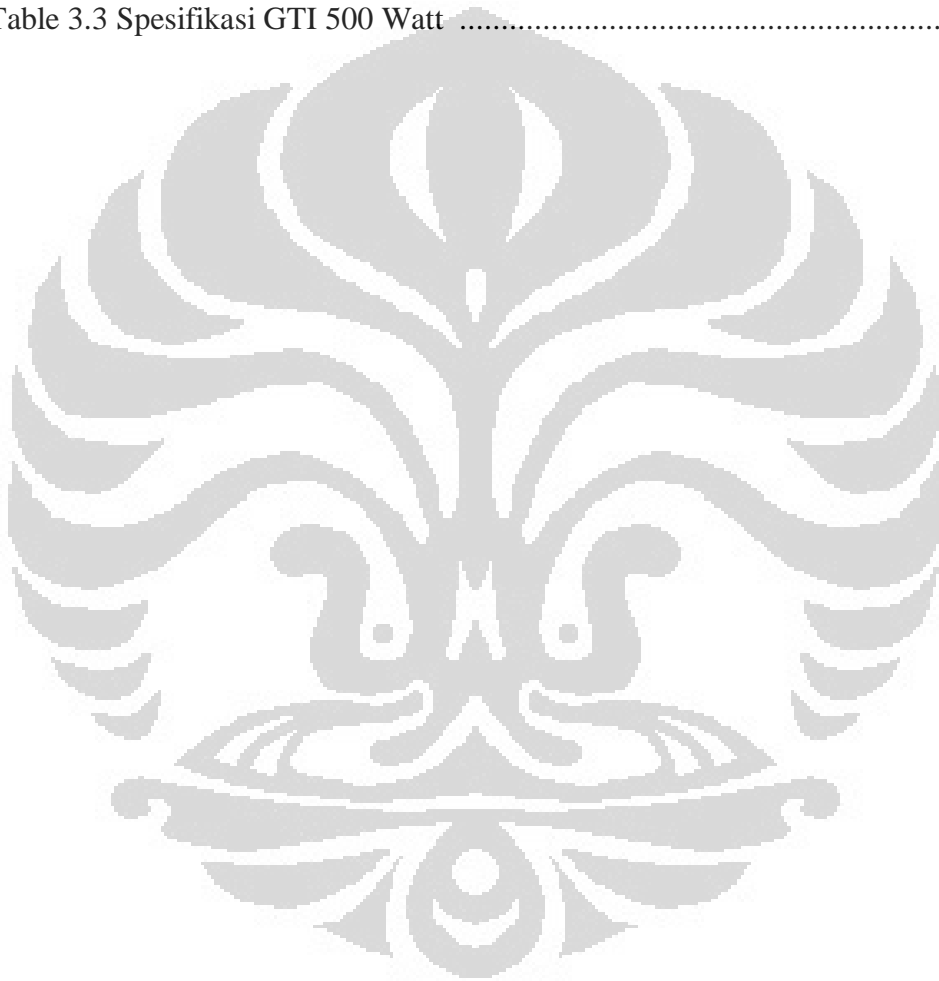
Gambar 4.8 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> satu GTI dengan beban laptop	38
Gambar 4.9 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> satu GTI dengan beban lampu hemat energi.....	38
Gambar 4.10 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> satu GTI dengan beban lampu hemat energi dan laptop	39
Gambar 4.11 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> satu GTI dengan beban lampu hemat energi dan lampu pijar	39
Gambar 4.12 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> satu GTI dengan beban resistif.....	39
Gambar 4.13 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> dua GTI tanpa beban	40
Gambar 4.14 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> dua GTI beban laptop.....	41
Gambar 4.15 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> dua GTI beban lampu hemat energi.....	41
Gambar 4.16 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> dua GTI beban lampu hemat energi dan laptop.....	42
Gambar 4.17 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> dua GTI beban lampu hemat energi dan lampu pijar.....	42
Gambar 4.18 Grafik tegangan dan arus sistem <i>solar panel</i> dua GTI beban resistif.....	42
Gambar 4.19 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN tanpa beban....	43
Gambar 4.20 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> satu GTI tanpa beban	44
Gambar 4.21 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> dua GTI paralel tanpa beban.....	45
Gambar 4.22 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN berbeban laptop.....	46
Gambar 4.23 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> satu GTI berbeban laptop.....	47
Gambar 4.24 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> dua GTI paralel berbeban laptop.....	48
Gambar 4.25 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN berbeban LHE.....	49
Gambar 4.26 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> satu GTI berbeban LHE.....	50
Gambar 4.27 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> dua GTI paralel berbeban LHE.....	51
Gambar 4.28 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN berbeban lampu hemat energi dan laptop.....	52
Gambar 4.29 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> satu GTI berbeban LHE dan laptop.....	53
Gambar 4.30 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> dua GTI paralel berbeban LHE dan laptop.....	54
Gambar 4.31 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN berbeban lampu hemat energi dan lampu pijar.....	55

Gambar 4.32 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> satu GTI berbeban LHE dan lampu pijar.....	56
Gambar 4.33 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> dua GTI paralel berbeban LHE dan lampu pijar.....	57
Gambar 4.34 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN berbeban resistif.....	58
Gambar 4.35 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> satu GTI berbeban resistif.....	59
Gambar 4.36 Grafik THD tegangan dan THD arus <i>solar panel</i> dua GTI paralel berbeban resistif.....	60



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Standar Batas Harmonisa Tegangan IEEE 519-1992	22
Tabel 2.2 Standar Batas Harmonisa Arus (< 69 kV) IEEE 519-1992	22
Tabel 2.3 Standar Batas Harmonisa Arus (69 kV–161 kV) IEEE 519-1992	22
Tabel 2.4 Standar Batas Harmonisa Arus (> 161 kV) IEEE 519-1992	22
Tabel 3.1 Karakteristik elektrik modul PV SHARP NE-80EJEA	24
Tabel 3.2 Spesifikasi programmable power supply CAMTEC HSEUIreg04801	25
Tabel 3.2 Spesifikasi GTI 1000 Watt	26
Table 3.3 Spesifikasi GTI 500 Watt	26



DAFTAR LAMPIRAN

Data Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Tanpa Beban.....	65
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Tanpa Beban..	65
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Tanpa Beban	66
Data Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban Laptop	67
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Berbeban Laptop	67
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban Laptop.....	68
Data Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban LHE.....	69
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Berbeban LHE.....	69
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE	70
Data Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban LHE dan Laptop	71
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Berbeban LHE dan Laptop	71
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE dan Laptop.....	72
Data Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban LHE dan Lampu Pijar ..	73
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Berbeban LHE dan Lampu Pijar	73
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE dan Lampu Pijar	74
Data Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban Resistif	75
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Satu GTI Berbeban Resistif	75
Data Hasil Pengukuran Sistem <i>Solar Panel</i> Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban Resistif.....	76

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Pembangkitan energi listrik merupakan proses konversi energi primer menjadi energi mekanik penggerak generator yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik. Sumber energi primer yang ada dapat dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu sumber energi tidak terbarukan (*nonrenewable energy*) dan sumber energi yang terbarukan (*renewable energy*). Seiring dengan jumlah sumber energi tidak terbarukan yang semakin berkurang dan banyaknya dampak negatif yang ditimbulkan dari penggunaannya, penghematan dan pemilihan sumber energi alternatif mutlak dilakukan.

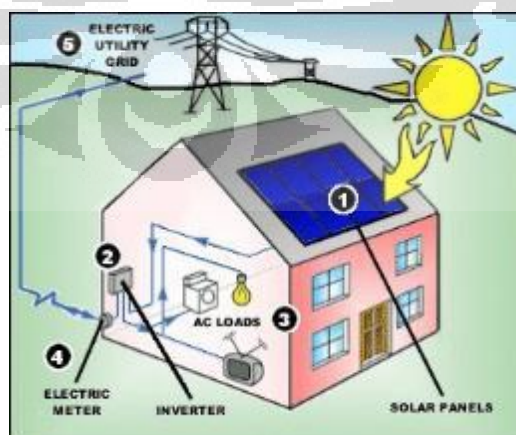
Penggunaan energi listrik secara efisien, ekonomis dan berkelanjutan dapat terjamin dengan memanfaatkan konsep teknologi *smart grid* yang secara cerdas mengintegrasikan jaringan listrik dengan seluruh pengguna yang tersambung didalamnya. Sistem *smart grid* dapat dihubungkan dengan berbagai sumber energi terbarukan yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik, misalnya energi panas matahari dan energi angin. Di Indonesia, pemanfaatan sumber energi terbarukan yang terhubung ke sistem *smart grid* biasanya berasal dari energi panas matahari melalui teknologi *solar panel* (PV). Pemanfaatan energi panas matahari di Indonesia secara umum telah diterima sebagai bagian yang penting dalam masyarakat, lingkungan dan merupakan kesempatan sekaligus tantangan dalam bidang ekonomi yang akan menjawab permasalahan dari isu perubahan iklim dan pemanasan global.

Indonesia adalah negara tropis yang letak geografisnya dilalui oleh garis khatulistiwa sehingga mempunyai potensi energi panas matahari yang cukup besar. Berdasarkan data penyinaran matahari yang diperoleh dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral yang dihimpun dari 18 lokasi yang ada di Indonesia, radiasi surya di Indonesia untuk kawasan Indonesia bagian barat dan timur memiliki distribusi penyinaran sekitar 4,5 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 10% untuk Kawasan Barat Indonesia (KBI) dan 5,1 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 9% untuk Kawasan Timur Indonesia (KTI).

Dengan demikian, potensi energi surya rata-rata di Indonesia sekitar 4,8 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 9%.

Potensi energi surya di Indonesia yang cukup besar dan merata disetiap daerah harus dapat dimanfaatkan secara optimal baik itu dalam skala kecil (rumah tangga) hingga skala besar (PLTS). Teknologi yang digunakan untuk memanfaatkan energi surya terbagi menjadi dua macam, yaitu teknologi energi surya termal dan teknologi energi surya *solar panel* (PV). Teknologi energi surya termal pada umumnya digunakan untuk memasak (kompor surya), mengeringkan hasil pertanian, perkebunan, perikanan dan kehutanan. Teknologi energi surya *solar panel* digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga bahkan mungkin untuk kebutuhan listrik industri.

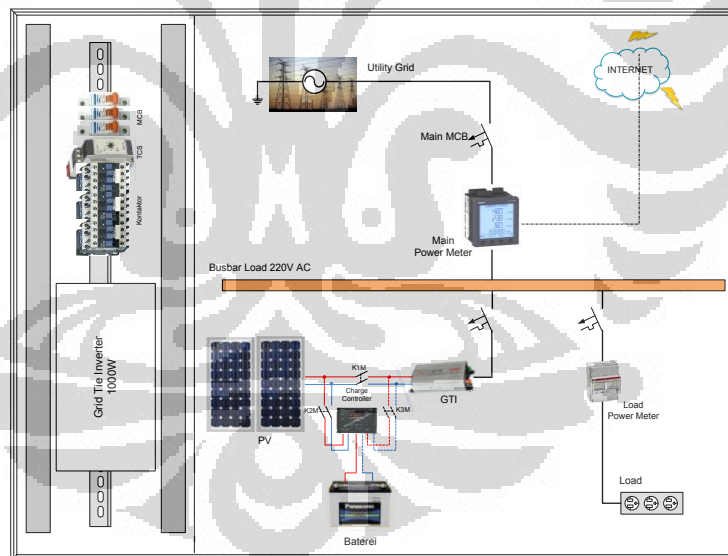
Teknologi energi surya *solar panel* yang diterapkan pada skala rumah tangga disebut sebagai *solar home system* (SHS). SHS memanfaatkan energi surya melalui panel-panel solar PV yang terpasang pada bagian atap rumah dan dihubungkan ke sistem BOS (*balance of system*) yang meliputi *controller*, inverter, kerangka modul, dan peralatan listrik. Sistem ini dapat terkoneksi dengan jaringan yang sudah ada (PLN) menggunakan inverter yang tidak hanya dapat mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan AC, tetapi juga dapat mensinkronisasi frekuensi dan tegangan pada jaringan yang telah ada dengan keluaran dari inverter tersebut. Inverter jenis ini disebut *grid tie inverter* (GTI). SHS yang terhubung ke jaringan listrik PLN ini biasa disebut *solar panel system*. Berikut ini gambar SHS yang terhubung langsung ke jaringan listrik PLN, yaitu :



Gambar 1.1 *Solar home system grid-connected*^[9]

Grid tie inverter (GTI) merupakan inverter tipe khusus yang dapat mengkonversikan tegangan DC menjadi tegangan AC yang berasal dari sumber energi terbarukan. GTI dikenal juga sebagai *synchronous inverter* dan perangkat ini tidak dapat berdiri sendiri karena keluaran GTI harus terhubung dengan jaringan listrik yang sudah ada (PLN). Dengan adanya GTI, kelebihan daya yang dihasilkan oleh PV dapat dialirkan kembali ke jaringan PLN sehingga daya tersebut bisa dijual dengan ketentuan yang telah ada dan disepakati bersama.

Universitas Indonesia, khususnya Teknik Elektro Universitas Indonesia, telah membuat sistem *solar panel* sederhana yang memanfaatkan energi surya dan baterai sebagai penyimpan energi listrik dengan menggunakan GTI sebagai konverter tegangan DC yang dihasilkan oleh panel surya (PV) menjadi tegangan AC. Komponen yang terdapat pada sistem *solar panel* sederhana ini meliputi modul PV, baterai, regulator baterai (BCU), *grid tie inverter* (GTI), Powermeter, dan rangkaian pengendalinya. Berikut ini gambar sistem *solar panel* sederhana tersebut :



Gambar 1.2 Skema sistem *solar panel* ^[4]

Penggunaan GTI pada sistem *solar panel* sederhana ini bertujuan agar kelebihan daya yang dihasilkan oleh modul PV dan baterai dapat dialirkan kembali ke jaringan PLN sehingga dapat diketahui berapa besar daya yang dapat dijual. Penyambungan satu atau lebih GTI dari sistem *solar panel* ke jaringan PLN ini akan memberikan dampak tertentu pada jaringan yang sudah ada. Untuk mengetahui dampak tersebut, maka harus dilakukan pengukuran tentang

karakteristik arus, tegangan dan daya serta harmonisa dari sistem *solar panel* ini pada saat tidak terhubung dan terhubung dengan GTI. Penulisan skripsi ini akan membahas salah satu efek yang mungkin ditimbulkan, yaitu efek harmonisa, pada saat sistem *solar panel* sederhana yang telah ada ini terhubung dengan satu atau lebih *grid tie inverter* dari sistem *solar panel*.

1.2 TUJUAN PENULISAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penyambungan satu atau lebih *grid tie inverter* (GTI) terhadap besarnya harmonisa sistem saat terhubung beban pada jaringan tegangan rendah PLN.

1.3 BATASAN MASALAH

Ruang lingkup kajian dari studi ini adalah :

1. Karakteristik sistem *solar panel* dan *grid tie inverter*
2. Perancangan model rangkaian sistem *solar panel* yang terhubung *grid tie inverter* dengan sumber energi yang berasal dari simulator *solar panel*.
3. Pengukuran besaran dan bentuk gelombang tegangan, arus dan daya serta harmonisa pada sistem *solar panel* dengan menggunakan alat *Power Quality Analyzer*.

1.4 METODOLOGI PENULISAN

Metode penulisan yang digunakan dalam analisis penyambungan *grid tie inverter* terhadap harmonisa sistem *solar panel* ini adalah :

1. Pemilihan Topik Penelitian

Topik penelitian ini ditentukan berdasarkan hasil diskusi yang dilakukan bersama dosen pembimbing. Pada penelitian ini, topik yang dipilih adalah analisis pengaruh penyambungan *grid tie inverter* terhadap harmonisa sistem *solar panel*.

2. Studi Pustaka

Dilakukan dengan mencari sumber-sumber data yang mendukung studi ini, seperti *handbook*, *ebook*, dan jurnal-jurnal ilmiah yang dapat digunakan sebagai acuan (referensi) untuk melakukan kajian, pengukuran dan analisis hasil pengukurannya.

3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran terhadap sistem *solar panel* sederhana yang telah dibuat di Teknik Elektro Universitas Indonesia. Pengukuran yang dilakukan meliputi pengukuran sistem *solar panel* pada saat tidak tersambung *grid tie inverter* dan saat sistem *solar panel* dihubungkan dengan satu atau lebih *grid tie inverter*. Kedua pengukuran ini dilakukan dalam dua kondisi yaitu saat tidak berbeban dan saat diberi beban. Alat ukur yang digunakan dalam pengukuran ini adalah *Power Quality Analyzer* dengan merk Hioki 3169-20.

4. Pengolahan Data dan Analisis Hasil Pengukuran

Pengolahan data dilakukan berdasarkan data hasil pengukuran yang telah diperoleh berupa arus, tegangan dan daya serta THD tegangan dan arus. Setelah itu dilakukan analisis data dan grafik berdasarkan hasil pengolahan data yang telah dilakukan.

5. Penarikan Kesimpulan

Kesimpulan dibuat untuk merangkum semua hasil penelitian dalam kalimat yang lebih sederhana.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan skripsi ini terbagi menjadi lima bagian, yaitu :

Bab I : Pendahuluan

Memuat tentang latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, metodologi penulisan, dan sistematika penulisan skripsi.

Bab II : Tinjauan Pustaka

Berisi tentang landasan teori yang digunakan dalam penulisan skripsi ini. Materi yang dibahas pada bab ini meliputi sistem *solar panel*, simulator *solar panel*, inverter, *grid tie inverter* (GTI) dan harmonisa.

Bab III : Pemodelan Rangkaian Pengukuran

Bagian ini menjelaskan tentang alat-alat ukur dan rangkaian pengukuran yang digunakan. Rangkaian pengukuran yang

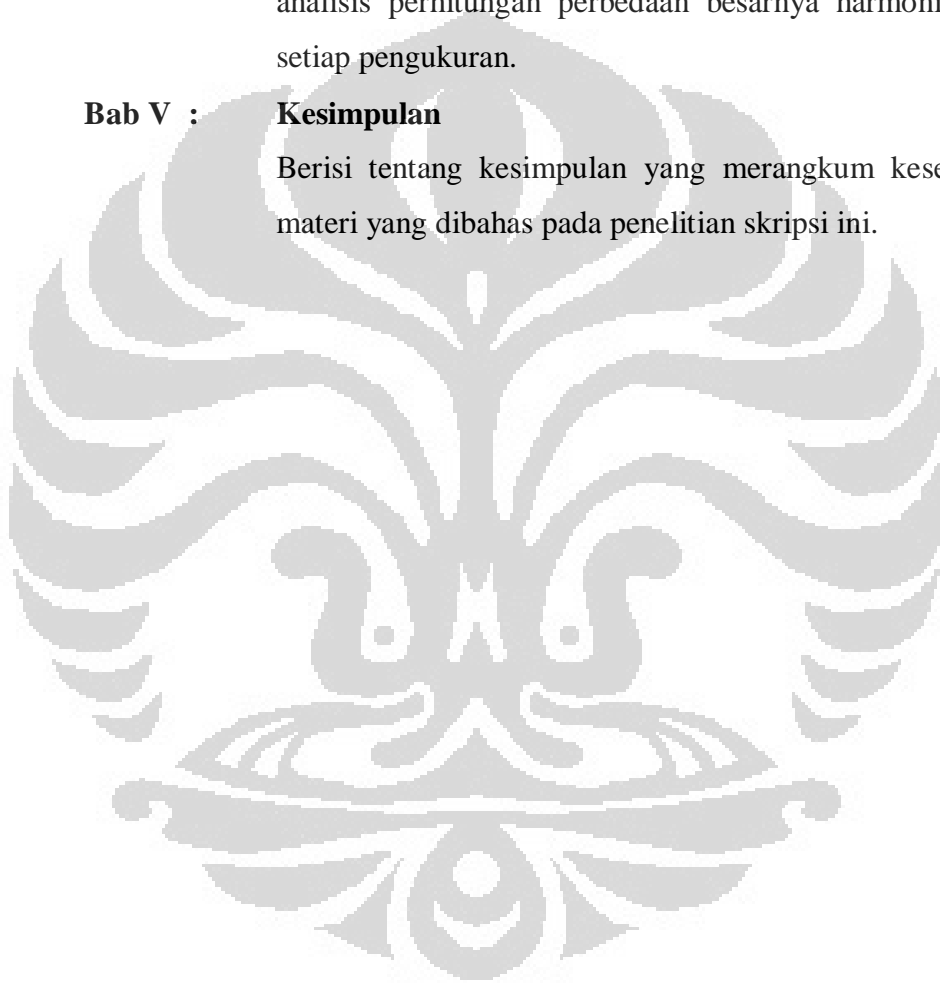
dibahas pada bab ini meliputi diagram garis rangkaian sistem serta rangkaian pengukuran sistem.

Bab IV : Hasil Pengukuran dan Analisis

Bagian ini memaparkan mengenai pengolahan data hasil pengukuran yang diperoleh berikut analisisnya. Analisis yang dilakukan meliputi analisis perhitungan harmonisa sesuai dengan persamaan harmonisa yang dijadikan acuan, analisis perhitungan perbedaan besarnya harmonisa pada setiap pengukuran.

Bab V : Kesimpulan

Berisi tentang kesimpulan yang merangkum keseluruhan materi yang dibahas pada penelitian skripsi ini.



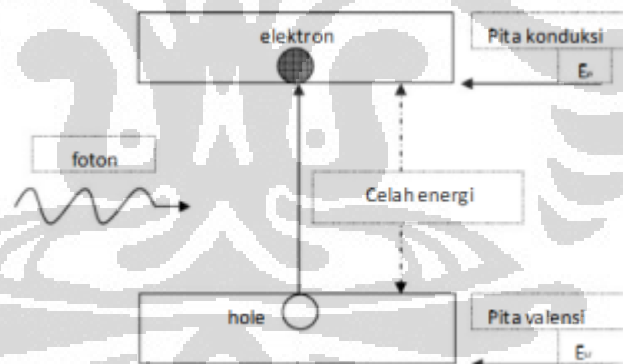
BAB 2

DASAR TEORI

2.1 SISTEM SOLAR PANEL

2.1.1 Gambaran Umum

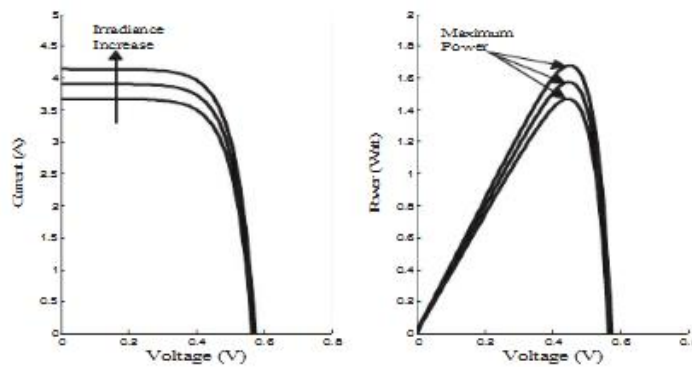
Solar panel (PV) merupakan salah satu teknologi yang dikembangkan pada bahan semikonduktor untuk membangkitkan daya listrik arus searah dalam satuan Watt (W) atau kiloWatt (kW) dengan memanfaatkan energi matahari (*photon*). Prinsip dasar PV merupakan kebalikan dari LED (*Light Emmiting Diode*) yang mengubah energi listrik menjadi cahaya atau dapat dikatakan identik dengan sebuah dioda cahaya (*photodiode*) hubungan *p-n* (*p-n junction*). Ketika energi foton yang datang lebih besar dari celah energi ini, maka foton akan diserap oleh semikonduktor untuk membentuk pasangan *electron-hole* sebagai pembawa muatan (*carrier*). Selanjutnya elektron dan *hole* bergerak berturut-turut ke arah lapisan semikonduktor *p* dan semikonduktor *n* sehingga timbul beda potensial dan *photocurrent* (arus yang dihasilkan oleh cahaya).



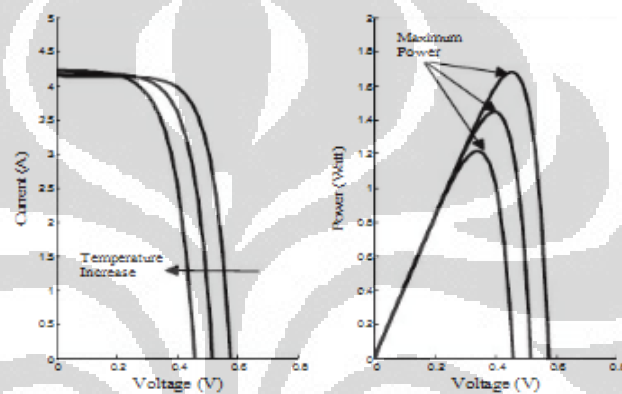
Gambar 2.1 Skema terjadinya *photocurrent* pada solar panel ^[11]

2.1.2 Karakteristik Solar Panel

Solar panel terdiri dari perangkat-perangkat semikonduktor memiliki daya keluaran yang berbanding lurus dengan intensitas cahaya matahari. Pada saat energi surya mengenai permukaan modul *solar panel*, arus akan dibangkitkan sebanding dengan tingkat intensitas cahaya yang diterima dan disaat yang sama tegangan arus searah pun akan dihasilkan^[2]. Oleh sebab itu, *solar panel* juga disebut sebagai sumber arus.



Gambar 2.2 Karakteristik V-I pada radiasi yang berubah-ubah dan temperatur yang konstan^[2]



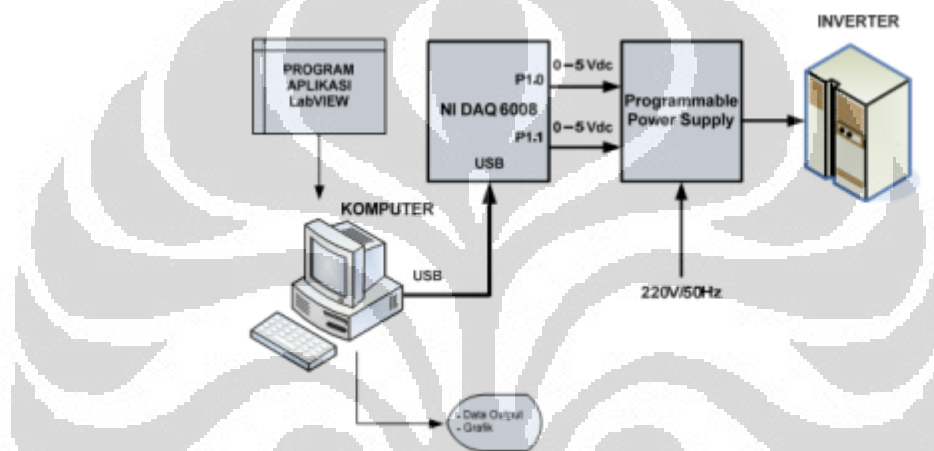
Gambar 2.3 Karakteristik V-I pada temperatur yang berubah-ubah dan radiasi yang konstan^[2]

Tegangan dan arus merupakan parameter penting yang mempengaruhi karakteristik *solar panel*. Arus yang dihasilkan *solar panel* sangat tergantung pada besarnya radiasi energi surya yang diterima, semakin tinggi radiasi maka arus yang dihasilkan akan semakin besar. Sementara itu, tegangan yang dibangkitkan dipengaruhi oleh temperatur. Semakin besar temperaturnya maka akan semakin kecil tegangan yang dibangkitkan pada terminal modul *solar panel*.

2.2 SIMULATOR SOLAR PANEL

Simulator *solar panel* yang digunakan pada penelitian ini telah dibuat sebelumnya oleh mahasiswa Teknik Elektro FTUI untuk menggantikan modul *solar panel* yang sudah ada. Simulator PV ini dibuat dengan menggunakan perangkat lunak NI LabView 2010 yang dilengkapi modul NI-DAQ. NI-DAQ merupakan perangkat untuk data akuisisi yang dihubungkan ke komputer melalui *port* USB sebagai *interface* bagi komputer dengan *programmable power supply*.

Parameter-parameter yang mempengaruhi performa modul *solar panel* diolah melalui program simulator *solar panel* pada LabVIEW dengan memasukkan persamaan matematis dari *solar panel* yang ada untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus *solar panel*. Selain dapat menentukan besarnya tegangan dan arus *solar panel*, simulator ini juga dapat menampilkan grafik karakteristik daya terhadap tegangan dan grafik karakteristik arus terhadap tegangan. Berikut ini gambar diagram blok yang menyajikan blok-blok rangkaian dan menjelaskan cara kerja alat secara keseluruhan, yaitu :



Gambar 2.4 Diagram blok rangkaian simulator *solar panel*^[3]

Parameter-parameter yang menjadi nilai masukan pada program simulator *solar panel* ini terdiri dari :

1. Radiasi matahari

Data radiasi matahari yang dijadikan parameter masukan untuk program simulator *solar panel* ini merupakan data radiasi yang digunakan perusahaan pembuat *solar panel*, yaitu sebesar 1000 W/m^2 .

2. Temperatur

Pada program simulator *solar panel* terdapat dua parameter input temperatur. Data temperatur yang digunakan yaitu data temperatur ruangan sebesar 25° C yang merupakan suhu konstan.

3. Faktor ideal material *solar panel* (A)

Data faktor ideal material *solar panel* yang digunakan sesuai material pembentuk dari modul *solar panel*, yaitu *polysilicon* yaitu sebesar 1,3.

4. Jumlah *solar panel*

Jumlah *cell* modul *solar panel* yang digunakan dalam program ini sebanyak 36 *cell* buah *solar panel* yang dihubung seri dan 1 *cell* buah yang dihubung paralel.

5. Arus hubung singkat *solar panel*

Arus hubung singkat sesuai dengan spesifikasi dari modul *solar panel* yang digunakan, yaitu modul *solar panel* SHARP NE-80EJEA sebesar 5,15 A.

6. Data temperatur operasi *solar panel* (NOTC)

Pada modul *solar panel* SHARP NE-80EJEA tidak diberikan spesifikasi data temperatur operasi *solar panel* (NOTC), namun secara umum data temperatur operasi *solar panel* berkisar 48° C.

2.3 INVERTER

2.3.1 Pengertian

Konverter tegangan arus searah ke tegangan bolak-balik dikenal sebagai inverter. Fungsi dari sebuah inverter adalah untuk mengubah tegangan masukan DC menjadi tegangan keluaran AC yang simetris dengan besar magnitudo dan frekuensi yang diinginkan. Tegangan keluaran dapat bernilai tetap atau berubah-ubah pada frekuensi tetap atau berubah-ubah. Tegangan keluaran yang berubah-ubah dapat diperoleh dengan memvariasikan tegangan masukan DC dan menjaga penguatan inverter bernilai tetap. Sebaliknya, jika tegangan masukan DC tetap dan tidak terkontrol, tegangan keluaran yang berubah-ubah dapat diperoleh dengan memvariasikan penguatan dari inverter. Variasi penguatan inverter biasanya diperoleh dengan menggunakan pengendali *pulse-width-modulation* (PWM) yang ada di dalam inverter. Penguatan inverter didefinisikan sebagai rasio dari tegangan keluaran AC terhadap tegangan masukan DC.

Bentuk gelombang keluaran dari sebuah inverter ideal seharusnya berupa gelombang sinusoidal. Namun demikian, bentuk gelombang inverter yang digunakan biasanya tidak berupa gelombang sinusoidal dan memuat harmonisa-harmonisa. Pada aplikasi daya rendah dan daya medium, gelombang tegangan keluaran berbentuk persegi (*square-wave*) dan berbentuk persegi termodifikasi (*quasi-square-wave*) mungkin dapat diterima. Pada aplikasi daya tinggi, bentuk gelombang sinusoidal terdistorsi minimum dibutuhkan. Dengan adanya devais

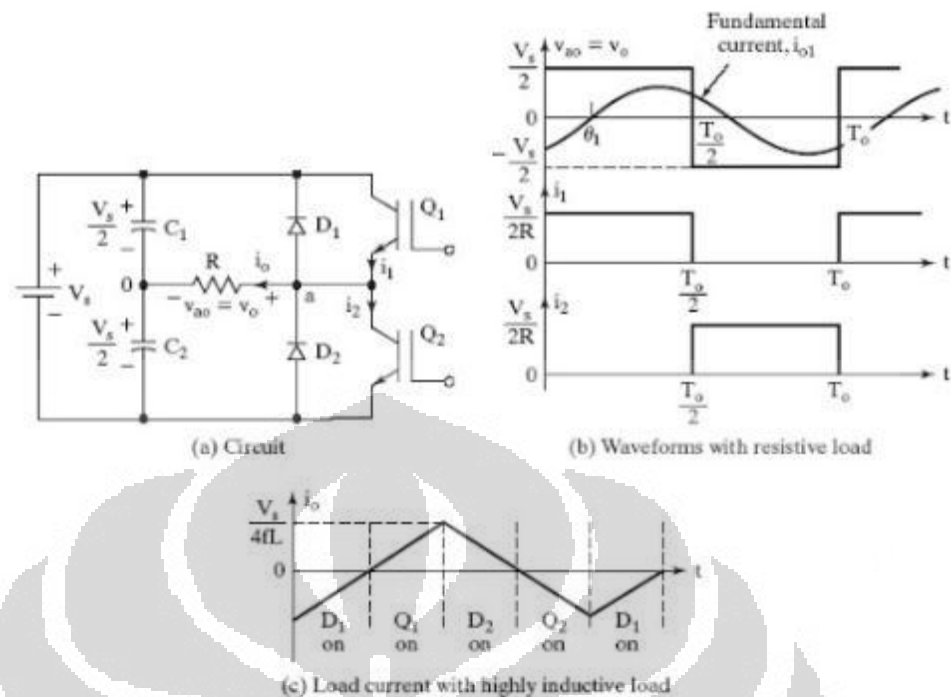
semikonduktor daya berkecepatan tinggi, kandungan harmonisa pada tegangan keluaran dapat diminimalisasi atau dikurangi secara signifikan dengan teknik *switching*.

Inverter secara luas digunakan dalam aplikasi-aplikasi industri, seperti *variable speed AC motor drives*, *induction heating*, *standby power supplies*, *uninterruptible power supplies* (UPS). Masukkan inverter dapat berupa baterai, *fuel cell*, sel surya (PV), atau sumber DC lainnya. Tegangan keluaran satu fasa secara tipikal diantaranya, 120 V pada frekuensi 60 Hz, 220 V pada frekuensi 50 Hz, dan 115 V pada frekuensi 400 Hz. Untuk sistem daya tiga fasa, tegangan keluaran tipikalnya, yaitu 220/380 V pada frekuensi 50 Hz, 120/208 V pada frekuensi 60 Hz, dan 115/200 V pada frekuensi 400 Hz.

Inverter secara umum dapat diklasifikasikan kedalam dua tipe, yaitu inverter satu fasa dan inverter tiga fasa. Masing-masing tipe dapat menggunakan devais pengontrol *turn-on* dan *turn-off* (seperti BJT, MOSFET, IGBT, MCT, SIT, dan GTO) atau dengan menggunakan *forced-commutated thyristor* tergantung pada aplikasinya. Secara umum, inverter menggunakan sinyal pengendali PWM untuk menghasilkan tegangan keluaran AC. Sebuah inverter disebut sebagai *voltage fed inverter* (VFI) jika tegangan masukan tetap konstan, *current-fed inverter* (CFI) jika arus masukan dijaga konstan, dan *variable DC linked inverter* jika tegangan masukan dapat dikendalikan.

2.3.2 Prinsip Kerja Inverter

Prinsip kerja inverter satu fasa dapat diterangkan dengan gambar 2.5(a), rangkaian inverter ini memuat dua buah *choppers*. Ketika hanya transistor Q_1 yang berkonduksi untuk selang waktu $T_0/2$, tegangan yang melewati beban v_o adalah $V_s/2$. Jika transistor Q_2 yang berkonduksi untuk selang waktu $T_0/2$, tegangan yang melewati beban adalah $-V_s/2$. Rangkaian logika sebaiknya didesain sedemikian sehingga Q_1 dan Q_2 tidak berkonduksi pada waktu yang bersamaan. Gambar 2.5(b) menunjukkan bentuk gelombang untuk tegangan dan arus keluaran untuk beban resistif. Inverter seperti ini dikenal sebagai *single-phase half-bridge inverter*.



Gambar 2.5 Single-phase half-bridge inverter^[1]

Tegangan keluaran efektif dapat diperoleh dari persamaan berikut, yaitu :

$$V_o = \left(\frac{2}{T_o} \int_0^{T_o/2} \frac{V_s^2}{4} dt \right)^{1/2} = \frac{V_s}{2} \quad (2.1)$$

Tegangan keluaran dapat diekspresikan dalam *Fourier series* sebagai :

$$v_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \sin n\omega t$$

$$= 0 \quad \text{for } n = 2, 4, \dots \quad (2.2)$$

dimana, $\omega = 2\pi f_o$ adalah frekuensi dari tegangan keluaran dalam rad/s.

Untuk $n = 1$ pada persamaan di atas, nilai efektif untuk komponen fundamentalnya sesuai dengan persamaan berikut, yaitu :

$$V_1 = \frac{2V_s}{\sqrt{2}\pi} = 0,45V_s \quad (2.3)$$

Untuk beban induktif, arus beban tidak dapat berubah dengan segera dan bersamaan dengan tegangan keluaran. Jika Q_1 mati pada $t = T_o / 2$, arus beban akan mengalir melewati D_2 , beban, dan setengah bagian yang lebih bawah dari sumber arus searah hingga arus bernilai nol. Dengan cara yang sama, ketika Q_2

mati pada $t = T_0$, arus beban mengalir melewati D_1 , beban, dan setengah bagian yang lebih atas dari sumber arus searah. Ketika dioda D_1 atau D_2 bekerja, energi dikembalikan menuju sumber arus searah dan dioda ini diketahui sebagai *feedback diodes*. Gambar 2.5(c) menunjukkan interval arus beban dan konduksi dari devais untuk beban induktif murni.

Transistor pada rangkaian sebelumnya dapat diganti dengan GTO atau *forced-commutated thyristor*. Jika t_q adalah waktu pemutusan tiristor, maka terdapat nilai minimum waktu tunda dari t_q diantara tiristor *outgoing* dan penyalan tiristor *incoming* selanjutnya. Jika tidak, akan terjadi hubung singkat antara dua tiristor tersebut. Oleh karena itu, waktu konduksi maksimum dari sebuah tiristor sebaiknya $T_0 / 2 - t_q$.

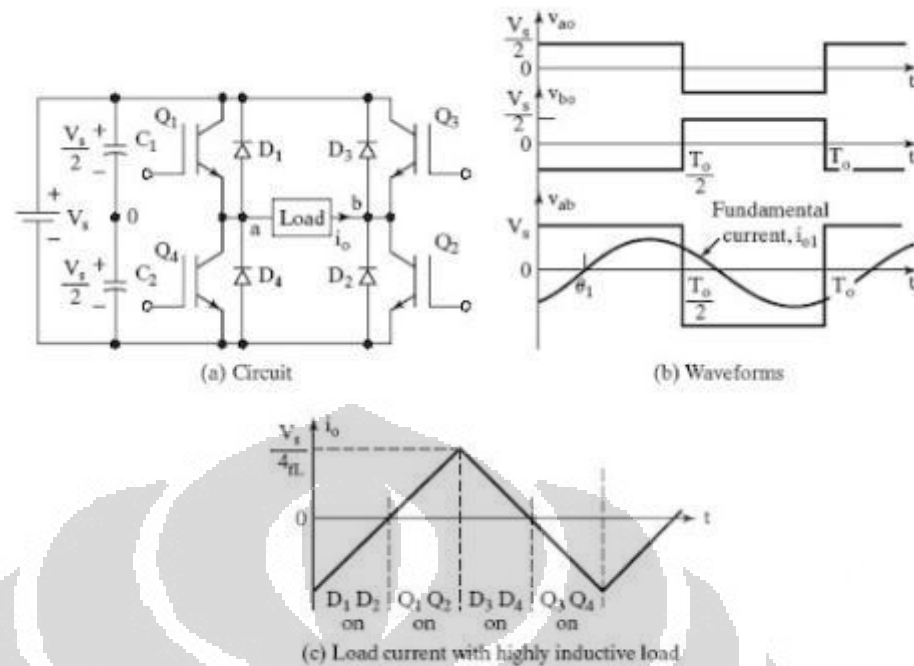
Untuk beban RL, besarnya arus beban i_0 dapat diperoleh dari persamaan berikut, yaitu :

$$i_0 = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \sin(n\omega t - \theta_n) \quad (2.4)$$

dimana, $\theta_n = \tan^{-1}(n\omega L / R)$. Jika I_{01} adalah arus beban fundamental efektif, daya keluaran fundamentalnya (untuk $n = 1$) adalah :

$$\begin{aligned} P_{01} &= V_1 I_{01} \cos \theta_1 = I_{01}^2 R \\ &= \left[\frac{2V_s}{\sqrt{2\pi}\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \right]^2 R \end{aligned} \quad (2.5)$$

Rangkaian *single-phase full-bridge inverter* memuat empat buah *choppers* yang ditunjukkan pada gambar 2.6(a). Ketika transistor Q_1 dan Q_2 berkonduksi secara bersama-sama, tegangan masukan V_s dihasilkan melewati beban. Jika transistor Q_1 dan Q_2 berkonduksi pada waktu yang bersamaan pula, tegangan yang dihasilkan nilainya menjadi negatif, $-V_s$. Bentuk gelombang tegangan keluaran ditunjukkan oleh gambar 2.6(b).



Gambar 2.6 Single-phase full-bridge inverter^[1]

Tegangan keluaran efektif dapat diperoleh dari persamaan berikut, yaitu :

$$V_o = \left(\frac{2}{T_o} \int_0^{T_o/2} V_s^2 dt \right)^{1/2} = V_s \quad (2.6)$$

Tegangan keluaran dapat diekspresikan dalam *Fourier series* sebagai :

$$v_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin n\omega t \quad (2.7)$$

dimana, $\omega = 2\pi f_0$ adalah frekuensi dari tegangan keluaran dalam rad/s.

Untuk $n = 1$ pada persamaan di atas, nilai efektif untuk komponen fundamentalnya sesuai dengan persamaan berikut, yaitu :

$$V_1 = \frac{4V_s}{\sqrt{2}\pi} = 0,90V_s \quad (2.8)$$

Untuk beban RL, besarnya arus beban i_o dapat diperoleh dari persamaan berikut, yaitu :

$$i_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \sin(n\omega t - \theta_n) \quad (2.9)$$

dimana, $\theta_n = \tan^{-1}(n\omega L / R)$.

Ketika dioda D_1 atau D_2 bekerja, energi dikembalikan menuju sumber arus searah dan dioda ini diketahui sebagai *feedback diodes*. Gambar 2.6(c) menunjukkan interval arus beban dan konduksi dari devais untuk beban induktif murni.

2.3.3 Parameter Performa Inverter

Secara praktikal, keluaran inverter memuat harmonisa-harmonisa dan kualitas inverter secara normal dievaluasi melalui parameter-parameter berikut ini, yaitu :

1. *Harmonic Factor* dari harmonisa ke-n (HF_n)

Faktor harmonisa (dari harmonisa ke-n) merupakan ukuran kontribusi harmonisa diri, sesuai dengan persamaan :

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (2.10)$$

dimana V_1 adalah nilai efektif dari komponen fundamental dan V_n adalah nilai efektif dari komponen harmonisa ke-n.

2. *Total Harmonic Distortion* (THD)

Distorsi harmonisa total (THD) adalah ukuran kemiripan bentuk antara sebuah gelombang dan komponen fundamentalnya yang didefinisikan oleh persamaan berikut, yaitu :

$$THD = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2} \quad (2.11)$$

3. *Distortion Factor* (DF)

THD memberikan informasi tentang konten harmonisa total, tetapi tidak mengindikasikan level masing-masing komponen harmonisa. Jika sebuah filter digunakan pada keluaran inverter, harmonisa orde tinggi akan dilemahkan (dikurangi) dengan lebih efektif. Oleh karena itu, pengetahuan tentang frekuensi dan magnitudo dari masing-masing harmonisa sangat dibutuhkan. Faktor distorsi menunjukkan sejumlah distorsi harmonisa yang masih tersisa dalam gelombang setelah harmonisa-harmonisa pada gelombang tersebut mengalami pelemahan orde kedua (misal, dibagi dengan n^2). Jadi, DF adalah ukuran efektivitas dari pengurangan harmonisa-

harmonisa yang tidak diinginkan tanpa nilai spesifik filter beban orde kedua dan didefinisikan melalui persamaan berikut, yaitu :

$$DF = \frac{1}{V_1} \left[\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

Faktor distorsi untuk harmonisa ke-n diperoleh dari persamaan :

$$DF_n = \frac{V_n}{V_1 n^2} \quad (2.13)$$

4. *Lowest-Order Harmonic* (LOH)

Harmonisa orde terendah adalah harmonisa yang frekuensi komponen harmonisanya mendekati komponen fundamentalnya dan amplitudonya lebih besar atau sama dengan 3% dari komponen fundamentalnya.

2.4 GRID TIE INVERTER

2.4.1 Gambaran Umum

Grid Tie Inverter (GTI) merupakan inverter tipe khusus yang dapat mengkonversikan tegangan DC menjadi tegangan AC yang berasal dari sumber energi terbarukan. GTI dikenal juga sebagai *synchronous inverter* dan perangkat ini tidak dapat berdiri sendiri karena keluaran GTI harus terhubung dengan jaringan listrik yang sudah ada (PLN). Hal inilah yang membedakan GTI dengan inverter lainnya. Karakteristik GTI yang harus terhubung dengan jaringan listrik PLN membuat GTI memiliki kemampuan untuk mensinkronisasi tegangan AC dan fasanya serta frekuensi kerjanya. Selain itu, GTI juga memiliki sistem proteksi terhadap gangguan yang terjadi pada jaringan PLN (*reaction to power outage*). Jadi, secara umum suatu GTI harus memenuhi beberapa persyaratan agar dapat terhubung dengan jaringan listrik PLN, yaitu^[4] :

1. Tegangan AC dan fasa yang dihasilkan GTI harus sama dengan tegangan dan fasa jaringan yang ada.
2. Frekuensi dari tegangan AC yang dihasilkan GTI harus sama dengan frekuensi jaringan listrik yang ada (frekuensi yang digunakan di Indonesia sebesar 50 Hz).

Penggunaan GTI pada sistem *solar panel* ini bertujuan agar kelebihan daya yang dihasilkan oleh modul *solar panel* dan baterai dapat dialirkan kembali

ke jaringan PLN sehingga daya tersebut dapat dijual dengan ketentuan yang telah disepakati bersama. Salah satu kelemahan dari penggunaan GTI adalah pada saat terjadi pemadaman pada sumber utama PLN, sistem *solar panel* harus dipadamkan pula meskipun pada saat yang sama modul *solar panel* sedang menghasilkan listrik. Hal ini terjadi karena GTI tidak dapat bekerja jika tidak ada aliran listrik dari PLN. Kondisi seperti ini disebut sebagai *anti islanding*.

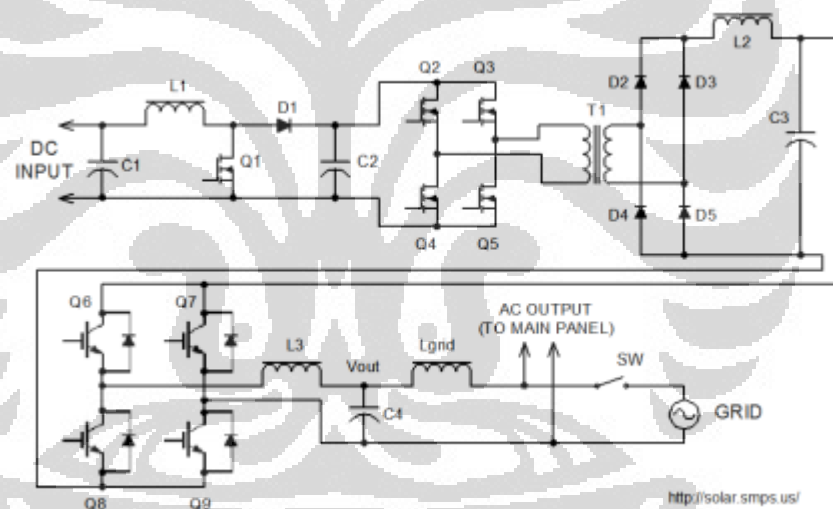
2.4.2 Karakteristik *Grid Tie Inverter* (GTI)

Grid Tie Inverter berbeda dengan inverter biasa karena GTI dapat dihubungkan langsung dengan jaringan listrik PLN. Secara umum karakteristik yang dimiliki oleh setiap GTI hampir sama, berikut ini karakteristik GTI yang digunakan pada percobaan ini dengan daya 1000 Watt dan 500 Watt, yaitu^[8] :

1. GTI memiliki operasi daya *maximum power point tracking* (MPPT) dengan tingkat presisi yang tinggi, otomatis, dan secara cepat menyesuaikan daya keluaran PV pada titik keluaran maksimum agar keluaran daya yang stabil dapat diperoleh. MPPT pada GTI berfungsi untuk mengatasi masalah yang mungkin terjadi akibat adanya perubahan intensitas arus dan tegangan.
2. GTI memiliki fungsi *power automatically locked* (APL).
Pada saat terdapat perbedaan fluktuasi arus, MPPT akan menyesuaikan hingga titik daya maksimum dan APL akan mengunci nilai titik daya maksimum tersebut agar keluaran daya GTI lebih stabil.
3. GTI dapat dihubungkan langsung dengan modul PV (tanpa membutuhkan baterai), fungsi MPPT dan APL yang ada membuat PV dapat dengan mudah dihubungkan ke GTI.
4. GTI memiliki karakteristik sudut fasa tegangan AC sebesar 0° .
5. Gelombang keluaran GTI berupa gelombang sinusoidal murni dengan menggunakan SPWM secara langsung.
6. Pada saat sistem tenaga listrik mengalami gangguan, GTI akan mati secara otomatis.
7. Proteksi pembatas arus pada saat terjadi hubung singkat.

2.4.3 Topologi Rangkaian *Grid Tie Inverter* GTI

Secara umum, topologi dasar rangkaian penyusun GTI dapat tersusun dari tiga jenis rangkaian, yaitu inverter LF-transformator, inverter HF-transformator, dan *transformer-less inverter*^[3]. GTI konvensional biasanya menggunakan LF-transformator untuk menaikkan tegangan masukannya. LF-transformator menyediakan isolasi galvanik antara jaringan dan susunan PV. Inverter jenis ini memiliki bobot yang berat, ukuran yang besar, dan efisiensinya kecil. Efisiensi inverter ini dapat ditingkatkan dengan mengganti LF-transformator dengan HF-transformator. Pergeseran fasa konverter DC-DC dapat melakukan fungsi MPPT dan pada saat yang bersamaan dapat menyediakan isolasi galvanik. *Transformer-less inverter* menggunakan *boost converter* untuk mengatur tegangan dari PV agar sesuai dengan tegangan masukan yang dibutuhkan. Berikut ini gambar topologi rangkaian penyusun GTI, yaitu :



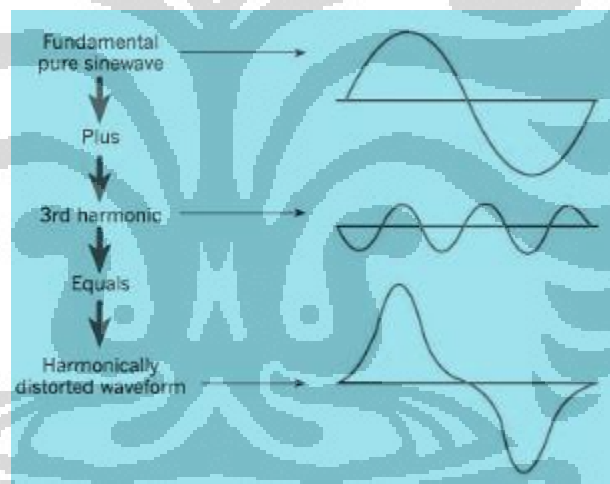
Gambar 2.7 Topologi rangkaian GTI^[3]

Tegangan DC masukan akan dinaikkan oleh *boost converter* yang terbentuk oleh induktor L_1 , n-MOSFET Q_1 , dioda D_1 dan kapasitor C_2 . Setelah itu tegangan DC akan dikonversikan menjadi tegangan AC oleh n-MOSFET Q_2 - Q_5 . Tahap selanjutnya, transformator frekuensi tinggi T_1 akan menaikkan tegangan masukan dan menyediakan isolasi galvanik antara sisi masukan dan keluaran GTI. Dioda D_2 - D_5 menyearahkan kembali tegangan keluaran transformator. Tahap terakhir rangkaian ini yaitu pengkonversian tegangan DC menjadi tegangan AC oleh konverter *full bridge*, yang terdiri dari IGBT Q_6 - Q_9 dan filter LC (L_3 dan C_4).

2.5 HARMONISA

2.5.1 Pengertian

Harmonisa adalah gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan adanya distorsi gelombang arus dan tegangan. Distorsi gelombang arus dan tegangan ini disebabkan adanya pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya. Harmonisa terjadi karena adanya beban-beban non linear yang terhubung ke jaringan sistem. Beban non linear secara umum berasal dari peralatan-peralatan elektronika yang didalamnya banyak terdapat komponen semikonduktor (komponen elektronika daya). Komponen elektronika daya ini berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Beberapa contoh dari beban non linear, diantaranya *variable speed drive*, komputer, laptop, printer, dan lampu *fluorescent* yang menggunakan elektronika *ballast*.



Gambar 2.8 Gelombang fundamental dengan gelombang harmonisanya^[12]

Dampak negatif yang ditimbulkan oleh harmonisa adalah adanya rugi-rugi pada peralatan listrik yang digunakan sehingga bisa menyebabkan peralatan tersebut cepat rusak dan panas meskipun belum digunakan pada performa maksimumnya. Salah satu cara untuk mengatasi harmonisa adalah dengan menggunakan filter pasif atau filter aktif. Karakteristik harmonisa dapat dipresentasikan dengan deret Fourier, menurut persamaan berikut :

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cdot \cos(n\omega_0 t) + B_n \cdot \sin(n\omega_0 t)] \quad (2.14)$$

A_0, A_n, B_n adalah koefisien Fourier yang secara berturut-turut menyatakan amplitudo komponen fundamental dan amplitudo komponen-komponen harmonisanya. Koefisien Fourier ditentukan oleh persamaan berikut :

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \\ A_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \\ B_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \end{aligned} \quad (2.15)$$

Berdasarkan persamaan diatas, suatu gelombang periodik yang berulang dalam selang waktu tertentu (T) dapat direpresentasikan sebagai penjumlahan antara komponen gelombang fundamental dengan komponen gelombang harmonisanya.

2.5.2 Komponen Harmonisa

Harmonisa yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik menyebabkan bentuk gelombang keluaran sistem tidak sinusoidal lagi karena adanya superposisi antara gelombang frekuensi fundamental dengan gelombang frekuensi harmonisanya. Komponen-komponen penyusun harmonisa yang biasa digunakan untuk menganalisis sistem yang mengalami distorsi harmonisa diantaranya, yaitu :

1. Orde Harmonisa

Orde harmonisa menunjukkan nilai kelipatan bulat frekuensi gelombang harmonisa terhadap frekuensi fundamentalnya. Jadi, secara matematis orde harmonisa dinyatakan sebagai perbandingan antara frekuensi gelombang harmonisa dengan frekuensi fundamentalnya dan dinyatakan melalui persamaan berikut :

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (2.16)$$

dimana : n = orde harmonisa

f_n = frekuensi gelombang harmonisa ke-n

f_1 = frekuensi gelombang fundamental

2. *Individual Harmonic Distortion* (IHD)

Menurut *Institute of Electrical and Electronic Engineering* (IEEE), IHD adalah perbandingan antara nilai RMS dari masing-masing arus atau

tegangan harmonisa dengan nilai RMS arus atau tegangan fundamentalnya yang dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$IHD_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (2.17)$$

dimana : IHD_n = IHD harmonisa orde ke-n
 I_n = nilai RMS arus harmonisa orde ke-n
 I_1 = nilai RMS arus fundamental (orde ke-1)

3. *Total Harmonic Distortion* (THD)

Terdapat dua jenis THD, yaitu THD fundamental (THD-F) dan THD RMS (THD-R). THD-F merupakan perbandingan dari nilai RMS arus harmonisa-harmonisa (selain harmonisa ke-1) terhadap nilai RMS arus harmonisa ke-1. Sedangkan THD-R adalah perbandingan dari nilai RMS arus harmonisa-harmonisa (selain harmonisa ke-1) terhadap nilai RMS arus totalnya. Secara umum persamaan THD adalah sebagai berikut :

$$THD = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

dimana : THD = Distorsi Harmonisa Total
 I_n = nilai arus harmonisa orde ke-n
 I_1 = nilai arus fundamental (orde ke-1)

4. *Total Demand Distortion* (TDD)

TDD adalah perbandingan antara total arus harmonisa terhadap permintaan arus beban maksimum (selama 15 sampai 30 menit) pada *Point of Common Coupling* (PCC). Berdasarkan standar IEEE-519, TDD dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$TDD = \frac{1}{I_{load}} \left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (2.19)$$

dimana : THD = Distorsi Kebutuhan Total
 I_n = nilai RMS arus harmonisa orde ke-n
 I_{load} = nilai arus beban puncak fundamental pada PCC

2.5.3 Standar Harmonisa

Standar harmonisa menunjukkan batasan nilai distorsi harmonisa arus dan tegangan yang digunakan untuk mengevaluasi harmonisa yang terjadi. Batasan harmonisa arus ditentukan berdasarkan perbandingan arus hubung singkat terhadap arus beban puncak fundamental pada PCC. Sementara itu, batasan harmonisa tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang digunakan. Berikut ini tabel standar harmonisa berdasarkan standar IEEE 519-1992, yaitu :

Tabel 2.1 Standar Batas Harmonisa Tegangan IEEE 519-1992

Standar Batas Harmonisa Tegangan		
Tegangan Bus Pada PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
< 69 kV	3.0	5.0
69,001 kV - 161 kV	1.5	2.5
>161,001 kV	1.0	1.5

Tabel 2.2 Standar Batas Harmonisa Arus (< 69 kV) IEEE 519-1992

Standar Batas Harmonisa Arus (< 69 kV)						
I_{sc}/I_L	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabel 2.3 Standar Batas Harmonisa Arus (69 kV–161 kV) IEEE 519-1992

Standar Batas Harmonisa Arus (69 kV - 161 kV)						
I_{sc}/I_L	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Tabel 2.4 Standar Batas Harmonisa Arus (> 161 kV) IEEE 519-1992

Standar Batas Harmonisa Arus (> 161 kV)						
I_{sc}/I_L	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

BAB 3

SKEMATIK RANGKAIAN PENGUKURAN

Perancangan skematik rangkaian yang terdiri dari simulator *solar panel*, *programmable power supply*, *grid tie inverter* (GTI), dan sistem *solar panel* yang telah ada dilakukan untuk mempermudah proses pengukuran besaran listrik pada sistem tersebut beserta harmonisanya. Pengukuran besaran listrik dan harmonisa ini dilakukan dengan menggunakan alat Multimeter, Amperemeter, dan *Power Quality Analyzer* bermerk Hioki 3169-20.

Pemodelan rangkaian dan pengukurannya dilakukan dengan dua macam tahapan. Tahap pertama yaitu pemodelan rangkaian dan pengukuran sistem *solar panel* yang tidak terhubung GTI pada saat tidak berbeban maupun saat berbeban. Tahapan ini merupakan pengukuran untuk menentukan karakteristik jaringan listrik PLN yang ada. Tahap kedua yaitu pemodelan rangkaian dan pengukuran sistem *solar panel* yang terhubung GTI pada saat tidak berbeban maupun saat berbeban. Beban yang digunakan terdiri dari laptop, lampu hemat energi, laptop dan lampu hemat energi, lampu pijar dan lampu hemat energi, serta resistif. Dengan menggunakan dua macam pemodelan rangkaian ini, hasil pengukuran yang diperoleh dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dari jaringan listrik PLN dan sistem *solar panel* beserta harmonisa sistem saat tidak terhubung GTI dan saat terhubung GTI.

3.1 RANGKAIAN SISTEM SOLAR PANEL

3.1.1 Deskripsi Sistem Solar Panel

Sistem *solar panel* yang digunakan pada penelitian ini telah dibuat sebelumnya oleh mahasiswa Teknik Elektro UI. Sistem ini memanfaatkan modul *solar panel* dan baterai sebagai sumber tegangan DC yang digunakan sebagai input untuk *grid tie inverter*. GTI akan mengubah tegangan DC tersebut menjadi tegangan AC yang bisa digunakan untuk mensuplai beban-beban rumah tangga atau bisa dikirimkan ke jaringan listrik PLN. Penggunaan modul *solar panel* atau baterai diatur dengan suatu rangkaian pengendali yang terdiri dari *solar charge controller*, MCB dan tiga buah kontaktor.

Penelitian ini mengganti modul *solar panel* yang digunakan dengan simulator *solar panel* dan tidak memanfaatkan baterai sebagai penyimpanan energi. Simulator *solar panel* yang digunakan ini juga telah dibuat sebelumnya oleh mahasiswa Teknik Elektro UI. Dengan menggunakan simulator *solar panel* ini, besarnya tegangan DC yang dijadikan masukan GTI dapat diatur. Simulator *solar panel* dibuat dengan menggunakan perangkat lunak NI Labview 2010 yang dilengkapi dengan sistem akuisisi data NI DAQ.

3.1.2 Parameter Simulator Solar Panel

Simulator *solar panel* yang digunakan pada penelitian ini adalah pengganti dari modul *solar panel* yang ada sehingga memiliki karakteristik yang hampir sama dengan modul *solar panel* sebenarnya. Perangkat lunak NI LabView 2010 untuk mensimulasikan simulator *solar panel* dilengkapi modul NI-DAQ untuk data akuisisi yang dihubungkan ke komputer melalui *port* USB sebagai *interface* bagi komputer dengan *programmable power supply*. Parameter masukan dibuat berdasarkan karakteristik elektrik modul *solar panel* yang digantikan, yaitu modul *solar panel* SHARP NE-80EJEA. Berikut ini tabel karakteristik elektrik dari modul *solar panel* SHARP NE-80EJEA, yaitu :

Tabel 3.1 Karakteristik elektrik modul *solar panel* SHARP NE-80EJEA^[6]

Cell	Poly-crystalline silicon
No. of Cells and Connections	36 in series
Open Circuit Voltage (Voc)	21,6 V
Maximum Power Voltage (V _{pm})	17,3 V
Short Circuit Current (I _{sc})	5,16 A
Maximum Power Current (I _{pm})	4,63 A
Maximum Power (P _{max})	80W (+10% / -5%)
Module Efficiency (η _m)	12,40%
Maximum System Voltage	600 VDC
Series Fuse Rating	10A
Type of Output Terminal	Junction Box
*Standard Test Condition (STC) : 25° C, 1kW/m ² , AM 1,5	

Parameter masukan tambahan yang tidak ada pada karakteristik elektrik modul *solar panel* SHARP NE-80EJEA untuk simulator *solar panel* ini adalah data temperatur operasi *solar panel* (NOTC). Namun, secara umum data temperatur operasi *solar panel* berkisar 48° C.

3.1.3 Programmable Power Supply

Penggunaan *programmable power supply* memungkinkan adanya pengendalian tegangan dan arus keluaran melalui *interface* komputer (simulator PV). Namun demikian, tegangan dan arus keluaran pada penelitian ini tidak dibuat bervariasi sehingga parameter masukan untuk simulator *solar panel* pun dibuat tetap. *Programmable power supply* yang digunakan bermerk CAMTEC HSEUIreg04801 dengan spesifikasi berikut, yaitu :

Tabel 3.2 Spesifikasi programmable power supply CAMTEC HSEUIreg04801^[7]

AC Input Rating	230 Vac < 4,3 A
Rated DC Voltage	0 - 30 V
Overvoltage Protection	35 Vdc
Max. DC Current (-25° C) - (+60° C)	0 - 24 A
Max. DC Current +70° C	0 - 18 A
Ripple Peak 230 Vac 20 MHz	40 mVpp
Pmax	480 W
Accurancy	< ± 1,5 % interface
Load Regulation	< ± 0,05 % 0-100%
Efficiency 230 Vac	90% typical
Ambient Operating Temp.	(-25° C) - (+70° C)
Ambient Storage Temp.	(-40° C) - (+85° C)
Input/Output	Galvanic insulated 3000

3.1.4 Grid Tie Inverter (GTI)

Sistem *solar panel* menggunakan GTI sebagai konverter arus searah yang dihasilkan *solar panel* menjadi arus bolak-balik untuk mensuplai beban karena GTI dapat mensinkronkan tegangan dan frekuensi keluarannya dengan jaringan listrik yang sudah ada. Pada saat GTI tidak mensuplai beban, daya yang dihasilkan dapat dijual sesuai dengan ketentuan yang telah ada karena daya tersebut akan dikirimkan kembali ke jaringan PLN. Hal terpenting dari GTI adalah kemampuannya untuk terhubung langsung dengan sumber tegangan arus searah yang berasal dari energi terbarukan. Selain itu, pemasangan GTI juga sangat mudah dan sederhana karena tidak memerlukan pengaturan parameter-parameter tertentu. GTI yang digunakan pada penelitian ini memiliki kapasitas

1000 Watt dan 500 Watt. Berikut ini spesifikasi GTI yang digunakan pada penelitian ini, yaitu :

Tabel 3.3 Spesifikasi GTI 1000 Watt^[8]

Recommended Maximum PV Power	Ppv=1300Wp
DC Maximum Input Power	PDC.max=1100W
DC Maximum Voltage	VpvDC28VDC
PV MPPT DC Voltage Range	Vpv 10.5V~28DC
Peak Inverter Efficiency	$\eta_{max}>94\%$
Power Factor	0.93-0.99
PV Maximum Input Current	Ipv.max65A
Reverse Polarity Protection	Fuse
AC Rating Output Power	950W AC
AC Maximum Output Power	1000W AC
AC Normal Voltage Range	80V-130;160~260VAC
AC Frequency	45-65Hz
Inverter Output Current Total Harmonic Distortion	THDIAC <5%
Phase shift	<1%
Island Effect Protection	inverter shuts down during black out
Output waveform	Pure Sine Wave
Inverter Output Shorting Protection	Current Limiting
Standby Power Consumption	<8W
Nighttime Power Consumption	<1W
Ambient Temperature Range	-20 °C~65°C
Cooling	Convection cooled with fan
Ambient Humidity	0~100% (Indoor Type Design)

Tabel 3.4 Spesifikasi GTI 500 Watt^[8]

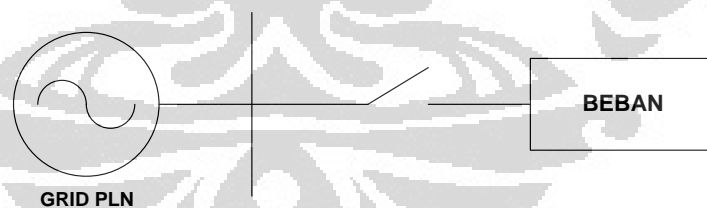
DC Maximum Input Power	PDC.max=600W
DC Maximum Voltage	VpvDC28VDC
PV MPPT DC Voltage Range	Vpv 10.5V~28DC
Peak Inverter Efficiency	$\eta_{max}>94\%$
Power Factor	0.93-0.99
PV Maximum Input Current	Ipv.max65A
Reverse Polarity Protection	Fuse
AC Rating Output Power	500W AC
AC Maximum Output Power	500W AC

AC Normal Voltage Range	80V-130;160~260VAC
AC Frequency	45-65Hz
Inverter Output Current Total Harmonic Distortion	THDIAC <5%
Phase shift	<1%
Island Effect Protection	inverter shuts down during black out
Output waveform	Pure Sine Wave
Inverter Output Shorting Protection	Current Limiting
Standby Power Consumption	<8W
Nighttime Power Consumption	<1W
Ambient Temperature Range	-20 °C~65°C
Cooling	Convection cooled with fan
Ambient Humidity	0~100% (Indoor Type Design)

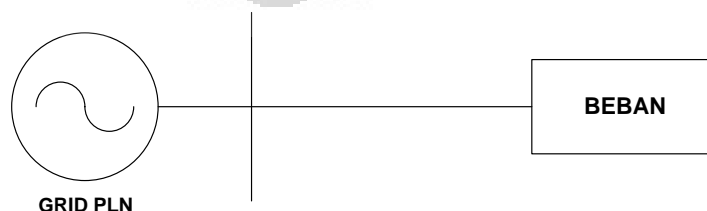
3.2 DIAGRAM GARIS RANGKAIAN SISTEM *SOLAR PANEL*

3.2.1 Diagram Garis Rangkaian Sistem Jaringan PLN

Rangkaian *solar panel* tanpa inverter merupakan rangkaian yang secara tidak langsung menunjukkan karakteristik jaringan listrik PLN karena tanpa adanya GTI, listrik yang dihasilkan modul *solar panel* tidak dapat digunakan sebagai pengganti suplai listrik dari jaringan PLN. Berikut ini diagram garis yang menunjukkan skema rangkaian sistem *solar panel* tanpa GTI, yaitu :



Gambar 3.1 Diagram garis rangkaian sistem jaringan PLN tanpa beban

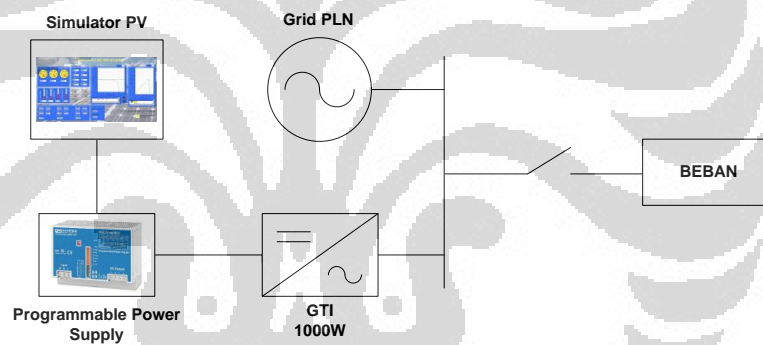


Gambar 3.2 Diagram garis rangkaian sistem jaringan PLN terhubung beban

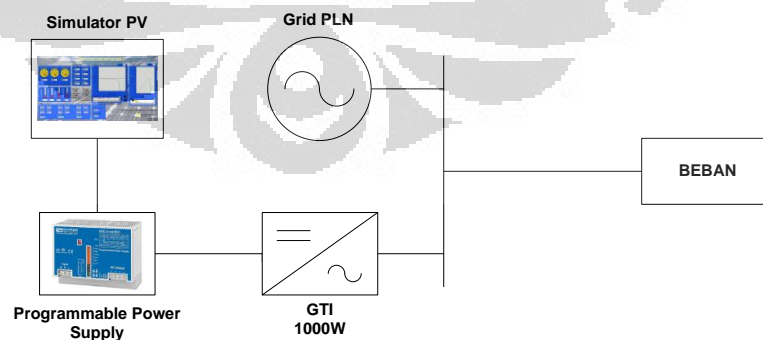
Diagram skema rangkaian pada gambar 3.1 dan gambar 3.2 secara berturut-turut menunjukkan skema rancangan pengukuran sistem diagram garis rangkaian sistem jaringan PLN saat tidak terhubung beban dan saat terhubung beban.

3.2.2 Diagram Garis Rangkaian Sistem *Solar Panel* Terhubung GTI

Rangkaian *solar panel* terhubung *grid tie inverter* merupakan rangkaian yang menunjukkan karakteristik sistem *solar panel*. Rangkaian ini menggunakan simulator PV yang terhubung ke *programmable power supply* sebagai sumber tegangan arus searah GTI. Keluaran GTI yang digunakan harus terhubung langsung dengan jaringan listrik PLN karena GTI memiliki karakteristik dapat menyesuaikan tegangan dan frekuensi keluarannya dengan jaringan listrik PLN. Berikut ini diagram garis yang menunjukkan skema rangkaian sistem *solar panel* yang terhubung GTI, yaitu :



Gambar 3.3 Diagram garis rangkaian sistem *solar panel* terhubung GTI tanpa beban

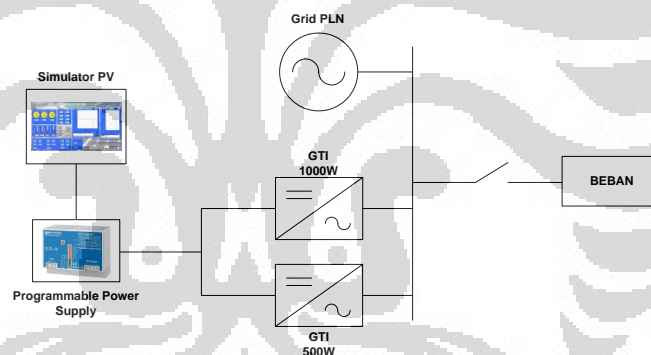


Gambar 3.4 Diagram garis rangkaian sistem *solar panel* terhubung GTI berbeban

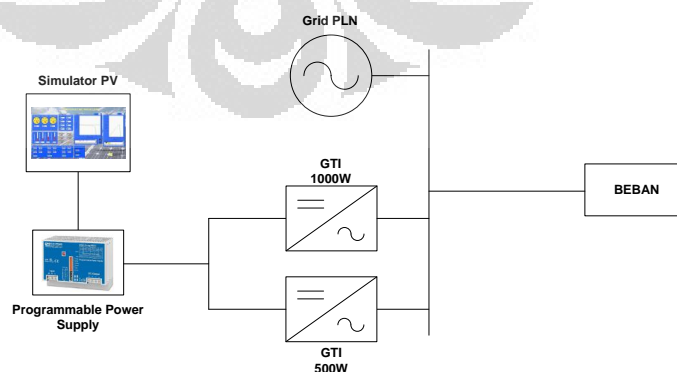
Diagram garis pada gambar 3.3 dan gambar 3.4 secara berturut-turut menunjukkan skema rancangan pengukuran sistem *solar panel* terhubung GTI saat tidak terhubung beban dan saat terhubung beban.

3.2.3 Diagram Garis Rangkaian Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel

Rangkaian ini dibuat untuk mengetahui unjuk kerja sistem dan karakteristik *solar panel* saat terhubung dua *grid tie inverter* yang dihubung paralel. GTI yang digunakan memiliki kapasitas yang berbeda, yaitu GTI 1000 Watt dan GTI 500 Watt. Penggunaan GTI yang berbeda kapasitas ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik pembagian arus pada masing-masing GTI saat sistem terhubung beban. Selain itu, hal ini dilakukan karena pada sistem *solar panel* yang telah dibuat, GTI yang digunakan adalah GTI berkapasitas 1000 Watt, sedangkan GTI yang tersedia untuk dihubung paralel hanya berkapasitas 500 Watt. Berikut ini diagram garis yang menunjukkan skema rangkaian sistem *solar panel* yang terhubung dua GTI yang dihubung paralel, yaitu :



Gambar 3.5 Diagram garis rangkaian sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel tanpa beban



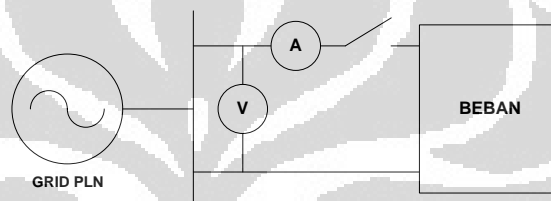
Gambar 3.6 Diagram garis rangkaian sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel berbeban

Diagram blok pada gambar 3.5 dan gambar 3.6 secara berturut-turut menunjukkan skema rancangan pengukuran sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel saat tidak terhubung beban dan saat terhubung beban.

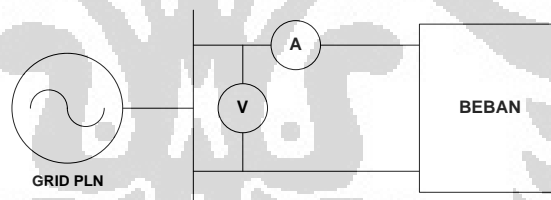
3.3 RANGKAIAN PENGUKURAN HARMONISA SISTEM *SOLAR PANEL*

Pemodelan rangkaian pengukuran harmonisa ini dibuat sebagai acuan untuk mempermudah proses merangkai rangkaian pengukuran sebenarnya sehingga meminimalisasi kesalahan yang mungkin terjadi. Berikut ini gambar model rangkaian pengukuran harmonisa sistem *solar panel*, yaitu :

3.3.1 Pengukuran Harmonisa Sistem Jaringan PLN



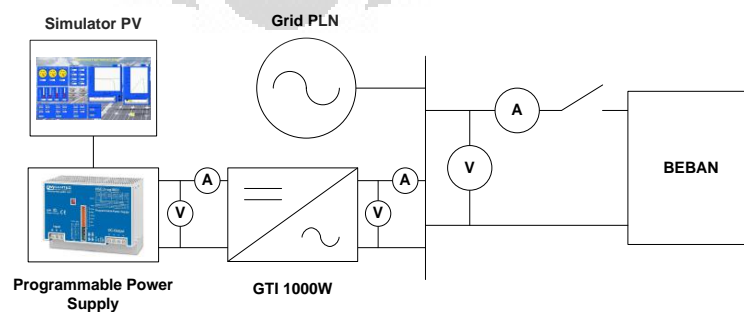
Gambar 3.7 Rangkaian pengukuran sistem jaringan PLN tidak terhubung beban



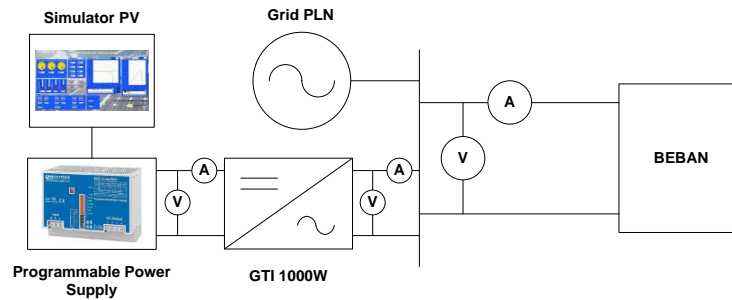
Gambar 3.8 Rangkaian pengukuran sistem jaringan PLN dan terhubung beban

Pada pengukuran ini, alat ukur diletakan diantara *grid* PLN dan beban.

3.3.2 Pengukuran Harmonisa Sistem *Solar Panel* Terhubung GTI



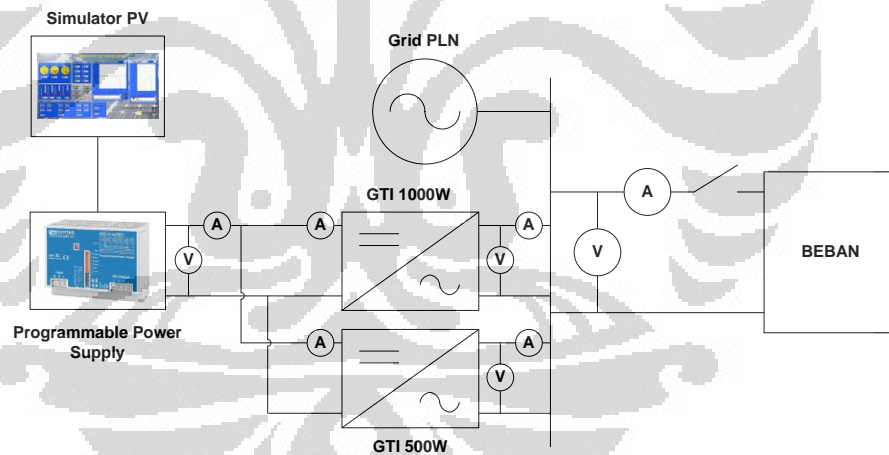
Gambar 3.9 Rangkaian pengukuran sistem *solar panel* terhubung GTI tanpa beban



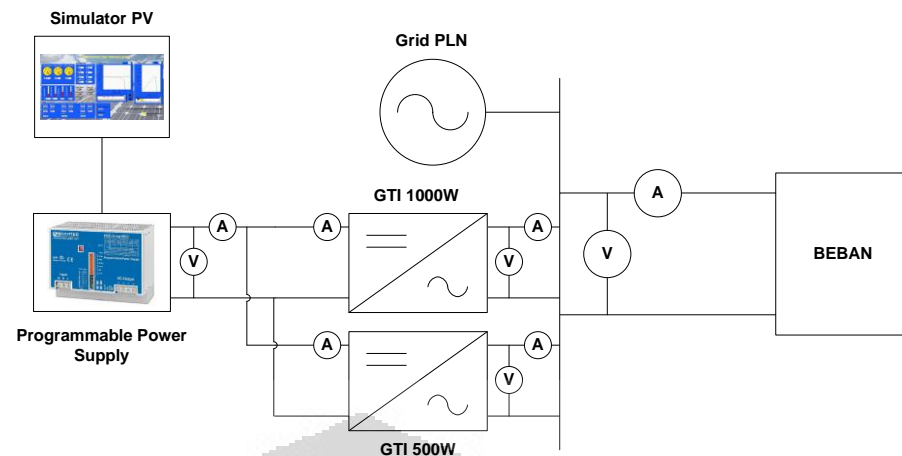
Gambar 3.10 Rangkaian pengukuran sistem *solar panel* terhubung GTI berbeban

Kedua gambar rangkaian diatas secara berturut-turut menunjukkan rangkaian pengukuran sistem *solar panel* yang terhubung GTI saat tanpa beban dan saat berbeban. Alat ukur yang digunakan dipasang diantara *programmable power supply* dan GTI, antara GTI dan jaringan PLN, serta antara jaringan PLN dan beban. Alat ukur yang dipasang diantara jaringan PLN dan beban adalah *Power quality analyzer* HIOKI 3169-20.

3.3.3 Pengukuran Harmonisa Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel



Gambar 3.11 Rangkaian pengukuran sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel tanpa beban



Gambar 3.12 Rangkaian pengukuran sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel tanpa beban

Kedua gambar rangkaian diatas secara berturut-turut menunjukkan rangkaian pengukuran sistem *solar panel* yang terhubung dua GTI yang diparalelkan saat tanpa beban dan saat berbeban. Alat ukur yang digunakan dipasang diantara *programmable power supply* dan GTI, antara GTI dan jaringan PLN, serta antara jaringan PLN dan beban. Pada sisi antara *programmable power supply* dan GTI terdapat penambahan amperemeter untuk mengukur pembagian arus searah antara GTI 1000 Watt dan GTI 500 Watt. Alat ukur yang dipasang diantara *grid PLN* dan beban adalah *Power Quality Analyzer* HIOKI 3169-20.

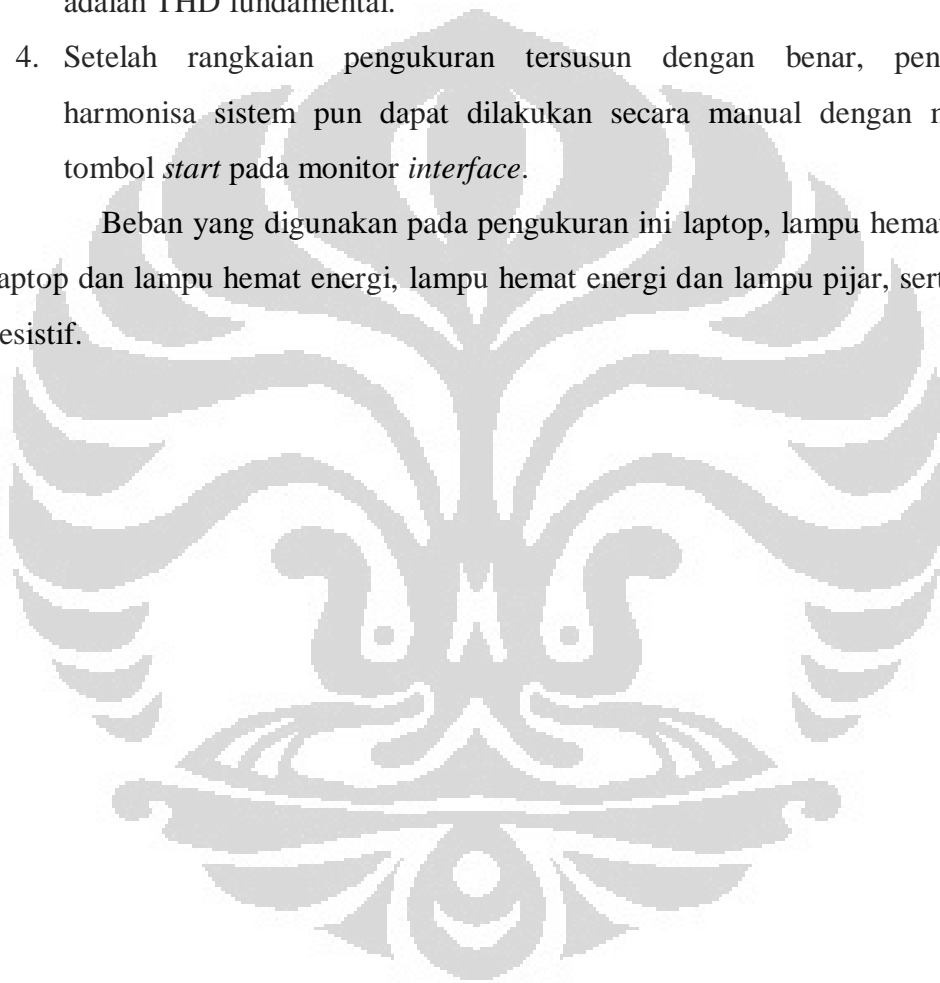
3.4 PENGUKURAN HARMONISA SISTEM SOLAR PANEL

Pengukuran harmonisa sistem *solar panel* saat tidak terhubung beban dan saat berbeban ini dilakukan dengan menggunakan alat *Power Quality Analyzer* bermerk HIOKI 3169-20. Alat ini dapat merekam data harmonisa sistem sesuai dengan rentang waktu yang telah diatur sebelumnya. Pada penelitian ini, pengukuran dilakukan selama 10 menit dengan interval pengukuran harmonisa setiap 1 menit sekali. Berikut ini penjelasan mengenai tahapan pengukuran harmonisa menggunakan alat *Power quality analyzer* Hioki 3169-20, yaitu :

1. Menyiapkan seperangkat alat *Power quality analyzer* yang terdiri dari monitor *interface*, dua buah kabel pengukur tegangan, kabel *clamp* arus, serta kabel daya untuk menghidupkan alat ini.

2. Menghubungkan kabel pengukur tegangan dan kable *clamp* arus ke kabel kontaktor yang dipasang pada sisi keluaran sistem sesuai dengan aturan pengukuran.
3. Melakukan pengaturan rentang nilai parameter sistem yang akan diukur mulai dari tegangan, arus, jenis THD sistem, waktu pengukuran, dan interval pengukuran harmonisa hingga pengaturan penyimpanan data hasil pengukuran. Pada penelitian ini pengukuran jenis THD yang digunakan adalah THD fundamental.
4. Setelah rangkaian pengukuran tersusun dengan benar, pengukuran harmonisa sistem pun dapat dilakukan secara manual dengan menekan tombol *start* pada monitor *interface*.

Beban yang digunakan pada pengukuran ini laptop, lampu hemat energi, laptop dan lampu hemat energi, lampu hemat energi dan lampu pijar, serta beban resistif.



BAB 4

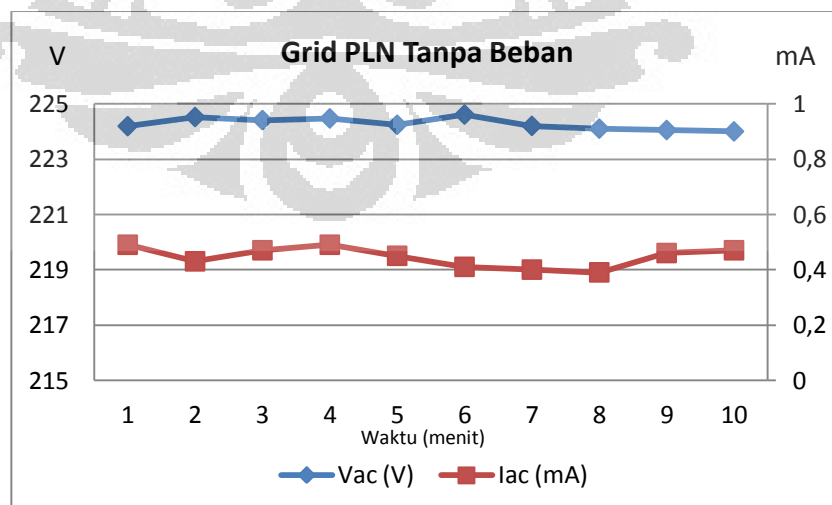
HASIL PENGUKURAN DAN ANALISIS

Bagian ini akan menunjukkan hasil pengukuran sistem *solar panel* terhubung jaringan tegangan rendah PLN, yaitu parameter-parameter harmonisa yang meliputi tegangan, arus, daya, THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada sisi keluaran sistem yang terhubung ke beban. Hasil pengukuran parameter-parameter harmonisa ini diperoleh dari tiga macam pengukuran, yaitu pengukuran sistem jaringan PLN tanpa beban dan berbeban, pengukuran sistem *solar panel* terhubung satu GTI tanpa beban dan berbeban, serta sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel berkapasitas 1000 Watt dan 500 Watt tanpa beban dan berbeban.

4.1 HASIL PENGUKURAN SISTEM JARINGAN PLN

4.1.1 Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Tanpa Beban

Pengukuran sistem jaringan PLN tanpa beban dilakukan tanpa menghubungkan sistem *solar panel* ke simulator *solar panel*, GTI, dan beban. Oleh karena itu, hasil pengukuran ini secara tidak langsung menunjukkan karakteristik sistem jaringan PLN. Pengukuran parameter harmonisa sistem ini dilakukan di gedung *Engineering Center* FTUI selama 10 menit dengan selang waktu pengukuran 1 menit. Alat ukur yang digunakan pada pengukuran ini adalah *Power Quality Analyzer* HIOKI 3169-20. Hasil pengukuran tegangan dan arus sistem jaringan PLN tanpa beban ditunjukkan pada grafik berikut ini, yaitu :

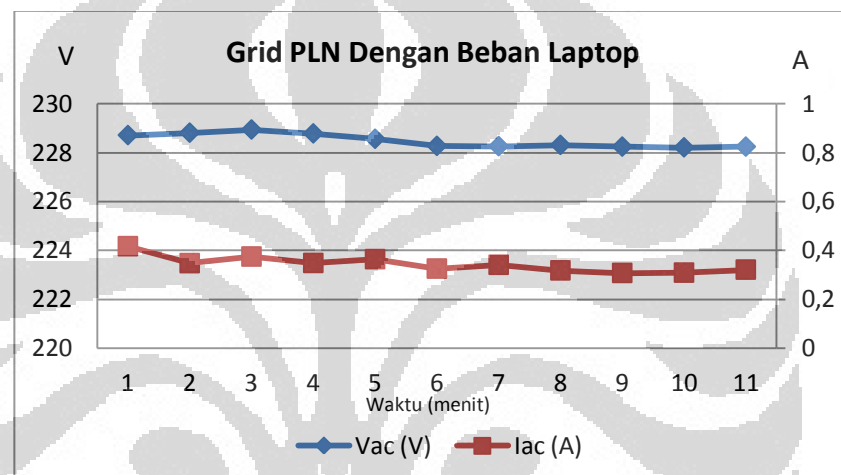


Gambar 4.1 Grafik tegangan dan arus sistem jaringan PLN tanpa beban

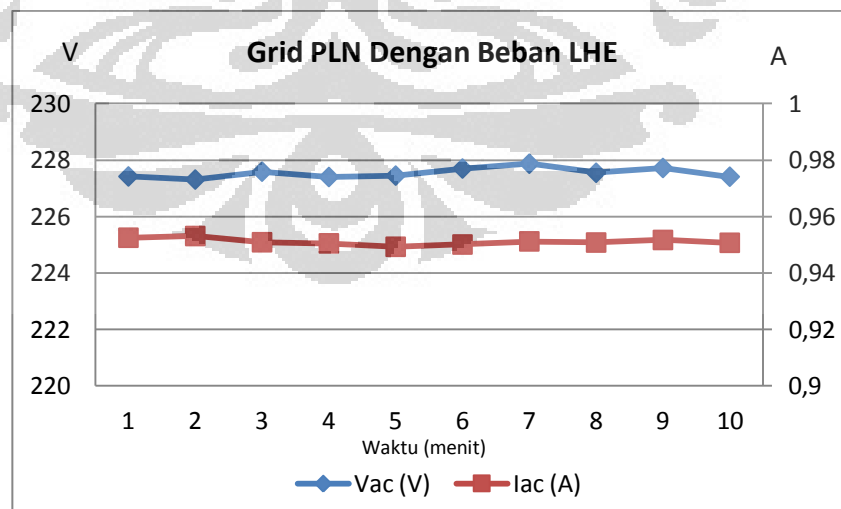
Berdasarkan grafik diatas terlihat tegangan yang terukur lebih dari 224 V, hal ini terjadi karena pengukuran dilakukan pada saat hari libur. Sementara itu, arus yang terukur bernilai sangat kecil berkisar antara 0,4 mA sampai 0,5 mA, padahal seharusnya bernilai nol.

4.1.2 Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban

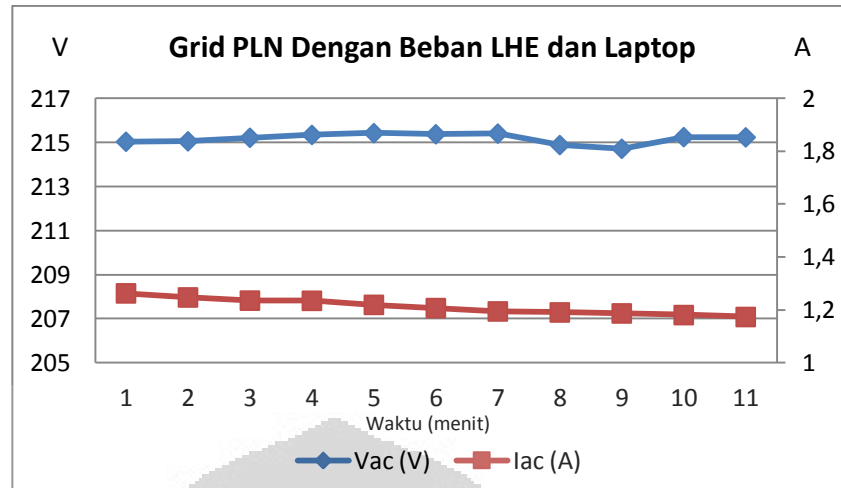
Pada pengukuran ini, sistem jaringan PLN dihubungkan langsung ke beban. Beban yang digunakan berbeda pada tiap pengukuran. Hasil pengukuran tegangan dan arus sistem jaringan PLN dengan berbagai jenis beban ditunjukkan pada grafik berikut ini, yaitu :



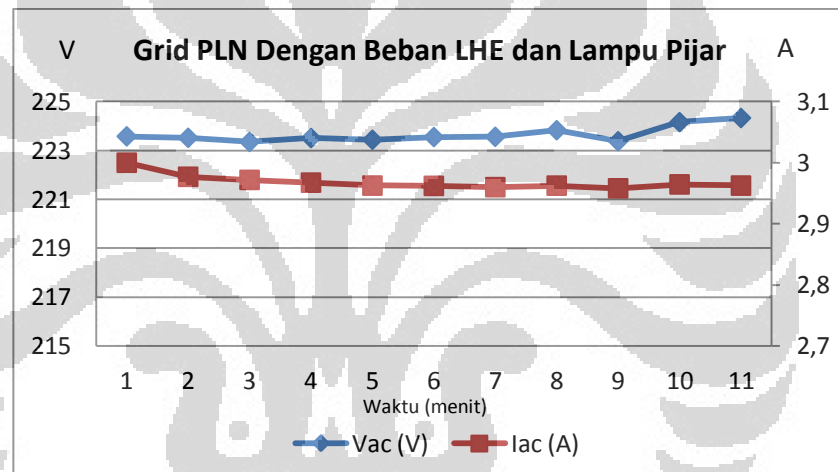
Gambar 4.2 Grafik tegangan dan arus sistem jaringan PLN dengan beban laptop



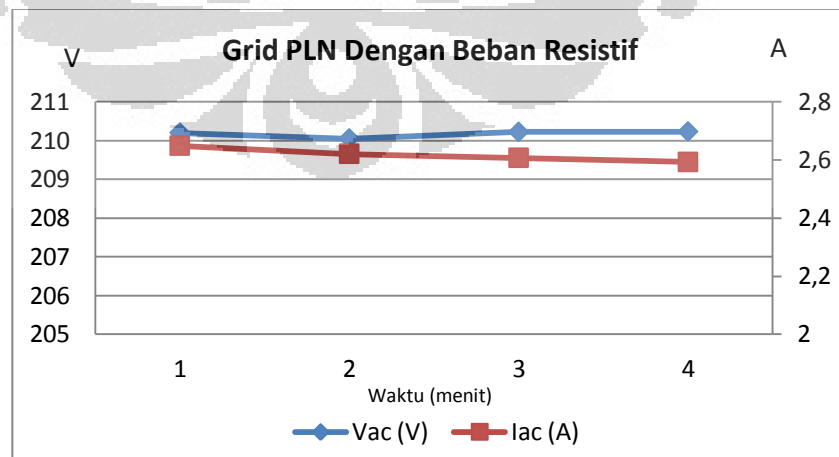
Gambar 4.3 Grafik tegangan dan arus sistem jaringan PLN dengan beban lampu hemat energi



Gambar 4.4 Grafik tegangan dan arus sistem jaringan PLN dengan beban lampu hemat energi dan laptop



Gambar 4.5 Grafik tegangan dan arus sistem *grid* PLN dengan beban lampu hemat energi dan lampu pijar



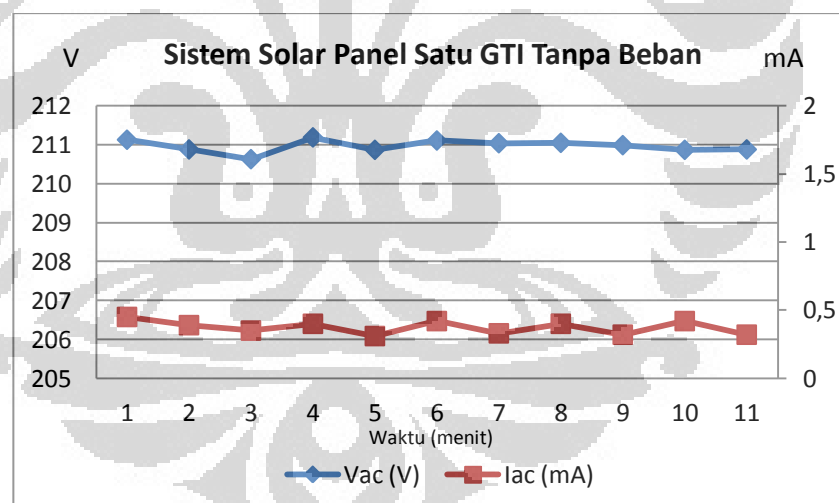
Gambar 4.6 Grafik tegangan dan arus sistem jaringan PLN dengan beban resistif

Pengukuran sistem jaringan PLN berbeban ini tidak dilakukan pada waktu yang sama, sehingga dari grafik pengukuran tegangan berbagai jenis beban diatas menunjukkan beberapa nilai tegangan keluaran yang terukur lebih dari 220 V. Besarnya nilai arus keluaran yang terukur menunjukkan besaran daya pada beban yang digunakan. Grafik tegangan dan arus diatas menunjukkan urutan beban berdaya kecil sampai beban yang memiliki daya diatas 500 Watt.

4.2 HASIL PENGUKURAN SISTEM SOLAR PANEL TERHUBUNG GTI

4.2.1 Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung GTI Tanpa Beban

Pengukuran sistem *solar panel* terhubung GTI tanpa beban dilakukan dengan menghubungkan sistem *solar panel* ke simulator *solar panel* dan GTI dengan keluaran yang tidak terhubung beban. GTI yang digunakan memiliki kapasitas 1000 Watt. Hasil pengukuran ini secara tidak langsung menunjukkan karakteristik sistem *solar panel* dan karakteristik inverter. Hasil pengukuran tegangan dan arus sistem *solar panel* terhubung GTI tanpa beban ditunjukkan pada grafik berikut ini, yaitu :

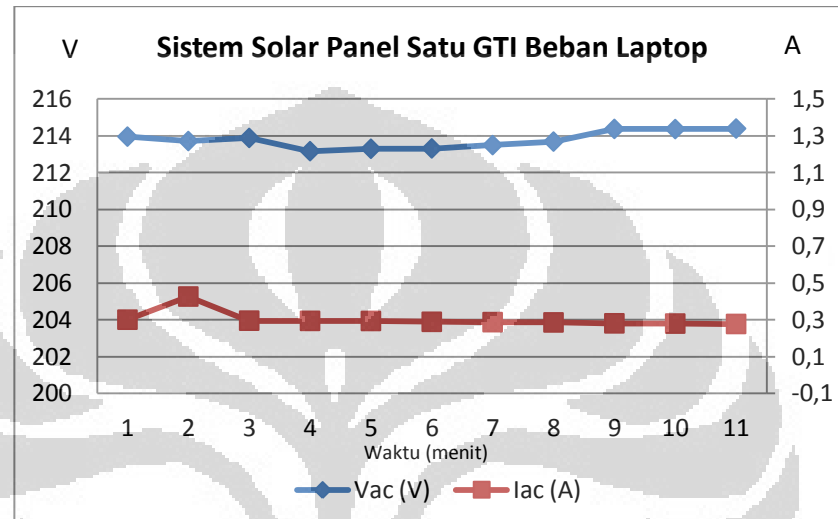


Gambar 4.7 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* satu GTI tanpa beban

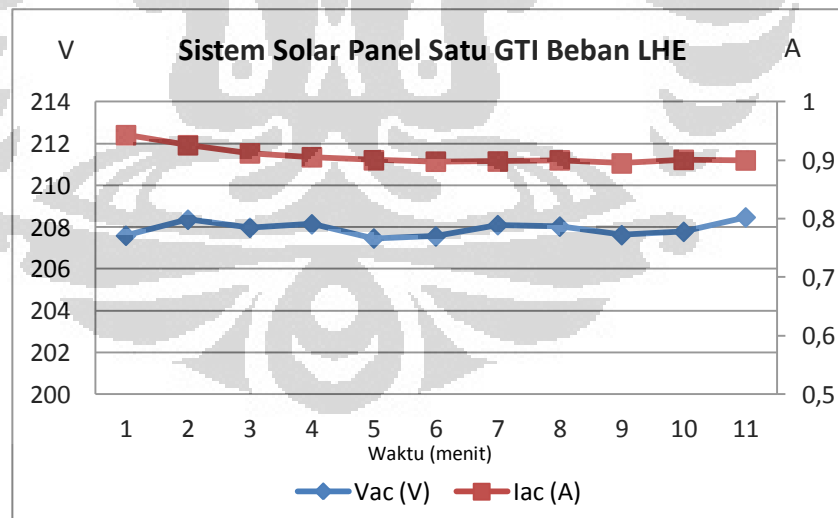
Berdasarkan grafik diatas terlihat tegangan yang terukur kurang dari 220 V, hal ini terjadi karena pengukuran dilakukan pada saat jam kerja. Sementara itu, arus yang terukur bernilai sangat kecil berkisar antara 0,3 mA sampai 0,5 mA.

4.2.2 Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung GTI Berbeban

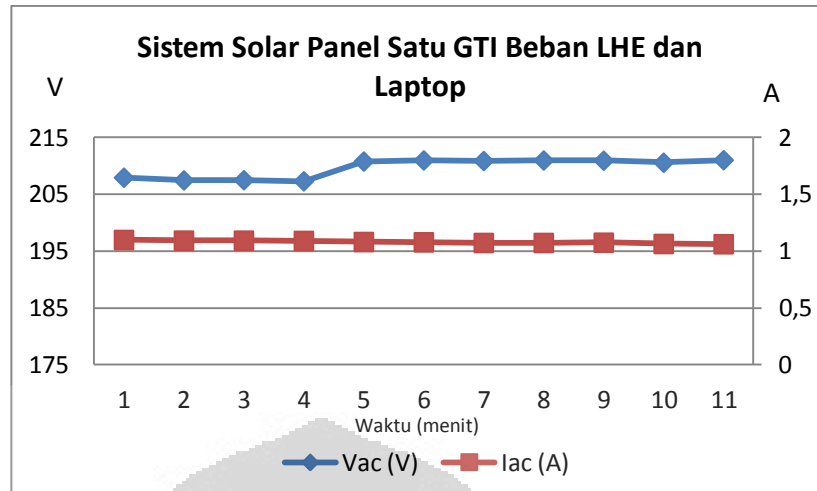
Pada pengukuran sistem ini, daya yang disuplai untuk beban berasal langsung dengan sistem *solar panel* yang telah terpasang GTI. Beban yang digunakan berbeda pada tiap pengukuran. Hasil pengukuran tegangan dan arus sistem *solar panel* terhubung GTI dengan berbagai jenis beban ditunjukkan pada grafik berikut ini, yaitu :



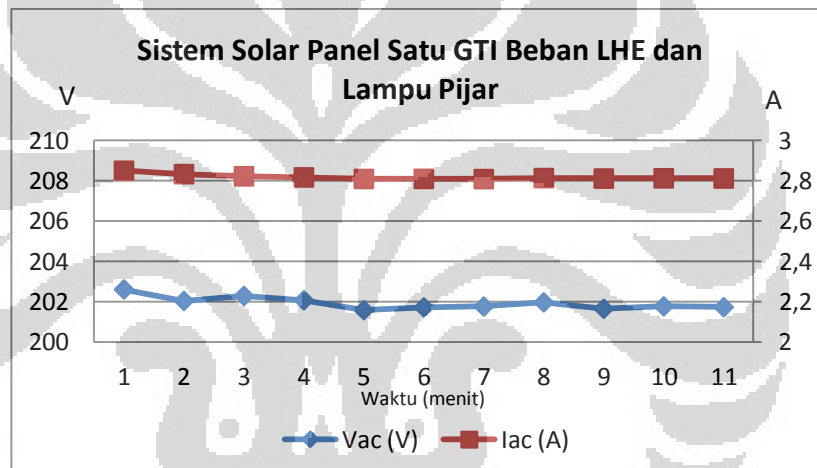
Gambar 4.8 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* satu GTI dengan beban laptop



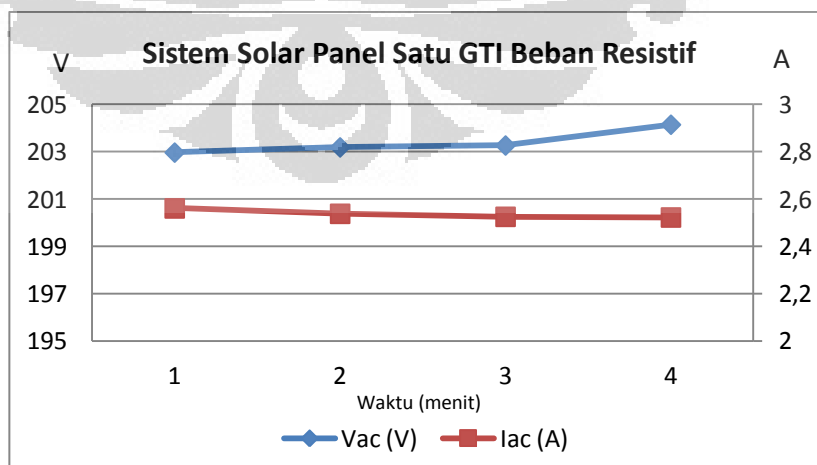
Gambar 4.9 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* satu GTI dengan beban lampu hemat energi



Gambar 4.10 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* satu GTI dengan beban lampu hemat energi dan laptop



Gambar 4.11 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* satu GTI dengan beban lampu hemat energi dan lampu pijar



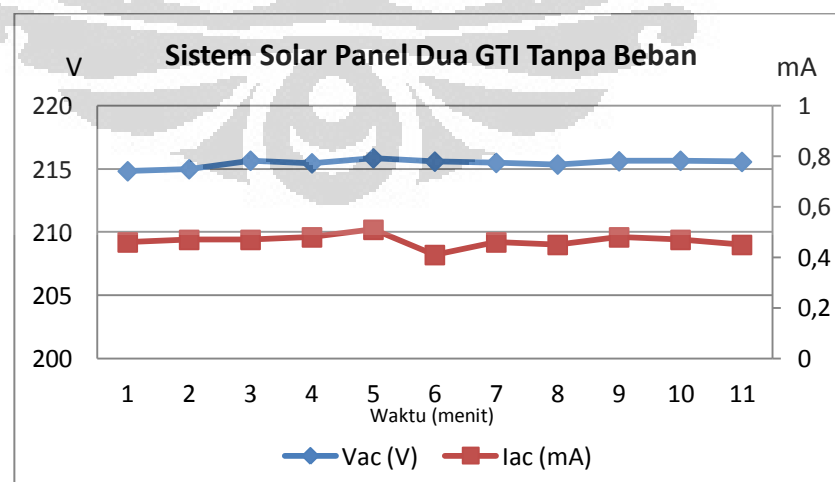
Gambar 4.12 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* satu GTI dengan beban resistif

Pengukuran sistem *solar panel* terhubung satu GTI berkapasitas 1000 Watt berbeban ini dilakukan pada hari kerja tetapi pada jam yang berbeda sehingga dari grafik pengukuran berbagai jenis beban diatas terlihat semua nilai tegangan keluaran yang terukur bernilai kurang dari 220 V. Besarnya nilai arus keluaran yang terukur menunjukkan besaran daya pada beban yang digunakan. Grafik tegangan dan arus diatas menunjukkan urutan beban berdaya kecil sampai beban yang memiliki daya diatas 500 Watt.

4.3 HASIL PENGUKURAN SISTEM *SOLAR PANEL* TERHUBUNG DUA GTI PARALEL

4.3.1 Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Tanpa Beban

Pengukuran sistem ini menggunakan dua buah GTI dengan kapasitas 1000 Watt dan 500 Watt. Penggunaan GTI yang berbeda kapasitas ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik pembagian arus pada masing-masing GTI saat sistem terhubung beban. Selain itu, hal ini dilakukan karena pada sistem *solar panel* yang telah dibuat, GTI yang digunakan adalah GTI berkapasitas 1000 Watt, sedangkan GTI yang tersedia untuk dihubung paralel hanya berkapasitas 500 Watt. Pengukuran ini tidak menghubungkan beban ke sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel. Hasil pengukuran tegangan dan arus sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel tanpa beban ditunjukkan pada grafik berikut ini, yaitu :

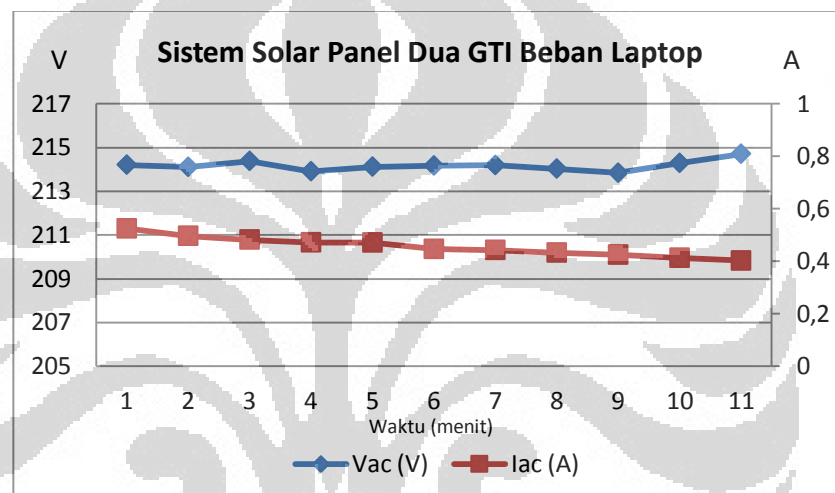


Gambar 4.13 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* dua GTI tanpa beban

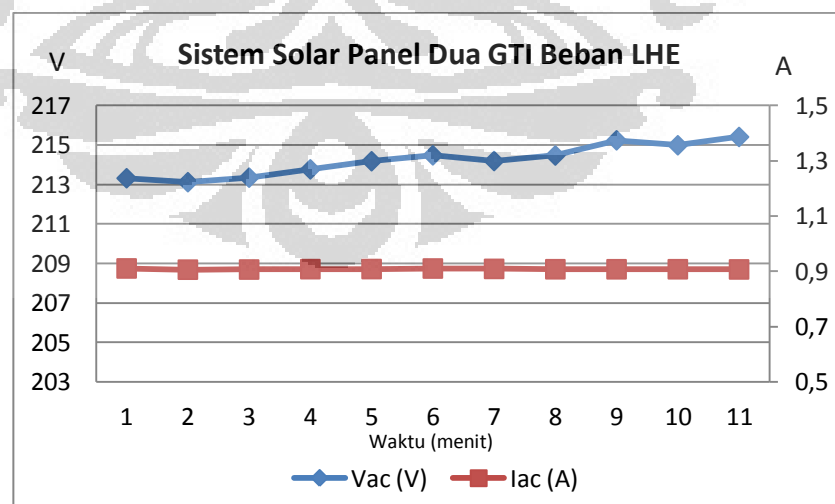
Berdasarkan grafik diatas terlihat tegangan yang terukur kurang dari 220 V, hal ini terjadi karena pengukuran dilakukan pada saat jam kerja. Sementara itu, arus yang terukur bernilai sangat kecil berkisar antara 0,4 mA sampai 0,5 mA.

4.3.2 Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban

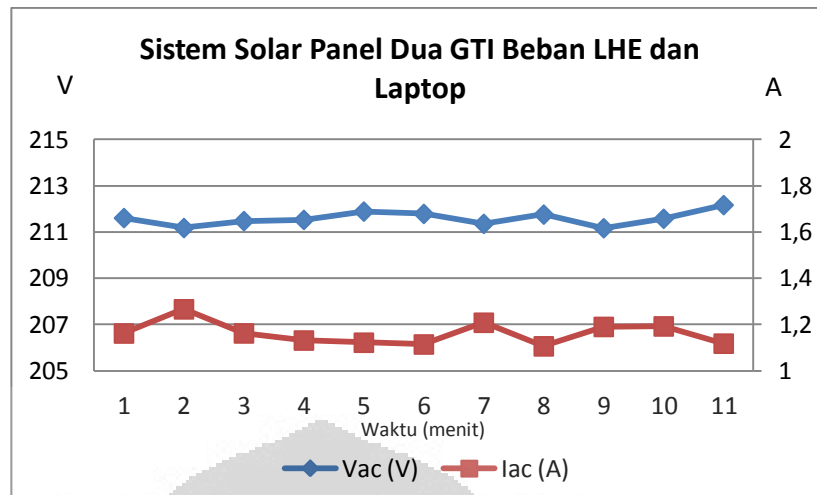
Pada pengukuran sistem ini, daya yang disuplai untuk beban berasal langsung dengan sistem *solar panel* yang telah terpasang dua GTI paralel. Beban yang digunakan berbeda pada tiap pengukuran. Hasil pengukuran tegangan dan arus sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel dengan berbagai jenis beban ditunjukkan pada grafik berikut ini, yaitu :



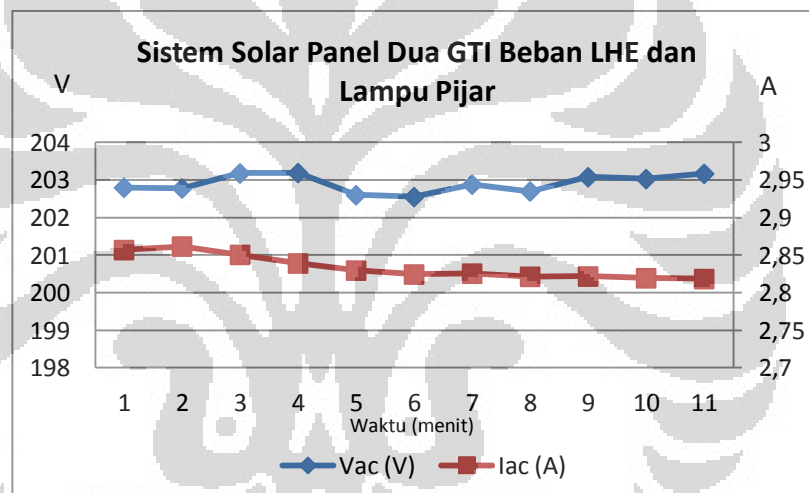
Gambar 4.14 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* dua GTI beban laptop



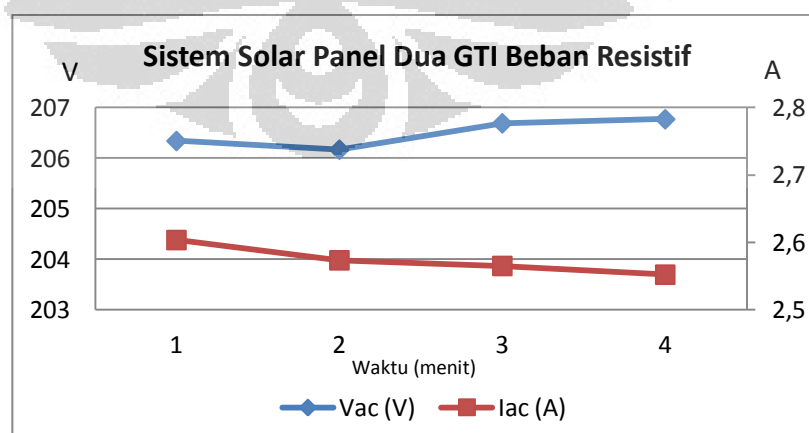
Gambar 4.15 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* dua GTI beban lampu hemat energi



Gambar 4.16 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* dua GTI beban lampu hemat energi dan laptop



Gambar 4.17 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* dua GTI beban lampu hemat energi dan lampu pijar



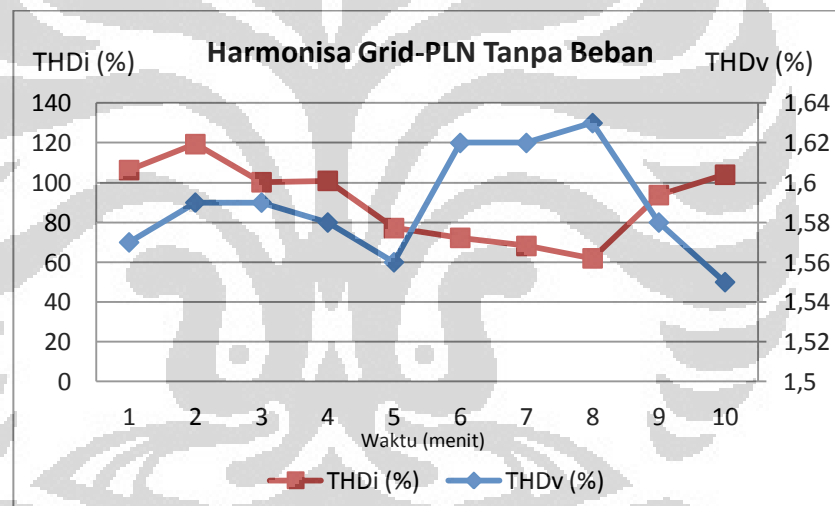
Gambar 4.18 Grafik tegangan dan arus sistem *solar panel* dua GTI beban resistif

Seperti halnya pengukuran sistem *solar panel* terhubung satu GTI berkapasitas 1000 W berbeban, pengukuran sistem ini juga dilakukan pada hari kerja tetapi pada jam yang berbeda sehingga dari grafik pengukuran berbagai jenis beban diatas terlihat semua nilai tegangan keluaran yang terukur bernilai kurang dari 220 V. Besarnya nilai arus keluaran yang terukur menunjukkan besaran daya pada beban yang digunakan. Grafik tegangan dan arus diatas menunjukkan urutan beban berdaya kecil sampai beban yang memiliki daya diatas 500 Watt.

4.4 ANALISIS HASIL PENGUKURAN SISTEM TANPA BEBAN

4.4.1 Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Tanpa Beban

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem jaringan PLN tanpa beban selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.19 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN tanpa beban

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 1,59% dan THD arus sebesar 90,45%. Nilai THD tegangan rata-rata sistem yang terukur masih di bawah standar batas harmonisa tegangan IEEE sebesar 5%, sehingga dapat disimpulkan sistem jaringan PLN yang ada sudah baik.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-2, tegangan fundamental (V_1) = 224,50 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{224,50} (12,7868)^{1/2} \times 100\% = 1,5928\%$$

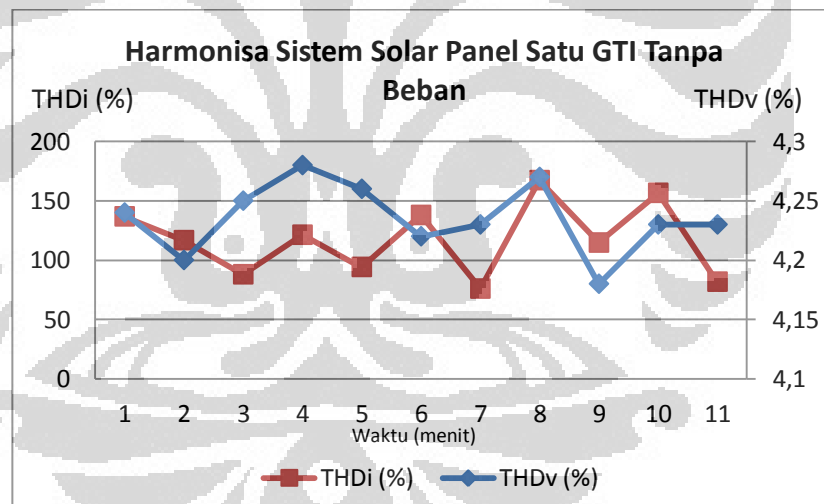
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-2, arus fundamental (A_1) = 0,23 mA dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,23} (0,0764)^{1/2} \times 100\% = 120,1763\%$$

4.4.2 Analisis Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Satu GTI Tanpa Beban

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung satu GTI tanpa beban selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.20 Grafik THD tegangan dan THD arus *grid-connected* PV satu GTI tanpa beban

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 4,24% dan THD arus sebesar 117,38%. Nilai THD tegangan rata-rata sistem yang terukur masih di bawah standar batas harmonisa tegangan IEEE sebesar 5%, sehingga dapat disimpulkan sistem *solar panel* terhubung satu GTI sudah baik.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-8, tegangan fundamental (V_1) = 210,86 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{210,86} (81,169)^{1/2} \times 100\% = 4,2727\%$$

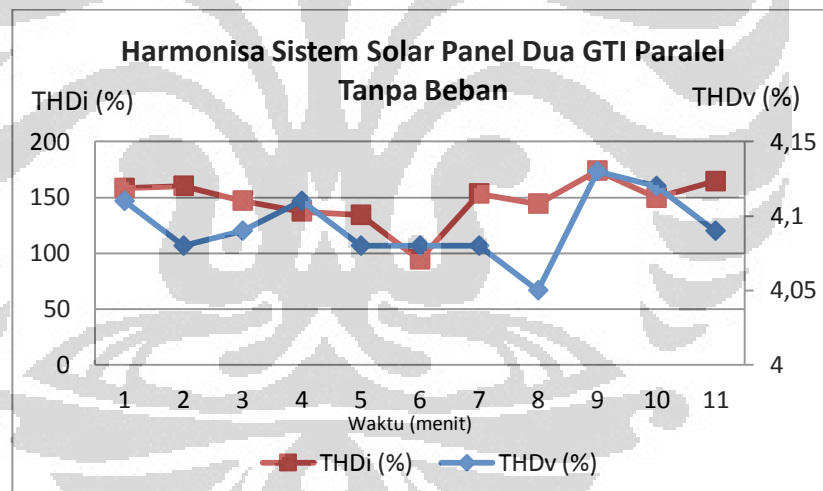
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-8, arus fundamental (A_1) = 0,17 mA dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,17} (0,0792)^{1/2} \times 100\% = 165,5541\%$$

4.4.3 Analisis Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Tanpa Beban

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel tanpa beban selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.21 Grafik THD tegangan dan THD arus *solar panel* dua GTI paralel tanpa beban

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 4,09% dan THD arus sebesar 146,97%. Nilai THD tegangan rata-rata sistem yang terukur masih di bawah standar batas harmonisa tegangan IEEE sebesar 5%, sehingga dapat disimpulkan sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel sudah baik.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-9, tegangan fundamental (V_1) = 215,44 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{215,44} (78,6678)^{1/2} \times 100\% = 4,1169\%$$

Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-9, arus fundamental (A_1) = 0,2 mA dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

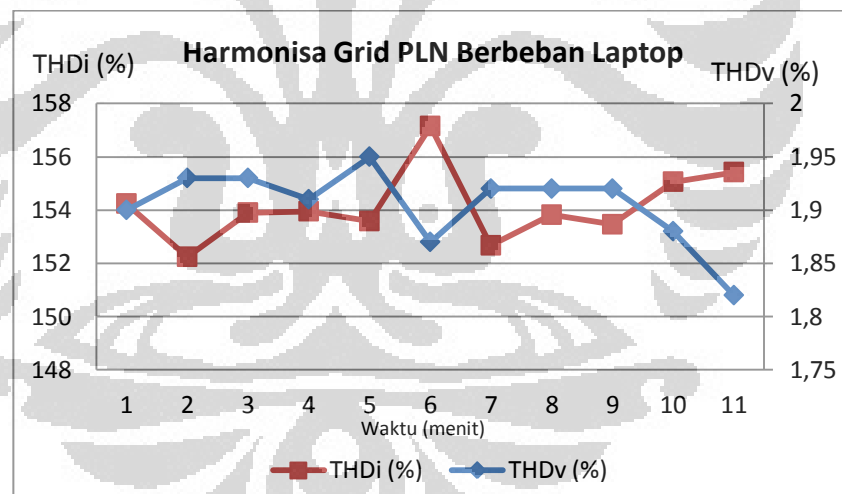
$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,2} (0,1254)^{1/2} \times 100\% = 177,0593\%$$

4.5 ANALISIS HASIL PENGUKURAN SISTEM BERBEBAN LAPTOP

4.5.1 Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban Laptop

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem jaringan PLN berbeban laptop selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.22 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN berbeban laptop

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 1,9% dan THD arus sebesar 154,14%. Nilai THD tegangan rata-rata sistem yang terukur masih di bawah standar batas harmonisa tegangan IEEE sebesar 5%, sehingga dapat disimpulkan sistem jaringan PLN yang ada sudah baik. Nilai THD arus rata-rata lebih dari 150% karena beban yang digunakan adalah beban yang banyak terdapat komponen elektronika dayanya.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-6, tegangan fundamental (V_1) = 228,23 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{228,23} (18,183)^{1/2} \times 100\% = 1,8684\%$$

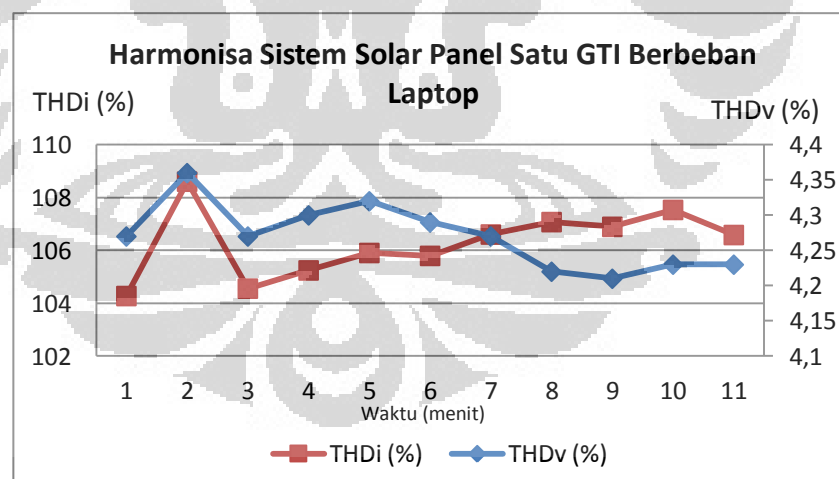
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-6, arus fundamental (A_1) = 0,1742 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,1742} (0,074953)^{1/2} \times 100\% = 157,1619\%$$

4.5.2 Analisis Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Satu GTI Berbeban Laptop

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung satu GTI berbeban laptop selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.23 Grafik THD tegangan dan THD arus *solar panel* satu GTI berbeban laptop

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 4,27% dan THD arus sebesar 106,29%. Nilai THD arus rata-rata sistem ini lebih kecil daripada sistem grid PLN berbeban laptop dengan penurunan persentase harmonisa sebesar

31,04%. Hal ini terjadi karena saat beban yang digunakan lebih kecil dari kapasitas GTI, seluruh daya yang disuplai ke beban berasal dari GTI itu sendiri.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-2, tegangan fundamental (V_1) = 213,5 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{213,5} (86,475)^{1/2} \times 100\% = 4,3556\%$$

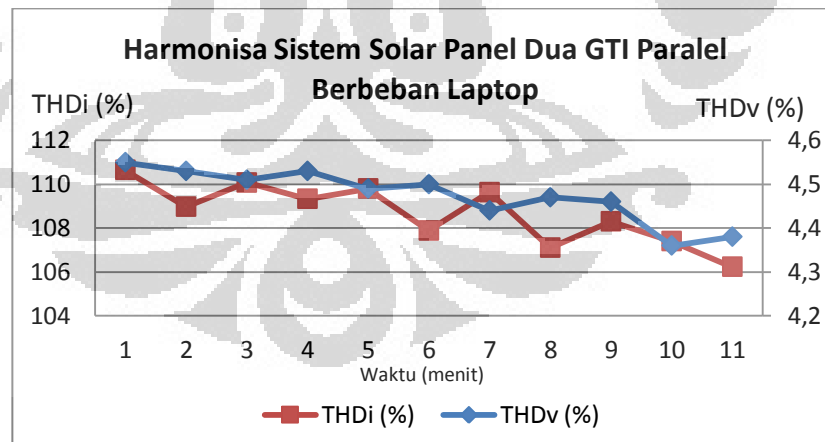
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-2, arus fundamental (A_1) = 0,2885 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,2885} (0,09817)^{1/2} \times 100\% = 108,6035\%$$

4.5.3 Analisis Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban Laptop

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel berbeban laptop selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.24 Grafik THD tegangan dan THD arus *solar panel* dua GTI paralel berbeban laptop

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 4,47% dan THD arus sebesar 108,67%. Nilai THD arus rata-rata sistem ini lebih kecil daripada sistem grid PLN berbeban laptop dengan penurunan persentase harmonisa sebesar

29,49%. Hal ini terjadi karena saat beban yang digunakan lebih kecil dari kapasitas dua GTI yang diparalelkan, seluruh daya yang disuplai ke beban berasal dari dua GTI itu sendiri.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-1, tegangan fundamental (V_1) = 213,98 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{213,98} (94,6363)^{1/2} \times 100\% = 4,5463\%$$

Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-1, arus fundamental (A_1) = 0,3516 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

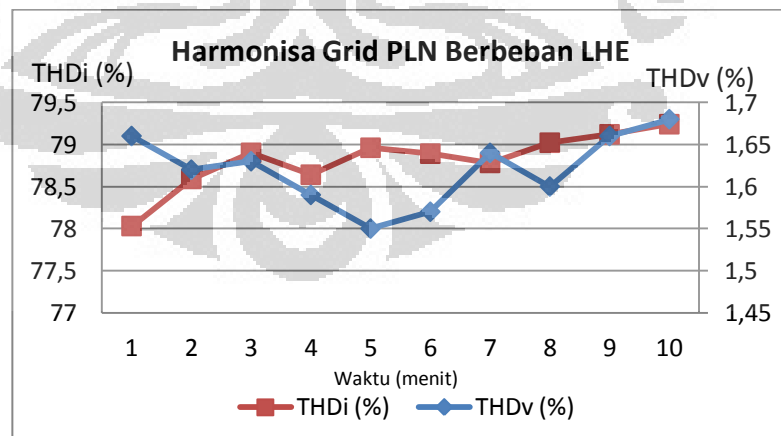
$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,3516} (0,151333)^{1/2} \times 100\% = 110,6414\%$$

4.6 ANALISIS HASIL PENGUKURAN SISTEM BERBEBAN LAMPU HEMAT ENERGI (LHE)

4.6.1 Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban LHE

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem jaringan PLN berbeban lampu hemat energi, yaitu :



Gambar 4.25 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN berbeban LHE

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 1,62% dan THD arus sebesar 78,82%.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-10, tegangan fundamental (V_1) = 227,38 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{227,38} (14,6791)^{1/2} \times 100\% = 1,685\%$$

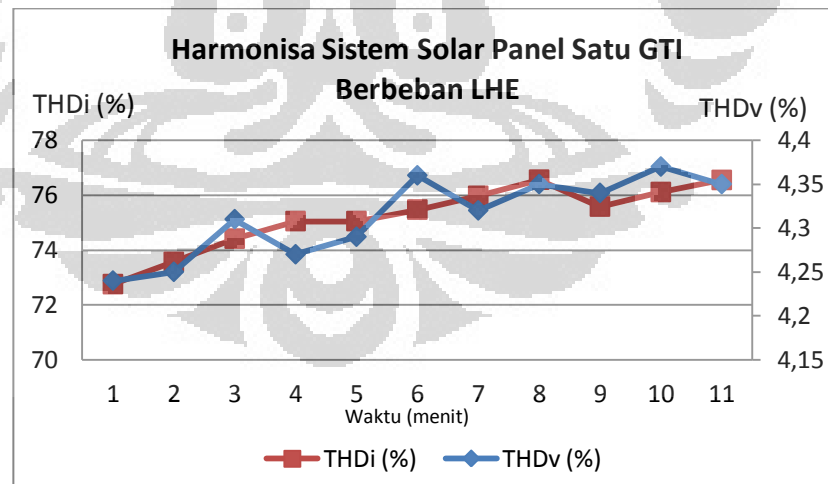
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-10, arus fundamental (A_1) = 0,7451 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,7451} (0,348585)^{1/2} \times 100\% = 79,2391\%$$

4.6.2 Analisis Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Satu GTI Berbeban LHE

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung satu GTI berbeban lampu hemat energi selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.26 Grafik THD tegangan dan THD arus *solar panel* satu GTI berbeban LHE

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 4,31% dan THD arus sebesar 75,19%. Nilai THD arus rata-rata sistem ini lebih kecil daripada sistem

grid PLN berbeban lampu hemat energi dengan penurunan persentase harmonisa sebesar 4,3%.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-11, tegangan fundamental (V_1) = 207,83 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{207,83} (81,4629)^{1/2} \times 100\% = 4,3428\%$$

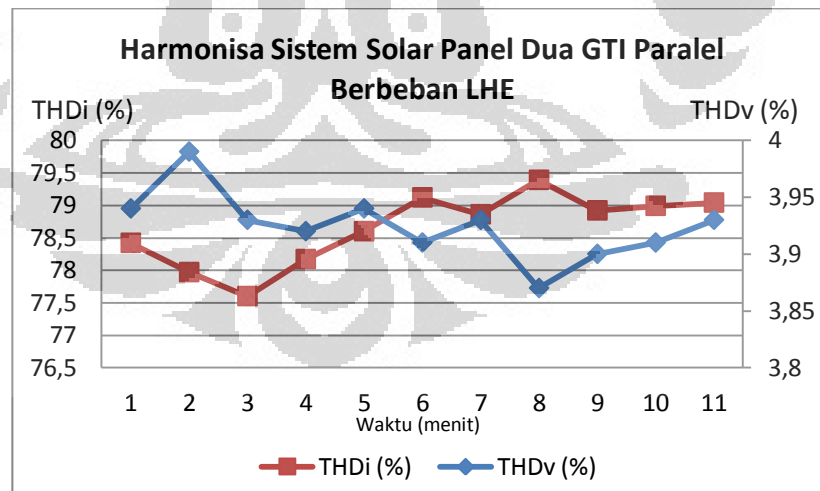
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-11, arus fundamental (A_1) = 0,7142 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,7142} (0,299017)^{1/2} \times 100\% = 76,5646\%$$

4.6.3 Analisis Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel berbeban lampu hemat energi selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.27 Grafik THD tegangan dan THD arus *solar panel* dua GTI paralel berbeban LHE

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 3,92% dan THD arus sebesar 78,64%. Nilai THD arus rata-rata sistem ini lebih kecil daripada sistem

grid PLN berbeban lampu hemat energi dengan penurunan persentase harmonisa sebesar 0,19%.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-8, tegangan fundamental (V_1) = 214,3 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{214,3} (68,7297)^{1/2} \times 100\% = 3,8686\%$$

Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-8, arus fundamental (A_1) = 0,7108 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

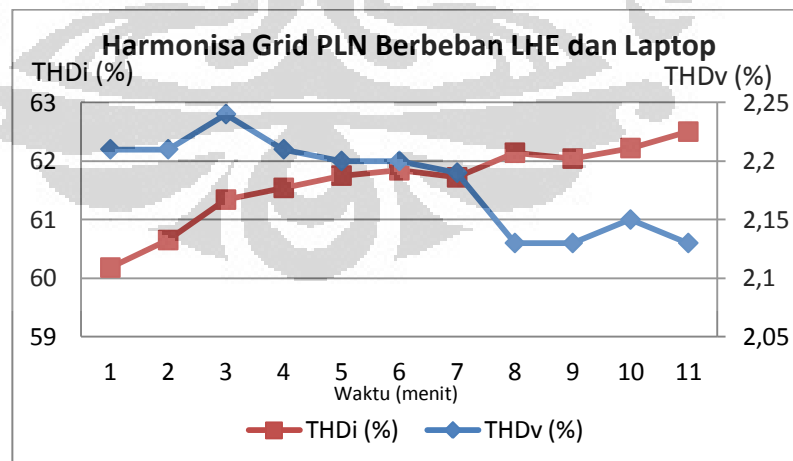
$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,7108} (0,318468)^{1/2} \times 100\% = 79,3936\%$$

4.7 ANALISIS HASIL PENGUKURAN SISTEM BERBEBAN LAMPU HEMAT ENERGI (LHE) DAN LAPTOP

4.7.1 Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban LHE dan Laptop

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem jaringan PLN berbeban lampu hemat energi dan laptop selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.28 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN berbeban lampu hemat energi dan laptop

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 2,18% dan THD arus sebesar 61,63%.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-11, tegangan fundamental (V_1) = 215,19 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{215,19} (21,0934)^{1/2} \times 100\% = 2,1343\%$$

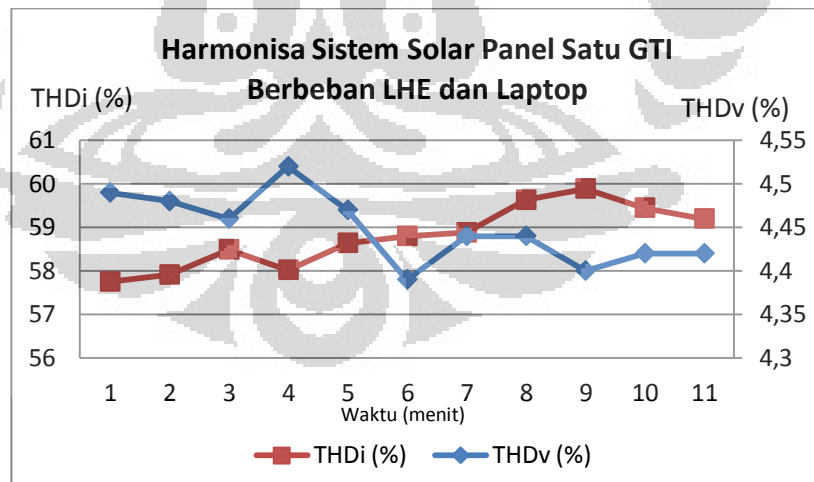
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-11, arus fundamental (A_1) = 0,9953 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,9953} (0,386931)^{1/2} \times 100\% = 62,4975\%$$

4.7.2 Analisis Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Satu GTI Berbeban LHE dan Laptop

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung satu GTI beban lampu hemat energi dan laptop selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.29 Grafik THD tegangan dan THD arus *solar panel* satu GTI berbeban LHE dan laptop

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 4,45% dan THD arus sebesar 58,79%. Nilai THD arus rata-rata sistem ini lebih kecil daripada sistem

grid PLN berbeban lampu hemat energi dengan penurunan persentase harmonisa sebesar 4,61%.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-9, tegangan fundamental (V_1) = 210,74 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{210,74} (86,015)^{1/2} \times 100\% = 4,4009\%$$

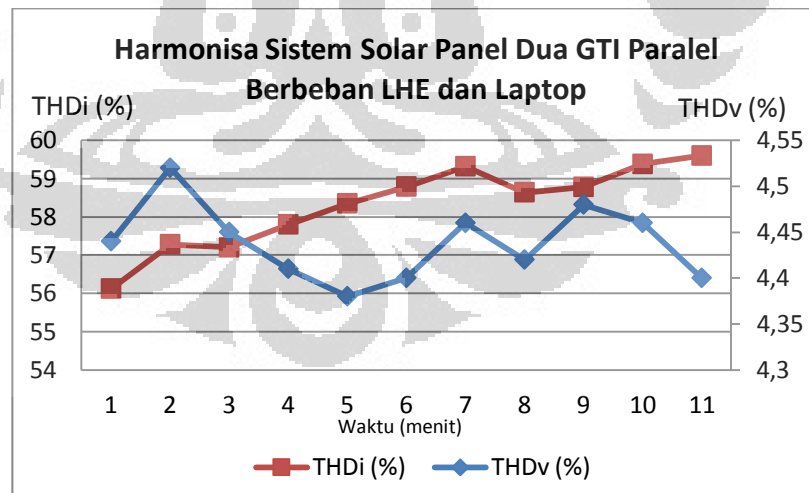
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-9, arus fundamental (A_1) = 0,9225 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,9225} (0,305154)^{1/2} \times 100\% = 59,8816\%$$

4.7.3 Analisis Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE dan Laptop

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel berbeban lampu hemat energi dan laptop selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.30 Grafik THD tegangan dan THD arus *solar panel* dua GTI paralel berbeban LHE dan laptop

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 4,44% dan THD arus sebesar 58,3%. Nilai THD arus rata-rata sistem ini lebih kecil daripada sistem grid

PLN berbeban lampu hemat energi dengan penurunan persentase harmonisa sebesar 5,41%.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-8, tegangan fundamental (V_1) = 211,96 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{211,96} (87,0834)^{1/2} \times 100\% = 4,4026\%$$

Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-8, arus fundamental (A_1) = 0,9601 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

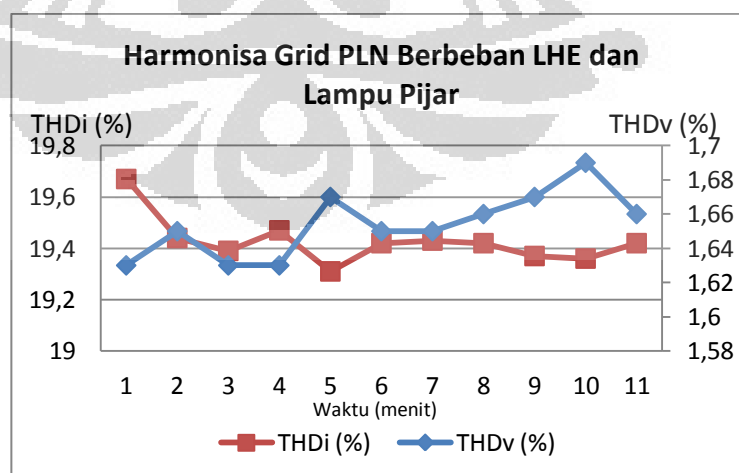
$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{0,9601} (0,327421)^{1/2} \times 100\% = 59,5987\%$$

4.8 ANALISIS HASIL PENGUKURAN SISTEM BERBEBAN LAMPU HEMAT ENERGI (LHE) DAN LAMPU PIJAR

4.8.1 Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban LHE dan Lampu Pijar

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem jaringan PLN berbeban lampu hemat energi dan lampu pijar selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.31 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN berbeban lampu hemat energi dan lampu pijar

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 1,65% dan THD arus sebesar 19,43%.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-1, tegangan fundamental (V_1) = 223,55 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{223,55} (13,3534)^{1/2} \times 100\% = 1,6346\%$$

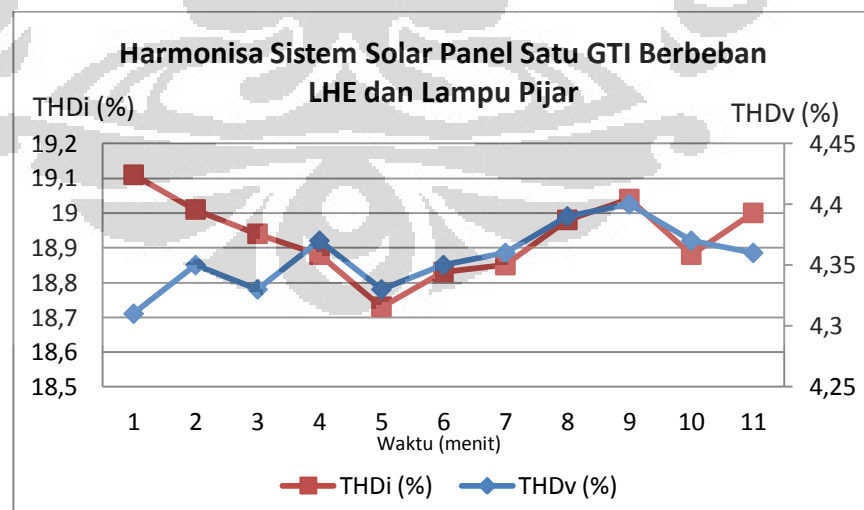
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-1, arus fundamental (A_1) = 2,9435 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{2,9435} (0,335267)^{1/2} \times 100\% = 19,6712\%$$

4.8.2 Analisis Hasil Pengukuran Sistem Solar Panel Terhubung Satu GTI Berbeban LHE dan Lampu Pijar

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung satu GTI beban lampu hemat energi dan lampu pijar selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.32 Grafik THD tegangan dan THD arus *solar panel* satu GTI berbeban LHE dan lampu pijar

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 4,36% dan THD arus sebesar 18,93%. Nilai THD arus rata-rata sistem ini lebih kecil daripada sistem grid PLN berbeban lampu hemat energi dengan penurunan persentase harmonisa sebesar 2,55%.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-1, tegangan fundamental (V_1) = 202,42 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{202,42} (76,0522)^{1/2} \times 100\% = 4,3083\%$$

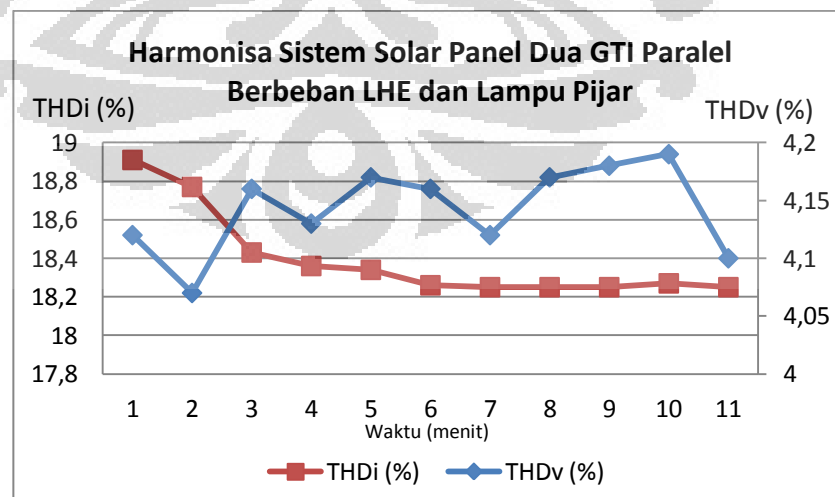
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-9, arus fundamental (A_1) = 2,7997 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{2,7997} (0,286101)^{1/2} \times 100\% = 19,1051\%$$

4.8.3 Analisis Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE dan Lampu Pijar

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel berbeban LHE dan lampu pijar selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.33 Grafik THD tegangan dan THD arus *solar panel* dua GTI paralel berbeban LHE dan lampu pijar

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 4,14% dan THD arus sebesar 18,39%. Nilai THD arus rata-rata sistem ini lebih kecil daripada sistem grid PLN berbeban lampu hemat energi dengan penurunan persentase harmonisa sebesar 5,32%.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-1, tegangan fundamental (V_1) = 202,63 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{202,63} (69,8088)^{1/2} \times 100\% = 4,1234\%$$

Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-1, arus fundamental (A_1) = 2,807 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

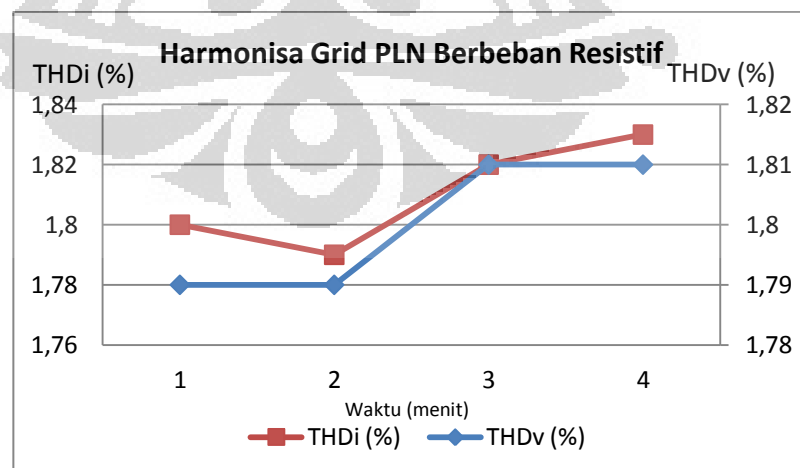
$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{2,807} (0,28189)^{1/2} \times 100\% = 18,9146\%$$

4.9 ANALISIS HASIL PENGUKURAN SISTEM BERBEBAN RESISTIF

4.9.1 Analisis Hasil Pengukuran Sistem Jaringan PLN Berbeban Resistif

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem jaringan PLN berbeban resistif selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.34 Grafik THD tegangan dan THD arus jaringan PLN berbeban resistif

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 1,8% dan THD arus sebesar 1,81%.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-1, tegangan fundamental (V_1) = 210,2 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{210,2} (14,568)^{1/2} \times 100\% = 1,8158\%$$

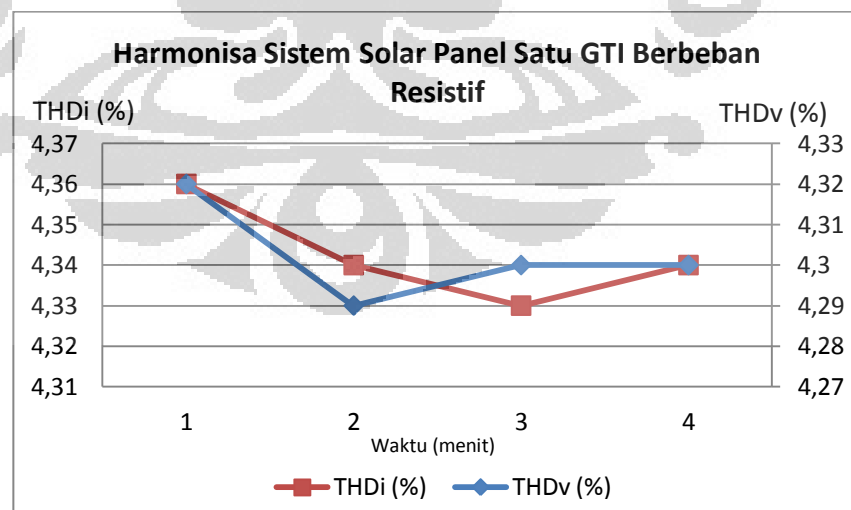
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-1, arus fundamental (A_1) = 2,5921 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir pada bagian akhir skripsi.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{2,5921} (0,002236)^{1/2} \times 100\% = 1,8244\%$$

4.9.2 Analisis Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Satu GTI Berbeban Resistif

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung satu GTI beban resistif selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.35 Grafik THD tegangan dan THD arus *solar panel* satu GTI berbeban resistif

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 4,30% dan THD arus sebesar 4,34%. Nilai THD arus rata-rata sistem ini lebih besar daripada sistem grid PLN berbeban resistif dengan kenaikan persentase harmonisa sebesar 139,94%.

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-1, tegangan fundamental (V_1) = 202,78 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{202,78} (76,5763)^{1/2} \times 100\% = 4,3154\%$$

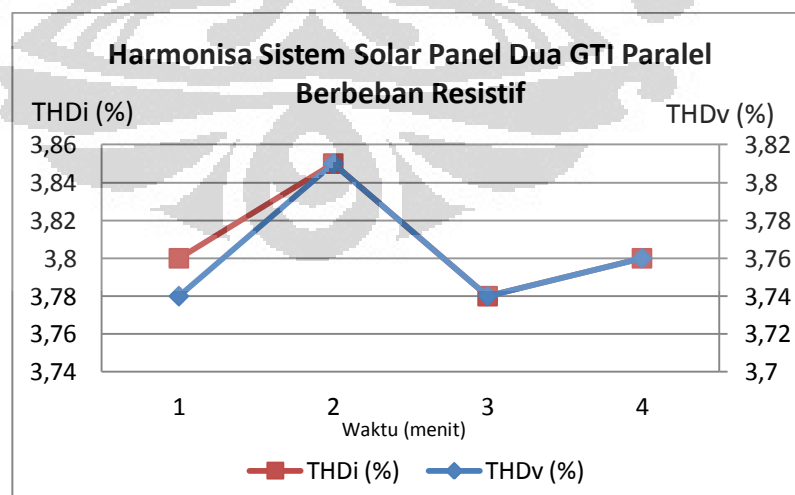
Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-9, arus fundamental (A_1) = 2,7997 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{2,5585} (0,012468)^{1/2} \times 100\% = 4,3644\%$$

4.9.3 Analisis Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban Resistif

Berikut ini nilai persentase THD tegangan dan THD arus yang diperoleh pada pengukuran sistem *solar panel* terhubung dua GTI paralel berbeban resistif selama 10 menit dengan interval 1 menit, yaitu :



Gambar 4.36 Grafik THD tegangan dan THD arus *solar panel* dua GTI paralel berbeban resistif

Nilai persentase rata-rata THD tegangan sebesar 3,76% dan THD arus sebesar 3,81%. Nilai THD arus rata-rata sistem ini lebih besar daripada sistem grid PLN berbeban resistif dengan kenaikan persentase harmonisa sebesar 110,38%

Contoh perhitungan THD tegangan pada menit ke-1, tegangan fundamental (V_1) = 206,01 V dan data tegangan orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{40} V_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_V = \frac{1}{206,01} (61,5003)^{1/2} \times 100\% = 3,8067\%$$

Contoh perhitungan THD arus pada menit ke-1, arus fundamental (A_1) = 0,9601 A dan data arus orde 2 hingga orde 40 terlampir.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)^{1/2} \times 100\%$$

$$THD_I = \frac{1}{2,5718} (0,009798)^{1/2} \times 100\% = 3,8488\%$$

Harmonisa tegangan dan arus yang terbesar pada ketiga jenis pengukuran sistem ini berada pada orde yang berbeda pada setiap pengukuran. Nilai harmonisa tegangan pada sistem jaringan PLN memiliki nilai terbesar pada orde kelima untuk semua jenis beban, sedangkan nilai harmonisa tegangan pada sistem *solar panel* dengan satu GTI maupun dua GTI paralel memiliki nilai terbesar pada orde ketiga untuk semua jenis beban. Nilai harmonisa arus pada sistem jaringan PLN memiliki nilai terbesar pada orde ketiga untuk semua jenis beban, kecuali pada beban resistif yang memiliki nilai harmonisa arus terbesar pada orde kelima. Sedangkan nilai harmonisa arus pada sistem *solar panel* dengan satu GTI maupun dua GTI paralel memiliki nilai terbesar pada orde ketiga untuk semua jenis beban. Hasil ini dapat dilihat pada bagian lampiran skripsi.

BAB 5

KESIMPULAN

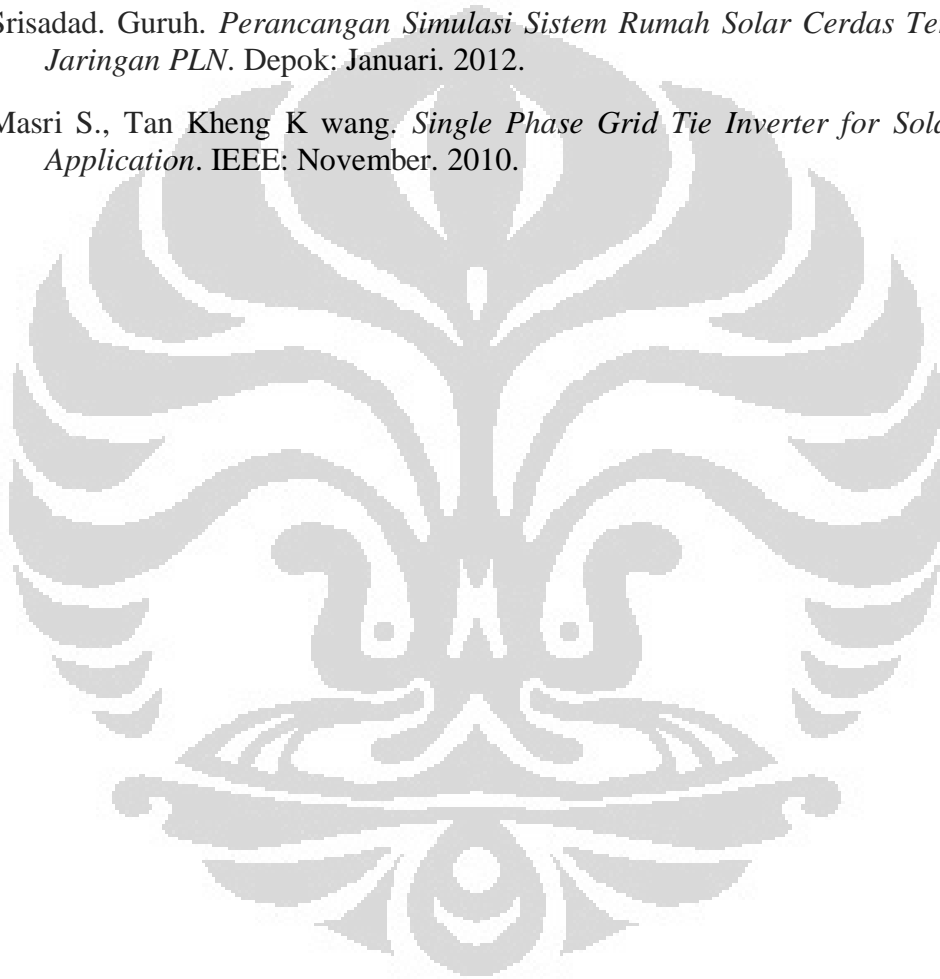
1. Pada saat sistem diberikan beban, THD-F tegangan untuk tiga jenis pengukuran relatif tidak mengalami perubahan, dimana THD-F tegangan sistem *grid* PLN memiliki nilai yang terkecil.
2. Nilai THD-F tegangan sistem dengan satu GTI lebih kecil daripada sistem dengan dua GTI paralel untuk beban dibawah 150 Watt. Sebaliknya, saat beban diatas 150 Watt THD-F tegangan sistem dengan dua GTI paralel lebih kecil daripada sistem dengan satu GTI.
3. Nilai THD-F arus sistem dengan satu GTI lebih kecil daripada sistem dengan dua GTI paralel untuk beban dibawah 150 Watt. Sebaliknya, saat beban diatas 150 Watt THD-F arus sistem dengan dua GTI paralel lebih kecil daripada sistem dengan satu GTI.
4. Pada saat sistem terhubung dengan beban, nilai THD-F arus untuk tiga jenis pengukuran relatif tidak mengalami perubahan, dimana THD-F arus sistem *grid* PLN memiliki nilai yang paling besar.
5. Pada saat sistem terhubung beban resistif, nilai THD-F tegangan pengukuran yang dilakukan tidak jauh berbeda dengan pengukuran tanpa beban, begitu juga nilai THD-F arusnya. Hanya saja untuk kondisi beban resistif, nilai THD-F arus sistem dengan dua GTI paralel lebih kecil daripada sistem dengan satu GTI.

DAFTAR ACUAN

- [1] Rashid. Muhammad H. *Power Electronics : Circuits, Devices, and Applications* (2nd ed.). Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 1993.
- [2] Hamid, M. I., and Anwari M. *Single-Phase Solar panel-Inverter Operation Characteristic in Distributed Generation System*. Februari. 2010.
- [3] M. Arief Albachrony. *Pemodelan dan Verifikasi Karakteristik Modul Sel Surya Berbasis Labview*. Depok: Desember. 2011.
- [4] Srisadad. Guruh. *Perancangan Simulasi Sistem Rumah Solar Cerdas Terhubung Jaringan PLN*. Depok: Januari. 2012.
- [5] Masri S., Tan Kheng K wang. *Single Phase Grid Tie Inverter for Solar panel Application*. IEEE: November. 2010.
- [6] USA. Huntington Beach: Sharp Electronics Corporation. 2006
- [7] Germany. Camtec Systemelektronik GmbH. 2010
- [8] GTI-Series-Inverter User Manual. *Mini Solar Grid-Connected Inverter*. 2010
- [9] *Solar Power Systems For Homes*. 2012.
<<http://mplsstartribune.net/solar-power-systems-for-homes/>>
- [10] Rozenblat, Lazar. *A Grid Tie Inverter For Solar Systems*. 2010.
<<http://solar.smeps.us/grid-tie-inverter-schematic.html>>
- [11] <<http://www.scribd.com/doc/85078188/sel-surya-1>>
- [12] <http://blog.pandora.com/archives/show_temp/2007/08/synthesis_1.html>

DAFTAR PUSTAKA

- Rashid, Muhammad H. *Power Electronics : Circuits, Devices, and Applications* (2nd ed.). Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 1993.
- Hamid, M. I., and Anwari M. *Single-Phase Solar panel-Inverter Operation Characteristic in Distributed Generation System*. Februari. 2010.
- M. Arief Albachrony. *Pemodelan dan Verifikasi Karakteristik Modul Sel Surya Berbasis Labview*. Depok: Desember. 2011.
- Srisadad. Guruh. *Perancangan Simulasi Sistem Rumah Solar Cerdas Terhubung Jaringan PLN*. Depok: Januari. 2012.
- Masri S., Tan Kheng K wang. *Single Phase Grid Tie Inverter for Solar panel Application*. IEEE: November. 2010.



LAMPIRAN

Data Hasil Pengukuran Sistem *Grid* PLN Tanpa Beban

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	224,5	11	0,69	21	0,22	31	0,07
2	0,29	12	0,03	22	0,01	32	0,01
3	0,25	13	0,6	23	0,17	33	0,1
4	0,05	14	0,04	24	0,03	34	0,03
5	3,13	15	0,42	25	0,17	35	0,07
6	0,01	16	0,03	26	0,03	36	0,02
7	0,7	17	0,32	27	0,11	37	0,2
8	0,03	18	0,02	28	0,05	38	0,01
9	1	19	0,15	29	0,08	39	0,13
10	0,02	20	0,02	30	0,01	40	0,02

Harmonisa arus							
Orde	mA	Orde	mA	Orde	mA	Orde	mA
1	0,23	11	0,04	21	0,05	31	0,03
2	0,02	12	0,07	22	0,03	32	0,05
3	0,05	13	0,04	23	0,06	33	0,02
4	0,03	14	0,01	24	0,04	34	0,01
5	0,04	15	0,03	25	0,02	35	0,05
6	0,03	16	0,09	26	0,03	36	0,06
7	0,04	17	0,02	27	0,05	37	0,06
8	0,08	18	0,02	28	0,06	38	0,04
9	0,01	19	0,05	29	0,04	39	0,03
10	0,01	20	0,06	30	0,04	40	0,05

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Satu GTI Tanpa Beban

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	210,86	11	0,77	21	0,84	31	0,28
2	0,47	12	0,02	22	0,15	32	0,11
3	7,16	13	1,11	23	0,7	33	0,44
4	0,13	14	0,12	24	0,12	34	0,07
5	4,71	15	0,72	25	0,28	35	0,48
6	0,02	16	0,1	26	0,09	36	0,2
7	0,82	17	0,6	27	0,37	37	0,23
8	0,05	18	0,05	28	0,14	38	0,11
9	1,32	19	0,36	29	0,05	39	0,21
10	0,08	20	0,16	30	0,15	40	0,05

Harmonisa arus							
Orde	mA	Orde	mA	Orde	mA	Orde	mA
1	0,17	11	0,04	21	0,04	31	0,07
2	0,02	12	0,08	22	0,03	32	0,07
3	0,03	13	0,03	23	0,01	33	0,07
4	0,07	14	0,01	24	0,03	34	0,01
5	0,05	15	0,01	25	0,02	35	0,03
6	0,01	16	0,05	26	0,01	36	0,04
7	0,03	17	0,02	27	0,02	37	0,04
8	0,06	18	0,04	28	0,08	38	0,03
9	0,05	19	0,06	29	0,04	39	0,03
10	0,03	20	0,09	30	0,05	40	0,04

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Tanpa Beban

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	215,44	11	0,63	21	0,84	31	0,18
2	0,17	12	0	22	0,14	32	0,14
3	7,04	13	1,26	23	0,36	33	0,35
4	0,06	14	0,07	24	0,22	34	0,07
5	4,39	15	0,86	25	0,52	35	0,45
6	0,05	16	0,06	26	0,24	36	0,03
7	0,72	17	0,07	27	0,47	37	0,4
8	0,08	18	0,01	28	0,24	38	0,03
9	2,05	19	0,31	29	0,3	39	0,27
10	0,12	20	0,04	30	0,07	40	0,03

Harmonisa arus							
Orde	mA	Orde	mA	Orde	mA	Orde	mA
1	0,2	11	0,05	21	0,06	31	0,09
2	0,02	12	0,07	22	0,04	32	0,09
3	0,03	13	0,01	23	0,08	33	0,04
4	0,07	14	0,05	24	0,02	34	0,03
5	0,08	15	0,03	25	0,06	35	0,05
6	0,05	16	0,08	26	0,07	36	0,05
7	0,04	17	0,07	27	0,01	37	0,04
8	0,05	18	0,04	28	0,09	38	0,03
9	0,06	19	0,03	29	0,05	39	0,02
10	0,02	20	0,09	30	0,04	40	0,1

Data Hasil Pengukuran Sistem *Grid* PLN Berbeban Laptop

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	228,23	11	0,84	21	0,26	31	0,12
2	0,29	12	0,03	22	0,03	32	0,02
3	0,17	13	0,64	23	0,19	33	0,11
4	0,03	14	0,04	24	0,03	34	0,03
5	3,79	15	0,35	25	0,19	35	0,07
6	0,1	16	0,01	26	0,05	36	0,01
7	0,82	17	0,32	27	0,11	37	0,21
8	0,05	18	0,02	28	0,04	38	0,02
9	1,17	19	0,17	29	0,15	39	0,12
10	0,02	20	0,06	30	0,04	40	0,04

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	0,1742	11	0,0552	21	0,0285	31	0,0148
2	0,0102	12	0,0009	22	0,0003	32	0,0004
3	0,1605	13	0,0367	23	0,0226	33	0,0129
4	0,0085	14	0,002	24	0,0009	34	0,0011
5	0,1396	15	0,0317	25	0,0171	35	0,01
6	0,0062	16	0,0022	26	0,0011	36	0,0014
7	0,1118	17	0,0329	27	0,015	37	0,0068
8	0,0036	18	0,0017	28	0,0011	38	0,0016
9	0,0823	19	0,0326	29	0,0149	39	0,0064
10	0,0011	20	0,0009	30	0,0006	40	0,0012

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Satu GTI Berbeban Laptop

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	213,5	11	0,98	21	0,48	31	0,19
2	0,49	12	0,1	22	0,26	32	0,05
3	7,61	13	0,84	23	0,51	33	0,3
4	0,05	14	0,05	24	0,29	34	0,05
5	4,3	15	1,2	25	0,54	35	0,13
6	0,08	16	0,2	26	0,17	36	0,03
7	1,11	17	0,14	27	0,76	37	0,34
8	0,08	18	0,14	28	0,13	38	0,11
9	1,78	19	0,35	29	0,36	39	0,26
10	0,1	20	0,15	30	0,03	40	0,18

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	0,2885	11	0,0772	21	0,0363	31	0,0088
2	0,0035	12	0,0027	22	0,004	32	0,0006
3	0,2294	13	0,0624	23	0,0228	33	0,0117
4	0,0054	14	0,0022	24	0,0029	34	0,0005
5	0,1391	15	0,0389	25	0,0191	35	0,0131
6	0,0058	16	0,0022	26	0,0026	36	0,0008
7	0,0625	17	0,0384	27	0,0218	37	0,0088
8	0,005	18	0,0031	28	0,002	38	0,0011
9	0,0621	19	0,0441	29	0,0173	39	0,0042
10	0,0035	20	0,0034	30	0,0013	40	0,0007

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban Laptop

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	213,98	11	0,79	21	0,7	31	0,22
2	0,19	12	0,03	22	0,04	32	0,04
3	8,11	13	0,72	23	0,62	33	0,09
4	0,15	14	0,02	24	0,03	34	0,02
5	4,57	15	0,89	25	0,49	35	0,38
6	0,03	16	0,03	26	0,04	36	0,02
7	0,74	17	0,33	27	0,8	37	0,45
8	0,04	18	0,03	28	0,06	38	0,06
9	1,67	19	0,49	29	0,2	39	0,27
10	0,02	20	0,07	30	0,04	40	0,06

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	0,3516	11	0,111	21	0,0379	31	0,0133
2	0,0013	12	0,0053	22	0,0035	32	0,0019
3	0,2727	13	0,0827	23	0,0262	33	0,0156
4	0,0009	14	0,0057	24	0,003	34	0,0017
5	0,1578	15	0,0569	25	0,0309	35	0,0124
6	0,003	16	0,0056	26	0,0024	36	0,0013
7	0,0845	17	0,0597	27	0,0281	37	0,0044
8	0,0046	18	0,0049	28	0,0021	38	0,0015
9	0,103	19	0,0577	29	0,0173	39	0,0053
10	0,0052	20	0,0041	30	0,0018	40	0,0008

Data Hasil Pengukuran Sistem *Grid* PLN Berbeban LHE

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	227,38	11	0,66	21	0,16	31	0,1
2	0,06	12	0,02	22	0,04	32	0,02
3	0,99	13	0,51	23	0,21	33	0,12
4	0,03	14	0,01	24	0,03	34	0,03
5	3,16	15	0,39	25	0,22	35	0,09
6	0,02	16	0,02	26	0,03	36	0,02
7	0,99	17	0,24	27	0,12	37	0,15
8	0,02	18	0,01	28	0,05	38	0,02
9	1,24	19	0,24	29	0,1	39	0,14
10	0,01	20	0,02	30	0,02	40	0,02

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	0,7451	11	0,06	21	0,0332	31	0,0055
2	0,0007	12	0,0009	22	0,0027	32	0,0008
3	0,4801	13	0,0851	23	0,0411	33	0,0097
4	0,0009	14	0,0008	24	0,0022	34	0,0015
5	0,2282	15	0,0507	25	0,0167	35	0,0027
6	0,0011	16	0,0011	26	0,0026	36	0,001
7	0,1853	17	0,0618	27	0,0167	37	0,0123
8	0,0004	18	0,0012	28	0,0027	38	0,0016
9	0,0932	19	0,0432	29	0,0124	39	0,0075
10	0,0014	20	0,0022	30	0,0015	40	0,0016

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Satu GTI Berbeban LHE

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	207,83	11	0,75	21	0,94	31	0,2
2	0,12	12	0,04	22	0,04	32	0,05
3	7,52	13	1,03	23	0,63	33	0,45
4	0,08	14	0,1	24	0,14	34	0,06
5	3,91	15	0,43	25	0,3	35	0,41
6	0,03	16	0,11	26	0,1	36	0,09
7	1,42	17	0,55	27	0,39	37	0,31
8	0,11	18	0,03	28	0,03	38	0,08
9	1,78	19	0,16	29	0,27	39	0,21
10	0,12	20	0,15	30	0,08	40	0,05

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	0,7142	11	0,0704	21	0,0653	31	0,0115
2	0,0005	12	0,0035	22	0,0098	32	0,0088
3	0,3835	13	0,0615	23	0,0288	33	0,0108
4	0,0022	14	0,0053	24	0,0105	34	0,0107
5	0,2445	15	0,1138	25	0,0259	35	0,0095
6	0,0033	16	0,0066	26	0,0091	36	0,0104
7	0,2084	17	0,0924	27	0,011	37	0,0027
8	0,0027	18	0,0078	28	0,008	38	0,0108
9	0,057	19	0,0851	29	0,022	39	0,0078
10	0,0046	20	0,0102	30	0,0091	40	0,0097

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	214,3	11	0,34	21	0,97	31	0,32
2	0,05	12	0,06	22	0,04	32	0,03
3	6,68	13	0,59	23	0,49	33	0,3
4	0,08	14	0,07	24	0,02	34	0,04
5	3,64	15	0,33	25	0,48	35	0,45
6	0,05	16	0,03	26	0,03	36	0,02
7	1,5	17	0,79	27	0,49	37	0,38
8	0,05	18	0,03	28	0,04	38	0,04
9	2,23	19	0,45	29	0,03	39	0,02
10	0,02	20	0,07	30	0,05	40	0,05

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	0,7108	11	0,0625	21	0,0424	31	0,0077
2	0,0003	12	0,0012	22	0,0023	32	0,0032
3	0,418	13	0,0574	23	0,0159	33	0,0212
4	0,0006	14	0,0011	24	0,0032	34	0,0034
5	0,2461	15	0,0866	25	0,0079	35	0,0217
6	0,0007	16	0,0004	26	0,003	36	0,0033
7	0,2209	17	0,0866	27	0,0019	37	0,019
8	0,0013	18	0,0007	28	0,0027	38	0,003
9	0,0762	19	0,0479	29	0,012	39	0,0196
10	0,0013	20	0,0013	30	0,0028	40	0,0022

Data Hasil Pengukuran Sistem *Grid* PLN Berbeban LHE dan Laptop

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	215,19	11	0,39	21	0,36	31	0,1
2	0,14	12	0,02	22	0,06	32	0,05
3	2,89	13	0,27	23	0,28	33	0,12
4	0,06	14	0,02	24	0,12	34	0,05
5	2,11	15	0,6	25	0,18	35	0,11
6	0,08	16	0,03	26	0,06	36	0,02
7	1,55	17	0,29	27	0,35	37	0,12
8	0,03	18	0,02	28	0,06	38	0,01
9	2,1	19	0,52	29	0,2	39	0,08
10	0,01	20	0,1	30	0,06	40	0

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	0,9953	11	0,0545	21	0,0336	31	0,0164
2	0,005	12	0,0034	22	0,0037	32	0,0023
3	0,5261	13	0,0521	23	0,0243	33	0,0028
4	0,0056	14	0,0045	24	0,0035	34	0,0015
5	0,02	15	0,0371	25	0,0184	35	0,0198
6	0,0043	16	0,0026	26	0,0025	36	0,0001
7	0,2512	17	0,0846	27	0,0295	37	0,0174
8	0,0021	18	0,0011	28	0,0007	38	0,0009
9	0,162	19	0,0456	29	0,0034	39	0,0041
10	0,0017	20	0,0035	30	0,0016	40	0,0007

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Satu GTI Berbeban LHE dan Laptop

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	210,74	11	0,57	21	0,85	31	0,17
2	0,03	12	0,04	22	0,06	32	0,07
3	7,74	13	1,15	23	0,54	33	0,28
4	0,07	14	0,08	24	0,3	34	0,03
5	3,94	15	0,61	25	0,34	35	0,4
6	0,04	16	0,12	26	0,24	36	0,12
7	1,42	17	0,54	27	0,39	37	0,39
8	0,13	18	0,07	28	0,06	38	0,13
9	2,03	19	0,09	29	0,3	39	0,24
10	0,13	20	0,12	30	0,06	40	0,01

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	0,9225	11	0,1026	21	0,0821	31	0,0101
2	0,0031	12	0,0034	22	0,0138	32	0,0125
3	0,4501	13	0,052	23	0,0468	33	0,0132
4	0,0016	14	0,0042	24	0,0106	34	0,0123
5	0,1266	15	0,0857	25	0,0365	35	0,0151
6	0,0033	16	0,0088	26	0,0093	36	0,0123
7	0,196	17	0,0815	27	0,0168	37	0,0074
8	0,0058	18	0,0115	28	0,0095	38	0,0104
9	0,0505	19	0,0728	29	0,0086	39	0,0075
10	0,0063	20	0,0146	30	0,0117	40	0,0093

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE dan Laptop

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	211,96	11	0,53	21	1,1	31	0,37
2	0,09	12	0,05	22	0,07	32	0,09
3	7,75	13	0,64	23	0,4	33	0,36
4	0,08	14	0,05	24	0,07	34	0,07
5	4,15	15	0,23	25	0,25	35	0,37
6	0,05	16	0,02	26	0,14	36	0,03
7	1,48	17	0,61	27	0,44	37	0,39
8	0,07	18	0,03	28	0,09	38	0,03
9	2,03	19	0,32	29	0,02	39	0,03
10	0,05	20	0,05	30	0,02	40	0,02

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	0,9601	11	0,128	21	0,0591	31	0,0238
2	0,0013	12	0,0017	22	0,0021	32	0,0038
3	0,4837	13	0,0815	23	0,0314	33	0,0287
4	0,0008	14	0,0013	24	0,0028	34	0,0037
5	0,1246	15	0,0626	25	0,0191	35	0,0222
6	0,0016	16	0,0004	26	0,0025	36	0,0044
7	0,1883	17	0,0581	27	0,025	37	0,0098
8	0,0044	18	0,0026	28	0,0014	38	0,0041
9	0,0499	19	0,0334	29	0,0288	39	0,0094
10	0,0044	20	0,0027	30	0,0029	40	0,0051

Data Hasil Pengukuran Sistem *Grid* PLN Berbeban LHE dan Lampu Pijar

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	223,55	11	0,6	21	0,2	31	0,05
2	0,29	12	0,01	22	0,06	32	0,03
3	0,91	13	0,58	23	0,28	33	0,12
4	0,03	14	0,03	24	0,03	34	0,03
5	3,05	15	0,31	25	0,14	35	0,07
6	0,02	16	0,01	26	0,02	36	0,03
7	0,83	17	0,32	27	0,17	37	0,17
8	0,06	18	0,02	28	0,04	38	0,05
9	1,12	19	0,22	29	0,07	39	0,08
10	0,05	20	0,03	30	0,04	40	0,01

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	2,9435	11	0,0944	21	0,0455	31	0,0196
2	0,0047	12	0,0019	22	0,002	32	0,0018
3	0,4659	13	0,0888	23	0,0298	33	0,0087
4	0,0019	14	0,0027	24	0,0017	34	0,001
5	0,2374	15	0,0564	25	0,0137	35	0,0162
6	0,0031	16	0,0002	26	0,0015	36	0,0016
7	0,1672	17	0,0671	27	0,0196	37	0,0144
8	0,0023	18	0,0029	28	0,0021	38	0,0018
9	0,0596	19	0,035	29	0,0078	39	0,0033
10	0,0009	20	0,0037	30	0,0011	40	0,0012

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Satu GTI Berbeban LHE dan Lampu Pijar

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	202,42	11	0,78	21	1,06	31	0,41
2	0,28	12	0,05	22	0,03	32	0,01
3	6,95	13	0,7	23	0,37	33	0,43
4	0,02	14	0,12	24	0,07	34	0,04
5	4,39	15	0,71	25	0,1	35	0,19
6	0,08	16	0,05	26	0,12	36	0,05
7	1,59	17	0,51	27	0,09	37	0,16
8	0,07	18	0,11	28	0,1	38	0,04
9	1,37	19	0,52	29	0,15	39	0,2
10	0,07	20	0,08	30	0,07	40	0,1

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	2,7997	11	0,087	21	0,0298	31	0,0162
2	0,0026	12	0,0036	22	0,0085	32	0,0041
3	0,3699	13	0,0856	23	0,008	33	0,0055
4	0,0012	14	0,0061	24	0,006	34	0,0035
5	0,2801	15	0,1121	25	0,0055	35	0,0082
6	0,0008	16	0,008	26	0,0071	36	0,0059
7	0,178	17	0,0707	27	0,0183	37	0,0055
8	0,0014	18	0,0085	28	0,0068	38	0,0063
9	0,0461	19	0,0435	29	0,0071	39	0,0134
10	0,0021	20	0,0094	30	0,006	40	0,0092

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban LHE dan Lampu Pijar

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	202,63	11	0,94	21	1,11	31	0,45
2	0,39	12	0,1	22	0,11	32	0,14
3	6,55	13	0,42	23	0,17	33	0,33
4	0,06	14	0,08	24	0,15	34	0,09
5	4,18	15	0,63	25	0,03	35	0,27
6	0,1	16	0,11	26	0,18	36	0,07
7	1,58	17	0,55	27	0,3	37	0,18
8	0,08	18	0,07	28	0,17	38	0,03
9	1,5	19	0,73	29	0,44	39	0,29
10	0,06	20	0,08	30	0,02	40	0,06

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	2,807	11	0,0883	21	0,0316	31	0,034
2	0,0038	12	0,0059	22	0,0083	32	0,0102
3	0,3784	13	0,0706	23	0,0317	33	0,0224
4	0,0018	14	0,007	24	0,0095	34	0,0113
5	0,2719	15	0,0853	25	0,0278	35	0,0164
6	0,0027	16	0,0081	26	0,0065	36	0,0097
7	0,1777	17	0,0486	27	0,0387	37	0,0166
8	0,0033	18	0,0081	28	0,0103	38	0,0079
9	0,0435	19	0,0113	29	0,0312	39	0,0122
10	0,0049	20	0,0078	30	0,0093	40	0,0064

Data Hasil Pengukuran Sistem *Grid* PLN Berbeban Resistif

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	210,2	11	0,61	21	0,56	31	0,14
2	0,04	12	0,03	22	0,13	32	0,05
3	0,47	13	0,47	23	0,22	33	0,12
4	0,05	14	0,03	24	0,13	34	0,01
5	2,92	15	0,77	25	0,37	35	0,09
6	0,03	16	0,03	26	0,1	36	0,01
7	0,89	17	0,3	27	0,27	37	0,04
8	0,05	18	0,06	28	0,09	38	0
9	1,72	19	0,22	29	0,19	39	0,13
10	0,04	20	0,08	30	0,03	40	0,01

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	2,5921	11	0,0075	21	0,0069	31	0,0018
2	0,0005	12	0,0003	22	0,0016	32	0,0005
3	0,0071	13	0,0057	23	0,0028	33	0,0015
4	0,0006	14	0,0004	24	0,0018	34	0,0001
5	0,0361	15	0,0095	25	0,0047	35	0,0011
6	0,0003	16	0,0003	26	0,0013	36	0,0003
7	0,0107	17	0,0038	27	0,0031	37	0,0004
8	0,0006	18	0,0008	28	0,0011	38	0,0001
9	0,0213	19	0,0026	29	0,0023	39	0,0016
10	0,0006	20	0,001	30	0,0004	40	0

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Satu GTI Berbeban Resistif

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	202,78	11	0,63	21	0,79	31	0,19
2	0,49	12	0,03	22	0,01	32	0,06
3	6,95	13	1,2	23	0,48	33	0,36
4	0,14	14	0,09	24	0,07	34	0,02
5	4,54	15	0,74	25	0,3	35	0,36
6	0,08	16	0,02	26	0,05	36	0,07
7	0,92	17	0,53	27	0,31	37	0,29
8	0,1	18	0,05	28	0,06	38	0,09
9	1,51	19	0,18	29	0,2	39	0,24
10	0,03	20	0,02	30	0,05	40	0,02

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	2,5585	11	0,008	21	0,0099	31	0,0024
2	0,0061	12	0,0003	22	0,0002	32	0,0006
3	0,0893	13	0,0151	23	0,0061	33	0,0046
4	0,0018	14	0,0011	24	0,001	34	0,0002
5	0,0573	15	0,0093	25	0,0037	35	0,0046
6	0,0011	16	0,0003	26	0,0006	36	0,001
7	0,0114	17	0,0067	27	0,0039	37	0,0035
8	0,0015	18	0,0006	28	0,0006	38	0,0012
9	0,019	19	0,0021	29	0,0026	39	0,0031
10	0,0004	20	0,0003	30	0,0006	40	0,0004

Data Hasil Pengukuran Sistem *Solar Panel* Terhubung Dua GTI Paralel Berbeban Resistif

Harmonisa tegangan							
Orde	V	Orde	V	Orde	V	Orde	V
1	206,01	11	0,45	21	1	31	0,47
2	0,12	12	0,11	22	0,07	32	0,13
3	5,74	13	0,79	23	0,33	33	0,2
4	0,03	14	0,05	24	0,18	34	0,11
5	4,64	15	0,39	25	0,28	35	0,29
6	0,1	16	0,07	26	0,15	36	0,05
7	0,86	17	0,68	27	0,26	37	0,24
8	0,07	18	0,06	28	0,28	38	0,05
9	1,62	19	0,35	29	0,38	39	0,18
10	0,04	20	0,16	30	0,09	40	0,02

Harmonisa arus							
Orde	A	Orde	A	Orde	A	Orde	A
1	2,5718	11	0,0056	21	0,0123	31	0,0059
2	0,0015	12	0,0014	22	0,0009	32	0,0018
3	0,0733	13	0,0099	23	0,0042	33	0,0025
4	0,0003	14	0,0007	24	0,0022	34	0,0015
5	0,0578	15	0,0048	25	0,0036	35	0,0036
6	0,0011	16	0,0007	26	0,0018	36	0,0005
7	0,0104	17	0,0085	27	0,0033	37	0,0029
8	0,0008	18	0,0007	28	0,0037	38	0,0007
9	0,0202	19	0,0043	29	0,0048	39	0,0023
10	0,0004	20	0,0019	30	0,001	40	0,0003