

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Fotovoltaik Terkonsentrasi**

Fotovoltaik terkonsentrasi, atau *concentrated photovoltaics* (CPV), adalah sistem fotovoltaik yang menggunakan sistem optik konsentrator untuk menambahkan jumlah penyinaran matahari pada sel fotovoltaik. Secara umum di sistem CPV, sebuah konsentrator digunakan untuk memfokuskan cahaya matahari ke serangkaian sel surya. Dengan demikian, luas dari sel surya dapat diperkecil berdasarkan rasio konsentrasi. Dengan demikian pula, setiap satuan luas permukaan sel surya menerima intensitas cahaya yang lebih tinggi dibandingkan intensitas matahari tanpa konsentrator [10]. Konsentrator dalam CPV dapat berupa cermin dan atau lensa, bergantung pada desain sistem CPV. CPV merupakan teknologi yang belum banyak diterapkan di dalam implementasi sistem surya saat ini secara komersial. Gambar 2.1 menunjukkan contoh sistem CPV.



Gambar 2.1 - Contoh Fotovoltaik Terkonsentrasi [11]

##### **2.1.1. Sejarah CPV**

Teknologi CPV secara efektif pertama dikembangkan di Amerika Serikat pada National Sandia Laboratories pada tahun 1976. Ketika itu, dibuat sebuah rangkaian CPV berskala 1 kWp yang disebut Sandia I dan Sandia II. Pengembangan ini dilakukan untuk mengidentifikasi dan berusaha mencari

solusi untuk masalah-masalah teknis mengenai sistem fotovoltaik terkonsentrasi. CPV dikembangkan sebagai suatu cara alternatif untuk meningkatkan efisiensi sel surya di daerah yang kaya akan sinar matahari. Banyak sistem lain dikembangkan di Perancis, Italia, dan Spanyol dengan purwarupa berskala 500 Wp sampai dengan 1kWp. Pengembangan ini didasari oleh naik drastisnya harga energi dari minyak yang memasok bagian besar dari kebutuhan energi listrik serta transportasi dunia saat itu, tetapi pengembangan segera melambat kembali ketika sebuah solusi selain energi matahari muncul. [10]

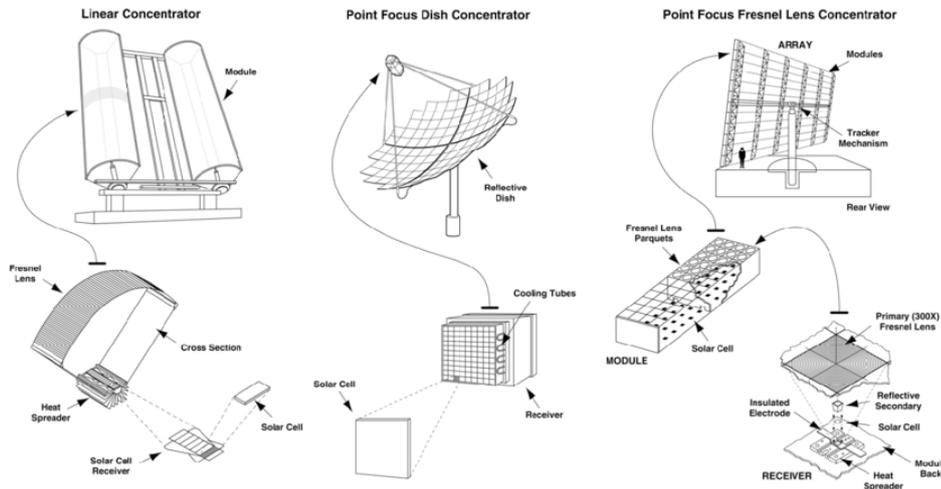
Pengembangan CPV terus berjalan pada akhir abad ke-20, dan berbagai usaha untuk mengintegrasikan CPV sebagai suatu iterasi teknologi PV baru dianggap sangat penting. Namun, dengan mempertimbangkan bahwa proyeksi jangka pendek untuk sistem CPV, teknologi ini belum cukup mengurangi biaya agar kompetitif dengan listrik konvensional, semua aplikasi CPV tetap berukuran kecil dan dianggap kurang sesuai untuk sepenuhnya dipenuhi oleh konsentrator [10].

CPV tidak saat ini memiliki jalur tersendiri dalam pemecahan pasar PV berdasarkan teknologi. Meskipun tampak gagal secara komersial, adanya jalur pengembangan dan riset secara terus-menerus telah memungkinkan CPV untuk tetap menjadi subjek di tingkat akademik (misalnya, konsentrator secara teratur diteliti dalam program doktorat di Instituto de Energía Solar Universidad Politécnica de Madrid (IES/UPM), di Spanyol) dan menciptakan kelompok spesialis yang kecil tetapi efektif, dan siap untuk langkah selanjutnya. [10]

### **2.1.2. Jenis Konsentrator**

Terdapat dua kategori luas dalam CPV, yaitu sistem-sistem yang memfokuskan cahaya matahari ke sebuah titik (*point-focus*), dan yang memfokuskan cahaya matahari ke sebuah garis (*line-focus*). Sistem *point-focus* umumnya dibuat dari lensa Fresnel berbentuk persegi (*square Fresnel lens*), piringan parabolik (*parabolic dish*), dan sebuah *receiver* yang diletakkan di titik fokus. Sedangkan sistem *line-focus* umumnya dibuat menggunakan lensa

Fresnel linear (*linear Fresnel lens*) dan palung parabolik (*parabolic trough*) dengan *receiver* dijejerkan berbentuk garis [10]. Beberapa jenis konsentrator yang dikembangkan untuk keperluan konsentrator CPV ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 - Contoh konsentrator sistem CPV [12]

Namun, di dalam kedua kategori tersebut, terdapat banyak jenis konsentrator CPV yang dapat digunakan untuk mengumpulkan cahaya matahari untuk keperluan sistem CPV. Konsentrator dapat berupa alat optik seperti cermin atau lensa. Beberapa jenis konsentrator CPV dijelaskan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 - Jenis-Jenis Konsentrator untuk CPV

Nama	Gambar	Karakteristik	Ref
Lensa Fresnel linear ( <i>linear Fresnel lens, LFL</i> )		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memiliki profil bergerigi untuk mengurangi material dibandingkan lensa konvensional</li> <li>• Lebih ringan dibanding lensa konvensional</li> <li>• Efisiensi optik mencapai 80-90%</li> <li>• Membutuhkan sistem pelacakan satu sumbu</li> </ul>	[4]
Reflektor Fresnel linear ( <i>linear Fresnel reflector, LFR</i> )		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terdiri dari cermin-cermin panjang yang tersusun sejajar</li> <li>• Biaya lebih rendah dibanding palung parabolik</li> <li>• Membutuhkan sistem pelacakan satu sumbu</li> <li>• Efisiensi optik lebih rendah dari LFL</li> </ul>	[6]
Palung parabolik ( <i>parabolic trough, PT</i> )		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berbentuk parabola memanjang</li> <li>• Efisiensi optik tinggi</li> <li>• Membutuhkan sistem pelacakan satu sumbu</li> <li>• Biaya manufaktur relatif tinggi</li> </ul>	[4]
Compound parabolic concentrator (CPC)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terdiri dari dua kurva parabolik</li> <li>• Dapat menerima radiasi dalam sudut penerimaan yang lebar</li> <li>• Bisa beroperasi tanpa pelacakan untuk periode tertentu</li> <li>• Rasio konsentrasi menengah (3-10x)</li> </ul>	[4]
Quantum dot solar concentrator (QDSC)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Non-tracking</i></li> <li>• Dapat menggunakan cahaya tersebar (<i>diffuse</i>) dan langsung (<i>direct</i>)</li> <li>• Menggunakan material quantum dot untuk reemisi foton</li> <li>• Biaya produksi relatif tinggi</li> </ul>	[4], [9]
V-trough solar concentrator (VSC)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menggunakan sepasang cermin datar</li> <li>• Rasio konsentrasi rendah (1-3x)</li> <li>• Konstruksi sederhana</li> <li>• Dapat beroperasi tanpa sistem pelacakan</li> </ul>	[13]

### 2.1.3. Rasio Konsentrasi

Rasio konsentrasi sebuah sistem CPV (disebut juga *concentration ratio* atau CR) adalah ukuran intensitas cahaya yang diterima oleh sel-sel surya dibandingkan dengan penyinaran tanpa konsentrator. Umumnya, CR dinyatakan sebagai kelipatan dari intensitas penyinaran matahari yang disebut satuan *suns*. Secara umum, sistem-sistem CPV dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan rasio konsentrasinya [4]:

- *Low-Concentrating Photovoltaics* (LCPV) dengan CR <10 *suns*;
- *Medium-Concentrating Photovoltaics* (MCPV) dengan CR di antara 10–100 *suns*; dan
- *High-Concentrating Photovoltaics* (HCPV) dengan CR >100 *suns*.

Sistem-sistem dengan rasio konsentrasi yang berbeda memerlukan desain yang berbeda jauh pula. Khususnya untuk MCPV dan HCPV, suatu sistem pendinginan wajib diimplementasikan karena implementasi sistem CPV dengan CR tinggi menyebabkan peningkatan suhu yang drastis dibandingkan suhu kerja sel atau panel surya yang wajar, sehingga mengurangi efisiensi pembangkitan dan menambah risiko kegagalan dan kerusakan sistem [4].

Rasio konsentrasi dari sebuah sistem CPV secara matematis adalah [4]:

$$CR = \frac{A_a}{A_t}$$

dengan:

- $A_a$  adalah area apertur, yaitu area pengumpulan cahaya; dan
- $A_t$  adalah area target, yaitu area dari sel yang digunakan.

## 2.2. Klasifikasi Sel Fotovoltaik

Sel fotovoltaik terbagi menjadi beberapa jenis berdasarkan karakteristiknya, antara lain jumlah dan jenis p-n *junction* dan jenis struktur kristal semikonduktor, yang memengaruhi efisiensi pengumpulan energi. Jenis sel sangatlah penting dalam karakterisasi performa dalam sistem CPV.

### **2.2.1. P-N Junction**

Sebuah *p-n junction* (atau pertemuan p-n) adalah titik temu dua semikonduktor yang telah diproses (melalui proses *doping*) menjadi tipe p (positif) atau tipe n (negatif). Semikonduktor-semikonduktor dengan tipe p dan n memiliki perbedaan energi (*band gap*) yang berbeda, yang tergantung pada komposisi semikonduktor. Untuk mengaktifkan efek fotovoltaik, hanya cahaya-cahaya dengan energi yang lebih besar dibandingkan *band gap* yang dapat mendorong elektron keluar dari cangkang dan berpotensi menghasilkan energi yang berguna. Sel fotovoltaik dapat dibagi berdasarkan jumlah jenis *p-n junction* yang digunakan di dalamnya.

#### **2.2.1.1. Single-junction**

Sel fotovoltaik *single-junction* adalah sel dengan hanya satu jenis lapisan *p-n junction*. Saat ini, sel fotovoltaik *single-junction* yang paling banyak tersusun adalah sel-sel dari silikon kristalin (c-Si), dengan nilai *band gap* yaitu 1,12 eV, yang ekuivalen dengan panjang gelombang cahaya *cut-off* yaitu 1.160 nm [14]. Sel fotovoltaik jenis ini hanya memiliki efisiensi teoretis maksimum sekitar 34%.

#### **2.2.1.2. Multi-junction**

Sel fotovoltaik *multi-junction* adalah sel dengan beberapa lapisan *p-n junction* yang terdiri dari beberapa material berbeda. Ada banyak jenis sel yang menggunakan semikonduktor berbeda, dari silikon kristalin (c-Si), indium-galium-fosfida (InGaP), indium-galium-arsenik (InGaAs), galium-arsenik (GaAs), dan germanium (Ge). Karena sel-sel ini memiliki biaya produksi yang sangat tinggi, jumlah yang dapat digunakan sangat terbatas dan oleh karena itu pula cocok untuk digunakan dalam penerapan sistem HCPV.

### **2.2.2. Struktur Kristal Sel**

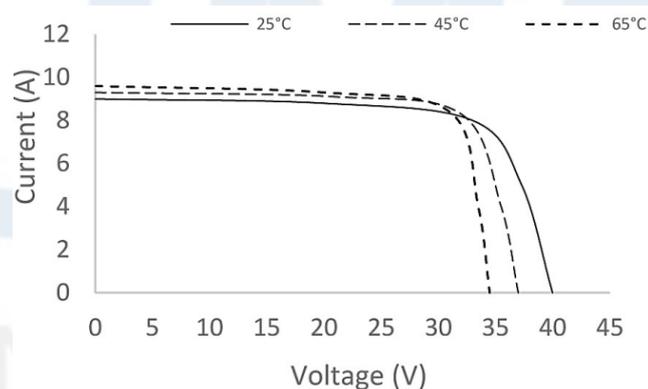
Efisiensi dari sebuah sel juga bergantung pada struktur kristal penyusunnya. Untuk semikonduktor silikon, dua jenis struktur kristal sel yang

dapat dikategorikan adalah sel monokristalin (*monocrystalline*) dan polikristalin (*polycrystalline*). Karakteristik ini penting untuk proses penyerapan energi cahaya karena sistem monokristalin lebih mampu mengumpulkan energi dengan efisien.

### 2.2.3. Respon I-V Sel terhadap Suhu

Karakteristik I-V (arus-tegangan) sel fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh perubahan suhu lingkungan. Peningkatan suhu umumnya menyebabkan peningkatan kecil pada arus keluaran ( $I$ ) karena penurunan resistansi internal semikonduktor. Namun, efek ini diimbangi oleh penurunan yang lebih signifikan pada tegangan keluaran ( $V$ ), yang terjadi akibat penurunan energi *band gap* semikonduktor pada suhu yang lebih tinggi.

Secara kuantitatif, setiap kenaikan suhu sebesar  $1^{\circ}\text{C}$  biasanya menghasilkan kenaikan arus dalam kisaran 0,02–0,05% dari nilai nominal arus. Sebaliknya, tegangan keluaran dapat berkurang sekitar 2–3% per kenaikan suhu  $1^{\circ}\text{C}$ , tergantung pada jenis material semikonduktor yang digunakan. Akibat kombinasi perubahan ini, daya total yang dihasilkan sel fotovoltaik cenderung menurun (karena  $P = IV$ ) pada suhu yang lebih tinggi. Secara ringkas, Gambar 2.3 menunjukkan respon keluaran tegangan dan arus sel [15].



Gambar 2.3 - Respon tipikal sel surya terhadap variasi suhu [15]

## 2.3. Solar Tracker

Beberapa sistem CPV memerlukan suatu *solar tracker* adalah sebuah sistem yang mampu mengarahkan sistem, dalam kasus ini sistem fotovoltaik,

agar mengarah setegak lurus mungkin terhadap matahari pada kurun waktu tertentu, umumnya dari pagi hingga sore hari waktu lokal.

Untuk implementasi nyata sistem CPV, khususnya untuk konsentrasi sedang atau tinggi (MCPV atau HCPV) dan konsentrator-konsentrator jenis tertentu (misalnya lensa Fresnel) diperlukan suatu *solar tracker* karena sistem CPV memiliki *acceptance angle* (sudut penerimaan) untuk sinar matahari yang jauh lebih kecil dibandingkan sistem-sistem fotovoltaik konvensional [16]. Dengan keberadaan konsentrator, sudut-sudut kedatangan cahaya (*angle of incidence/AOI*) yang diperlukan untuk kinerja sistem optimal menjadi lebih kecil, dan, khususnya untuk sistem konsentrasi tinggi, memerlukan sistem yang dapat secara akurat mengarahkan sinar tepat pada sel surya. Salah satu alasan sulitnya komersialisasi CPV adalah keperluan sistem *solar tracking* ini, yang menambah biaya implementasi serta membuat pemasaran lebih sulit [4].

Di sisi lain, beberapa rancangan CPV terbaru tidak memerlukan *solar tracker* sebagai komponen wajib karena sifat konsentratornya yang dapat mengarahkan sinar ke sel; contohnya adalah *quantum dot solar concentrator* (QDSC) dan beberapa rancangan CPV dengan rasio konsentrasi rendah (LCPV). Sistem-sistem ini memiliki kelebihan karena tidak membutuhkan implementasi sistem *tracking* ini dan berpotensi menurunkan biaya dan kompleksitas implementasi.

#### **2.4. Tinjauan Sistem**

Tabel 2.2 berikut merupakan ringkasan tinjauan dari beberapa sistem-sistem CPV yang telah diteliti sebelumnya.

UNIVERSITAS  
MULTIMEDIA  
NUSANTARA

Tabel 2.2 - Ringkasan tinjauan sistem

Ref	Penulis	Tahun	Fokus	Konsentrator	CR	Efek	Catatan
[1]	Kiyae dkk.	2021	Line	Lensa Fresnel Linear	10x	Efisiensi optik 81%	Tanpa sistem pendinginan dapat berfungsi ( $\Delta T$ 42°C dari LFL biasa)
[6]	Wang dkk.	2019	Line	Primer: Reflektor Fresnel Linear Rapat Sekunder: Palung parabola	15,96x	Efisiensi PV 31.2%, efisiensi total 26,7%	<i>Beam splitter</i> menyaring cahaya masuk hanya 380 nm – 1100 nm
[8]	Karimi dkk.	2017	Line	Reflektor Fresnel Linear	5,85x	Peningkatan daya 28% dibandingkan tanpa konsentrator	Efisiensi per sel menurun dari 10,9% ke 7,63%
[17]	Boito dkk.	2021	Line	Reflektor Fresnel Linear	10x	Peningkatan daya 8,5x dibandingkan tanpa konsentrator	Biaya komponen dasar (cermin + panel) sekitar 50% harga panel ekuivalen
[18]	Chemisana dkk.	2011	Line	Primer: Lensa Fresnel Linear Sekunder: Reflektor Parabolik Majemuk	7–10x	Efisiensi optik 85%	–
[19]	Askins dkk.	2022	Point	Lensa bikonveks	–	Efisiensi CSTC 26%	Modul micro-CPV, tanpa <i>tracking</i> konvensional
[20]	Ustaoglu dkk.	2020	Line	V-trough	1,94x	Peningkatan daya 17,84% dibandingkan tanpa konsentrator (PSSR-CPV)	AAR-CPV diuji lebih buruk dibandingkan tanpa konsentrator
[21]	Li dkk.	2018	Line	Reflektor Parabolik Majemuk Asimetris	1,74x	Peningkatan daya 74% dibandingkan tanpa konsentrator	Terintegrasi dengan bangunan
[22]	Soltani dkk.	2018	Line	Palung parabola	8x	Efisiensi termal 57%, efisiensi PV 4,8%–7,6%, efisiensi listrik dari TEG 0,468%	Menggunakan simulasi dengan MATLAB untuk karakteristik PV dan TEG
[23]	Sabry dkk.	2023	–	–	160–250x	Efisiensi sel 33%, efisiensi listrik dari CPV 16%, dari TEG 6-20%	Bergantung konfigurasi sistem, menggunakan sumber cahaya terkonsentrasi
[24]	Parupudi dkk.	2021	Line	(a) Reflektor Parabolik Majemuk (b) V-trough (c) Reflektor Parabolik Majemuk Asimetris	(a) 1,46 (b) 1,40 (c) 1,53	Energi/tahun (p-Si): (a) 99 kWh/m <sup>2</sup> (b) 105 kWh/m <sup>2</sup> (c) 156 kWh/m <sup>2</sup>	Tanpa sistem pendinginan
[25]	Alnajideen dkk.	2022	Line	V-trough	2,47–3x	Daya maksimum naik 2,64x dibandingkan tanpa konsentrator	CR geometri 3x, CR efektif pada sel 2,47x

Untuk membantu dalam proses perancangan dan pemilihan desain untuk konsentrator, dilakukan perbandingan antara berbagai sistem yang terdapat pada literatur. Setiap penelitian dibahas lebih lanjut dalam penjelasan berikut.

Dibuat sebuah lensa Fresnel yang berkarakteristik mampu mengubah panjang gelombang sinar yang diterima, yang disebut *Spectral Splitting Fresnel Lens* (SSFL). Lensa ini mampu mengarahkan panjang gelombang tertentu ke sel

dan menggunakan efek difraksi untuk mengarahkan sinar dengan panjang gelombang yang tidak diinginkan ke luar sistem. Diuji penggunaan SSFL dengan panjang gelombang yang diterima dari 400–1150 nm hingga 800–1150 nm dan rasio konsentrasi 10 *suns*. Ditemukan bahwa SSFL dengan jangkauan 600–1150 nm memiliki efisiensi optik 81% tetapi juga menurunkan suhu sel sebanyak 48°C [1].

Dilakukan penelitian yang menggabungkan sebuah sistem CPV dan sistem termal menggunakan sebuah desain konsentrator baru yang dinamakan reflektor Fresnel linear rapat (*compact linear Fresnel reflector/CLFR*) sebagai konsentrator primer, dan sebuah palung parabola untuk konsentrator sekunder; rangkaian keduanya menghasilkan CR sebesar 15,96 *suns*. Dikembangkan model geometris dan juga prinsip-prinsip perancangan yang digunakan untuk tipe konsentrator CLFR. Sistem juga menggunakan *beam splitter* yang memperbolehkan cahaya 380nm–1100nm dan mendifraksi sinar dengan panjang gelombang selain yang ditentukan. Konsentrator ini kemudian disimulasikan menggunakan metode Monte Carlo Ray Tracing untuk mengetahui efisiensi dan distribusi iradiasi pada sel surya. Didapatkan iradiasi dengan distribusi yang merata, namun ditemukan pula bahwa dengan sistem yang statis (tanpa menggunakan *solar tracker*), efisiensi optik sistem menurun; contohnya dengan *tracking error* sebesar 0,8°, efisiensi optik sistem menjadi 51,2%. Didapatkan bahwa efisiensi PV yaitu 31,2%, dan efisiensi total sistem dengan desain yang digunakan sebesar 26,7% [6].

Penelitian lain membuat sistem *concentrated hybrid photovoltaic thermal* (CPV/T) yang dapat digunakan untuk memproduksi listrik dan juga air panas. Diuji kinerja sebuah sistem CPV/T dengan menggunakan lensa Fresnel linear dengan rasio konsentrasi 5,85 *suns*. Didapatkan nilai efisiensi karakteristik modul yang digunakan tanpa konsentrator adalah 10,9%, namun setelah menggunakan konsentrator turun menjadi 7,63%. Namun, konsentrasi cahaya yang tinggi memungkinkan daya keluaran listrik dari sistem bertambah sebanyak 28% [8].

Selain itu, dibuat pula sebuah sistem CPV dengan menggunakan rangkaian sepuluh (10) cermin dan dengan rasio konsentrasi 10 *suns*. Didapatkan peningkatan daya sebanyak 8,5 kali lipat dibandingkan hanya menggunakan sel. Selain itu, karena sistem menggunakan panel fotovoltaik silikon konvensional, cermin datar dan juga sistem pendinginan menggunakan air (*water cooling*) sederhana, biaya total komponen hanya sekitar 50% dari harga panel dengan daya keluaran yang sama dengan sistem, yaitu 8,5 kali jumlah sel yang digunakan [17].

Di optimasikan pula sebuah sistem CPV terhadap kinerja optik dengan menggunakan konsentrator primer lensa Fresnel linear dan konsentrator sekunder reflektor parabolik majemuk dengan CR rancangan sebesar 7–10 *suns*. Didapatkan bahwa dengan rangkaian mencapai efisiensi optik sebesar 85% berdasarkan analisis termal numerik teoretis dan juga dari pengujian secara langsung [18].

Di Eropa, dibangun sebuah sistem CPV dengan implementasi *tracking* yang non-konvensional dalam proyek HIPERION. Sistem ini menggunakan lensa konvensional bikonveks (kedua sisi cembung). Berdasarkan pengujian yang dilakukan di kondisi laboratorium pengujian dengan  $AOI = 0^\circ$  dan  $AOI > 0^\circ$  menghasilkan efisiensi *Concentrator Standard Test Conditions* (CSTC) sebesar 26%, yang merupakan nilai efisiensi total sistem [19].

Telah dikembangkan pula sistem CPV berbasis konfigurasi *V-trough* dengan desain yang efisien secara energi dan ekonomis. Sistem ini dirancang menggunakan bahan reflektor yang mudah diakses, yaitu baja tahan karat yang dipoles (*Polished Stainless Steel Reflector*, PSSR), sebagai alternatif dari reflektor aluminium anodisasi (*Anodized Aluminum Reflector*, AAR) yang memiliki biaya tinggi. Sistem CPV ini diproduksi dan diimplementasi untuk perbandingan kinerjanya dengan sistem PV konvensional tanpa konsentrator. Didapatkan peningkatan daya sebesar +17,84% menggunakan konsentrator PSSR, jika dibandingkan sistem tanpa konsentrator. Namun, pada sistem konsentrator AAR, suhu yang tinggi menyebabkan penurunan kinerja, bahkan

ketika dibandingkan dengan sistem tanpa konsentrator, sebesar 17,4% [20].

Sedangkan, untuk pengembangan CPV pada bangunan, diteliti sistem CPV menggunakan konsentrator reflektor parabolik majemuk yang bersifat asimetris (*assymetric compound parabolic concentrator/aCPC*). Sistem ini dikembangkan dengan tujuan mengintegrasikan sistem CPV dengan bangunan; lebih tepatnya integrasi dengan pemasangan di tembok arah selatan bangunan. Didapatkan bahwa sudut penerimaan sistem besar ( $>60^\circ$ ) dan menghasilkan lebih dari satu [21].

Pengembangan CPV juga berupa integrasi sebuah sistem CPV dengan sebuah generator termoelektrik (*thermoelectric generator/TEG*) dalam sebuah sistem CPV-TEG. Sistem CPV-TEG ini menggunakan konsentrator palung parabola atau *parabolic trough*. Daya maksimum yang didapatkan adalah 22,71 W pada kondisi iradiasi surya  $998 \text{ W/m}^2$ , dengan 2,3 W di antara produksi daya tersebut berasal dari TEG. Efisiensi termal tertinggi yang diraih sebanyak 57% dan didapatkan efisiensi fotovoltaik yang bervariasi antara 4,8%–7,6% berdasarkan waktu penyinaran. Pengukuran dilakukan pada pukul 10:00 sampai dengan 15:30 dan dicocokkan dengan perhitungan numerik [22].

Selanjutnya, dilakukan karakterisasi sebuah sistem CPV-TEG dengan rasio konsentrasi 160–250 *suns*. Digunakan sebuah sel surya multi-persimpangan yaitu sel GaInP/GaInAs/Ge. Digunakan sumber cahaya terkolimasi (*collimated*) berupa cahaya lampu Xenon. Didapatkan bahwa dengan nilai efisiensi sel 33%, efisiensi listrik total dari sistem CPV setelah pemasangan bernilai hanya 16%; sedangkan dengan TEG yang diuji berkisar antara 6–20%, bergantung sangat besar pada metode transfer panas yang diimplementasi [23].

Dilakukan studi perbandingan tiga jenis reflektor untuk sistem konsentrasi fotovoltaik, yaitu (a) reflektor parabolik majemuk (CPC), (b) *V-trough*, dan (c) reflektor parabolik majemuk asimetris (aCPC). Penelitian ini berfokus pada analisis rasio konsentrasi geometris dan performa energi tahunan menggunakan sel surya silikon polikristalin (p-Si). Sistem dengan Reflektor

Parabolik Majemuk mencapai rasio konsentrasi 1,46 dan menghasilkan energi tahunan sebesar 99 kWh/m<sup>2</sup>. Sementara itu, sistem *V-trough* memiliki rasio konsentrasi 1,40 dengan hasil energi tahunan kedua tertinggi dengan 105 kWh/m<sup>2</sup>. Reflektor parabolik majemuk asimetris menunjukkan performa tertinggi dengan rasio konsentrasi 1,53 dan produksi energi tahunan mencapai 156 kWh/m<sup>2</sup>. Penelitian ini dilakukan tanpa menggunakan sistem pendinginan pada rangkaian fotovoltaik, sehingga menggunakan CR yang rendah [24].

Lalu, sebuah konfigurasi baru dari konsentrator surya *V-trough* yang disebut *Onagraceae V-trough Solar Concentrator* (OVSC) telah dirancang dan diuji, dinamakan demikian karena bentuknya terinspirasi bunga *Onagraceae*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa OVSC mampu meningkatkan rasio konsentrasi hingga 40%–60% lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrator *V-trough* konvensional (CVSC) dan sekaligus sedikit mengurangi kebutuhan jumlah material reflektor. Selain itu, OVSC dengan CR efektif 2,47x (dan CR geometris 3x) mampu meningkatkan keluaran daya listrik maksimum hingga 2,64 kali dibandingkan dengan rangkaian PV tanpa konsentrator [25].

