

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Prinsip Kerja *Solar Charger Controller* PLTS *Off-Grid* & *Hybrid*

Solar Charge Controller (SCC) merupakan komponen utama yang berfungsi mengatur proses pengisian energi dari sumber pembangkit menuju baterai serta melindungi baterai dari kondisi *overcharge* dan *overdischarge*. Pada penelitian ini digunakan SCC yang bekerja pada dua konfigurasi sistem, yaitu sistem PLTS *Off-Grid* dan sistem Hybrid PLTS–PLTB.

4.1.1 Prinsip Kerja *Solar Charger Controller* PLTS *Off-Grid*

Pada sistem PLTS *Off-Grid*, energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya dialirkan menuju *Solar Charge Controller* sebelum disimpan ke dalam baterai. SCC bekerja dengan mengatur besarnya tegangan dan arus yang masuk ke baterai agar proses pengisian berlangsung secara optimal. Ketika intensitas radiasi matahari meningkat, daya keluaran modul surya akan bertambah sehingga SCC akan menyesuaikan proses pengisian sesuai kapasitas baterai.

Pada saat baterai mencapai kondisi penuh, SCC akan mengurangi atau memutus arus pengisian untuk mencegah terjadinya *overcharge*. Sebaliknya, ketika tegangan baterai berada pada batas minimum yang telah ditentukan, SCC akan membatasi atau memutus suplai energi ke beban guna mencegah terjadinya *deep discharge*. Dengan demikian, SCC memiliki peran penting dalam menjaga keandalan sistem dan memperpanjang umur operasional baterai.

Secara umum, aliran energi pada sistem *Off-Grid* berlangsung dari modul surya menuju SCC, kemudian disimpan pada baterai sebelum digunakan oleh beban.

4.1.2 Prinsip Kerja *Solar Charger Controller* Hybrid PLTS - PLTB

Pada sistem Hybrid PLTS–PLTB, *Solar Charge Controller* menerima energi listrik yang berasal dari dua sumber pembangkit, yaitu modul surya dan turbin angin. Energi yang dihasilkan oleh kedua sumber tersebut dikendalikan oleh SCC sebelum disalurkan ke baterai maupun beban.

Keberadaan dua sumber energi memungkinkan SCC memperoleh daya masukan yang lebih stabil dibandingkan sistem *Off-Grid*. Pada kondisi intensitas radiasi matahari tinggi, energi yang dihasilkan modul surya menjadi sumber utama pengisian baterai. Sebaliknya, ketika intensitas matahari menurun, energi dari turbin angin dapat membantu mempertahankan proses pengisian baterai dan suplai daya ke beban.

Dalam sistem *Hybrid*, SCC berfungsi mengatur distribusi energi dari kedua sumber pembangkit sehingga tegangan dan arus yang diterima baterai tetap berada dalam batas operasi yang aman. Oleh karena itu, penggunaan SCC pada sistem *Hybrid* dapat meningkatkan kontinuitas pasokan energi dan keandalan sistem secara keseluruhan.

4.2 Tabel Hasil Pengukuran

Tabel 4.1 Pengujian *input solar charger controller off-grid* 9 juni 2026

Waktu	Kondisi Cuaca	Tegangan Input (V)	Arus Input (A)	Daya Input (W)	Intesitas Cahaya (Lux)
08:00	Cerah	13,6	0,6	9,248	32049
10 : 00	Cerah	14,2	0,70	9,94	61441
12 : 00	Cerah	20,3	1,20	24,36	1145696
14 : 00	Cerah	19,2	0,82	15,74	954989
16 : 00	Cerah	17,6	0,32	5,362	72392

Tabel 4.2 Pengujian *output solar charger controller off-grid* 9 juni 2026

Waktu	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)	Daya Output (W)
08:00	12,4	0,42	5,18
10 : 00	12,6	0,52	6,552
12 : 00	13,4	1,46	19,556
14 : 00	13,5	0,91	12,29
16 : 00	13,1	0,21	2,788

Pengujian *Solar Charge Controller (SCC)* pada sistem PLTS off-grid dilakukan untuk mengetahui karakteristik daya yang diterima dan disalurkan SCC selama proses pengisian baterai. Parameter yang diamati meliputi tegangan input, arus *input*, daya *input*, intensitas cahaya matahari, tegangan output, arus output, dan daya output. Pengukuran dilakukan pada tanggal 9 Juni 2026 mulai pukul 08.00 WIB hingga 16.00 WIB untuk mengamati perubahan kinerja sistem selama periode penyinaran matahari.

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, terlihat bahwa perubahan intensitas cahaya matahari berpengaruh terhadap besarnya daya yang dihasilkan panel surya dan daya yang disalurkan oleh SCC menuju baterai. Semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima panel surya, semakin besar energi listrik yang dihasilkan sehingga daya masukan dan daya keluaran SCC juga mengalami peningkatan.

Pada pukul 08.00 WIB, intensitas cahaya yang terukur sebesar 32.049 Lux. Pada kondisi tersebut diperoleh tegangan input sebesar 13,6 V dan arus input sebesar 0,68 A, sehingga menghasilkan daya input sebesar 9,248 W. Pada sisi keluaran diperoleh tegangan sebesar 12,4 V dan arus sebesar 0,42 A, sehingga menghasilkan daya output sebesar 5,18 W. Nilai daya yang relatif rendah pada pagi hari menunjukkan bahwa energi yang diterima panel surya masih terbatas karena posisi matahari belum berada pada kondisi optimum terhadap permukaan panel.

Pada pukul 10.00 WIB, intensitas cahaya meningkat menjadi 61.441 Lux. Peningkatan intensitas cahaya tersebut menyebabkan daya input meningkat menjadi 9,94 W, sedangkan daya output meningkat menjadi 6,552 W. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan radiasi matahari berpengaruh terhadap peningkatan energi listrik yang dihasilkan panel surya dan kemampuan SCC dalam menyalurkan daya menuju baterai.

Pada pukul 12.00 WIB, diperoleh intensitas cahaya tertinggi sebesar 1.145.696 Lux. Pada kondisi ini tegangan input meningkat menjadi 20,3 V dan arus input sebesar 1,20 A, sehingga menghasilkan daya input sebesar 24,36 W. Pada sisi keluaran diperoleh tegangan sebesar 13,4 V dan arus sebesar 1,46 A, sehingga menghasilkan daya output sebesar 19,556 W. Besarnya daya input dan daya output

pada periode ini menunjukkan bahwa sistem bekerja pada kondisi optimum. Tingginya energi yang diterima panel surya memungkinkan SCC menyalurkan daya ke baterai secara lebih efektif dibandingkan waktu pengukuran lainnya.

Pada pukul 14.00 WIB, intensitas cahaya mulai mengalami penurunan menjadi 954.989 Lux. Meskipun demikian, daya input yang diterima SCC masih tergolong tinggi yaitu sebesar 15,74 W, sedangkan daya output sebesar 12,29 W. Hasil tersebut menunjukkan bahwa SCC masih mampu mempertahankan proses pengisian baterai dengan baik meskipun energi yang diterima panel surya mulai berkurang.

Pada pukul 16.00 WIB, intensitas cahaya menurun secara signifikan menjadi 72.392 Lux. Penurunan intensitas cahaya tersebut menyebabkan daya input turun menjadi 5,362 W, sedangkan daya output yang dihasilkan hanya sebesar 2,788 W. Kondisi ini menunjukkan bahwa berkurangnya radiasi matahari pada sore hari menyebabkan kemampuan panel surya dalam menghasilkan energi listrik menurun, sehingga daya yang dapat disalurkan SCC menuju baterai juga semakin kecil.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran menunjukkan bahwa daya input dan daya output SCC mengalami peningkatan dari pagi hingga siang hari dan mencapai nilai maksimum pada pukul 12.00 WIB, kemudian mengalami penurunan pada sore hari. Daya input tertinggi yang diperoleh selama pengujian adalah sebesar 24,36 W, sedangkan daya output tertinggi sebesar 19,556 W. Sebaliknya, daya input terendah sebesar 5,362 W dan daya output terendah sebesar 2,788 W terjadi pada pukul 16.00 WIB.

Perbedaan antara daya input dan daya output pada setiap waktu pengukuran menunjukkan adanya rugi-rugi daya selama proses konversi dan pengaturan energi listrik oleh SCC. Rugi-rugi tersebut dapat disebabkan oleh karakteristik komponen elektronika pada SCC, kondisi baterai selama proses pengisian, rugi-rugi penghantar, serta proses pengaturan tegangan dan arus yang dilakukan SCC untuk menjaga kestabilan sistem pengisian.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa Solar Charge Controller mampu menjalankan fungsinya dengan baik dalam mengatur dan menyalurkan energi listrik dari panel surya menuju baterai. Kinerja SCC

menunjukkan hubungan yang erat dengan besarnya energi yang dihasilkan panel surya, di mana peningkatan intensitas cahaya matahari menyebabkan peningkatan daya input dan daya output sistem. Dengan demikian, intensitas cahaya matahari merupakan faktor utama yang mempengaruhi performa sistem PLTS off-grid selama proses pengisian baterai berlangsung.

Tabel 4.3 Pengujian Input solar charger controller Hybrid 9 juni 2026

PLTS + PLTB

Waktu	Tegangan Input (V)	Arus Input (A)	Daya Input (W)
08:00	12,9	0,35	4,52
10 : 00	13,4	0,7	9,38
12 : 00	14	1,20	16,8
14 : 00	13,8	0,9	10,76
16 : 00	12,8	0,45	5,76

Tabel 4.4 Pengujian output solar charger controller Hybrid 9 juni 2026

Waktu	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)	Daya Output (W)
08:00	12,8	0,27	3,46
10 : 00	13,2	0,56	7,41
12 : 00	13,8	1,01	13,94
14 : 00	13,5	0,63	8,51
16 : 00	12,7	0,27	3,456

Pengujian *Solar Charge Controller (SCC)* pada sistem *hybrid* PLTS–PLTB dilakukan untuk mengetahui karakteristik kinerja SCC dalam menerima, mengatur, dan menyalurkan energi listrik yang berasal dari kombinasi panel surya dan turbin angin menuju baterai. Pengujian dilakukan pada tanggal 9 Juni 2026 dengan melakukan pengukuran parameter tegangan input, arus input, daya input, tegangan output, arus output, dan daya output pada beberapa interval waktu, yaitu pukul 08.00 WIB, 10.00 WIB, 12.00 WIB, 14.00 WIB, dan 16.00 WIB.

Berdasarkan hasil pengukuran yang diperoleh, terlihat bahwa nilai tegangan, arus, dan daya pada sisi input maupun sisi output SCC mengalami perubahan selama periode pengujian. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa energi yang diterima SCC dari sistem *hybrid* dipengaruhi oleh kondisi operasi sumber energi yang digunakan, yaitu panel surya dan turbin angin.

Pada pukul 08.00 WIB, diperoleh tegangan input sebesar 12,9 V dan arus input sebesar 0,35 A, sehingga menghasilkan daya input sebesar 4,52 W. Pada sisi keluaran SCC diperoleh tegangan sebesar 12,8 V dan arus sebesar 0,27 A, sehingga menghasilkan daya output sebesar 3,46 W. Nilai daya yang diperoleh pada waktu ini merupakan nilai terendah selama pengujian. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa energi yang diterima SCC masih relatif kecil sehingga daya yang dapat disalurkan menuju baterai juga masih terbatas.

Pada pukul 10.00 WIB, terjadi peningkatan pada seluruh parameter pengukuran. Tegangan input meningkat menjadi 13,4 V dengan arus input sebesar 0,70 A, sehingga menghasilkan daya input sebesar 9,38 W. Pada sisi keluaran diperoleh tegangan sebesar 13,2 V dan arus sebesar 0,56 A, sehingga menghasilkan daya output sebesar 7,41 W. Peningkatan daya input dan daya output pada periode ini menunjukkan bahwa SCC menerima energi yang lebih besar dibandingkan pengukuran sebelumnya, sehingga energi yang dapat disalurkan menuju baterai juga mengalami peningkatan.

Kondisi operasi terbaik selama pengujian terjadi pada pukul 12.00 WIB. Pada waktu tersebut diperoleh tegangan input sebesar 14,0 V dan arus input sebesar 1,20 A, sehingga menghasilkan daya input sebesar 16,8 W. Pada sisi keluaran diperoleh tegangan sebesar 13,8 V dan arus sebesar 1,01 A, sehingga menghasilkan daya output sebesar 13,94 W. Besarnya nilai daya yang diperoleh pada periode ini menunjukkan bahwa SCC menerima energi paling besar dibandingkan waktu pengujian lainnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem *hybrid* mampu menyediakan suplai energi yang optimal sehingga SCC dapat bekerja secara maksimal dalam proses pengisian baterai.

Pada pukul 14.00 WIB, nilai tegangan input mengalami sedikit penurunan menjadi 13,8 V dengan arus input sebesar 0,90 A, sehingga daya input yang

diterima SCC menjadi 10,76 W. Pada sisi keluaran diperoleh tegangan sebesar 13,5 V dan arus sebesar 0,63 A, sehingga menghasilkan daya output sebesar 8,51 W. Meskipun terjadi penurunan dibandingkan pengukuran pukul 12.00 WIB, nilai daya yang diperoleh masih tergolong cukup tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa SCC masih mampu menyalurkan energi listrik menuju baterai secara efektif meskipun daya yang diterima mulai berkurang.

Selanjutnya, pada pukul 16.00 WIB, diperoleh tegangan input sebesar 12,8 V dan arus input sebesar 0,45 A, sehingga menghasilkan daya input sebesar 5,76 W. Pada sisi keluaran diperoleh tegangan sebesar 12,7 V dan arus sebesar 0,27 A, sehingga menghasilkan daya output sebesar 3,456 W. Penurunan daya pada periode ini menunjukkan bahwa energi yang diterima SCC lebih kecil dibandingkan periode sebelumnya, sehingga daya yang dapat disalurkan menuju baterai juga mengalami penurunan.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran menunjukkan bahwa daya input dan daya output SCC mengalami pola peningkatan dari pagi hingga siang hari, kemudian mengalami penurunan pada sore hari. Nilai daya input tertinggi diperoleh pada pukul 12.00 WIB sebesar 16,8 W, sedangkan daya output tertinggi diperoleh pada waktu yang sama sebesar 13,94 W. Sebaliknya, nilai daya input terendah diperoleh pada pukul 08.00 WIB sebesar 4,52 W, dengan daya output sebesar 3,46 W.

Hasil pengukuran tersebut menunjukkan bahwa SCC mampu menjalankan fungsinya sebagai pengatur proses pengisian baterai pada sistem hybrid PLTS–PLTB dengan baik. Perubahan nilai daya yang terjadi pada sisi input dan output menunjukkan adanya hubungan yang erat antara energi yang diterima SCC dan energi yang dapat disalurkan menuju baterai. Ketika daya masukan meningkat, daya keluaran SCC juga mengalami peningkatan. Sebaliknya, ketika daya masukan menurun, daya keluaran SCC turut mengalami penurunan.

Selain itu, perbedaan antara daya input dan daya output pada setiap waktu pengukuran menunjukkan adanya rugi-rugi daya selama proses konversi dan pengaturan energi listrik di dalam SCC. Rugi-rugi daya tersebut dapat disebabkan oleh karakteristik komponen elektronika pada SCC, rugi-rugi penghantar, kondisi

pengisian baterai, serta proses pengaturan tegangan dan arus yang dilakukan SCC untuk menjaga keamanan sistem pengisian. Meskipun demikian, SCC tetap mampu menyalurkan sebagian besar energi yang diterima dari sistem hybrid menuju baterai sehingga proses pengisian dapat berlangsung secara berkelanjutan.

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem hybrid PLTS–PLTB mampu menyediakan energi listrik yang cukup stabil untuk mendukung proses pengisian baterai. SCC juga menunjukkan kinerja yang baik dalam mengatur dan menyalurkan energi dari kedua sumber pembangkit tersebut. Kondisi operasi terbaik diperoleh pada pukul 12.00 WIB ketika daya input mencapai nilai maksimum, sedangkan kondisi operasi terendah terjadi pada pukul 08.00 WIB dan 16.00 WIB ketika daya yang diterima SCC relatif lebih kecil. Hasil pengukuran ini menunjukkan bahwa integrasi panel surya dan turbin angin pada sistem hybrid dapat mendukung kontinuitas penyediaan energi listrik serta meningkatkan keandalan sistem pengisian baterai dibandingkan penggunaan satu sumber energi saja.

4.3 Analisis Efisiensi Solar Charger Controller Pada Sistem Off-Grid

Analisis efisiensi Solar Charge Controller (SCC) dilakukan untuk mengetahui kemampuan SCC dalam menyalurkan daya listrik yang diterima dari panel surya menuju baterai. Nilai efisiensi diperoleh dengan membandingkan daya keluaran SCC terhadap daya masukan SCC. Semakin tinggi nilai efisiensi yang diperoleh, maka semakin baik kemampuan SCC dalam menyalurkan energi listrik dengan rugi-rugi daya yang lebih kecil.

Berdasarkan hasil pengukuran yang telah dilakukan pada tanggal 9 Juni 2026 pukul 12:00 wib, diperoleh nilai daya masukan dan daya keluaran SCC yang bervariasi sesuai dengan perubahan intensitas cahaya matahari selama periode pengujian. Nilai efisiensi SCC dihitung menggunakan persamaan 2.6:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{19,556}{24,36} \times 100\%$$

$$\eta = 80,28 \%$$

Tabel 4.5 Hasil perhitungan *efisiensi solar charger controller Off - Grid*

Waktu	Daya Input (W)	Daya Output (W)	Efisiensi (%)
08:00	9,248	5,18	56,01
10 : 00	9,94	7,41	65,92
12 : 00	24,36	13,94	80,28
14 : 00	15,74	8,51	78,08
16 : 00	5,632	2,788	52,00

Analisis efisiensi *Solar Charge Controller* (SCC) dilakukan untuk mengetahui tingkat kemampuan SCC dalam menyalurkan daya listrik yang diterima dari panel surya menuju baterai. Efisiensi SCC diperoleh dari perbandingan antara daya keluaran (Pout) terhadap daya masukan (Pin). Nilai efisiensi yang dihasilkan menunjukkan seberapa besar energi listrik yang dapat dimanfaatkan setelah melewati proses pengaturan dan pengisian oleh SCC.

Berdasarkan hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 4.5, diperoleh nilai efisiensi SCC yang bervariasi selama periode pengujian. Variasi tersebut menunjukkan bahwa kinerja SCC dipengaruhi oleh besarnya daya masukan yang diterima dari panel surya serta kondisi pengoperasian sistem selama proses pengisian baterai.

Pada pukul 08.00 WIB, daya masukan yang diterima SCC sebesar 9,248 W, sedangkan daya keluaran yang berhasil disalurkan ke baterai sebesar 5,18 W. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh efisiensi sebesar 56,01%. Nilai efisiensi yang relatif rendah pada pagi hari menunjukkan bahwa SCC belum bekerja pada kondisi optimum karena energi yang dihasilkan panel surya masih terbatas akibat rendahnya intensitas penyinaran matahari.

Pada pukul 10.00 WIB, daya masukan meningkat menjadi 9,94 W dan daya keluaran meningkat menjadi 7,41 W, sehingga menghasilkan efisiensi sebesar 65,92%. Peningkatan efisiensi dibandingkan pengukuran sebelumnya menunjukkan bahwa bertambahnya energi yang diterima panel surya menyebabkan proses penyaluran daya menuju baterai berlangsung lebih efektif.

Pada pukul 12.00 WIB, diperoleh daya masukan tertinggi sebesar 24,36 W dan daya keluaran sebesar 13,94 W. Kondisi tersebut menghasilkan efisiensi sebesar 80,28%, yang merupakan nilai efisiensi tertinggi selama pengujian. Tingginya efisiensi pada periode ini menunjukkan bahwa SCC bekerja pada kondisi yang paling optimal. Besarnya energi yang diterima dari panel surya memungkinkan SCC menyalurkan daya ke baterai dengan rugi-rugi daya yang relatif kecil.

Pada pukul 14.00 WIB, daya masukan yang diterima SCC menurun menjadi 15,74 W, sedangkan daya keluaran sebesar 8,51 W. Hasil perhitungan menunjukkan efisiensi sebesar 78,08%. Meskipun daya masukan mengalami penurunan dibandingkan pukul 12.00 WIB, nilai efisiensi masih relatif tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa SCC masih mampu mempertahankan kinerja pengisian baterai secara efektif ketika daya yang diterima panel surya mulai berkurang.

Pada pukul 16.00 WIB, daya masukan yang diterima SCC turun menjadi 5,632 W, sedangkan daya keluaran sebesar 2,788 W. Kondisi tersebut menghasilkan efisiensi sebesar 52,00%, yang merupakan nilai efisiensi terendah setelah pengukuran pagi hari. Penurunan efisiensi ini menunjukkan bahwa berkurangnya energi yang dihasilkan panel surya pada sore hari menyebabkan SCC tidak dapat bekerja pada kondisi optimum. Pada kondisi daya masukan yang rendah, rugi-rugi daya yang terjadi menjadi lebih dominan sehingga nilai efisiensi sistem mengalami penurunan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa efisiensi SCC cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya daya masukan yang diterima dari panel surya. Efisiensi tertinggi diperoleh pada saat daya masukan mencapai nilai maksimum, yaitu pada pukul 12.00 WIB sebesar 80,28%, sedangkan efisiensi terendah terjadi pada pukul 16.00 WIB sebesar 52,00%. Pola tersebut menunjukkan bahwa besarnya daya yang dihasilkan panel surya memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja SCC dalam proses pengisian baterai.

Berdasarkan seluruh data pengujian, diperoleh nilai efisiensi rata-rata SCC sebesar:

$$\eta_{rata-rata} = \frac{56,01 + 65,92 + 80,28 + 78,08 + 52,00}{5}$$

$$\eta_{rata-rata} = 66,46\%$$

Nilai efisiensi rata-rata sebesar 66,46% menunjukkan bahwa SCC mampu menyalurkan sebagian besar daya yang diterima dari panel surya menuju baterai, meskipun masih terdapat rugi-rugi daya selama proses konversi dan pengaturan pengisian energi listrik. Dengan demikian, kinerja SCC pada sistem PLTS off-grid dapat dikategorikan cukup baik dalam mendukung proses pengisian baterai selama periode pengujian.

4.4 Analisis Efisiensi *Solar Charger Controller* Pada Sistem Hybrid

Analisis efisiensi *Solar Charge Controller* (SCC) pada sistem hybrid PLTS–PLTB dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan SCC dalam mengatur dan menyalurkan energi listrik yang berasal dari kombinasi panel surya dan turbin angin menuju baterai. Efisiensi SCC dihitung berdasarkan perbandingan antara daya keluaran (P_{out}) dan daya masukan (P_{in}) yang diterima SCC selama proses pengisian baterai berlangsung.

Perhitungan efisiensi SCC menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{13,94}{16,8} \times 100\%$$

$$\eta = 82,98 \%$$

Tabel 4.6 Hasil perhitungan *efisiensi solar charger controller Hybrid*

Waktu	Daya Input (W)	Daya Output (W)	Efisiensi (%)
08:00	4,52	3,46	76,55
10 : 00	9,38	7,41	79,00
12 : 00	16,8	13,94	82,98
14 : 00	10,76	8,51	79,09
16 : 00	5,76	3,456	60,00

Analisis efisiensi *Solar Charge Controller* (SCC) pada sistem *hybrid* PLTS–PLTB dilakukan untuk mengetahui tingkat kemampuan SCC dalam menyalurkan energi listrik yang diterima dari sumber pembangkit menuju baterai. Efisiensi SCC dihitung berdasarkan perbandingan antara daya keluaran (P_{out}) terhadap daya masukan (P_{in}). Nilai efisiensi yang diperoleh menunjukkan besarnya energi yang berhasil disalurkan ke baterai dibandingkan dengan energi yang diterima SCC dari sistem pembangkit.

Berdasarkan hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 4.6, diperoleh nilai efisiensi SCC yang bervariasi selama periode pengujian. Perubahan nilai efisiensi tersebut menunjukkan bahwa kinerja SCC dipengaruhi oleh besarnya daya masukan yang diterima dari sistem *hybrid* serta kondisi operasi pengisian baterai pada saat pengujian berlangsung.

Pada pukul 08.00 WIB, daya masukan yang diterima SCC sebesar 4,52 W, sedangkan daya keluaran sebesar 3,46 W. Kondisi tersebut menghasilkan efisiensi sebesar 76,55%. Nilai efisiensi ini menunjukkan bahwa SCC telah mampu menyalurkan sebagian besar energi yang diterima menuju baterai meskipun daya masukan yang tersedia masih relatif rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa SCC tetap dapat bekerja dengan baik pada kondisi daya masukan yang kecil.

Pada pukul 10.00 WIB, daya masukan meningkat menjadi 9,38 W dan daya keluaran meningkat menjadi 7,41 W. Peningkatan daya tersebut menghasilkan efisiensi sebesar 79,00%. Kenaikan efisiensi dibandingkan periode sebelumnya menunjukkan bahwa bertambahnya daya yang diterima SCC berpengaruh terhadap peningkatan kemampuan SCC dalam menyalurkan energi listrik ke baterai. Dengan daya masukan yang lebih besar, proses pengisian baterai berlangsung lebih efektif sehingga rugi-rugi daya yang terjadi relatif lebih kecil.

Pada pukul 12.00 WIB, diperoleh daya masukan tertinggi sebesar 16,8 W dan daya keluaran sebesar 13,94 W. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi SCC mencapai 82,98%, yang merupakan nilai efisiensi tertinggi selama pengujian. Tingginya efisiensi pada periode ini menunjukkan bahwa SCC bekerja pada kondisi optimum. Besarnya energi yang diterima dari sistem *hybrid* memungkinkan SCC

menyalurkan daya listrik ke baterai secara lebih efektif dengan tingkat kehilangan daya yang lebih rendah dibandingkan waktu pengujian lainnya.

Pada pukul 14.00 WIB, daya masukan menurun menjadi 10,76 W, sedangkan daya keluaran sebesar 8,51 W. Meskipun daya yang diterima SCC berkurang dibandingkan pukul 12.00 WIB, efisiensi yang diperoleh masih sebesar 79,09%. Nilai ini menunjukkan bahwa SCC masih mampu mempertahankan kinerja yang baik dalam menyalurkan energi listrik ke baterai. Penurunan daya masukan belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan SCC dalam melakukan proses pengisian.

Pada pukul 16.00 WIB, daya masukan yang diterima SCC sebesar 5,76 W, sedangkan daya keluaran sebesar 3,456 W. Kondisi tersebut menghasilkan efisiensi sebesar 60,00%, yang merupakan nilai efisiensi terendah selama pengujian. Penurunan efisiensi pada sore hari menunjukkan bahwa berkurangnya daya masukan menyebabkan SCC tidak dapat bekerja secara optimal. Pada kondisi ini, energi yang diterima dari sistem hybrid relatif kecil sehingga rugi-rugi daya yang terjadi menjadi lebih dominan dibandingkan energi yang berhasil disalurkan ke baterai.

Secara keseluruhan, nilai efisiensi SCC pada sistem hybrid PLTS–PLTB berada pada rentang 60,00% hingga 82,98%. Efisiensi tertinggi diperoleh pada pukul 12.00 WIB, sedangkan efisiensi terendah terjadi pada pukul 16.00 WIB. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar daya masukan yang diterima SCC, maka semakin tinggi pula efisiensi yang dihasilkan. Sebaliknya, ketika daya masukan menurun, kemampuan SCC dalam menyalurkan energi listrik ke baterai juga mengalami penurunan.

Nilai efisiensi rata-rata SCC selama pengujian dapat dihitung sebagai berikut:

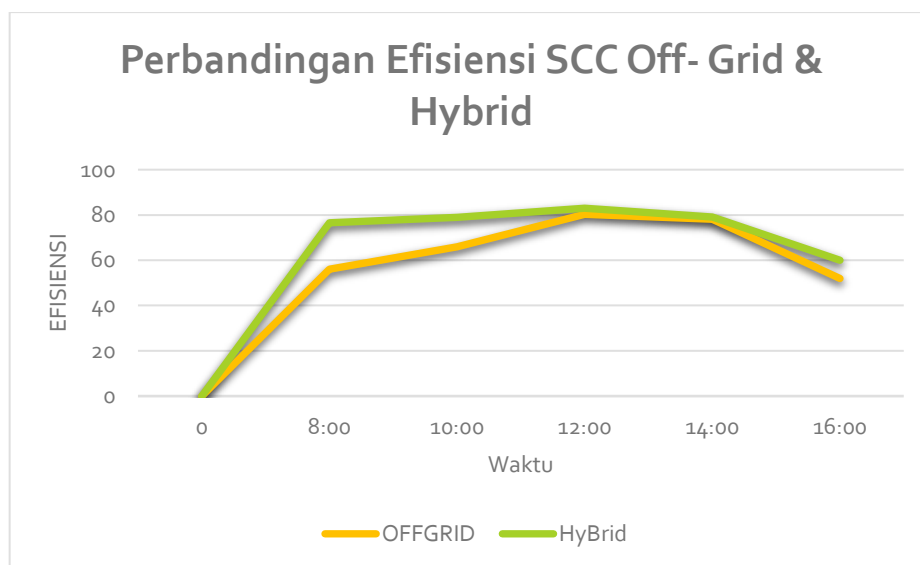
$$\eta_{rata-rata} = \frac{76,55 + 79,00 + 82,98 + 79,09 + 60,00}{5}$$

$$\eta_{rata-rata} = 75,52 \%$$

4.5 Perbandingan Efisiensi SCC Off-Grid & Hybrid

Tabel 4. 7 Perbandingan *Efisiensi SCC Off– Grid & Hybrid*

Sistem	Efisiensi Minimum	Efisiensi Maksimum	Efisiensi Rata - Rata
Off-Grid	52,00 %	80,28 %	66,46 %
Hybrid	60,00 %	82,98 %	75,52 %



Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Efisiensi SCC Off – Grid & Hybrid

Berdasarkan grafik perbandingan efisiensi SCC, terlihat bahwa sistem Hybrid PLTS–PLTB memiliki nilai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sistem Off-Grid pada seluruh waktu pengujian. Pada pukul 08.00 WIB, efisiensi sistem hybrid mencapai 76,55%, sedangkan sistem off-grid hanya 56,01%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sistem hybrid mampu memanfaatkan energi yang tersedia dengan lebih baik pada kondisi daya masukan yang rendah.

Seiring bertambahnya waktu pengujian, efisiensi kedua sistem mengalami peningkatan dan mencapai nilai maksimum pada pukul 12.00 WIB. Sistem off-grid menghasilkan efisiensi sebesar 80,28%, sedangkan sistem hybrid mencapai 82,98%. Kondisi ini menunjukkan bahwa kedua sistem bekerja mendekati kondisi optimum ketika daya masukan dari sumber energi berada pada nilai tertinggi. Setelah pukul 12.00 WIB, efisiensi kedua sistem mulai mengalami penurunan. Namun demikian, sistem hybrid tetap menunjukkan performa yang lebih baik

dibandingkan sistem off-grid. Pada pukul 16.00 WIB, efisiensi sistem hybrid masih mencapai 60,00%, sedangkan sistem off-grid turun menjadi 52,00%.

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan bahwa penggunaan sistem hybrid menghasilkan kinerja SCC yang lebih stabil dan lebih efisien dibandingkan sistem off-grid. Hal ini dibuktikan oleh nilai efisiensi rata-rata sistem hybrid sebesar 75,52%, yang lebih tinggi dibandingkan sistem off-grid sebesar 66,46%. Adanya kombinasi sumber energi dari panel surya dan turbin angin memungkinkan daya masukan ke SCC menjadi lebih stabil, sehingga rugi-rugi daya dapat diminimalkan dan efisiensi sistem meningkat.

4.6 Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian dan perhitungan efisiensi Solar Charge Controller (SCC), diperoleh bahwa nilai efisiensi pada sistem Off-Grid dan Hybrid mengalami perubahan selama periode pengujian. Perubahan tersebut dipengaruhi oleh besarnya daya masukan yang diterima SCC dari sumber energi serta kondisi pengisian baterai pada saat pengujian berlangsung.

Pada sistem Off-Grid, nilai efisiensi SCC berada pada rentang 52,00% hingga 80,28% dengan nilai efisiensi rata-rata sebesar 66,46%. Efisiensi terendah terjadi pada pukul 16.00 WIB sebesar 52,00%, sedangkan efisiensi tertinggi terjadi pada pukul 12.00 WIB sebesar 80,28%. Peningkatan efisiensi yang terjadi dari pagi menuju siang hari menunjukkan bahwa semakin besar daya yang dihasilkan panel surya, maka semakin optimal kinerja SCC dalam menyalurkan energi listrik menuju baterai. Pada saat intensitas cahaya matahari mencapai nilai maksimum, daya masukan yang diterima SCC juga meningkat sehingga rugi-rugi daya yang terjadi relatif lebih kecil dibandingkan energi yang disalurkan ke baterai.

Sementara itu, pada sistem Hybrid PLTS–PLTB diperoleh nilai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sistem Off-Grid. Nilai efisiensi minimum yang diperoleh sebesar 60,00%, sedangkan efisiensi maksimum mencapai 82,98%, dengan nilai efisiensi rata-rata sebesar 75,52%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa SCC pada sistem Hybrid memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menyalurkan energi listrik menuju baterai dibandingkan SCC pada sistem Off-Grid.

Perbedaan nilai efisiensi antara kedua sistem menunjukkan bahwa kombinasi sumber energi dari panel surya dan turbin angin mampu meningkatkan stabilitas daya masukan yang diterima SCC. Pada sistem Off-Grid, energi listrik sepenuhnya bergantung pada intensitas cahaya matahari. Ketika intensitas cahaya menurun, daya yang dihasilkan panel surya juga menurun sehingga efisiensi SCC ikut mengalami penurunan. Sebaliknya, pada sistem Hybrid terdapat kontribusi energi dari turbin angin yang membantu mempertahankan suplai daya ketika keluaran panel surya berkurang. Kondisi tersebut menyebabkan daya masukan yang diterima SCC menjadi lebih stabil sehingga proses pengisian baterai dapat berlangsung lebih efektif.

Berdasarkan Tabel 4.7, efisiensi rata-rata sistem Hybrid sebesar 75,52% lebih tinggi dibandingkan sistem Off-Grid yang hanya sebesar 66,46%. Selisih efisiensi rata-rata sebesar 9,06% menunjukkan bahwa penerapan sistem Hybrid mampu meningkatkan kinerja SCC dalam proses pengisian baterai. Selain itu, efisiensi minimum sistem Hybrid juga lebih tinggi dibandingkan sistem Off-Grid, yang menunjukkan bahwa sistem Hybrid memiliki performa yang lebih baik pada kondisi daya masukan yang rendah.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa stabilitas daya masukan merupakan faktor penting yang mempengaruhi efisiensi SCC. Semakin stabil daya yang diterima SCC, maka semakin besar energi yang dapat disalurkan menuju baterai dengan rugi-rugi daya yang lebih kecil. Oleh karena itu, penggunaan sistem Hybrid PLTS–PLTB dapat menjadi alternatif yang lebih efektif dibandingkan sistem Off-Grid karena mampu meningkatkan efisiensi pengisian baterai serta menjaga kontinuitas suplai energi listrik.

Secara keseluruhan, hasil pengujian membuktikan bahwa SCC pada kedua sistem mampu menjalankan fungsinya sebagai pengatur proses pengisian baterai dengan baik. Namun, sistem Hybrid menunjukkan performa yang lebih unggul dibandingkan sistem Off-Grid, baik dari segi efisiensi minimum, efisiensi maksimum, maupun efisiensi rata-rata. Dengan demikian, sistem Hybrid memiliki potensi yang lebih baik untuk diterapkan pada sistem pembangkit listrik tenaga surya yang memerlukan keandalan dan efisiensi pengisian baterai yang lebih tinggi.

Apabila dibandingkan dengan karakteristik Solar Charge Controller (SCC) tipe Maximum Power Point Tracking (MPPT), nilai efisiensi yang diperoleh pada penelitian ini masih berada di bawah efisiensi konversi SCC MPPT yang secara umum dapat mencapai 95%–98% pada kondisi operasi optimum. Namun demikian, perbedaan tersebut tidak dapat dijadikan dasar untuk menyatakan bahwa SCC bekerja di bawah spesifikasi, karena nilai efisiensi yang dihitung dalam penelitian ini merupakan efisiensi sistem pengisian baterai secara keseluruhan yang diperoleh dari perbandingan antara daya masukan (*input power*) dan daya keluaran (*output power*) SCC. Nilai efisiensi tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional, seperti fluktuasi intensitas radiasi matahari, variasi kecepatan angin pada sistem Hybrid, kondisi *State of Charge* (SOC) baterai, serta rugi-rugi daya yang terjadi pada kabel, sambungan, dan komponen pendukung lainnya. Meskipun demikian, sistem Hybrid menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan sistem Off-Grid dengan nilai efisiensi rata-rata sebesar 75,52%, sedangkan sistem Off-Grid memiliki efisiensi rata-rata sebesar 66,46%. Selisih efisiensi sebesar 9,06% menunjukkan bahwa kombinasi sumber energi panel surya dan turbin angin mampu meningkatkan stabilitas daya masukan yang diterima SCC sehingga proses pengisian baterai dapat berlangsung lebih efektif. Dengan demikian, penerapan sistem Hybrid PLTS–PLTB memiliki potensi yang lebih baik dalam meningkatkan kinerja pengisian baterai dibandingkan sistem PLTS Off-Grid.