

## **BAB 2**

# **Tinjauan Pustaka**

Indonesia kaya akan dengan potensi energi terbarukan (antara lain energi surya, air, bayu, biomassa, laut, dan panas bumi) yang belum dimanfaatkan secara optimal. Menurut data ESDM, dengan teknologi yang ada saat ini, potensi listrik dari energi terbarukan mencapai 432 GW, atau 7-8 kali dari total kapasitas pembangkit terpasang saat ini. Mayoritas pembangkit listrik energi terbarukan yang ada maupun yang direncanakan mengandalkan tenaga air atau panas bumi. Dari 7 GW kapasitas terpasang yang ada, 66% adalah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dan 27% Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Demikian pula dari 29 GW rencana penambahan dalam RUPTL, 50% berupa PLTA dan 26% berupa PLTP. Di sisi lain, rencana pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebesar 7% dan memiliki potensi hampir mencapai 50% untuk energi terbarukan di Indonesia. Dalam RUED, rencana pembangunan PLTS memiliki proporsi yang lebih besar, mencapai 16%.

Energi surya memiliki potensi lebih dari 200 GW dengan efisiensi teknologi photovoltaic yang tersedia saat ini. Namun, pemanfaatan energi surya dalam pembangkitan listrik masih kurang dari 100 MW [1]. Dalam kasus energi surya, karena energi tersebut hanya tersedia pada siang hari dan energi yang tersedia berubah tergantung pada kondisi cuaca dan wilayah, desain yang tepat diperlukan untuk pemanfaatan yang efisien. Untuk merancang dan menggunakan sistem pemanas surya dengan benar, sangat penting untuk mengevaluasi kinerja kolektor surya. Karena efisiensi pengumpulan surya dari kolektor surya bergantung pada jumlah radiasi matahari, kondisi media pemanas (misalnya, laju aliran dan suhu saluran masuk), dan suhu udara luar, maka perlu mempertimbangkan kinerja

kolektor surya dalam kondisi cuaca aktual yang mungkin terjadi saat menggunakan sistem untuk pemanasan dan air panas [2].

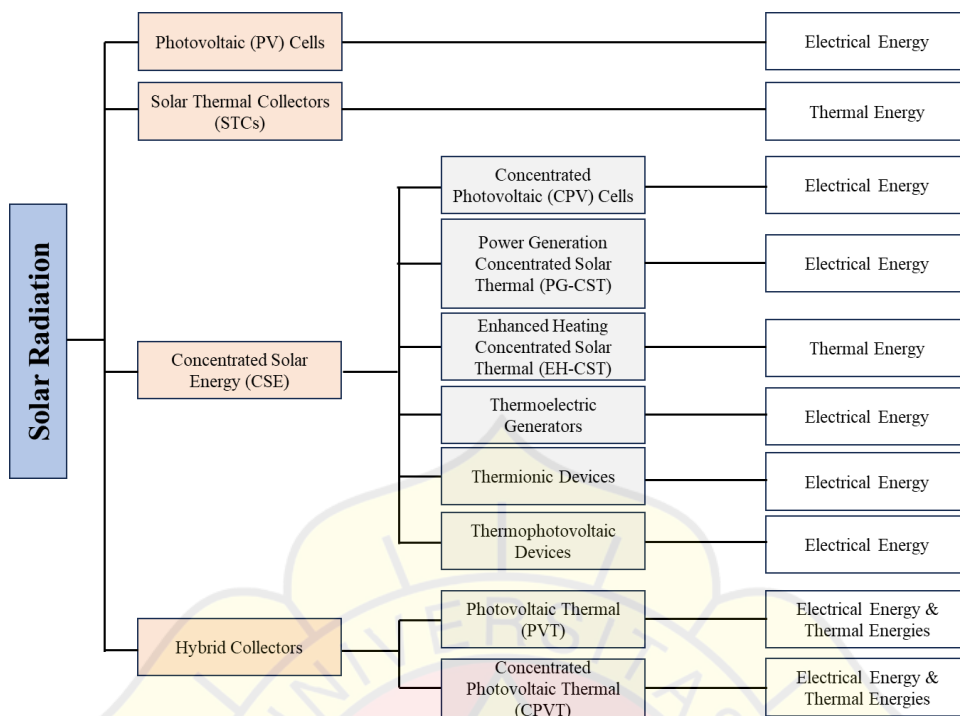
Air Conditioner (AC) bekerja dengan cara mengalirkan udara melalui evaporator yang mendinginkan udara di dalam ruangan. Proses dimulai ketika AC menyerap udara panas dari ruangan, kemudian udara tersebut didiamkan oleh refrigerant (zat pendingin) di dalam koil evaporator. Setelah itu, udara dingin disalurkan kembali ke ruangan, sementara panas yang diserap oleh refrigerant dipindahkan ke luar ruangan melalui koil kondensor. Proses ini berulang, menjaga suhu ruangan tetap stabil, panas buang yang dikeluarkan oleh ini tentunya dapat dimanfaatkan dan menjadi pendekatan yang efektif untuk menghemat energi listrik dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Penerapan temuan ini sangat relevan dalam industri HVAC dan sektor perumahan, di mana penerapan sistem tersebut dapat mengurangi biaya operasional dan beban energi. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan strategi pemanfaatan panas buangan yang dapat diintegrasikan ke dalam sistem AC yang ada untuk meningkatkan efisiensi energi [3].

Integrasi sistem hibrida, yang menggabungkan kolektor surya, modul PV, pemanas, dan unit pendingin udara (AC), menghadirkan peluang untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi dengan memanfaatkan kekuatan masing-masing komponen. Meskipun ada kemajuan dalam teknologi ini, tantangan tetap ada dalam mengelola kondisi lingkungan yang berfluktuasi, seperti radiasi surya dan beban termal yang bervariasi, yang secara signifikan memengaruhi efisiensi sistem. Untuk mengatasi tantangan ini, penelitian ini memperkenalkan sistem energi hibrida terintegrasi yang dikelola oleh pengontrol logika terprogram (PLC) dan antarmuka manusia-mesin (HMI). Kerangka kerja kontrol canggih ini memungkinkan pemantauan waktu nyata dan manajemen energi adaptif, memastikan operasi optimal dalam kondisi lingkungan dan operasional yang dinamis. Tidak seperti sistem konvensional, pendekatan ini memanfaatkan sinergi antara sistem energi termal dan listrik untuk meningkatkan efisiensi dan skalabilitas. Kebaruan penelitian ini terletak pada kemampuannya untuk mengoptimalkan distribusi energi di antara kolektor surya, modul PV, unit AC,

dan pemanas sambil beradaptasi dengan berbagai masukan dan permintaan energi. Dengan menjembatani kesenjangan antara optimasi tingkat komponen dan manajemen energi di seluruh sistem, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan sistem energi terbarukan yang lebih cerdas dan lebih tangguh untuk berbagai aplikasi [4]–[6].

## 2.1 Pemanfaatan Solar Radiasi

Teknologi fotovoltaik (PV), teknologi termal surya, dan konsentrator surya reflektif atau refraktif telah menjadi pilihan yang sangat menarik bagi pengembang dan peneliti sejak akhir 1970-an dan awal 1980-an. Hasilnya adalah apa yang dikenal dengan sistem fotovoltaik termal terkonsentrasi (CPVT), yang merupakan kombinasi hibrida dari sistem fotovoltaik terkonsentrasi (CPV) dan fotovoltaik termal (PVT). Beberapa sistem CPVT telah dirancang, dipelajari, dan didemonstrasikan baik secara teori maupun eksperimen dalam literatur. Hasil-hasil dari penelitian dan demonstrasi ini menunjukkan bahwa sistem CPVT memiliki potensi yang sangat tinggi untuk penetrasi pasar di sektor energi karena fitur-fitur uniknya. Misalnya, efisiensi sistem total eksperimen yang mencapai 65,1%, suhu outlet fluida transfer panas (HTF) teori yang mencapai 196°C, biaya serendah 2,37 \$  $W_e^{-1}$ , biaya energi levelized (elektrik dan termal) serendah 8,7 c€ kWh<sup>-1</sup>, dan periode pengembalian energi dan gas rumah kaca serendah satu tahun telah dilaporkan dalam literatur.



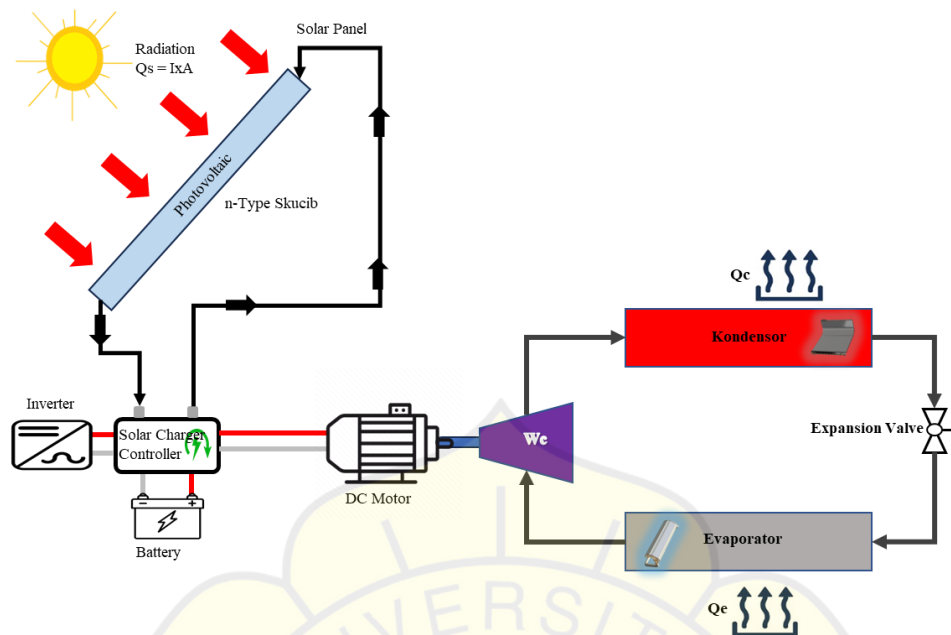
**Gambar 3** Konversi teknologi energi surya menjadi energi listrik [7]

**Gambar 3.** menggambarkan berbagai teknologi yang berkaitan dengan pemanfaatan energi surya, yang didapatkan berdasarkan jenis radiasi matahari dan metode pengumpulan energi. Teknologi pertama, yaitu sel fotovoltaik (PV), berfungsi untuk menghasilkan energi listrik dari radiasi surya, sementara kolektor termal surya (STCs) mengumpulkan dan mengkonversi radiasi surya menjadi energi termal. Energi surya surya (CSE) memanfaatkan konsentrator untuk memfokuskan radiasi surya pada titik tertentu guna meningkatkan efisiensi pengumpulan energi. Selain itu, kolektor hibrida mengintegrasikan dua atau lebih teknologi yang berbeda untuk menghasilkan energi listrik dan termal secara bersamaan. Sel fotovoltaik menyala (CPV) menggunakan konsentrator untuk memfokuskan radiasi surya pada sel fotovoltaik, yang kemudian menghasilkan energi listrik. Penghasil energi konsentrasi surya termal (PG-CST) dan pemanasan yang ditingkatkan konsentrasi surya termal (EH-CST) keduanya memanfaatkan konsentrasi energi surya untuk menghasilkan energi listrik dan termal. Generator termoelektrik mengubah perbedaan suhu menjadi energi listrik, sedangkan perangkat termionik memanfaatkan efek termionik untuk menghasilkan energi listrik. Perangkat termofotovoltaik menggunakan radiasi inframerah untuk

menghasilkan energi listrik. Terakhir, fotovoltaik termal (PVT) menggabungkan teknologi fotovoltaik dan termal surya untuk menghasilkan kedua jenis energi, yaitu listrik dan termal, dan fotovoltaik termal memancarkan (CPVT) menggabungkan kedua teknologi tersebut dengan konsentrasi untuk menghasilkan energi listrik dan termal. Secara keseluruhan, gambar ini menyajikan berbagai teknologi surya yang menghasilkan energi listrik dan/atau termal dengan cara yang beragam, mulai dari metode pengumpulan energi surya konvensional hingga sistem hibrida yang lebih kompleks [7].

## **2.2 Solar Collector Dan Pendinginan Udara Bertenaga Surya**

Energi matahari dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan sistem pendinginan dan pendingin udara melalui dua metode: secara elektrik dan termal. Pada bentuk elektrik, panel fotovoltaik (PV) mengubah cahaya matahari langsung menjadi listrik untuk menjalankan sistem pendingin konvensional. Sistem ini umumnya disebut sebagai sistem pendinginan/vapor kompresi refrigerasi tenaga surya (SE-VCR) atau sering disebut sebagai sistem pendinginan bantuan PV surya. Panel PV menghasilkan arus searah (DC), yang membutuhkan inverter untuk menjalankan kompresor AC tradisional. Penggunaan energi primer ini dapat mengurangi konsumsi energi hingga 39%-100% tergantung pada lokasi bangunan (Ayadi dan Al-Dahidi, 2019) dan mengurangi biaya sistem tradisional hingga 12,3%. [8]



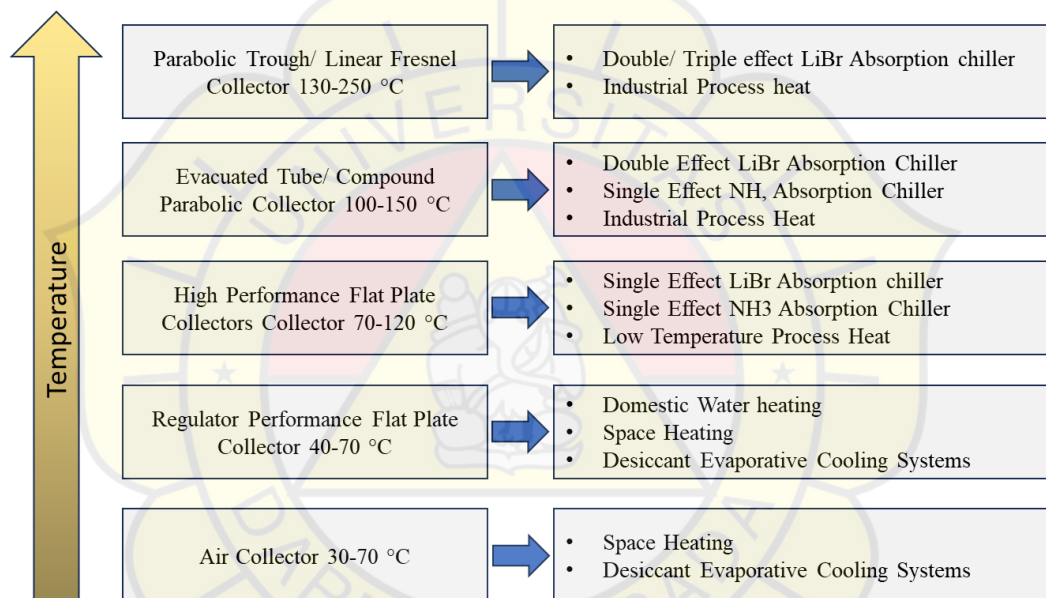
**Gambar 4** Type dari SE-VCR

Bilgili, M, 2011[9] menganalisis kinerja sistem SE-VCR yang diterapkan pada bangunan yang terletak di selatan Turki selama hari ke-23 bulan pendinginan, yaitu dari Mei hingga September. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pada suhu evaporator  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , konsumsi daya kompresor maksimum adalah 2,53 kW pada pukul 3:00 PM pada 23 Agustus, dan luas panel PV yang dibutuhkan adalah 31,26 m<sup>2</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa sistem SE-VCR dapat digunakan secara efisien dalam kondisi ini. Hasilnya menunjukkan bahwa koefisien kinerja (COP) sistem meningkat, dan konsumsi energi primer total menurun untuk ketiga refrigeran yang dianalisis (R22, R134a, dan R410A). Selain itu, studi tersebut melaporkan bahwa penggunaan energi langsung sepanjang tahun dapat dikurangi lebih dari 5% dengan menggunakan desain ejector dan refrigeran yang sesuai untuk sistem SE-VCR.

Pada sistem berbasis energi matahari termal, radiasi matahari dapat dikumpulkan dan digunakan untuk meminimalkan konsumsi daya listrik pada sistem skala kecil, seperti pada sistem AC surya hibrida yang ditunjukkan pada Gambar.... Sistem ini menggabungkan AC tipe split tradisional dengan kolektor surya tabung vakum. Radiasi matahari yang diserap oleh kolektor surya digunakan untuk memanaskan air di dalam tangki kolektor yang dipasang di atas. Tabung

evaporator dari unit split luar melewati tangki sebelum masuk ke kompresor. Refrigeran yang ada di dalam tabung menyerap panas dari tangki air dan memasuki kompresor pada suhu yang lebih tinggi. Dengan demikian, ukuran kompresor yang dibutuhkan berkurang, dan konsumsi listrik dapat berkurang hingga 60%.

Energi panas matahari biasanya digunakan sebagai penggerak suhu di SCACS. Sistem ini secara umum diklasifikasikan sebagai siklus terbuka, tertutup, dan termo-mekanis.



**Gambar 5** Kisaran suhu kolektor surya yang sesuai untuk SCACS

**Gambar 5.** Menjelaskan mengenai berbagai jenis kolektor surya yang digunakan untuk tujuan pemanasan, yang dikelompokkan berdasarkan rentang suhu operasionalnya. Kolektor parabolik trough atau linear fresnel dengan rentang suhu operasionalnya 130-250°C beroperasi pada suhu tinggi dan umumnya digunakan untuk pemanasan proses industri, serta dapat menggerakkan pendingin penyerapan lithium bromida (LiBr) efek ganda/triple untuk aplikasi pendinginan di industri. Kolektor tabung evakuasi atau compound parabolic collector (100-150°C) juga beroperasi pada suhu menengah hingga tinggi, dan digunakan untuk menghasilkan pemanasan proses industri, serta dapat menggerakkan pendingin penyerapan LiBr efek ganda atau pendingin penyerapan amonia (NH<sub>3</sub>) efek tunggal untuk

pendinginan. Kolektor piring datar kinerja tinggi (70-120°C) lebih cocok untuk pemanasan proses industri dengan menggerakkan pendingin penyerapan LiBr efek tunggal atau pemanasan proses suhu rendah. Kolektor piring datar kinerja regulator (40-70°C) berfungsi pada suhu lebih rendah dan umumnya digunakan untuk pemanasan air domestik, pemanasan ruang, atau sistem pendinginan evaporatif desikan. Sementara itu, kolektor udara (30-70°C) bekerja pada suhu relatif rendah dan lebih cocok untuk pemanasan ruang atau sistem pendinginan evaporatif desikan. Semakin tinggi rentang suhu, semakin cocok kolektor untuk aplikasi industri seperti pendinginan dan pemanasan proses suhu tinggi, sementara kolektor dengan suhu lebih rendah lebih sesuai untuk pemanasan domestik dan ruang serta pendinginan.

### **2.3 Teknologi Solar Collector**

Solar collector merupakan jenis khusus dari penukar kalor yang berfungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi internal pada medium fluida yang mengalir. Komponen utama dalam setiap sistem tenaga surya adalah kolektor surya. Perangkat ini menyerap radiasi matahari yang masuk, mengubahnya menjadi panas, lalu mentransfer panas tersebut ke fluida kerja (umumnya berupa udara, air, atau minyak) yang mengalir melalui kolektor. Energi panas yang dikumpulkan oleh fluida ini selanjutnya dapat langsung digunakan untuk sistem pemanas air, pengondisian ruangan, atau disimpan dalam tangki penyimpanan energi termal untuk digunakan saat malam hari atau pada kondisi cuaca mendung.

Secara umum, terdapat dua jenis utama kolektor surya: kolektor non-konsentrasi (stasioner) dan kolektor konsentrasi. Kolektor non-konsentrasi memiliki luas permukaan penyerap dan penangkap radiasi matahari yang sama. Sementara itu, kolektor konsentrasi menggunakan permukaan reflektif berbentuk cekung yang mengikuti pergerakan matahari untuk memusatkan radiasi sinar matahari ke area penerima yang lebih kecil, sehingga meningkatkan intensitas fluks radiasi yang diterima.

Kolektor energi surya dapat dibedakan berdasarkan mekanisme pergerakannya, yaitu tipe stasioner (diam), pelacakan satu sumbu (single-axis tracking), dan pelacakan dua sumbu (two-axis tracking). Selain itu, kolektor juga diklasifikasikan berdasarkan rentang temperatur operasionalnya. Saat ini, telah tersedia beragam jenis kolektor surya di pasaran dengan karakteristik dan efisiensi yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan pengguna dan kondisi geografis tertentu.

### **2.3.1 Kolektor Pelat Datar (FPC)**

Gambar 1 menunjukkan skema dasar dari kolektor surya tipe pelat datar (flat-plate solar collector) yang umum digunakan. Ketika radiasi matahari menembus lapisan penutup transparan dan mengenai permukaan penyerap (absorber) yang berwarna hitam dan memiliki daya serap tinggi, sebagian besar energi radiasi tersebut diserap oleh pelat penyerap. Energi panas ini kemudian ditransfer ke fluida kerja (biasanya cairan) yang mengalir di dalam pipa-pipa fluida, untuk selanjutnya dialirkan menuju sistem penyimpanan energi atau langsung digunakan.

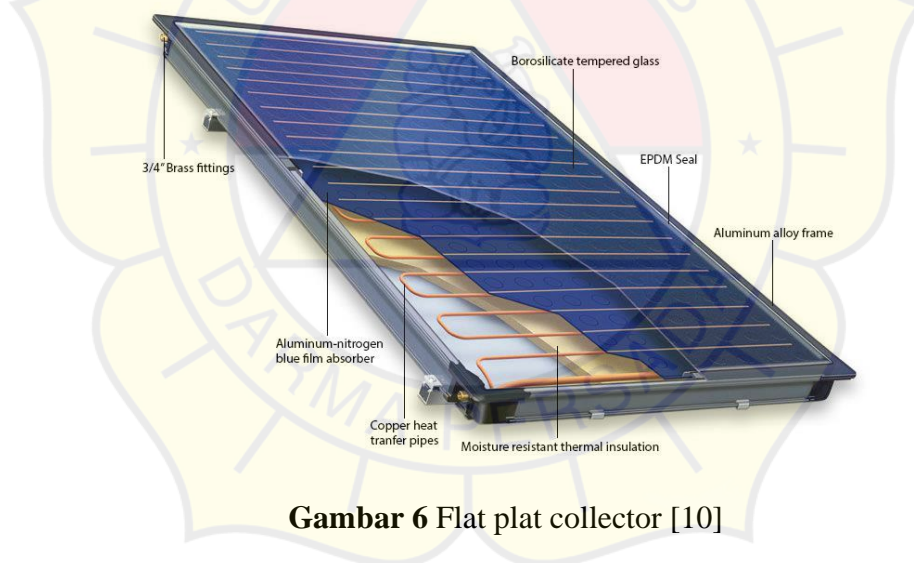
Bagian bawah pelat penyerap serta sisi-sisi dari kotak kolektor dilapisi bahan isolasi termal yang baik untuk meminimalkan kehilangan panas secara konduksi. Pipa-pipa cairan dapat disambungkan ke pelat penyerap melalui proses pengelasan, atau bisa juga dibentuk menjadi satu kesatuan integral dengan pelat tersebut. Ujung-ujung dari pipa-pipa kecil ini dihubungkan oleh pipa manifold berdiameter besar yang berfungsi sebagai header.

Penutup transparan, yang umumnya terbuat dari kaca, berfungsi untuk mengurangi kehilangan panas secara konveksi dari pelat penyerap dengan cara mempertahankan lapisan udara stagnan di antara pelat penyerap dan kaca. Selain itu, penutup ini juga mengurangi kehilangan panas secara radiasi. Kaca memiliki karakteristik transmisi yang baik terhadap radiasi gelombang pendek dari matahari, namun hampir tidak tembus terhadap radiasi gelombang panjang yang dipancarkan oleh pelat penyerap. Fenomena ini dikenal sebagai efek rumah kaca (greenhouse effect).

Kolektor surya pelat datar (Flat Plate Collectors atau FPC) merupakan jenis kolektor yang paling banyak digunakan seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

Umumnya, FPC digunakan untuk aplikasi suhu rendah hingga sekitar 80°C. Kolektor tipe ini bersifat stasioner dan tidak memerlukan sistem pelacakan matahari (sun tracking). Dalam pemasangannya, kolektor harus diorientasikan secara langsung ke arah ekuator, yaitu menghadap ke selatan untuk lokasi di belahan bumi utara, dan menghadap ke utara untuk belahan bumi selatan.

Kolektor pelat datar telah dikembangkan dalam berbagai desain dan menggunakan beragam jenis material. Kolektor ini dapat digunakan untuk memanaskan berbagai jenis fluida, seperti air, campuran air dengan aditif anti-beku, maupun udara. Dalam aplikasinya, kolektor dirancang agar memiliki usia pakai yang panjang, meskipun harus menghadapi berbagai tantangan lingkungan seperti radiasi ultraviolet dari sinar matahari, korosi, penyumbatan akibat keasaman, alkalinitas atau kekerasan fluida, pembekuan air, serta penumpukan debu atau kelembaban pada permukaan penutup [10].



**Gambar 6** Flat plat collector [10]

### 2.3.2 Kolektor Parabola Gabungan (CPC)

Kolektor konsentrasi parabola majemuk (Compound Parabolic Collector atau CPC) memiliki kemampuan untuk memantulkan seluruh radiasi matahari yang masuk ke arah permukaan penyerap dalam rentang sudut yang luas. Dengan menggunakan desain berupa palung (trough) yang terdiri atas dua bagian parabola yang saling berhadapan, kebutuhan untuk menggerakkan kolektor mengikuti perubahan posisi matahari dapat dikurangi secara signifikan.

CPC mampu menerima radiasi matahari yang datang dari berbagai arah dalam sudut penerimaan tertentu (acceptance angle). Melalui mekanisme pantulan internal yang berulang di dalam permukaan reflektor, setiap radiasi yang masuk melalui bukaan (aperture) dalam batas sudut penerimaan akan dipantulkan menuju permukaan penyerap yang terletak di dasar kolektor. Permukaan penyerap tersebut dapat berupa silinder, atau berupa pelat datar tergantung pada desain kolektornya.

Pada desain CPC yang ditampilkan, bagian bawah reflektor (BC dan CD) berbentuk lingkaran, sedangkan bagian atasnya (AB dan DE) berbentuk parabola. Karena bagian atas reflektor hanya memberikan kontribusi kecil terhadap pemusatan radiasi ke permukaan penyerap, maka bagian ini biasanya dipangkas (truncated) untuk membentuk versi yang lebih pendek dan lebih ekonomis dari CPC.

Untuk melindungi permukaan reflektor dari debu dan kotoran yang dapat menurunkan daya pantulnya, CPC umumnya dilapisi dengan kaca pelindung. Lapisan ini juga membantu menjaga efisiensi optik sistem. CPC lebih banyak digunakan dalam bentuk linier atau palung (trough-type concentrator), di mana orientasi kolektor sangat bergantung pada sudut penerimaan. Berdasarkan besar sudut penerimaan ini, CPC dapat dioperasikan secara stasioner maupun menggunakan sistem pelacakan (tracking).

### **2.3.3 Kolektor Tabung Evakuasi (ETC)**

Kolektor surya tipe tabung vakum dengan pipa panas (evacuated heat pipe solar collectors) merupakan salah satu teknologi termutakhir dalam pemanfaatan energi surya untuk menghasilkan panas. Sistem ini terdiri dari sebuah pipa panas (heat pipe) yang ditempatkan di dalam tabung transparan yang tersegel secara vakum. Desain vakum ini berfungsi sebagai isolator termal yang sangat efektif dengan cara meminimalkan kehilangan panas akibat konveksi dan konduksi, sehingga memungkinkan kolektor beroperasi pada suhu tinggi, bahkan hingga sekitar 150°C.

Kolektor tabung vakum ini mampu menangkap baik radiasi langsung maupun radiasi difus dari matahari. Keunggulan efisiensi termal pada suhu tinggi dicapai melalui kombinasi antara permukaan penyerap selektif (*selective absorber surface*) dan penghambat konveksi yang efektif. Seiring perkembangan teknologi, kini tersedia berbagai variasi bentuk permukaan penyerap (*absorber*) dari kolektor tabung vakum di pasaran. Salah satu inovasi terbaru adalah tabung vakum *all-glass*, yang dinilai berpotensi menurunkan biaya produksi sekaligus meningkatkan umur pakai kolektor secara signifikan.

Jenis kolektor lain yang juga dikembangkan adalah *Integrated Compound Parabolic Collector (ICPC)*, yaitu kolektor tabung vakum yang pada bagian dasar tabung kacanya dilapisi bahan reflektif. Desain ini menggabungkan insulasi vakum dan teknologi konsentrator non-pencitraan (*non-imaging concentrator*) dalam satu unit kolektor yang kompak. Untuk aplikasi bersuhu tinggi, ICPC dapat dilengkapi dengan sistem pelacakan matahari (*tracking system*) guna meningkatkan efisiensi penangkapan radiasi.

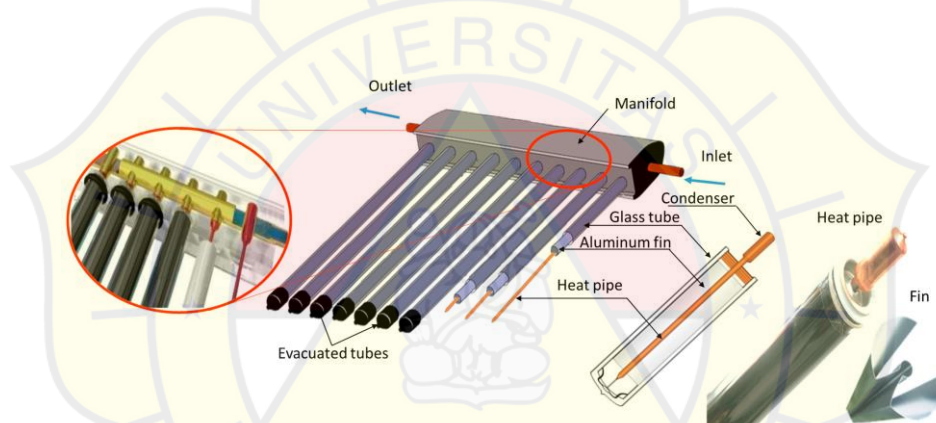
*Evacuated tube collectors* menggunakan prinsip perubahan fasa cair-uap untuk mentransfer panas secara efisien. Kolektor ini memiliki pipa panas berbahan tembaga yang sangat konduktif secara termal, tertutup rapat dan diletakkan di dalam tabung vakum. Pipa ini dilekatkan pada sirip tembaga berwarna hitam yang berfungsi sebagai pelat penyerap panas. Ujung atas pipa panas menonjol keluar dari tabung dan terhubung dengan kondensor yang ditempatkan dalam suatu manifold atau penukar panas.

Di dalam pipa panas terdapat sejumlah kecil fluida (misalnya metanol) yang mengalami siklus penguapan dan kondensasi. Ketika energi surya dipaparkan ke kolektor, fluida menguap dan uapnya bergerak ke area kondensor untuk melepaskan panas laten melalui proses kondensasi. Selanjutnya, fluida yang telah mencair akan kembali ke bagian bawah pipa melalui gaya kapiler, dan siklus ini berlangsung secara berulang.

Dalam konfigurasi operasionalnya, ujung logam dari tabung dimasukkan ke dalam manifold yang berisi fluida seperti air atau glikol. Fluida ini menyerap panas dari

kondensor dan mentransfernya ke sistem pemanfaatan akhir, seperti pemanas air atau sistem pemanas ruangan.

Salah satu keunggulan utama dari kolektor jenis ini adalah kemampuannya dalam mengatur suhu secara mandiri (self-limiting temperature control). Karena proses penguapan dan kondensasi hanya terjadi pada suhu tertentu yang sesuai dengan titik perubahan fasa fluida di dalam pipa, sistem ini secara alami terlindungi dari risiko pembekuan pada suhu rendah maupun dari panas berlebih (overheating) pada suhu tinggi. Karakteristik ini menjadikan evacuated heat pipe solar collectors sebagai solusi yang sangat andal dan efisien untuk kebutuhan pemanasan berbasis energi surya, terutama pada kondisi iklim ekstrem.



**Gambar 7.** Evacuated Tube Collector [11]

Berbagai jenis kolektor surya memiliki karakteristik berbeda berdasarkan sistem gerak, bentuk absorber, rasio konsentrasi, dan suhu operasi yang dihasilkan. Kolektor stasioner seperti Flat Plate Collector (FPC) dan Evacuated Tube Collector (ETC) memiliki rasio konsentrasi rendah (1) dengan suhu kerja antara 30–200°C, cocok untuk aplikasi suhu rendah hingga menengah tanpa sistem pelacakan matahari. Compound Parabolic Collector (CPC) yang juga stasioner, namun memiliki rasio konsentrasi hingga 5 dan dapat bekerja pada suhu hingga 200°C. Sementara itu, kolektor dengan pelacakan satu sumbu seperti Linear Fresnel Reflector (LFR), Parabolic Trough Collector (PTC), dan Cylindrical Trough Collector (CTC) mampu mencapai suhu 250–300°C dengan rasio konsentrasi lebih tinggi (10–50), sehingga cocok untuk aplikasi industri. Kolektor dengan pelacakan dua sumbu seperti Parabolic Dish Reflector (PDR) dan

Heliostat Field Collector (HFC) memiliki rasio konsentrasi sangat tinggi (hingga 1500) dan dapat menghasilkan suhu sangat tinggi hingga 2000°C, yang ideal untuk pembangkit listrik tenaga surya berskala besar. Pemilihan jenis kolektor sangat bergantung pada kebutuhan energi panas, efisiensi sistem, serta kapasitas investasi.

**Tabel 1.** Solar Energy Collectors [10]

Motion	Collector type	Absorber shape	Concentration ratio	Indicative temperature (°C)
Stationary	Flat plate collector (FPC)	Flat	1	30-80
	Evacuated tube collector (ETC)	Flat	1	50-200
	Compound parabolic collector (CPC)	Tubular	1-5	60-200
5-15			80-300	
Single-axis tracking	Linear fresnel reflector (LFR)	Tubular	10-40	80-250
	Parabolic trough collector (PTC)	Tubular	15-45	80-300
	Cylindrical trough collector (CTC)	Tubular	10-50	80-300
Two-axes tracking	Parabolic dish reflector (PDR)	Point	100-1000	100-500
	Heliostat field collector (HFC)	Point	100-1500	150-2000

## 2.4 Design Pemanfaatan Solar Collector, Solar Panel & AC

Choi, 2018 [12] efisiensi kolektor surya yang terukur dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti intensitas radiasi matahari, karakteristik media pemanas (termasuk suhu masuk dan laju aliran), dan suhu udara sekitar. Untuk mengevaluasi kinerjanya secara akurat, penting untuk menganalisis pengoperasian kolektor surya dalam kondisi cuaca nyata yang mungkin mereka hadapi selama

penggunaan untuk aplikasi pemanas dan air panas. Wang Y et al. (2020) [13] mengoptimalkan rasio antara luas kolektor surya dan panel fotovoltaik, memastikan udara dalam ruangan tetap dalam kisaran yang nyaman, penelitian ini mempertimbangkan sistem pendingin udara pengering cair bertenaga surya sebagai solusi yang layak. Prinsip kerja sistem pendingin udara dianalisis, dan model fisika-matematika untuk subsistemnya ditetapkan. Al-Yasiri Q et al. (2022) [14] Memberikan gambaran menyeluruh tentang sistem pendingin dan pendingin udara tenaga surya (SCACS) yang dirancang untuk aplikasi bangunan, yang memanfaatkan energi termal surya. Sistem ini mencakup teknologi seperti metode penyerapan, adsorpsi, dan pengering padat. Chow TT et al. (2010) [15] menilai potensi aplikasi sistem pompa kalor berbantuan surya ekspansi langsung kesatuan (DX-SAHP). Model numerik sistem DX-SAHP dibuat dan dianalisis menggunakan data cuaca Tahun Meteorologi Khas (TMY) dari Hong Kong. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mencapai koefisien kinerja tahunan rata-rata (COP) yang mengesankan sebesar 6,46, jauh mengungguli sistem pompa kalor tradisional. Yoon S et al. (2021) [16] Sistem pemanas, ventilasi, dan pendingin udara (HVAC) hibrida diperkenalkan, yang mengintegrasikan kolektor termal surya sebagai sumber panas dan panel pendingin radiatif sebagai penyerap panas. Kinerja tahunan sistem dianalisis untuk rumah keluarga tunggal dan dibandingkan dengan sistem konvensional, termasuk pompa panas berbantuan surya (SAHP) dan pompa panas berbantuan pendinginan radiatif (RAHP). Thirugnanasambandam M et al (2010) [17] Memberikan tinjauan komprehensif tentang teknologi termal surya kontemporer. Tinjauan ini mengeksplorasi analisis kinerja desain yang ada, simulasi matematika untuk pengoptimalan sistem, dan pembuatan desain inovatif dengan perbaikan yang diusulkan. Studi ini memadukan aspek analisis, desain, dan pengembangan, yang menawarkan wawasan berharga tentang kemajuan teknologi termal surya. Liu B et al. (2021) [18] merancang dan mengoptimalkan sistem penyimpanan energi perubahan fase surya untuk bangunan tempat tinggal dan potensinya untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi karbon. Fokusnya adalah pada pengintegrasian material perubahan fase (PCM) ke dalam sistem kolektor termal surya, mengatasi tantangan seperti kebocoran PCM, dan mengeksplorasi faktor-

faktor seperti mikroenkapsulasi, sudut kemiringan yang tepat, jenis penukar panas, dan zona suhu PCM untuk memaksimalkan efisiensi dan kelayakan ekonomi. Xiong Q et al. (2021) [19] mengulas penggunaan nanofluida dalam kolektor surya, dengan fokus pada perilaku termal, peningkatan efisiensi, dan dampak berbagai jenis nanopartikel. Hal ini menyoroti bahwa nanofluida, terutama yang berbasis Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan nanopartikel non-logam lainnya, menawarkan keuntungan signifikan dibandingkan fluida konvensional untuk aplikasi perpindahan panas. Kolektor surya pelat datar adalah konfigurasi yang paling banyak dipelajari, dengan nanofluida non-logam terbukti lebih efektif untuk peningkatan efisiensi dibandingkan dengan yang logam. Yaakop SN et al. (2023) [20] penelitian ini mengeksplorasi pengembangan dan validasi sistem pemulihan panas yang menggunakan panas buangan dari unit kondensor HVAC untuk meningkatkan efisiensi energi dalam aplikasi pengeringan udara. Dengan memanfaatkan udara panas dari sistem AC 1,0 hp sebagai sumber pengeringan, penelitian ini meneliti parameter seperti suhu udara, waktu pengeringan, dan kelembaban relatif dalam berbagai kondisi, termasuk massa pakaian basah, kecepatan kipas, dan suhu sekitar. Hasil eksperimen menunjukkan kemampuan sistem untuk mengeringkan pakaian seberat 1950 g, 4255 g, dan 6350 g dalam waktu masing-masing 55, 80, dan 110 menit, pada kecepatan udara konstan 0,34 m<sup>3</sup>/s dan suhu sekitar 33°C. Sistem yang diusulkan meningkatkan Koefisien Kinerja (COP) unit AC dari 2,36 menjadi 2,70, yang menawarkan penghematan energi yang signifikan dibandingkan dengan pengering udara listrik konvensional, yang mengandalkan elemen pemanas berdaya tinggi. Hamja N et al. (2024) [21] penelitian ini menyelidiki potensi pemanfaatan panas buangan dari sistem pendingin udara (AC), yang merupakan konsumen energi listrik yang signifikan, untuk meningkatkan efisiensi energi. Biasanya, panas buangan dari unit luar ruangan AC dilepaskan ke lingkungan, yang merupakan peluang yang hilang untuk penghematan energi. Penelitian ini mengevaluasi dua pendekatan: menggunakan panas buangan untuk pemanas air rumah tangga dan mengubahnya menjadi energi listrik dengan generator termoelektrik (TEG). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua metode tersebut dapat meningkatkan efisiensi energi secara signifikan, meskipun tantangan dalam efisiensi konversi dan integrasi

dengan sistem AC tetap ada. Temuan ini bertujuan untuk memajukan pengembangan sistem pendinginan yang lebih efisien dan ramah lingkungan dengan mengoptimalkan teknologi dan mengatasi hambatan implementasi.

## **2.5 Biaya Penerapan Pemanfaatan Solar Collector dan Panel Surya**

Selama dekade terakhir, banyak penelitian telah meneliti aspek tekno-ekonomi dari sistem pemanas air surya (SWH) untuk membandingkan keunggulannya dibandingkan sistem pemanas konvensional dalam aplikasi domestik dan industri. Variabilitas temuan dalam penelitian ini disebabkan oleh beberapa faktor kunci, seperti ketersediaan dan biaya material, kebijakan energi yang berlaku, insentif pemerintah, dan tingkat radiasi matahari tahunan rata-rata yang berbeda di setiap negara. Analisis tekno-ekonomi mencakup beberapa komponen penting, termasuk investasi modal awal, biaya operasi dan pemeliharaan, pengeluaran energi jaringan, nilai penyelamatan, dan dampak inflasi selama masa ekonomi proyek. Oleh karena itu, pendekatan tekno-ekonomi umumnya disajikan dalam bentuk studi kasus untuk mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif tentang efektivitas ekonomi dan profitabilitas SWH dalam konteks aplikasi spesifiknya. Eze, F et.al (2024) [22] pemanfaatan pemanas air tenaga surya (Solar Water Heating/SWH) memiliki manfaat ekonomi yang signifikan, terutama dalam meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya konvensional seperti listrik dan bahan bakar fosil. Analisis Levelized Cost of Heat (LCOH) dan Life Cycle Analysis (LCA) menunjukkan bahwa investasi dalam SWH dapat memberikan keuntungan ekonomi dalam jangka panjang dengan menekan biaya operasional dan pemeliharaan. Selain itu, penerapan strategi teknologi seperti penyimpanan energi termal musiman (Seasonal Thermal Energy Storage) dan penggunaan material Phase Change Material (PCM) dalam tangki penyimpanan dapat meningkatkan efisiensi penyimpanan panas dan mengoptimalkan pemanfaatan energi, sehingga menghasilkan penghematan biaya yang lebih besar. Untuk meningkatkan adopsi SWH, diperlukan pendekatan berbasis techno-economic, termasuk penggunaan metode seperti Analytical

Hierarchy Process (AHP), Fuzzy-TOPSIS, dan Data Envelopment Analysis (DEA) guna memahami faktor yang mempengaruhi keputusan konsumen serta meningkatkan daya tarik investasi bagi sektor industri. Dukungan kebijakan pemerintah dalam bentuk insentif dan pendanaan riset juga diperlukan untuk meningkatkan skala implementasi teknologi ini. Dengan pendekatan yang tepat, SWH dapat menjadi solusi yang lebih ekonomis dibandingkan sistem pemanas berbasis energi fosil, sekaligus berkontribusi terhadap pertumbuhan pasar energi terbarukan dan pengurangan emisi karbon secara global. Tian, Z et.al (2018) [23] menjelaskan mengenai pembangunan pembangkit pemanas distrik tenaga surya hibrida di taars, Denmark, pada tahun 2015, yang terdiri dari 5960 m<sup>2</sup> kolektor pelat datar dan 4039 m<sup>2</sup> kolektor parabola dalam konfigurasi seri. Pembangkit pemanas tersebut sebagai kasus referensi dan mengembangkan model TRNSYS-GenOpt yang telah tervalidasi untuk mengoptimalkan parameter desain utama, termasuk luas area kolektor, ukuran penyimpanan energi, serta orientasi kolektor parabola. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan berbasis levelized cost of heat (LCOH) dapat digunakan sebagai metode generik untuk mengoptimalkan sistem pemanas distrik tenaga surya hibrida. Studi ini menemukan bahwa biaya panas bersih yang terendah dari sistem hibrida dapat mencapai sekitar 0,36 DKK/kWh. Selain itu, penerapan kolektor surya dalam jaringan pemanas distrik dapat menurunkan LCOH sebesar 5-9 %. Hasil penelitian juga mengonfirmasi bahwa kolektor parabola memiliki kelayakan ekonomi untuk diaplikasikan dalam sistem pemanas distrik di Denmark. Metode LCOH yang bersifat generik dan multivariable ini dapat menjadi panduan bagi insinyur dan perancang dalam merancang, membangun serta mengendalikan sistem pemanas tenaga surya skala besar secara lebih efisien dan ekonomis. Azad Gilani, H., dan Hoseinzadeh, S [24] penelitian ini menyoroti bahwa sistem pemanas surya tidak dapat sepenuhnya bergantung pada radiasi matahari dan memerlukan sumber energi tambahan ketika radiasi tidak mencukupi. Penggunaan cerdas surya parabolik (CPC) terbukti meningkatkan perolehan panas surya secara signifikan, dengan peningkatan tahunan dari 214 kWh di Tiongkok hingga 904 kWh di Mongolia. Akibatnya, kebutuhan daya tambahan untuk pemanas udara dapat dikurangi, dari 189 kWh di Tiongkok menjadi 757 kWh di Mongolia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa

efektivitas CPC bergantung pada tingkat radiasi matahari di suatu lokasi. Pada wilayah dengan radiasi matahari tinggi, penghematan energi lebih optimal, sementara di wilayah dengan radiasi rendah, manfaatnya berkurang. Namun, dari perspektif ekonomi, investasi pada CPC tetap menguntungkan di wilayah dengan harga listrik tinggi. Analisis kelayakan investasi menunjukkan bahwa di negara-negara seperti Kenya, Gabon, Mali, Guatemala, Israel, AS, Italia, Jepang, Finlandia, dan Swedia, di mana harga listrik berkisar antara 0,15 hingga 0,28 USD/kWh, investasi dalam CPC dapat menghasilkan nilai kini bersih (NPV) positif dalam rentang 341 hingga 1.981 USD selama 20 tahun. Aguilar, F et.al (2019) [25] berdasarkan analisis tekno-ekonomi, sistem pendingin udara inverter yang didukung secara simultan oleh panel fotovoltaik dan jaringan listrik tanpa baterai menunjukkan kelayakan yang signifikan. Sistem ini memiliki keunggulan dalam hal efisiensi, kecerahan, serta biaya perawatan yang rendah dibandingkan sistem pendingin udara berbasis energi terbarukan lainnya. Seluruh energi yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik dikonsumsi langsung oleh sistem, sehingga menghindari interaksi kompleks dengan jaringan listrik. Hasil pemantauan selama satu tahun menunjukkan bahwa kontribusi energi surya terhadap konsumsi listrik sistem mencapai 54%, yang meningkatkan efisiensi energi dengan rasio antara energi termal yang dihasilkan dan konsumsi listrik jaringan (SPF<sub>sys</sub>) sebesar 9,6, lebih tinggi dibandingkan dengan sistem referensi (SPF<sub>ref</sub> = 2,5). Akibatnya, konsumsi energi primer tak terbarukan berkurang hingga 26%. Dari aspek ekonomi, meskipun investasi awal sistem ini lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional, penghematan yang diperoleh dari efisiensi konsumsi listrik menghasilkan pengurangan biaya operasional tahunan sebesar 16%, sehingga biaya operasional sistem tahunan ini hanya mencapai 84% dari sistem referensi. Dengan demikian, sistem ini dinilai layak secara ekonomi untuk diterapkan dalam jangka panjang.