

ANALISA DAYA PADA PEMANFAATAN PANEL SURYA MENGUNAKAN *INVERTER LIMITER*

Reinard Mika Yuwana¹, Hanny Hosiana Tumbelaka², dan Yusak Tanoto^{3*}

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya, 60236

*e-mail: tanyusak@petra.ac.id (Penulis korespondensi)

Abstrak—Sistem pembangkit listrik tenaga surya *On-Grid* skala kecil (panel surya) memiliki potensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di rumah tinggal. Namun, ada beberapa kendala yaitu ada daerah yang tidak menyediakan pemasangan meter ekspor – impor dan biaya pemasangan meter ekspor – impor yang tidak murah. Salah satu alternatif solusi untuk permasalahan ini adalah dengan menggunakan *Grid Tie Inverter with Limiter* (GTIL) untuk mencegah energi berlebih masuk ke jaringan listrik. Pada saat energi yang dihasilkan panel surya lebih besar dari beban terpasang, maka GTIL membatasi daya yang dihasilkan oleh panel surya menjadi sesuai dengan kapasitas beban terpasang. Makalah ini membahas pemanfaatan GTIL dan analisa rugi daya dari penggunaan sistem limiter. Dari hasil analisa, diketahui bahwa sistem limiter bekerja dengan melakukan pergeseran titik kerja panel surya sesuai dengan daya total beban terpasang, dan rugi daya dapat dikurangi dengan melakukan alokasi daya yang dihasilkan ke baterai.

Kata kunci : Panel surya, *on-grid*, *grid tie inverter limiter*, sistem *limiter*

Abstract—*Small-scale on-grid solar power generation systems (solar panels) have great potential to meet electrical energy demand in residential. However, there are challenges such as several regions do not provide installation of export-import meters and the cost of installing export-import meters is not cheap. One of the solutions is to use a Grid Tie Inverter with Limiter (GTIL) to prevent excess energy from entering the utility grid. When the energy generated by the solar panel is greater than the load, GTIL limits the power generated by the solar panel to that used by the load. This paper discusses the use of GTIL and power loss analysis from the use of a limiter system. The analysis reveals that the limiter system works by shifting the operating point of the solar panel according to the total installed load, and power losses can be reduced by allocating the generated power to the battery.*

Keywords : *Solar panel, on-grid, grid tie inverter limiter, limiter system*

I. PENDAHULUAN

Konsumsi energi di Indonesia meningkat rata-rata 1.3% per tahun selama 2010-2015 [1]. Saat ini, penggunaan energi di Indonesia, termasuk energi listrik, mulai bergerak ke arah sumber energi terbarukan, salah satunya energi matahari. Dalam potensi energi matahari, kementerian ESDM mencatat bahwa Indonesia memiliki potensi sebesar 207.8 GW. Dalam hal ini, pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sangat potensial untuk dikembangkan di Indonesia dalam rangka membantu mencukupi kebutuhan listrik nasional sekaligus membantu menekan penggunaan energi fosil.

Salah satu potensi penggunaan sistem PLTS adalah untuk skala rumah tinggal. Instalasinya dapat berwujud sistem *On-Grid* ataupun *Off-Grid*. Untuk sistem *On-Grid*, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam implementasinya, karena masih ada beberapa daerah di Indonesia yang tidak menyediakan pemasangan kWh meter ekspor-impor yang merupakan bagian penting dalam instalasi *On-Grid*. Selain itu,

biaya pemasangan meter ekspor – impor tidaklah murah.

Berkaitan dengan hal tersebut, salah satu alternatif untuk menyelesaikan permasalahan ini adalah dengan menggunakan *limiter* pada alat *inverter* untuk mencegah energi berlebih masuk ke jaringan listrik. Inverter ini dinamai *Grid Tie Inverter with Limiter* (GTIL). Inverter jenis ini bekerja dengan cara menghalangi energi yang dihasilkan panel surya masuk ke jaringan. Namun demikian, ada hal yang perlu diperhatikan yaitu apakah pembatasan energi ini membuat adanya kerugian dibandingkan dengan energi yang berlebih tersebut tersebut diekspor ke PLN.

Makalah ini membahas pemanfaatan GTIL dan analisa rugi daya dari penggunaan sistem *limiter* tersebut. Adapun struktur makalah ini selanjutnya terdiri dari tinjauan pustaka, perancangan sistem, analisa dan hasil pengujian sistem, dan kesimpulan.

II. STUDI PUSTAKA

A. Karakteristik Panel Surya

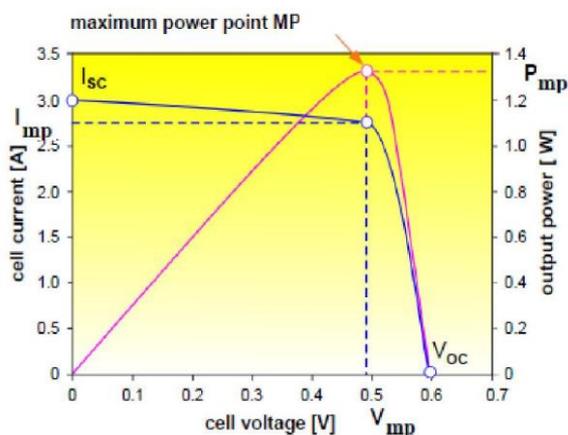
Panel surya memiliki kurva karakteristik yang menunjukkan hubungan antara arus dan tegangan keluaran (kurva I-V) dan daya dengan tegangan keluaran panel surya (kurva P-V). Pada saat tidak ada beban terpasang, arus ada di nilai minimum dan tegangan pada sel berada pada nilai maksimum, disebut tegangan *Open Circuit* (VOC). Pada panel surya, arus akan berada di nilai maksimum ketika tahanan nol, yang disebut arus *Short Circuit* (ISC).

Selain itu terdapat nilai daya maksimum yang dapat dihasilkan pada saat tegangan maksimum dan arus maksimum. Titik dimana arus dan tegangan menghasilkan daya terbesar disebut dengan *Maximum Power Point* (MPP) [2].

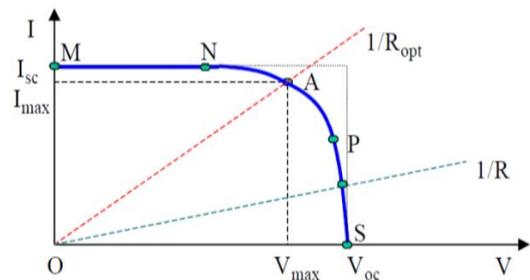
Ketika panel surya dihubungkan dengan beban, terdapat hambatan yang direpresentasikan sebagai garis *linear* dengan garis $I/V = I/R$. Hal tersebut menunjukkan daya yang didapat bergantung pada nilai resistansi. Jika R kecil maka panel surya beroperasi pada daerah kurva MN, dalam hal ini panel surya beroperasi sebagai sumber arus yang konstan atau arus *short circuit*.

Pada sisi lain, jika R besar, panel surya beroperasi pada daerah kurva PS, dimana panel surya beroperasi sebagai sumber tegangan yang konstan atau tegangan *open circuit*. Jika dihubungkan dengan hambatan optimal R_{opt} berarti panel surya menghasilkan daya maksimal dengan tegangan maksimal dan arus maksimal [3].

Kurva karakteristik panel surya ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan kurva karakteristik panel surya saat dihubungkan dengan beban (R) ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Kurva karakteristik panel surya [2].



Gambar 2. Kurva karakteristik arus dan tegangan pada panel surya saat dihubungkan dengan beban R [5].

B. Jenis Sistem Panel Surya

Ditinjau dari cara bekerjanya, sistem panel surya dikelompokkan menjadi dua yaitu sistem *Off-Grid* dan *On-Grid*. Sistem *Off-Grid* memanfaatkan baterai sebagai penyimpanan energi sebelum disalurkan kepada konsumen, sedangkan sistem *On-Grid* terhubung pada jaringan listrik PLN maupun jaringan lainnya (*hybrid*) [4]. Sistem panel surya *Off-Grid* mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi dan tidak disinkronkan dengan listrik PLN. Sebagai cadangan, sistem ini didukung dengan genset atau baterai untuk menyimpan energi.

Panel surya *On-Grid* mengandalkan energi matahari dan disinkronkan dengan jaringan listrik PLN. Berbeda dengan tipe *Off-Grid*, sistem ini umumnya tidak dilengkapi dengan baterai, dan banyak ditemukan di perkotaan dan daerah industri.

C. Sistem Grid Tie with Inverter Limiter

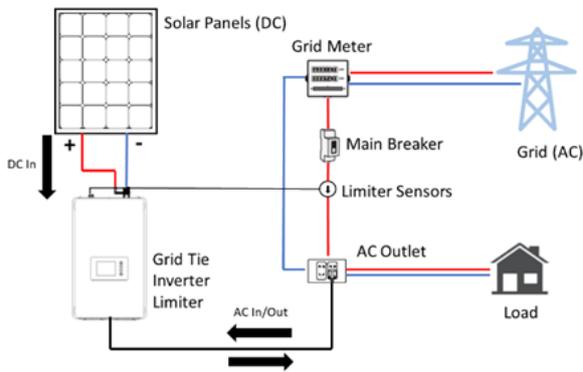
Sistem *Grid Tie Inverter* atau *On-Grid Inverter* adalah sistem *inverter* yang berfungsi mengubah listrik DC yang dihasilkan oleh panel surya menjadi AC. Listrik yang diubah kemudian akan dialirkan ke perangkat listrik dan jaringan PLN. Sedangkan *Grid Tie Inverter with Limiter* (GTIL) adalah alat *Inverter On-Grid* yang dilengkapi dengan alat limitasi daya yang dinamakan *limiter*. Hal ini menyebabkan daya keluaran *inverter* hanya diatur untuk menyuplai beban dan membatasi daya yang dialirkan ke jaringan [5]. Dalam hal ini, sensor *limiter* memastikan daya yang disalurkan oleh *inverter* tidak melebihi total daya beban terpasang. Bila daya keluaran *inverter* lebih kecil dari daya beban maka kekurangan daya tersebut akan diambil dari PLN. GTIL juga dilengkapi dengan MPPT (*maximum power point tracking*), untuk memaksimalkan konversi energi matahari menjadi energi listrik.

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Diagram Sistem

Perancangan sistem *Inverter Limiter On-Grid* terdiri dari 3 komponen utama, yaitu panel surya, *Grid Tie Inverter limiter* dan beban listrik. Komponen tersebut juga disertai dengan sistem proteksi berupa MCB,

konektor dan lainnya. Percobaan dilakukan di atap Gedung P lantai 7, Universitas Kristen Petra. Sistem kemudian disambungkan dengan alat metering dan beban. Gambar 3 menampilkan diagram rangkaian kerja dari sistem panel surya tersebut.



Gambar 3. Diagram rangkaian kerja sistem panel surya dengan GTIL.

Sistem panel surya *On-Grid* dengan menggunakan GTIL pada Gambar 3 terdiri dari panel surya sebesar 300W_{peak}, kemudian GTIL dengan sensor arus, *breaker* utama dan kWh meter analog dengan sumber listrik PLN yang berasal dari panel SDP pendingin ruangan Gedung P lantai 7, Universitas Kristen Petra.

Beban yang digunakan untuk uji coba adalah lampu pijar, 220VAC. Yang menjadi fokus perhatian dalam percobaan dengan beban lampu ini adalah apakah daya beban lebih besar atau lebih kecil dari daya keluaran panel surya sehingga dapat dipelajari fungsi dari *limiter*.

B. Sistem Inverter Limiter

Inverter yang digunakan pada perancangan ini adalah *Inverter SUN-1000G* dengan kapasitas maksimum 1000W, tegangan operasional 22-65VDC, dengan tegangan stabil minimal 25V. *Inverter* akan mengubah listrik DC yang dihasilkan panel surya menjadi listrik AC (220-230V) yang sesuai dengan tegangan nominal jaringan PLN.

Dengan kriteria tersebut maka tegangan yang dihasilkan panel surya harus stabil di dalam range tersebut agar dapat bekerja dengan maksimal. Apabila tegangan yang dihasilkan oleh panel surya terlalu besar atau kecil maka akan diberi peringatan oleh *Inverter* yaitu “*Starting Voltage Too Low*” atau “*Starting Voltage Too High*”. *Inverter* membutuhkan supply listrik dari PLN untuk bekerja, apabila suplai PLN mati maka inverter tidak dapat bekerja.

Inverter ini dilengkapi dengan sensor arus untuk mendeteksi besar arus yang disuplai oleh PLN ke beban dan membatasi daya yang dihasilkan oleh panel surya melalui *inverter* sesuai dengan yang dibutuhkan beban. Dalam hal ini, pembatasan daya sistem *limiter* berfungsi agar tidak ada daya lebih yang dialirkan ke

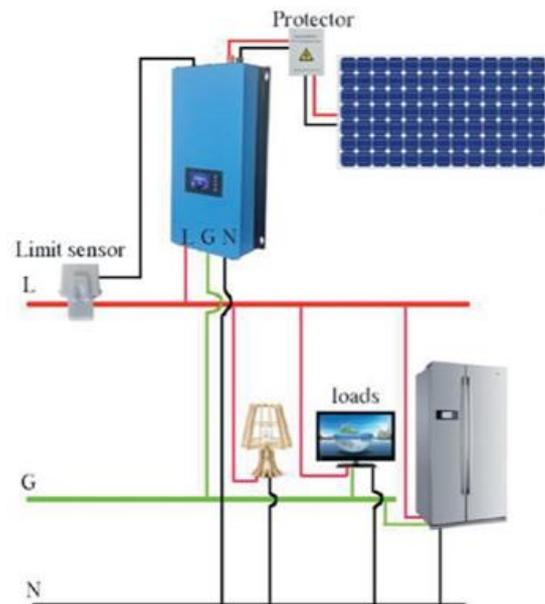
jaringan listrik (PLN). Selain itu, agar daya keluaran *inverter* sesuai dengan daya yang dibutuhkan beban. *Inverter* yang digunakan ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Inverter Limiter SUN-1000G (sumber: GWL GridFree Inverter Installation and Operation Manual, p.1)

Sensor arus tersebut berupa *Current Transformer Limiter* atau *CT Limiter* yang digunakan untuk mengukur arus beban terpasang. Alat ini berbentuk jepit dan ketika dipasang pada kabel ke beban, dapat membaca arus yang mengalir pada kabel tersebut. Alat ini mempunyai lilitan kawat kecil yang memberikan output tegangan sebanding dengan arus yang mengalir di kabel sehingga dapat diketahui besar daya yang mengalir di kabel tersebut.

CT Limiter ini dipasang pada kabel fasa utama seperti pada Gambar 5. Sementara itu, *clamp Limiter* harus dipasang dengan arah panah menghadap ke beban. Apabila arah pemasangan salah maka sistem inverter akan menunjukkan pengukuran daya *grid* negatif dan *inverter* tidak dapat bekerja.

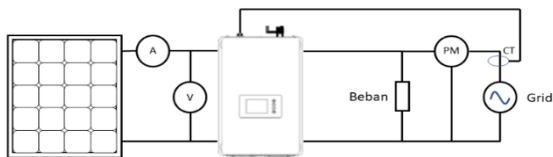


Gambar 5. Posisi Pemasangan Limit Sensor (Sumber: GWL GridFree Inverter Limit Function User Manual, p.2)

IV. ANALISA DAN HASIL PENGUJIAN SISTEM

Pengujian sistem dilakukan melalui pengambilan data sistem GTIL untuk mengetahui unjuk kerja dan rugi daya dari penggunaan sistem GTIL. Pengambilan data dilakukan di Gedung P Lantai 7 Universitas Kristen Petra selama 3 hari yaitu tanggal 21-23 Nopember 2022 tiap 1 jam, dari jam 8.00 sampai dengan jam 18.00. Data yang diambil yaitu keluaran panel surya, keluaran *inverter* beserta daya limitasinya, daya beban terpasang dan dari jaringan PLN.

Gambar 6 menunjukkan diagram pengukuran sistem yang dilakukan di beberapa titik, dimulai dari pengukuran tegangan dan arus dari panel surya. *Grid Tie Inverter* pada Gambar 4 dilengkapi dengan kemampuan membaca tegangan DC dari panel surya, tegangan dari *grid* PLN, daya keluaran *inverter* dan daya dari PLN.



Gambar 6. Diagram titik pengukuran sistem

Power meter digunakan untuk mengukur tegangan *grid*, arus *grid*, daya suplai PLN, daya *inverter* dan faktor daya. Pengambilan data juga memperhitungkan data intensitas cahaya matahari (W/m^2) yang diukur menggunakan *pyranometer*, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data intensitas cahaya matahari

Waktu pengukuran (jam)	Tanggal 21 Nopember 2022	Tanggal 22 Nopember 2022	Tanggal 23 Nopember 2022
08.00	211	136	330
09.00	318	459	384
10.00	708	713	646
11.00	922	466	988
12.00	958	568	612
13.00	1009	332	781
14.00	915	259	240
15.00	587	278	187
16.00	433	213	101
17.00	140	59	15
18.00	4	15	9

Dalam 3 hari pengukuran terlihat bahwa ada perbedaan intensitas cahaya matahari setiap harinya. Karena perbedaan rata-rata intensitas cahaya matahari ini, selanjutnya data pengukuran yang digunakan adalah data yang diambil tanggal 21 Nopember 2022, yang mana saat cuaca cerah.

A. Pengujian Daya Maksimum Panel Surya

Pengujian ini dilakukan tanpa beban dan tanpa *limiter*, sehingga total daya keluaran *inverter* disalurkan menuju jaringan PLN (dalam hal ini

jaringan listrik gedung). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui daya maksimum yang dapat dihasilkan panel surya dan apakah piringan kWh meter analog berputar kearah yang terbalik ketika daya keluaran *inverter* dibiarkan masuk ke jaringan PLN. Hasil pengambilan data untuk daya keluaran *inverter* dengan sistem *limiter* dimatikan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data pengukuran dengan beban kosong

Waktu pengukuran (jam)	Intensitas Cahaya (W/m^2)	Pengukuran <i>Inverter</i>		
		Arus PV I_{DC} (A)	Teg.PV V_{DC} (V)	Daya <i>Inverter</i> (W)
08.00	211	0.8	56	40.2
09.00	318	1.6	51.7	109.7
10.00	708	4.8	46.5	217.6
11.00	922	8.1	31.8	259.1
12.00	958	9.9	30.7	275.0
13.00	1009	10.4	30.5	293.2
14.00	915	8.5	31.5	265.4
15.00	587	3.7	48.4	173.9
16.00	433	2.8	50.2	137.3
17.00	140	0	19	0
18.00	4	0	2.7	0

Dari data yang didapatkan dapat diketahui beberapa hal: 1) daya keluaran maksimum *inverter* yaitu 293.2 W; 2) tegangan kerja minimum *inverter* adalah 25 VDC; 3) ketika tegangan kerja minimum tidak dipenuhi maka *inverter* tidak dapat menyalurkan energi listrik yang dihasilkan panel surya; 4) karena sistem *limiter* dimatikan dan tidak ada beban listrik maka daya dari panel surya akan dapat bebas masuk ke jaringan PLN. Hal ini dapat dibuktikan dengan melihat arah berputar piringan kWh meter analog, pada saat pengukuran ini piringan berputar kearah terbalik (kiri) yang menandakan daya dari *inverter* bebas masuk ke jaringan PLN (jaringan listrik gedung).

B. Pengujian Daya Beban Yang Lebih Kecil Dari Daya Panel Surya

Pengujian ini dilakukan dengan memasang beban berupa 5 buah lampu dengan total daya 125 W untuk menguji 2 hal yaitu simulasi daya beban lebih kecil dari daya maksimal yang dihasilkan panel surya dan kerja sistem *limiter*. Hasil pengambilan data untuk daya yang dialirkan oleh *inverter* dengan sistem *limiter* dinyalakan ditunjukkan pada Tabel 3.

Dari data yang didapatkan, dapat diketahui beberapa hal, diantaranya: 1) daya keluaran maksimum *inverter* tidak melebihi daya yang diperlukan oleh beban yaitu 123.5 W; 2) daya yang dihasilkan panel surya tidak ada yang dikirimkan ke jaringan PLN. Hal ini membuktikan sistem *limiter* bekerja dengan baik. Dari tabel diatas dapat dilihat ada 2 sumber listrik yang menyuplai beban dengan prioritas daya yang dihasilkan dari panel surya akan digunakan memenuhi kebutuhan beban terlebih dahulu. Ketika intensitas cahaya rendah

sehingga daya keluaran *inverter* mengecil maka daya yang diperlukan beban otomatis dipenuhi oleh PLN.

Tabel 3. Data pengukuran dengan beban terpasang 125 W

Waktu pengukuran (jam)	Intensitas Cahaya (W/m ²)	Pengukuran Inverter			
		Amper Meter <i>I_{DC}</i> (A)	<i>V_{DC}</i> (V)	Daya Inverter (W)	Suplai PLN (W)
			56		
			51		
			4		
			46		
			5		
08.00	219	0.9	51	41.2	85.8
09.00	331	2.1	1	110.2	22.4
10.00	680	2.7	53	112.5	18.3
11.00	879	2.6	8	116.3	11.4
12.00	920	2.5	54	117.6	10.3
13.00	969	2.3	8	117.3	10.0
14.00	952	2.4	53	120.1	7.5
15.00	514	2.5	6	109.5	17.6
16.00	450	2.3	49	111.4	18.6
17.00	134	0	8	0	127.7
18.00	5	0	51	0	127.4
			1		
			21		
			7		
			3		

C. Pengujian Daya Beban Yang Lebih Besar Dari Daya Panel Surya

Pengujian ini dilakukan dengan memasang beban berupa 3 buah lampu 200 W dengan total daya 600 W untuk menguji 2 hal yaitu simulasi daya beban lebih besar dari daya panel surya dan kerja sistem *limiter*. Hasil pengambilan data untuk daya keluaran *inverter* dengan sistem *limiter* dinyalakan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data pengukuran dengan beban melebihi keluaran panel surya

Waktu pengukuran (jam)	Intensitas Cahaya (W/m ²)	Pengukuran Inverter			
		Amper Meter <i>I_{DC}</i> (A)	<i>V_{DC}</i> (V)	Daya Inverter (W)	Suplai PLN (W)
			56		
			9		
			51		
08.00	224	0.8	1	41.4	544.4
09.00	337	2.3	46	114.7	471.1
10.00	676	4.2	7	191.5	394.3
11.00	977	4.3	47	207.4	378.8
12.00	987	4.3	5	199.0	369.0
13.00	1049	5	45	217.4	368.1
14.00	952	4.1	8	180.1	405.7
15.00	564	3.5	44	161.9	411.9
16.00	446	2.8	8	136.8	448.5
17.00	192	0.7	45	36.0	549.2
18.00	4	0	4	0	584.6
			48		
			4		

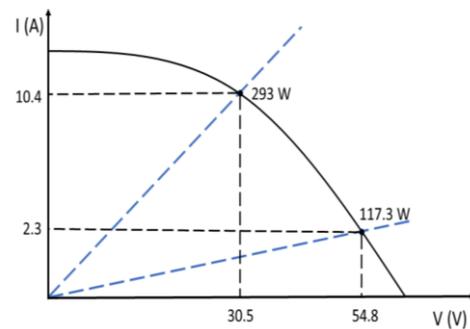
50.
1
57.
2
2.8

Dari data yang didapatkan dapat diketahui beberapa hal, diantaranya: 1) daya keluaran maksimum *inverter* tidak melebihi daya yang diperlukan oleh beban yaitu 584.6 W; 2) karena daya yang dihasilkan oleh solar panel lebih kecil dari yang dibutuhkan beban maka tidak ada daya lebih yang disalurkan ke jaringan PLN; 3) dalam situasi ini tidak ada perbedaan ketika sistem *limiter* dimatikan. Tetapi resikonya ketika sistem *limiter* dimatikan dan beban dilepas atau diganti dengan daya lebih kecil, maka daya lebih akan masuk ke jaringan PLN.

D. Analisa Kerja Sistem Limiter

Sistem *limiter* bekerja berdasarkan data total daya yang dibutuhkan oleh beban dengan membaca tegangan dan arus sistem. Data arus diperoleh dari CT *limiter*.

Pembatasan daya ini bekerja dengan cara mengubah titik kerja daya atau garis beban (1/R) yang dihasilkan oleh panel surya yang disesuaikan dengan beban terpasang. Pergeseran titik kerja pada kurva I-V dari panel surya ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva I-V: Perubahan Titik Kerja Panel Surya.

Seperti yang terlihat pada Gambar 7, dari data Tabel 2 dan Tabel 3, misalkan MPP (*Maximum Power Point*) dari daya yang dihasilkan panel surya pada saat beban kosong adalah sebesar 293.2 W dengan tegangan 30.5 V dan arus 10.4 A. Ketika beban terpasang hanya sebesar 125 W, GTIL akan melakukan pembatasan dengan mengubah titik kerja panel surya sehingga daya keluarannya menjadi hanya sebesar 117.3 W, yaitu pada tegangan 54.8 V dan arus 2.3 A. Dengan demikian daya keluaran panel surya turun sebesar 175.9 W. Selain itu tidak ada daya yang disalurkan ke jaringan PLN.

E. Analisa Rugi Daya

Berdasarkan pengujian yang sudah dilakukan, limitasi daya oleh sistem *limiter* menimbulkan kerugian daya. Kerugian ini disebabkan daya keluaran panel surya hanya sebagian saja dari kapasitas maksimum yang dapat dihasilkan, pada saat kondisi daya beban lebih kecil dari daya keluaran panel surya. Rugi daya akibat adanya pembatasan dapat dilihat pada Tabel 5 yang merupakan perbandingan Tabel 2 dan Tabel 3.

Dari Tabel 5, terlihat bahwa rugi (kehilangan) daya yang dihasilkan oleh solar panel bisa mencapai 60% dan rata-rata rugi daya per hari bisa mencapai 29.8%. Jadi sistem kehilangan potensi perolehan daya akibat limitasi. Setelah mengetahui bahwa ada rugi daya, ada hal yang dapat dilakukan untuk mengurangi rugi daya yaitu dengan alokasi daya yang dihasilkan oleh panel surya untuk disimpan di baterai.

Tabel 5. Rugi daya akibat pembatasan

Waktu pengukuran (jam)	Daya keluaran inverter tanpa pembatasan daya (W)	Daya keluaran inverter dengan pembatasan daya (W)	Total rugi daya (W)	Persentase rugi (%)
			-1	
			-0.5	
08.00	40.2	41.2	105.	-2
09.00	109.7	110.2	1	-2.5
10.00	217.6	112.5	142.	48
11.00	259.1	116.3	8	55
12.00	275	117.6	157.	57
13.00	293.2	117.3	4	60
14.00	265.4	120.1	175.	55
15.00	173.9	109.5	9	37
16.00	137.3	111.4	145.	19
17.00	0	0	3	0
18.00	0	0	64.4	0
			25.9	
			0	29.8
			0	
			Rata-rata	

F. Pengujian Daya dengan Tambahan Baterai

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui alokasi rugi daya yang ada ketika pembatasan daya yang dilakukan oleh GTIL disimpan sebagai energi baterai. Pengujian ini dilakukan pada tanggal 30 Nopember 2022, jam 8.00-13.00.

Terdapat 2 jenis data yang diambil yaitu a) sistem *limiter* dimatikan dengan beban kosong, dan b) sistem *limiter* aktif dengan beban 5 buah lampu masing-masing 25W dan baterai + *charger*. Data yang pertama diambil dengan tujuan untuk mengetahui daya maksimum yang dapat dihasilkan panel surya. Hasil pengukurannya ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Data pengukuran dengan beban kosong

	Ampere Meter	Pengukuran inverter
--	--------------	---------------------

Waktu pengukuran (jam)	Intensitas cahaya (W/m ²)	I _{DC} (A)	V _{DC} (V)	Daya inverter (W)
08.00	411	2.8	50.6	132.9
09.00	329	2.2	52.3	109
10.00	446	2.9	48.1	133.5
11.00	818	8.1	35.5	276.5
12.00	660	4.2	47.4	193
13.00	776	5	45.9	217.5

Tabel 7. Data pengukuran dengan beban lampu 125 W dan *charger* baterai

Waktu pengukuran (jam)	Intensitas cahaya (W/m ²)	Amper e Meter		Pengukuran inverter	
		I _{DC} (A)	V _{DC} (V)	Daya inverte r (W)	Supla i PLN (W)
			48.		
			1		
			53.		
08.00	447	2.9	7	133.6	71.0
09.00	325	1.9	50.	94.6	113
10.00	419	2.9	4	132.1	72.5
11.00	854	4.9	41.	194.5	10.2
12.00	675	4.7	5	194.1	10.5
13.00	782	4.9	42.	194.6	9.8
			5		
			41.		
			5		

Data daya pada Tabel 6 akan dibandingkan dengan Tabel 7 yaitu hasil pengukuran dengan beban 125 W dan *charger* baterai. Penambahan *charger* baterai 12V DC, kapasitas daya sebesar 80 W, sehingga total daya beban adalah 205 W. Perbedaan intensitas cahaya Tabel 6 dan 7 tidak signifikan dalam melakukan perbandingan. Perbandingan Tabel 6 dan 7 ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan rugi daya

Jam	Beban		Rugi daya	
	Kosong (W)	Baterai dan lampu (W)	Baterai dan lampu (W)	Baterai dan lampu (%)
08.00	132.9	133.6	-0.7	-0.5
09.00	109	94.6	14.4	13.2
10.00	133.5	132.1	1.4	1.0
11.00	276.5	194.5	82	29.7
12.00	193	194.1	-1.1	-0.6
13.00	217.5	194.6	22.9	10.5
				8.89

Dibanding dengan Tabel 5, pada saat kondisi daya beban lebih kecil dari daya keluaran panel surya, terlihat bahwa rugi (kehilangan) daya yang dihasilkan oleh solar panel akibat limitasi turun signifikan. Baterai menyimpan energi yang terbuang akibat pembatasan. Tetapi bila daya keluaran panel surya lebih kecil, maka listrik PLN akan mensuplai energi ke baterai. Disarankan untuk penelitian berikutnya agar ada mekanisme bahwa baterai hanya diisi oleh panel surya.

V. KESIMPULAN

Dari pengujian dan analisa yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Ketika sistem *limiter* dimatikan dalam keadaan beban kosong dan energi yang dihasilkan oleh panel surya dibiarkan mengalir ke jaringan PLN oleh GTIL.
2. Ketika daya beban terpasang kurang dari daya maksimal panel surya, kelebihan daya akan disalurkan ke PLN. Dengan menggunakan sistem *limiter* pada *inverter* maka dilakukan penyesuaian daya yang dihasilkan panel surya dengan yang diperlukan beban terpasang sehingga tidak ada daya lebih yang masuk ke jaringan PLN.
3. Ketika panel surya tidak mampu menghasilkan daya yang dibutuhkan oleh beban maka sebagian atau seluruh daya yang dibutuhkan oleh beban akan otomatis disuplai oleh jaringan PLN walaupun sistem limitasi daya tetap dibiarkan aktif.
4. *Limiter* bekerja dengan cara mengubah titik kerja dari panel surya dengan mengikuti kebutuhan dari beban terpasang, sehingga tidak ada daya lebih yang masuk ke jaringan PLN.
5. Penggunaan sistem *limiter* saat daya beban lebih kecil dari yang dihasilkan panel surya akan menyebabkan rugi daya. Dalam pengujian ditemukan rugi daya bisa mencapai 60% dari daya maksimum yang dihasilkan oleh panel surya.
6. Rugi daya dari penggunaan *limiter* dapat diatasi dengan menambah beban terpasang atau alokasi daya yang tidak digunakan untuk mengisi baterai.

Pengembangan penelitian ini di masa yang akan datang akan melibatkan sistem pengujian yang lebih besar, yaitu objek rumah tinggal, untuk menguji keefektifan sistem limiter untuk diaplikasikan pada beban listrik rumah tangga.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Fitriana, "Outlook Energi Indonesia 2017". BPPT, 2017.
- [2] F. Yusivar, M. Y. Farabi, R. Suryadiningrat, W. W. Ananduta and Y. Syaifudin, "Buck Converter Photovoltaic Simulator," *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, vol. 1, no.2, pp. 156-167, December 2011.
- [3] A. Julisman, "Prototipe Pemamfaatan Panel Surya Sebagai Sumber Energi pada Sistem Otomatis Atap Stadion Bola," *Jurnal Online Teknik Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 35-42, 2017.
- [4] D. Kusdiana, "Panduan Pengelolaan Lingkungan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)". Direktorat Aneka Energi Baru dan Energi Terbarukan, Kementerian ESDM, 2020.
- [5] S. Prajogo and B.H. Santoso, "Performance Analysis of Grid Tie Inverter with Power Limiter to Increase Utility Power Reduction in One Way kWh Meter Circuit," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1364, pp. 1-8, August 2019.