

Tim Penulis:

Reza Abdu Rahman - Dibyo Setiawan - Apri Wiyono

Rani Angrainy - Danies Seda Yuseva



TEKNOLOGI CONCENTRATED SOLAR POWER

**Referensi Perkembangan Teknologi Photo-Thermal Conversion
Sebagai Alternatif Sumber Energi Baru Terbarukan**

TEKNOLOGI CONCENTRATED SOLAR POWER

Referensi Perkembangan Teknologi Photo-Thermal Conversion
Sebagai Alternatif Sumber Energi Baru Terbarukan

Tim Penulis:

Reza Abdu Rahman - Dibyo Setiawan - Apri Wiyono
Rani Angrainy - Danies Seda Yuseva



TEKNOLOGI *CONCENTRATED SOLAR POWER*
REFERENSI PERKEMBANGAN TEKNOLOGI *PHOTO-THERMAL CONVERSION*
SEBAGAI ALTERNATIF SUMBER ENERGI BARU TERBARUKAN

Tim Penulis:

**Reza Abdu Rahman, Dibyo Setiawan, Apri Wiyono,
Rani Angrainy, Danies Seda Yuseva.**

Desain Cover:

Usman Taufik

Tata Letak:

Handarini Rohana

Editor:

Reza Abdu Rahman

ISBN:

978-623-459-225-2

Cetakan Pertama:

November, 2022

Hak Cipta 2022, Pada Penulis

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Copyright © 2022

by Penerbit Widina Bhakti Persada Bandung

All Right Reserved

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PENERBIT:

WIDINA BHAKTI PERSADA BANDUNG

(Grup CV. Widina Media Utama)

Komplek Puri Melia Asri Blok C3 No. 17 Desa Bojong Emas
Kec. Solokan Jeruk Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat

Anggota IKAPI No. 360/JBA/2020

Website: www.penerbitwidina.com

Instagram: @penerbitwidina

PENGANTAR

Optimisme tinggi untuk melepaskan diri dari ketergantungan terhadap bahan bakar fosil guna mengurangi emisi karbon global menjadi motivasi utama kami untuk menuliskan buku ini. Terlebih, semangat membangun kemandirian energi untuk bangsa Indonesia dan juga penerapan teknologi yang dapat diproduksi secara mandiri membuat kami yakin bahwa kajian teknologi *concentrated solar power* penting untuk diangkat ke permukaan sebagai opsi tambahan untuk pengembangan dan pemanfaatan sumber energi baru terbarukan di Indonesia. Sebagai negara tropis, wilayah Indonesia menerima suplai matahari sepanjang tahun. Tentunya ini menjadi bonus geografi yang menguntungkan terkait pemanfaatan energi matahari sebagai sumber energi terbarukan. Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi penting bagi kalangan akademisi, industri dan pemangku kepentingan untuk mulai mengarahkan pembangunan teknologi *concentrated solar power* di wilayah Indonesia.

Kenapa *concentrated solar power*? Pertama, teknologi ini masih dikembangkan dan belum mencapai taraf “ajeg”, sehingga memiliki peluang untuk penguasaan dan produksi teknologi untuk memberikan kemandirian energi dan peluang bisnis untuk komponen sistem di Indonesia dan dunia. Kedua, teknologi *concentrated solar power* cocok diterapkan di Indonesia dengan suplai rerata *Direct Normal Irradiation* (DNI) yang memadai, baik untuk keperluan pembangkitan listrik dan proses industri. Ketiga, teknologi ini memungkinkan untuk digunakan pada industri, perkebunan, dan aplikasi lain yang membutuhkan energi panas. Dan terakhir adalah *unit thermal energy storage* yang menjadi kunci penting dari sistem *concentrated solar power* masih dikembangkan sedemikian rupa, sehingga apabila fokus riset diarahkan secara masif untuk pengembangan sistem, maka bukan tidak mungkin kita menjadi global *leader* dalam penguasaan teknologi *thermal energy storage* dan juga *concentrated solar power*.

Bagian pertama dari buku ini membahas tentang pengantar dan dinamika energi bagi kehidupan manusia. Bagian ini secara spesifik memberikan hubungan sebab-akibat dari permasalahan energi dan lingkungan. Pada bagian yang sama, kami menawarkan konsep 5E (*Environment* → *Energy* → *Economy* → *Education* → *Engineering*) sebagai solusi model pembangunan teknologi yang bijak. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas terkait dinamika energi, model pendekatan difusi teknologi *renewable energy* dan bahan bakar fosil disajikan berdasarkan dua pendekatan berbeda untuk melihat dampaknya pada bauran energi global. Cara cerdas untuk pendekatan maju (*advanced approach*) dipaparkan melalui peran optimasi, integrasi dan hibridisasi pada sistem energi. Dengan demikian, perspektif yang tepat dapat terbentuk terkait dengan dinamika energi dan kehidupan manusia serta rencana adopsi dan arah pembangunan teknologi energi.

Bagian dua secara khusus membahas tentang energi matahari dan pemanfaatannya pada kehidupan modern. Pembahasan yang disajikan fokus pada teknologi dan istilah penting yang digunakan terkait dengan energi matahari dan aplikasinya. Perbandingan yang objektif antara sistem konversi *photo-electric* dengan *photo-thermal* diberikan dengan proporsi yang tepat karena masing-masing sistem memiliki kelebihan dan kekurangan. Bagian tiga secara spesifik menjabarkan istilah dan konsep kerja dari teknologi *concentrated solar power*. Bagian ini menjadi pondasi penting untuk pemahaman bagaimana karakteristik kerja sistem *concentrated solar power*, sistem operasi yang digunakan, komponen dan proses konversi energi yang terjadi. Bagian empat hingga enam membahas tentang teknologi *concentrated solar power* yang sudah dikembangkan selama ini. Bagian tujuh (terakhir) membahas tentang potensi dari teknologi *concentrated solar power*, baik sebagai sistem, aplikasi dan komponen, untuk keperluan pembangkitan energi di Indonesia.

Pembahasan yang disajikan pada buku ini lebih ke arah penyajian data dan kajian laporan terkait pengembangan teknologi *concentrated solar power* di seluruh dunia. Beberapa istilah tetap menggunakan Bahasa Inggris untuk memudahkan dalam penelusuran lebih lanjut dari literatur lain. Pembahasan pada buku dibuat sesederhana mungkin dengan asumsi

para pembaca telah menguasai ilmu dasar tentang konversi energi dan fisika dasar terkait dengan konversi energi. Dengan demikian, buku referensi ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih luas terkait dengan teknologi *concentrated solar power* dan peluang pemanfaatannya di Indonesia. Kami berharap referensi ini dapat mendorong para pembaca untuk aktif dan terlibat dalam proses penelitian dan pengembangan keilmuan terkait dengan teknologi energi, dan juga ikut aktif dalam melestarikan lingkungan melalui pola hidup yang bijak terhadap kelestarian lingkungan, khususnya terkait kepekaan terhadap masalah energi.

Tim Penulis

DAFTAR ISI

PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	vi
BAB 1 PERSPEKTIF ENERGI MATAHARI, LINGKUNGAN dan SDGs	1
A. Energi Matahari untuk Kehidupan Manusia	1
B. Konsumsi Energi, Ketergantungan, dan Limbah	3
C. Konsep 5E <i>Project</i>	7
D. Optimasi, Integrasi dan Hibridisasi Sistem Energi	11
E. Kesimpulan Bagian I	14
BAB 2 PEMANFAATAN ENERGI MATAHARI	17
A. Penggunaan Energi Matahari	17
B. Pemanfaatan Energi Matahari Melalui Proses <i>Photoelectrical</i>	20
C. Pemanfaatan Energi Matahari Melalui Proses <i>Photothermal</i>	23
D. Penyimpanan Energi dari Sistem Pemanfaatan Energi Matahari	29
E. Kebutuhan Pembangunan Sistem Energi Matahari	33
F. Tantangan Penerapan Teknologi Energi Matahari	36
G. Kesimpulan Bagian II	40
BAB 3 CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP)	41
A. <i>Concentrated Solar Power (CSP)</i> sebagai <i>Photothermal System</i>	41
B. Konsep Kerja <i>Concentrated Solar Power (CSP)</i>	45
C. Karakteristik Kinerja Sistem <i>Concentrated Solar Power (CSP)</i>	47
D. Batasan Kerja Optik Sistem <i>Concentrated Solar Power (CSP)</i>	51
1. Keterbatasan pada <i>Receiver</i> Model Datar	53
2. Keterbatasan pada <i>Receiver</i> Model Bulat	54
3. Kerugian Optik Aktual	54
E. Batasan Kerja <i>Receiver</i>	56
1. Kerugian Radiatif	57
2. Kerugian Konveksi	59
3. Kerugian Konduksi	60
F. Distribusi dan Penyimpanan Energi	60
G. Siklus Tenaga untuk <i>Concentrated Solar Power (CSP)</i>	61
1. Turbin Uap	62
2. <i>Organic Rankine Cycle (ORC)</i>	63

3.	<i>Stirling Engine</i>	64
4.	Siklus Brayton	65
5.	Alternatif Siklus Lain	66
H.	Meningkatkan Efisiensi Sistem CSP	66
1.	Analisis Hukum Kedua Termodinamika dan <i>Exergy</i>	67
2.	Perpindahan Panas Antar Fluida	69
3.	Optimisasi Temperatur Kerja	70
I.	Kesimpulan Bagian III	72
BAB 4 PARABOLIC TROUGH COLLECTOR (PTC) SYSTEM		73
A.	Pengantar <i>Parabolic Trough Collector</i> (PTC) pada Sistem CSP	73
B.	<i>Parabolic Trough Collector</i> (PTC) Skala Komersil	77
1.	Skala Besar <i>Parabolic Trough Collector</i> (PTC)	77
2.	Skala Kecil <i>Parabolic Trough Collector</i> (PTC)	79
3.	<i>Receiver</i>	80
C.	Pembangkit Termal Solar <i>Parabolic Trough Collector</i> (PTC)	83
D.	Parameter Dasar PTC	85
E.	Kesetimbangan Energi pada Sistem PTC	89
F.	Desain <i>Plant</i> CSP Model PTC	91
G.	<i>Operation dan Maitenance</i> (O&M)	98
H.	Tren di Masa Mendatang untuk PTC	100
I.	Kesimpulan Bagian IV	101
BAB 5 SOLAR TOWER SYSTEM		103
A.	Pengantar <i>Solar Tower System</i>	103
B.	Konfigurasi Dasar	104
C.	Perkembangan Awal <i>Solar Tower</i>	105
D.	Fasilitas Uji Coba Internasional dan Pilot <i>Plant</i>	107
E.	Studi Kasus: Proyek <i>Solar One</i> dan <i>Solar Two</i> , California, USA	108
F.	Periode Transisi	111
G.	Kebangkitan Setelah Tahun 2005	112
1.	Penelitian, Demonstrasi dan Pengembangan Lanjut	112
2.	<i>Plant</i> Komersil	114
H.	Tata Letak <i>Heliostat</i> dan Penggunaan Lahan	116
I.	Tren di Masa Mendatang untuk <i>Solar Tower</i>	117
J.	Kesimpulan Bagian V	118

BAB 6 PARABOLIC DISH SYSTEM	119
A. Pengantar <i>Parabolic Dish System</i>	119
B. Prinsip Dasar <i>Solar Dish System</i>	121
C. Perkembangan Saat Sekarang	130
1. <i>Stirling Energy System (SES)</i>	130
2. <i>Schlaich Bergermann UND Partner (SBP)</i>	131
3. <i>Infinia Corporation</i>	132
4. <i>HelioFocus</i>	133
5. <i>Solar Cat/SouthWest Solar</i>	134
6. <i>Australian National University (ANU)</i>	134
D. Konversi Energi, Siklus Tenaga dan Kelengkapan <i>Solar Dish System</i>	135
1. <i>Stirling Engine</i>	136
2. Kelengkapan Sistem	139
a. Alternator	139
b. Sistem Pendingin	140
c. <i>Receiver</i>	140
E. Performa Sistem	143
F. Sistem Kerja <i>Hibrid</i>	144
G. Sistem Kerja Mandiri (<i>Stand Alone Operation</i>)	144
H. Tren di Masa Mendatang untuk <i>Solar Dish System</i>	145
1. Aplikasi Desentralisasi	145
2. Ukuran Sistem	145
3. Sistem Penyimpanan Energi	146
4. Sistem Operasi <i>Hibrid</i>	148
I. Kesimpulan Bagian VI	148
BAB 7 TREN CONCENTRATED SOLAR POWER	151
A. Perkembangan <i>Plant Concentrated Solar Power Global</i>	151
B. Potensi Matahari di Indonesia	152
C. Semangat Perubahan	154
D. Sosial dan Ekonomi	156
E. Penutup	157
DAFTAR PUSTAKA	159
PROFIL PENULIS	167



PERSPEKTIF ENERGI MATAHARI, LINGKUNGAN dan SDGs

A. ENERGI MATAHARI UNTUK KEHIDUPAN MANUSIA

Merujuk istilah matahari sebagai sumber energi, memerlukan pemahaman yang lebih luas dari perspektif yang tepat. Seluruh bentuk energi yang ada di bumi pada prinsipnya dapat dikategorikan sebagai bentuk "**energi matahari**". Contoh paling mudah adalah energi angin. Angin merupakan udara yang bergerak akibat adanya perbedaan temperatur pada permukaan bumi yang secara langsung berhubungan dengan matahari. Bahan bakar fosil yang diperoleh dari hewan dan tumbuhan yang terpendam di dalam perut bumi juga dapat dikategorikan sebagai "**bentuk lain**" energi matahari dikarenakan mereka hidup dengan menyerap energi matahari. Dengan demikian, maka pada hakikatnya matahari merupakan sumber energi utama kehidupan di bumi. Secara spesifik buku ini menggunakan terminologi energi matahari yang dimanfaatkan secara langsung dari radiasi matahari. Pemanfaatan ini termasuk aplikasi dari *solar cell* (panel surya atau *photovoltaic*) untuk konversi cahaya menjadi listrik, pemanasan air secara langsung dari pancaran energi inframerah matahari dan contoh lain yang lebih sederhana seperti menjemur pakaian.

Secara khusus, radiasi sinar inframerah dari matahari telah dimanfaatkan manusia sejak zaman lampau. Uniknya, pemanfaatan energi matahari secara spesifik pada era Yunani kuno sangat relevan dengan kondisi modern saat ini yang berhubungan dengan krisis energi dan permasalahan lingkungan. Pada abad kelima sebelum masehi, penduduk Yunani Kuno berada pada kondisi krisis energi. Terjadi kelangkaan bahan bakar (tentu bukan minyak dan batu bara) yang bersumber dari kayu, umumnya digunakan dalam bentuk arang, yang berfungsi sebagai sumber energi utama untuk keperluan memasak dan pemanasan ruang pada masa tersebut. Masyarakat setempat telah banyak membakar hutan produktif untuk keperluan produksi arang, sehingga menyebabkan krisis “sumber arang” berkepanjangan. Hal ini yang mendatangkan kebijakan penjataan produksi dan penggunaan arang.

Pada prinsipnya, penjataan energi telah dilakukan sejak masa lampau dengan sebab yang sama: krisis energi!

Pemanfaatan energi matahari secara langsung dilakukan pada banyak aspek yang mendukung kehidupan manusia, yang bersifat tidak teknis. Setiap hari, total energi yang digunakan untuk menjemur pakaian dan pengeringan alami lainnya (misal pengeringan ikan, hasil kebun) jauh lebih besar dibandingkan pemanfaatan energi fosil kumulatif selama satu tahun (energi untuk produksi listrik, kendaraan, dll). Angka energi yang sangat fantastis diberikan oleh alam untuk menunjang kehidupan manusia, tanpa meninggalkan jejak karbon maupun kerusakan lainnya seperti penggunaan bahan bakar fosil [1]. Tentunya, konsep kerja ini perlu diperluas pemanfaatannya agar dapat memberikan kontribusi yang lebih besar untuk menggantikan sumber energi kotor (energi fosil).

Pemanfaatan energi matahari untuk kebutuhan yang lebih luas, misalnya penggantian energi fosil untuk keperluan produksi listrik dan produksi panas/termal, merupakan motivasi terbesar dari penulisan buku ini. Tren global menunjukkan angka kenaikan yang signifikan terkait dengan pemanfaatan energi matahari untuk kebutuhan teknis. Dengan semangat *Sustainable Development Goals* (Tujuan Pembangunan

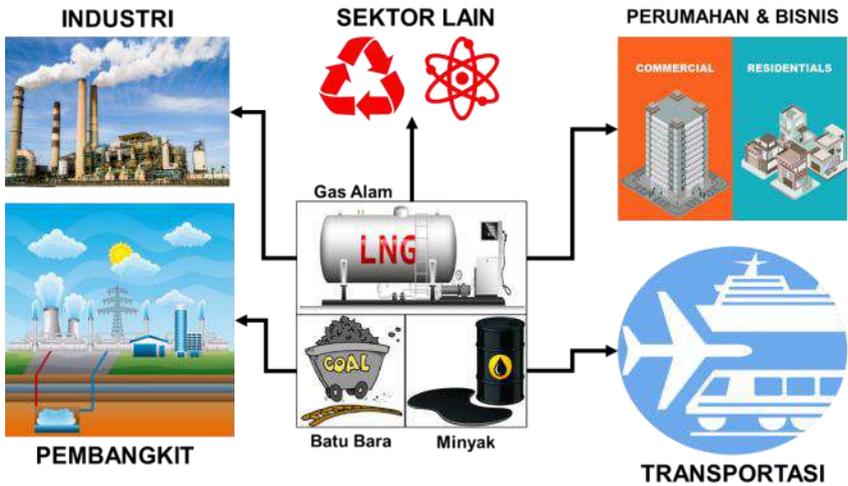
Berkelanjutan), maka sudah saatnya kita aktif untuk memanfaatkan energi matahari secara bijak sehingga dapat menurunkan pencemaran lingkungan akibat pembakaran bahan bakar fosil [2]. Meskipun tidak dapat langsung menggantikan peran bahan bakar fosil, namun paling tidak dapat meminimalisir dan mengurangi secara signifikan dampak dari pencemaran lingkungan akibat pembakaran bahan bakar fosil. Lebih lanjut, semangat penyebaran energi yang lebih merata bagi rakyat Indonesia, khususnya di wilayah tertinggal, diharapkan mampu mendorong pembangunan manusia Indonesia yang lebih baik ke depannya.

B. KONSUMSI ENERGI, KETERGANTUNGAN, DAN LIMBAH

Tingkat konsumsi energi global meningkat secara eksponensial dan tren yang terus meningkat. Permasalahan utamanya adalah sumber utama konsumsi energi global pada sektor teknis bersumber dari bahan bakar fosil (batu bara, minyak dan gas). Hanya sedikit konsumsi energi yang berasal dari energi nuklir (yang relatif lebih bersih dibandingkan bahan bakar fosil) dan energi terbarukan (*renewable energy*). Tingkat kemudahan dalam memperoleh energi fosil membuat ketergantungan yang sangat tinggi pada sisi pengguna (dan tentunya keuntungan besar produsen). Transisi energi tidak dapat dilakukan dengan mudah, khususnya untuk beralih ke energi terbarukan maupun energi yang dianggap memiliki "*masalah sampingan*" lebih rendah, misalnya nuklir. Hal ini khususnya dirasakan pada sektor transportasi yang menggunakan mesin pembakaran dalam sebagai motor penggerak utama. Tentu tidak mungkin atau paling tidak sulit untuk mengganti peran mesin pembakaran untuk aplikasi pesawat *jumbo jet* ataupun pada aplikasi kapal pesiar dengan menggunakan motor listrik.

Gambar 1.1 menyajikan sekilas tentang konsumsi dominan dari bahan bakar fosil yang umumnya digunakan untuk keperluan industri, transportasi, komersial dan perumahan, dan sektor lainnya seperti agrikultur. Masing-masing kategori memiliki nilai tersendiri dan sangat tergantung dengan fungsi dan kapasitasnya. Yang paling utama dari sini adalah ketergantungan yang begitu tinggi pada bahan bakar fosil menyebabkan sulitnya untuk transisi ke sektor energi bersih. Terlebih, dengan meningkatnya jumlah penduduk dan suhu rerata global,

memberikan hubungan yang lebih kuat terkait dengan tren kenaikan konsumsi energi [3].



Gambar 1.1 Sektor utama yang menggunakan bahan bakar fosil (umum)

Sebagaimana diketahui bahwa bahan bakar fosil memiliki jumlah yang terbatas dan kelak akan habis (*meskipun data validnya kadang masih dipertanyakan*). Kondisi ini secara langsung memotivasi banyak peneliti untuk mulai menerapkan teknologi alternatif (contohnya mengembangkan minyak bakar yang bersumber dari tumbuhan, atau dikenal dengan istilah *biofuel*). Dorongan yang kuat dari kalangan peduli lingkungan juga memberikan dampak (*yang dapat*) dikatakan positif terkait dengan pembangunan kesadaran untuk mulai mengurangi konsumsi bahan bakar fosil. Pun demikian, proses transisi masih berjalan lambat dan belum memberikan dampak yang terlihat nyata. Sebaliknya, dampak kerusakan lingkungan sudah sangat dirasakan, seperti kekacauan musim, kenaikan permukaan laut, dan beberapa kepunahan hewan serta perubahan perilaku flora dan fauna [4].

Untuk semakin memberikan kesan yang lebih jelas, kita juga harus memperhatikan terkait dengan limbah (sampah) yang diproduksi, baik untuk sektor personal, regional maupun global [5]. Seluruh permasalahan

ini sudah sangat jelas menanti perubahan nyata dari tiap individu, untuk mulai membangun kesadaran terkait penghematan energi, pengurangan konsumsi air, menurunkan jumlah sampah per kapita dan menyebarkan semangat ini secara kontinu. Mungkin kita dapat bergantung pada teori “*Gaia Effect*”, namun konsep ini dapat berisiko pada perubahan pola kehidupan (*dalam artian negatif*) manusia serta lingkungan ketika kita dipaksa berubah oleh alam [6]. Dengan demikian, permasalahan utama dapat dipetakan seperti diagram pada Gambar 1.2.

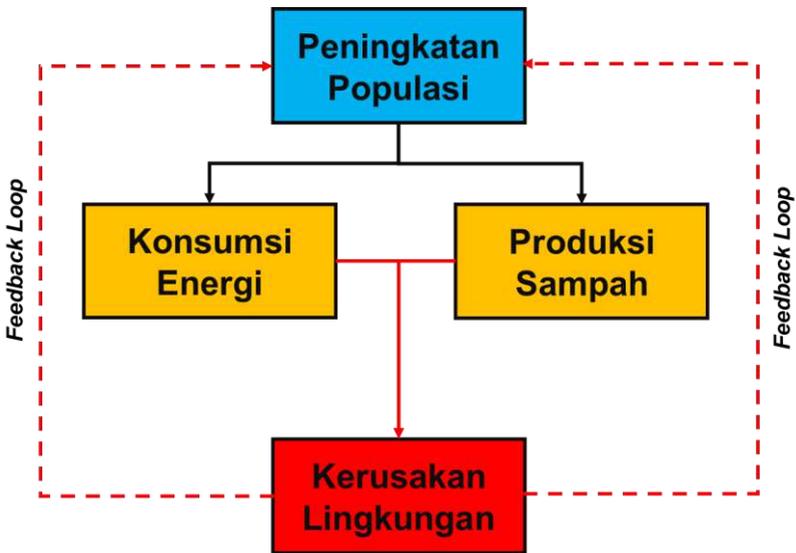


Gambar 1.2 Hubungan antara permasalahan utama terkait dengan energi

Pola hubungan masalah dapat dibuat menjadi lebih sederhana. Kenaikan jumlah populasi manusia sejak revolusi industri pertama sangat cepat. Populasi yang meningkat menuntut kebutuhan pangan dan energi yang lebih besar. Sesuai dengan konsep proses konversi energi di mana selalu ada “*limbah*” dari tiap proses konversi, maka kecenderungan peningkatan limbah (sampah) juga naik secara tajam. Keseluruhan faktor ini berdampak pada perubahan iklim yang secara langsung berdampak kembali pada kehidupan manusia. Dengan demikian, konsep *feedback loops* terjadi (Gambar 1.3). Konsep *feedback loops* merupakan konsep sebab akibat yang berlangsung secara kontinu.

Kenaikan populasi mendorong meningkatnya konsumsi energi. Di sisi lain, peningkatan konsumsi energi diiringi juga dengan peningkatan barang produksi dan limbah dari proses produksi energi itu sendiri. Kedua faktor

ini berdampak pada kerusakan lingkungan (tahap 1). Kemudian, kerusakan alam (tahap 1) berdampak pada peningkatan konsumsi energi yang lebih lanjut. Contoh paling mudah, pada era 1980an, kipas angin sudah dapat memberikan kenyamanan untuk sirkulasi udara di dalam ruangan karena pada masa tersebut suhu bumi relatif masih *“normal”*. Kemudian seiring dengan tingkat pemanasan yang berlanjut terus, maka rasa nyaman ini berkurang sehingga diperlukan pendingin ruang (*AC-air conditioner*). Kemudian, kipas tersebut menjadi limbah dan konsumsi energi listrik meningkat karena pemakaian AC. Lalu, dampak lingkungan yang disebabkan menjadi lebih besar (Tahap 2). ***Siklus ini berlanjut terus sampai nanti pada titik siklus terhenti dan populasi sudah hilang sepenuhnya.***



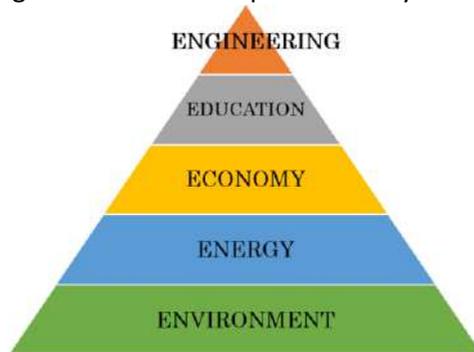
Gambar 1.3 Konsep *feedback loops*

Lalu timbul pertanyaan, apakah semua ini dikarenakan tingginya populasi? Sebenarnya, tidak sepenuhnya dikarenakan peningkatan populasi, karena memang ini sudah menjadi sifat alami makhluk hidup untuk berkembang biak. Permasalahan utama adalah bagaimana pola hidup manusia sebagai umat untuk menjaga lingkungannya. Ambil contoh

pada era Perang Dunia pertama dan kedua, kerusakan alam pada saat tersebut jauh lebih parah dibandingkan masa sekarang, padahal pada masa tersebut populasi cenderung sedikit. Dengan demikian, optimisme yang positif masih bisa ditanamkan untuk menyesuaikan perubahan iklim ini dengan perilaku sadar energi, bijak dalam mengelola limbah dan tentunya dilakukan secara kolektif.

C. KONSEP 5E PROJECT

5E *project* merupakan konsep berpikir yang memperhatikan aspek penting kehidupan manusia yang saling terkait, saling terikat dan saling mempengaruhi. Konsep ini memberikan hubungan antara *environment* (lingkungan), *energy* (energi), *economy* (ekonomi), *education* (pendidikan), dan *engineering* (rekayasa-teknik). Lima aspek E tersebut memberikan hubungan timbal balik yang saling berkelanjutan. Secara khusus, konsep 5E disajikan dalam hierarki piramida (Gambar 1.4). Bentuk hierarki 5E memberikan gambaran yang lebih jelas di mana tiap faktor memiliki peran dan kapasitas yang lebih besar dari aspek berikutnya.



Gambar 1.4 Hierarki 5E

Environment (lingkungan) ditempatkan pada bagian bawah dengan skala relatif terbesar dibandingkan seluruh aspek. Penempatan ini dikarenakan *environment* merupakan “tempat” kita dan seluruh flora/fauna hidup. Tanpa *environment* maka tidak akan ada kehidupan manusia atau lebih jelasnya tidak ada Bumi. Dengan demikian, sudah sangat jelas bagi kita semua, ***para penumpang environment***, untuk menjaga tempat tinggal kita ini. Pelestarian *environment* pada prinsipnya harus dilakukan

oleh semua orang, melalui program nyata, terstruktur dan terukur. Kualitas *environment* yang sehat pada akhirnya akan memberikan keuntungan bagi makhluk hidup yang tinggal didalamnya. Sebaliknya, risiko besar menanti jika kerusakan lingkungan dilanjutkan terus tanpa ada tindakan untuk memperlambat atau menghentikan sama sekali, risiko besar yang sudah pasti dirasakan oleh semua makhluk yang hidup, yakni ***extinction***.

Energy ditempatkan setelah *environment* dikarenakan seluruh kehidupan yang ada di "*environment*" membutuhkan *energy*. *Energy* ini tidak hanya dilihat untuk pemenuhan fungsi paling mendasar bagi makhluk hidup yakni makanan, namun juga melihat dari perspektif mikroskopik pada level atom. Pertanyaan muncul, apakah atom membutuhkan *energy*? ***Jawabannya sederhana: energy sendiri merupakan bagian dari atom.*** Jika atom tidak memiliki energi, maka ini berada pada kondisi 0 Kelvin karena tidak memiliki energi kinetik. Matahari yang menyinari bumi memberikan energi yang memungkinkan makhluk hidup dan "atom" untuk berfungsi dan memainkan perannya yang kompleks pada sistem kehidupan di Bumi. Sehingga penting bagi semua makhluk untuk memperhatikan keberlangsungan hidupnya dengan menjaga pasokan energi yang kontinu. Makhluk hidup punah hanya karena 2 hal: pemburuan secara *massif* sehingga tidak dapat bereproduksi atau karena kehilangan sumber pasokan energi (makanan). Artinya, *energy* mutlak dibutuhkan pada lingkungan dan semua makhluk yang ada pada lingkungan tersebut.

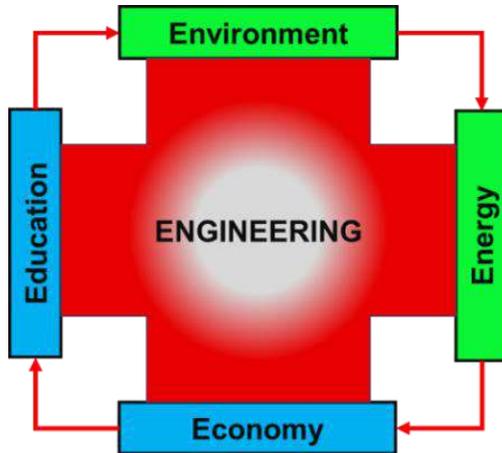
Jika *environment* dan *energy* berlaku kepada semua makhluk → flora, fauna, manusia, yang kasat dan tidak kasatmata, maka tahapan berikutnya pada konsep 5E hanya berlaku secara spesifik kepada manusia. ***Teorinya, economy*** digunakan sebagai *main driving force* (penggerak utama yang menyebabkan terjadinya sesuatu) untuk menjamin keberlangsungan hidup manusia secara sosial dan adil. Konsep ekonomi sederhana seperti *barter* (tukar-menukar) maupun *trade* (perdagangan) telah berlangsung sejak awal kehidupan manusia. Jika tidak ada konsep ekonomi ini, maka dapat dipastikan perburuan sesama manusia dan pola hidup binatang dapat terjadi juga pada manusia demi melangsungkan kehidupannya. Pengelolaan ekonomi sendiri pada prinsipnya erat dengan pengaturan

energy dan *environment*. Sebagai contoh, pengaturan jatah “arang” pada era Yunani kuno, dan pengenaan pajak/bea untuk penggunaan air irigasi. Sejatinya, pengelolaan ekonomi yang tepat dengan berlandaskan “*kecukupan*” dapat mendorong pemerataan teknologi dan unsur penunjang kehidupan manusia lainnya.

Kelestarian *environment*, penggunaan *energy* yang bijak, dan konsep *economy* yang adil hanya dapat diperoleh melalui *education* (pendidikan). Perlu digaris bawahi, bahwa ***education* ≠ perolehan gelar dari sekolah**, meskipun sebagian pendidikan dapat diperoleh melalui sekolah. *Education* yang dimaksud pada konsep ini adalah pengembangan kemampuan berpikir manusia, pemberdayaan akal yang lebih baik serta pematangan Nurani yang lebih mantap, yang pada akhirnya dapat memberikan pengaruh yang baik bagi diri manusia itu sendiri maupun sekitarnya. Maka tepat bahwa *education* menjadi kunci terpenting untuk membangun manusia yang bijak, bermartabat, dan memiliki rasa kepekaan sosial yang tinggi guna melestarikan alam ini [7]. Kembali, *education* yang baik mutlak diperlukan bagi tiap individu dan sudah seyogyanya Lembaga pendidikan serta “rumah tangga” menjadi pembibitan *education* yang baik. permasalahan sering muncul dikarenakan para pelaku di lembaga pendidikan cenderung bukan orang terdidik (*educated*) meskipun memiliki gelar tinggi (*high degree*).

Hubungan hierarki 5E sudah dijelaskan sampai tahap 4 (empat). Pertanyaan besar muncul, apa yang menyatukan *environment*, *energy*, *economy* dan *education* dengan tetap dapat langsung terhubung pada 4 (empat) aspek tersebut tanpa saling mengikat? Jawabnya adalah *engineering*. Model hubungannya dapat dilihat pada Gambar 1.5. Kenapa *engineering*? Kenapa tidak *science* dan atau *mathematic*? *Science* dan *mathematic* fokus pada *fundamental knowledge*, dan cenderung fokus pada konsep hukum dan pengetahuan dasar yang sangat penting dari kehidupan semesta ini. Sedangkan *engineering* fokus pada penerapan ilmu dan pengetahuan tersebut. Oleh karenanya, *engineering* sendiri sudah dilakukan oleh alam semesta dan kehidupan flora/fauna. Contoh *engineering* dari alam adalah penyesuaian suhu bumi secara berkala dan siklus abadi air di bumi. Banyak hewan yang telah menerapkan konsep *engineering* dan diadopsi oleh manusia, seperti bentuk sarang lebah

(*honeycomb*), struktur sarang semut (*ant-farm*), bendungan oleh berang-berang, dan banyak lainnya. Pohon atau tumbuhan sendiri merupakan produk *engineering* yang luar biasa, seperti *carnivore plant* dan bentuk duri pada tumbuhan di daerah kering. Secara singkat: *engineering* sudah diterapkan terlebih dahulu oleh alam dan dapat dijadikan contoh oleh manusia [8].

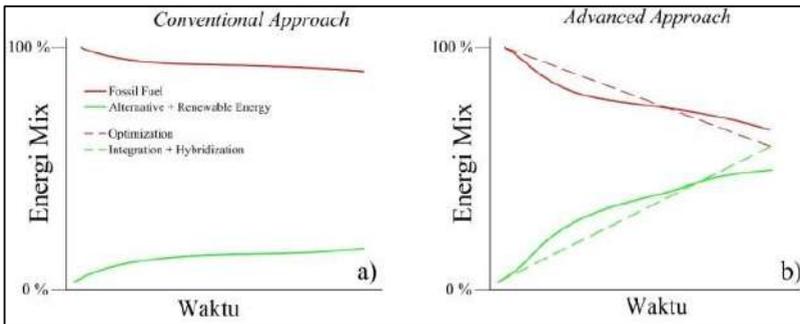


Gambar 1.5 Peran utama *engineering* pada pemenuhan unsur kehidupan

Integrasi konsep 5E dengan *engineering* menjadi siklus yang berkelanjutan. Teknologi yang merupakan produk dari *engineering* digunakan untuk memaksimalkan proses pendukung kehidupan manusia, meningkatkan efisiensi sistem energi, memajukan keekonomian dan mendukung pendidikan yang berkualitas. Akan tetapi, *engineering* sendiri dapat menjadi *boomerang* yang berdampak negatif pada *environment* dan aspek lainnya jika dilakukan secara serampangan. Sehingga dengan jelas dapat disimpulkan bahwa penyesuaian kebutuhan dan pengembangan teknologi yang berlandaskan pada asas kehidupan yang baik, merupakan faktor penjaga utama dari penerapan konsep 5E. Teknologi yang dikembangkan dapat menyelamatkan lingkungan, menghasilkan konsep energi bersih, memberikan dampak ekonomi yang lebih baik dan memaksimalkan proses "*memanusiakan manusia*" melalui pendidikan yang tepat.

D. OPTIMASI, INTEGRASI DAN HIBRIDISASI SISTEM ENERGI

Kompleksitas yang tinggi pada sistem energi *existing* menyebabkan sulitnya untuk transisi ke sumber energi yang relatif lebih ramah lingkungan. Kekurangan utama dari sistem energi terbarukan adalah tingginya biaya operasi dan rendahnya jaminan pasokan yang aman karena sifat *intermittent*. Kondisi ini tentu tidak dapat dibiarkan terus-menerus menjadi “*alasan klasik*” untuk tetap mempertahankan sistem energi *existing* yang bersumber dari bahan bakar fosil. Sehingga, penting adanya adopsi metode maju (*advanced method*) untuk memaksimalkan fungsi sistem energi alternatif dan terbarukan pada sistem *existing*. Adopsi ini dapat dilakukan dengan konsep pendekatan optimasi, integrasi dan hibridisasi sistem energi.

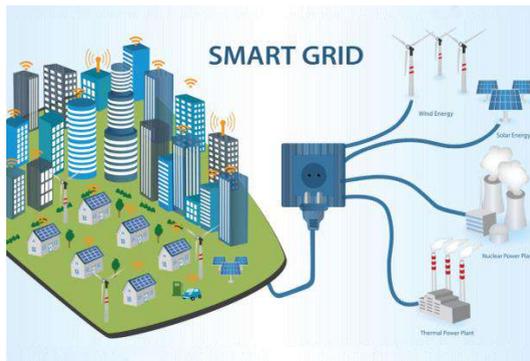


Gambar 1.6 Perbandingan *energy mix* (bauran energi) dengan konsep pendekatan konvensional (a) dan konsep pendekatan maju (b) [9]

Gambar 1.6 menyajikan perbandingan antara konsep pendekatan konvensional *a.k.a.* kuno dengan konsep pendekatan maju (*advanced*). Pendekatan konvensional menggunakan sistem independen di mana sistem energi *existing* tetap menggunakan bahan bakar fosil dan sistem energi bersih memiliki sistem tersendiri. Tentu ini tidak akan efektif dikarenakan perbedaan harga yang sangat jauh dan reliabilitas yang rendah dari sistem energi bersih (lihat aspek “*economy*” pada konsep 5E). Sehingga, bauran energi bersih tetap akan sedikit pada tahun mendatang dan penurunan bahan bakar fosil juga hanya sedikit saja. Hal ini kadang yang dijadikan “*jargon*” untuk menunda penerapan sistem energi bersih.

Dengan demikian, upaya alternatif yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan pendekatan maju (*advanced approach*).

Pendekatan maju menggabungkan konsep optimasi, integrasi dan hibridisasi pada sistem energi. Konsep optimasi digunakan pada sistem energi *existing*, yang biasanya menggunakan bahan bakar fosil, dengan tujuan meningkatkan efektivitas konversi energi sehingga menurunkan konsumsi bahan bakar per unit energi diproduksi. Contoh sederhana konsep optimasi adalah penerapan *regenerator heat exchanger* untuk mengambil limbah panas industri yang kemudian digunakan sebagai sistem pemanas mula untuk *feed water supply*. Dalam hitungan matematis sederhana dapat dilihat sebagai berikut: sebelum penerapan konsep optimasi, dibutuhkan 1000 kg batubara untuk menghasilkan 1000 MW_{th} (Mega Watt *thermal*). Melalui penerapan optimasi *regenerative heat exchanger*, 1000 kg batubara dapat digunakan untuk menghasilkan 1100 MW_{th}. Meskipun jumlah konsumsinya sama, namun nilai bersih yang diproduksi lebih tinggi, sehingga sistem lebih efisien. Banyak teknologi yang sudah dikembangkan untuk optimasi sistem energi *existing* dan masih akan terus dikembangkan agar dapat mencapai titik puncak efisiensi (meskipun tetap di bawah 100%, sesuai dengan kaidah Termodinamika).

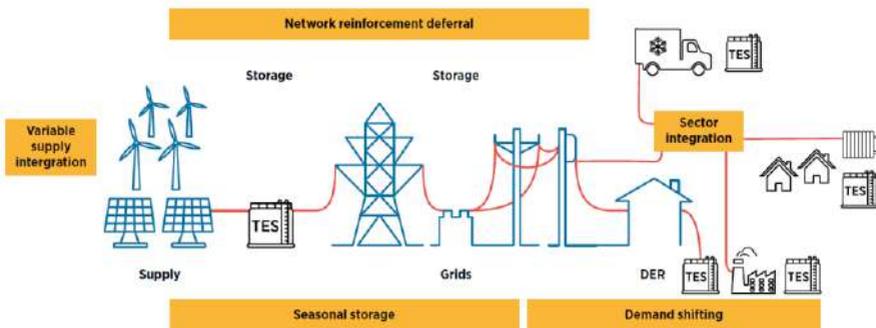


Gambar 1.7 Konsep *smart grid system* pada proses integrasi sistem energi [10]

Pada sistem energi alternatif dan bersih (*alternative dan renewable energy*) integrasi dan hibridisasi menjadi kunci utama untuk meningkatkan bauran energi sistem tersebut. Integrasi fokus pada aspek bagaimana energi bersih dapat masuk ke jaringan sistem utama atau menggantikan

peran fungsi sistem energi *existing*. Contoh sederhana integrasi adalah produksi listrik dari sistem *solar panel* dan energi angin dimasukkan ke dalam jaringan utama (*grid*) distribusi listrik. Alternatif dari integrasi adalah penerapan pada wilayah terpencil atau *remote*. Integrasi sistem sendiri mampu meningkatkan kelayakan (*feasibility*) dari sistem energi bersih, menurunkan (sedikit) konsumsi bahan bakar fosil dari sistem *existing*. Lebih jauh, kemajuan perangkat lunak dapat memberikan kontribusi yang lebih besar untuk membuat *smart grid system* (Gambar 1.7).

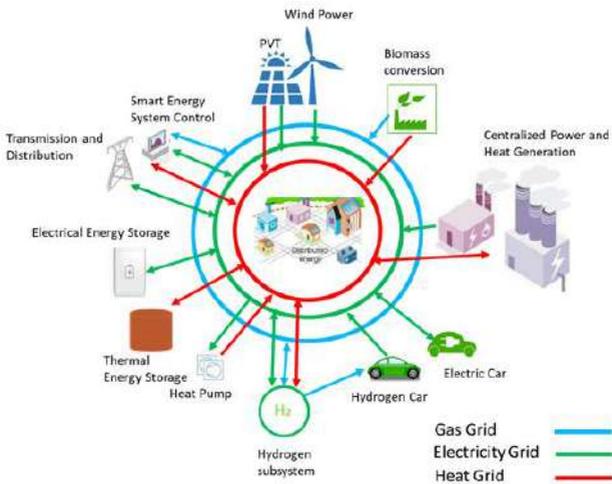
Konsep integrasi lanjutan juga dapat memanfaatkan sistem penyimpanan energi termal (*Thermal Energy Storage- TES*). Integrasi ini memberikan peluang aplikasi yang lebih besar, tidak hanya untuk keperluan *stationer*, namun juga dapat diterapkan untuk keperluan *mobile* (Gambar 1.8). Keperluan pada aspek *mobile* sendiri mendukung pemenuhan teknologi untuk sistem *supply chain* yang menggunakan pendingin. Sistem ini cenderung boros dalam konsumsi energi dan dapat dihemat dengan integrasi lanjutan menggunakan TES. Peluang integrasi sangat terbuka lebar dan dapat dengan cepat meningkatkan aspek kelayakan sistem energi alternatif dan bersih.



Gambar 1.8 Peran sistem penyimpanan energi untuk integrasi sistem [11]

Integrasi yang baik juga mendukung konsep *hybridization* (hibridisasi). *Hybridization* merupakan penggabungan beberapa sistem energi, baik dari sumber *alterative* (misalnya biomassa), *renewable energy* (energi angin dan matahari), maupun pembangkit utama (tenaga *fossil fuel*). Skema kerja *hybridization* pada Gambar 1.9 menunjukkan dengan jelas konsep

yang sangat efektif dalam peningkatan kapasitas bauran energi dari sumber energi alternatif dan energi bersih. *Hybridization* dapat menggabungkan beberapa sumber energi, memungkinkan untuk memberikan kombinasi bauran energi yang lebih optimal dengan harga rerata energi (*LCOE-leverage cost of electricity*, untuk listrik) yang lebih murah. Hal ini dapat dicapai karena konsep *hybridization* mampu memberikan fungsi yang lebih optimal. Kelebihan energi dalam proses produksi pada saat *low load* dapat digunakan untuk kebutuhan penyimpanan maupun produksi biomassa. Energi yang tersimpan tersebut dapat digunakan kembali saat beban puncak (*peak load*). Dengan demikian, energi yang hilang menjadi lebih rendah dan efektivitas menyeluruh sistem dapat meningkat secara tajam.



Gambar 1.9 Konsep *hybridization* sistem energi [12]

E. KESIMPULAN BAGIAN I

SDGs digunakan sebagai sasaran utama untuk pencapaian energi bersih, mengurangi kesenjangan energi dan pencemaran lingkungan. Matahari sebagai sumber energi utama memberikan peluang manfaat yang luas dan cenderung lebih bersih dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Permasalahan yang muncul akibat konsumsi energi yang tidak terkendali dan pembuangan limbah sebagai *byproduct* perlu diatasi sebelum terjadi tahapan akhir *feedback loops* yang berdampak pada

extinction. Pemahaman terhadap konsep 5E (*Environment* → *Energy* → *Economy* → *Education* → *Engineering*) menyajikan perspektif proses perkembangan yang lebih terarah dan memberikan hubungan dampak yang lebih jelas, sehingga arah pembangunan dan pengembangan konsep yang berkesinambungan dapat tercapai lebih baik. Optimasi, integrasi dan hibridisasi dalam skema *advanced approach* memberikan kontribusi yang optimal untuk meningkatkan kelayakan sistem energi alternatif dan bersih, yang secara bersamaan mampu menurunkan bauran energi dari sumber *fossil fuel*.

A square graphic with a grey background and a white border. Inside, the word 'BAB' is written in white capital letters at the top, and a large white number '2' is centered below it.

BAB
2

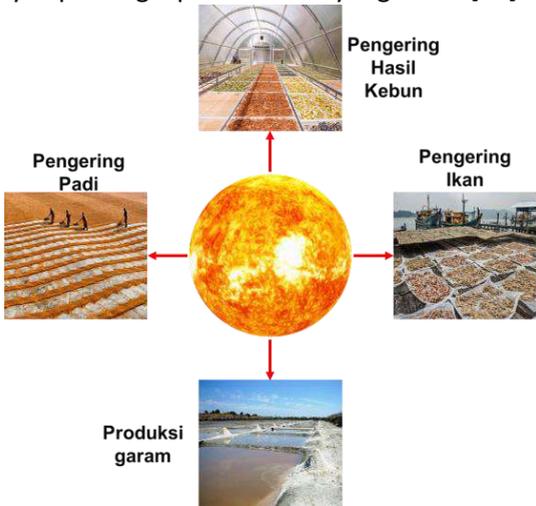
PEMANFAATAN ENERGI MATAHARI

A. PENGGUNAAN ENERGI MATAHARI

Bagian I memberikan pandangan secara luas tentang peran utama matahari sebagai sumber energi. Pemanfaatan ini dapat bersifat alami (*natural*) seperti untuk pemanasan ruang dan kebutuhan rumah tangga mendasar (menjemur pakaian) hingga pemanfaatan dengan rekayasa (*engineered utilization*). Kedua metode pemanfaatan tersebut telah digunakan sejak lama. Sebagai contoh, untuk meminimalisir efek pergantian musim (musim dingin dan panas), model susunan rumah dan desain bangunan disesuaikan agar tetap nyaman saat musim panas dan tetap hangat saat musim dingin. Archimedes menggunakan teknologi *solar death ray* untuk membakar kapal musuh. Teknologi ini dikembangkan dengan menggunakan lempengan perunggu yang memantulkan cahaya matahari pada satu titik fokus (*focal point*). Lebih lanjut, bangsa Romawi membuat larangan bangunan yang dapat menghalangi akses sinar matahari ke rumah di sekitarnya. Lebih dari itu, energi matahari sendiri memiliki peran besar bagi ekosistem seperti proses fotosintesis. Buku ini secara khusus fokus kepada pemanfaatan energi matahari secara teknis untuk keperluan pembangkitan listrik maupun energi termal [13].

Pemanfaatan hasil energi matahari secara alami dilakukan dengan memanfaatkan panas yang diradiasikan oleh matahari. Gambar 2.1 memperlihatkan pemanfaatan alami energi panas matahari untuk

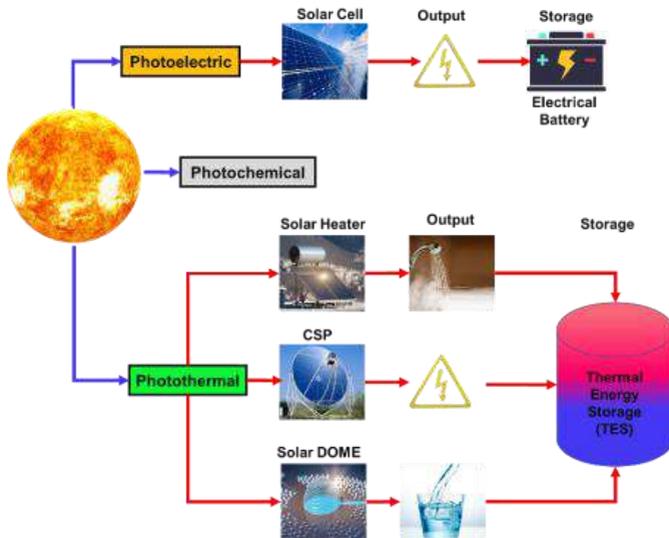
kebutuhan industri kecil. Terdapat satu kesamaan untuk model pemanfaatan energi matahari secara alami pada industri kecil yakni dibutuhkan luasan area yang besar. Hal ini disebabkan rerata energi matahari yang diterima perluasan area (biasanya ditulis dalam satuan kWh/m²) relatif kecil. Kemudian, model pemanfaatan ini cenderung memiliki kualitas yang rendah pada produk akhirnya dan memiliki efektivitas energi yang kecil, sehingga menyebabkan kenaikan biaya produksi. Di sisi lain, konsep ini sejatinya relatif lebih ramah lingkungan, mudah dilakukan, relatif murah secara biaya peralatan karena tidak melibatkan banyak perlengkapan mekanis yang rumit [14].



Gambar 2.1 Pemanfaatan energi matahari secara alami

Pada masa *modern* sekarang, pemanfaatan energi matahari menjadi lebih luas yang digunakan untuk memenuhi berbagai kebutuhan pada era *modern*. Sejalan dengan konsep 5E, skema pemanfaatan energi matahari dilakukan melalui proses rekayasa (*engineered utilization*) agar dapat menghasilkan energi luaran yang lebih berguna, dengan kapasitas yang lebih baik dan biaya yang lebih murah. Gambar 2.2 memperlihatkan peta pemanfaatan energi matahari berdasarkan skema *engineering utilization*. Perbedaan paling jelas terlihat terkait dengan perlengkapan konversi yang digunakan, bentuk luaran energi yang dihasilkan dan adanya unit penyimpanan energi [15]. Hal ini kembali membuktikan bahwa buah

teknologi dari proses *engineering* pada skema 5E sangat berguna untuk menunjang kehidupan manusia. Siklus proses desain *engineering* yang berkelanjutan mampu memberikan luaran teknologi yang berdampak bagi kehidupan manusia. Meskipun kadang dampak yang diberikan tidak selamanya positif, paling tidak upaya nyata yang dilakukan mampu berkontribusi untuk menunjang kehidupan manusia menjadi lebih baik.



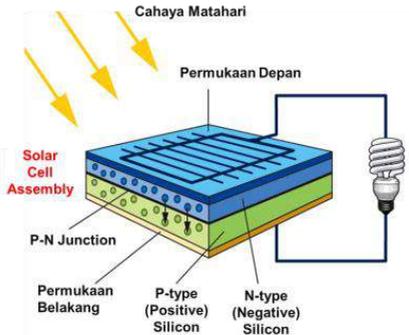
Gambar 2.2 Pemanfaatan energi matahari melalui proses rekayasa (*engineered utilization*)

Terdapat tiga model konversi pemanfaatan energi matahari berdasarkan proses *engineered utilization*. *Photoelectrical* secara umum memanfaatkan proses konversi cahaya matahari menjadi listrik. Konversi ini umumnya dilakukan dengan menggunakan bahan semi konduktor yang dirakit menjadi unit *solar cell* (panel surya). Energi luaran dari proses ini adalah listrik yang dapat langsung digunakan. Alternatif lain adalah proses konversi dengan skema *photothermal*. Konversi ini dilakukan dengan memanfaatkan panas matahari untuk digunakan pada kebutuhan spesifik tertentu [16]. Luaran energi atau produk dari proses *photothermal* bergantung kepada unit konversinya. Penggunaan *solar dome* menghasilkan produk air bersih, penggunaan *solar heater* menghasilkan air hangat dan penggunaan *concentrated solar power* (CSP) menghasilkan

listrik dan energi panas. Keunikannya adalah keseluruhan proses *photothermal* dapat disimpan pada unit penyimpanan energi termal (*Thermal Energy Storage*, TES) sedangkan pada *photoelectric* terbatas pada unit penyimpanan baterai listrik. Proses *photochemical* sedang mendapatkan perhatian khusus pada masa sekarang dan dapat digunakan untuk proses rekayasa biologi seperti fotosintesis buatan, dekomposisi gas CO₂, dan berbagai aplikasi lainnya. pembahasan lanjutan difokuskan pada model konversi *photoelectrical* dan *photothermal*.

B. PEMANFAATAN ENERGI MATAHARI MELALUI PROSES PHOTOELECTRICAL

Pemanfaatan *photoelectric* mendapat perhatian yang sangat besar pada era *modern*. Hal ini dikarenakan konsep yang sederhana dari *photoelectrical* dengan *output* energi langsung dapat digunakan yakni listrik. Teknologi *photoelectrical*, secara khusus *solar cell*, merupakan teknologi yang memanfaatkan proses konversi cahaya menjadi listrik dengan menggunakan material tertentu. Pada tahun 1818, *scientist* menyadari bahwa konduktivitas listrik suatu material, misalnya selenium (Se), meningkat beberapa persen ketika terpapar sinar matahari. Namun, temuan terpenting terjadi pada sekitar tahun 1950an ketika para peneliti menyadari bahwa *silicon* (Si) dapat digunakan secara efektif sebagai material *solar cell*. Konsep kerja sederhana dari *solar cell* diperlihatkan pada Gambar 2.3. Paparan cahaya matahari menyebabkan terjadinya aliran elektron pada *solar cell* sehingga menyebabkan adanya aliran listrik akibat perbedaan potensial antara sisi positif dan negatif.



Gambar 2.3 Konsep kerja *solar cell* [17]

Penemuan *silicon* sebagai material efektif untuk *solar cell* mendapat perhatian yang sangat besar dan diiringi dengan pengembangan sistem *solar cell* skala besar. Setelah krisis minyak pada tahun 1970an, pemerintah Amerika Serikat membentuk *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) sebagai badan yang bertanggung jawab untuk pengembangan energi alternatif. Pembuatan *solar farm* (istilah untuk daerah pemanfaatan energi matahari skala besar untuk ladang *solar cell* dan *concentrated solar power*) pertama dilakukan di California pada tahun 1982 dengan kapasitas pembangkitan 1 MW, yang berlanjut pada tahap kedua (di wilayah yang sama) dengan kapasitas lebih besar hingga 5.2 MW [18]. Pemerintah Amerika Serikat sendiri telah membuat beberapa *solar farm* dengan rentang pembangkitan antara 250–550 MW. Hal yang sangat menakjubkan terjadi setelah 34 tahun pembuatan *solar farm* pertama, China membuat *solar farm* dengan kapasitas hingga 850 MW. Kapasitas pembangkitan global dengan *solar cell* mencapai 300 GW (pada tahun 2016). Sebagai gambaran, 1000 MW merupakan ukuran pembangkitan standar untuk pembangkit listrik tenaga bahan bakar fosil.

Solar cell dapat langsung memproduksi listrik baik pada kondisi normal maupun sedang berawan, meskipun jumlahnya lebih sedikit dibandingkan saat cerah. Listrik dapat dihasilkan akibat serapan cahaya matahari pada panel (umumnya saat ini masih menggunakan *silicon*) yang menyebabkan adanya pelepasan elektron yang mengalir melalui beban maupun unit penyimpanan (baterai listrik). Perkembangan panel *solar cell* (*wafer*) umumnya masih berbasis *silicon*, yang mana cukup mahal dan membutuhkan energi yang besar selama proses manufakturnya. Tren saat ini sudah mulai mengembangkan material alternatif seperti *cadmium telluride*, paduan berbasis *indium* dan *gallium*, dan *perovskite*. Namun demikian, ketersediaan material tersebut cukup sedikit, dan masuk kategori beracun (*cadmium*). Perkembangan panel *silicon* sendiri mengalami peningkatan yang cukup tinggi selama dua dekade ini dan mampu mencapai efisiensi hingga 20%. Lebih lanjut, dengan adanya produksi massal dan pertimbangan optimasi, integrasi dan hibridisasi, maka biaya produksi dan penggunaan energi dapat turun secara signifikan [19].

Tren perkembangan harga dari panel *solar cell* turun sangat tajam. Sebagai contoh, sebuah laporan mengatakan bahwa pada Tahun 1990 di Jerman, harga untuk model umum atap *solar cell* dengan kisaran daya 10-100 kW_p dapat mencapai 14 €/kW_p. Pada akhir Tahun 2016, biaya untuk sistem yang sama dapat turun hingga mencapai harga hanya sebesar 1.3 €/kW_p. Dengan demikian, penurunan harga dalam kurun 26 tahun dapat mencapai hingga 90%. Penerapan *solar* panel yang sesuai untuk atap telah diproduksi secara massal yang mana jika diterapkan pada lokasi yang tepat, biayanya dapat sama dengan biaya listrik dari pembangkit listrik tenaga bahan bakar fosil. Hebatnya, ongkos dari *solar* panel tersebut belum termasuk subsidi, yang berarti jika menerapkan kebijakan subsidi karbon, maka harganya bisa jauh lebih murah dibandingkan dengan biaya listrik dari pembangkit tenaga bahan bakar fosil. Perkembangan manufaktur *solar* panel pada beberapa Negara seperti Britania Raya, Jerman, Spanyol dan Australia, termasuk biaya produksi listriknya serta inovasi teknologi mendapatkan subsidi tersendiri. Bahkan ada tarif khusus (biaya premium) yang digunakan jika listrik yang diproduksi tersebut dialirkan melalui jaringan listrik utama (*grid*). Biaya premium ini mendorong perkembangan yang lebih besar terkait dengan produksi listrik bersih bersumber dari *solar* panel dan *wind turbine* yang perlahan namun pasti menggantikan sumber listrik utama dari pembangkit tenaga bahan bakar fosil yang tidak ramah lingkungan dan relatif lebih mahal. Terlepas dari sifat alami *intermittent* matahari, keuntungan *solar* panel secara umum dapat dilihat pada perspektif berikut:

1. Panel *solar cell* dibuat secara modular, dapat dengan mudah disesuaikan dengan bentuk atap di lokasi pemasangan yang disinari matahari;
2. Listrik yang dihasilkan dari panel *solar cell* dapat langsung digunakan, yang berarti tidak membutuhkan jaringan utama, sangat menguntungkan untuk wilayah *remote* dan aplikasi khusus yang hanya membutuhkan daya kecil (misalnya penerangan jalan);
3. Terkadang pada negara yang relatif panas, penggunaan AC pada siang hari cukup tinggi, sehingga cocok untuk disuplai dari *solar cell*;

4. Secara khusus: aplikasi yang lebih luas untuk peralatan tunggal dapat dengan mudah diakomodir dengan *solar cell*, seperti *charging handphone/laptop*, penerangan jalan (LED), menara telekomunikasi, pompa air di wilayah pertanian tanpa jaringan listrik.

Sebagian besar *solar cell* pada wilayah Eropa terhubung dengan jaringan utama (*main grid*), sedangkan untuk sistem mandiri (*off-grid*) umumnya digunakan pada wilayah Australia, Amerika Selatan, Afrika dan Korea Selatan. Terdapat tiga area pasar utama dari *solar cell*: atap perumahan, atap bangunan komersial, dan sistem instalasi langsung ke jaringan utama untuk skala utilitas (*solar farm*). Instalasi sistem atap mencapai angka 60% pada Tahun 2013, yang dengan cepat terus meningkat hingga mencapai sistem skala utilitas. Per tahun 2017, sistem utilitas di Amerika Serikat mencapai kapasitas instalasi yang lebih besar dibandingkan jumlah keseluruhan kapasitas bangunan perumahan dan komersial. Kapasitas sistem skala perumahan umumnya berkisar sekitar 10 kW sedangkan skala komersial dapat mencapai *megawatt* (MW) [20]. Kapasitas utilitas sebagai pembangkit listrik berada pada kisaran 100-500 MW dan mulai mendekati kapasitas hingga 1 GW, yang semakin banyak diterapkan khususnya pada wilayah yang panas. Tahun 2014, Topaz Solar Farm yang berlokasi di California merupakan proyek *solar cell* terbesar di dunia dengan kapasitas 550 MW. Setahun kemudian, sistem yang sedikit lebih besar (579 MW) dibuat kembali pada wilayah yang sama dengan nama Star Solar Farm. Tahun 2016 India mendirikan proyek Kamuthi Solar Power dengan target 648 MW. Dan pada tahun 2017, China ikut menyusul melalui proyek Longyangxia Dam Solar Park dengan kapasitas target 850 MW.

C. PEMANFAATAN ENERGI MATAHARI MELALUI PROSES PHOTOTHERMAL

Photothermal merupakan konsep paling mendasar dari pemanfaatan energi matahari. Konsep dasar *photothermal* adalah penyerapan radiasi matahari oleh suatu objek yang mengakibatkan kenaikan temperatur pada objek tersebut. Modifikasi sistem umumnya berupa pemantulan (untuk mengarahkan cahaya yang datang ke satu titik tertentu) dan konsep *black*

body (memaksimalkan penyerapan dengan memberikan warna hitam pada objek penerima radiasi). Konsep *photothermal* telah banyak diterapkan untuk proses pemanfaatan energi matahari secara alami (Gambar 2.1). Sejatinya, pemanfaatan energi matahari melalui rekayasa *photothermal* (Gambar 2.2) hanya fokus pada peningkatan kapasitas produksi dan peningkatan densitas energi yang dimanfaatkan. Sehingga, penerapan teknologi ini lebih difokuskan untuk pencapaian fungsi tersebut ketimbang untuk proses konversi (*solar cell* mengkonversi cahaya menjadi listrik melalui rekayasa material *photovoltaic*) [21].

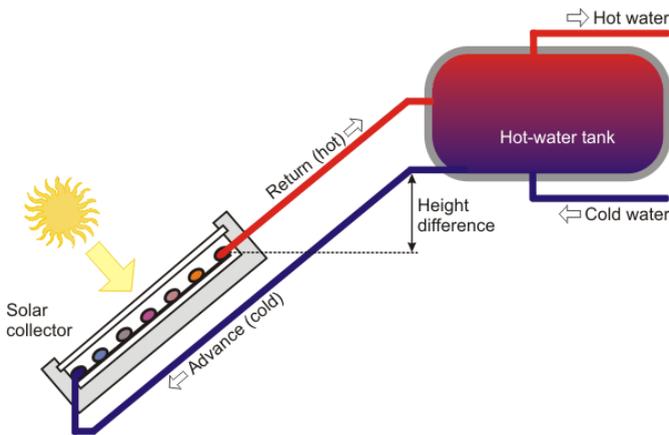


Gambar 2.4 Model umum *roof solar water heater* [22]

Contoh pada Gambar 2.2 menunjukkan beberapa aplikasi dominan dari sistem *photothermal*, yakni: *solar heater*, *concentrated solar power* dan *solar dome*. Masing-masing teknologi memiliki *output* produk/energi yang berbeda. Misalnya pada *solar heater*, produk atau energi keluaran yang dikehendaki adalah air hangat yang biasanya dibutuhkan untuk keperluan rumah tangga. *Concentrated solar power* (CSP) mengkonsentrasikan panas matahari untuk memanaskan fluida kerja maupun mesin listrik (*Stirling Engine* atau siklus tenaga lainnya) dengan harapan akhir adalah energi listrik. Terakhir adalah konsep *Solar Dome*, yang digunakan untuk menghasilkan air tawar melalui proses desalinasi

dengan memanfaatkan panas matahari untuk menguapkan air laut pada bagian dalam kubah. Seluruh teknologi tersebut pada prinsipnya adalah sama, memanaskan fluida kerja dengan tenaga matahari. Dengan demikian, teknologi ini lebih ke arah pemanfaatan penyerapan energi untuk proses pemanasan ketimbang konversi langsung cahaya matahari menjadi listrik seperti *photovoltaic*.

Solar heater, secara khusus dialamatkan untuk *solar water heater*, memanfaatkan energi matahari untuk memanaskan air. Gambar 2.5 menunjukkan contoh umum model *solar water heater* yang biasa digunakan untuk keperluan perumahan. Mungkin untuk wilayah tropis seperti Indonesia, teknologi *solar water heater* tidak memberikan dampak yang signifikan. Akan tetapi, untuk wilayah dingin, *solar water heater* memberikan dampak yang sangat besar untuk penghematan energi.

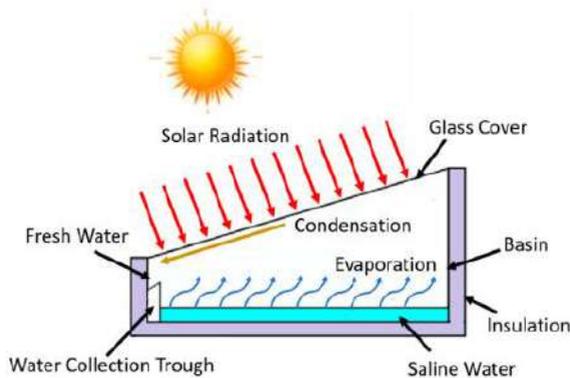


Gambar 2.5 Sistem kerja umum *solar water heater* [23]

Masih dibutuhkan beberapa piranti tambahan untuk aplikasi *solar water heater*, namun secara umum kerangka kerjanya tetap sama seperti Gambar 2.5. Air dingin masuk ke *solar collector*. *Solar collector* merupakan bagian khusus yang digunakan untuk menyerap panas matahari dengan memanfaatkan konsep benda hitam (*black body*). Panas tersebut kemudian memanaskan fluida kerja di dalam *solar collector* yang kemudian mentransfer panas tersebut ke air. Model sistem pada Gambar 2.5 bekerja dengan prinsip *thermocline*, di mana perbedaan temperatur

menyebabkan perubahan densitas fluida sehingga air yang dingin (lebih berat) akan mendorong air yang hangat (lebih ringan). Sistem ini sangat sederhana dan berkontribusi sangat signifikan untuk menggantikan peran *electric* dan *gas heater*. Meskipun demikian, beberapa sistem yang dikembangkan juga tetap menggabungkan pemanas cadangan (*electric* ataupun *gas heater*) untuk menanggulangi kondisi dingin ekstrem atau matahari yang tidak bersinar maksimal. Kembali, konsep hibridisasi mampu memberikan pengaruh yang baik untuk sistem energi.

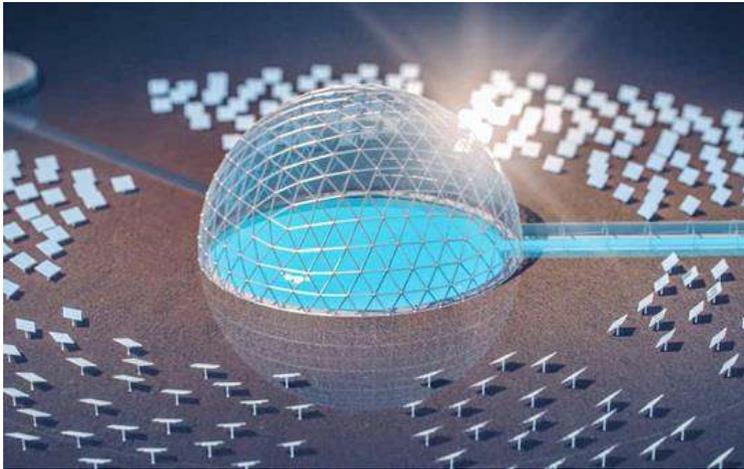
Energi panas matahari yang diserap oleh air laut menyebabkan terjadinya penguapan hingga turun hujan. Konsep ini juga diterapkan untuk *solar desalination* yang bertujuan untuk mendapatkan air tawar dari air laut melalui jalan pemanasan dengan tenaga matahari. Gambar 2.6 menunjukkan contoh awal pemanfaatan panas matahari untuk desalinasi melalui penggunaan *solar still*. Panas matahari masuk ke bagian dalam melalui penutup kaca transparan dan diserap oleh air asin (*saline water*). Pelapis bagian dalam menggunakan cat berwarna hitam untuk meningkatkan serapan panas. Akibatnya, terjadi penguapan air murni dari *saline water*. Uap air ini kemudian terkondensasi pada penutup kaca dan turun ke arah saluran keluar air bersih. Konsep ini sangat sederhana dan sangat bermanfaat untuk menghasilkan produksi air bersih dari air laut.



Gambar 2.6 Konsep kerja *solar desalination* pada sistem *solar still* [24]

Kebutuhan konsumsi air bersih yang lebih tinggi menyebabkan dorongan teknologi untuk meningkatkan kapasitas produksi dari *solar still*. Teknologi yang dikembangkan melalui proses *engineering* adalah *solar*

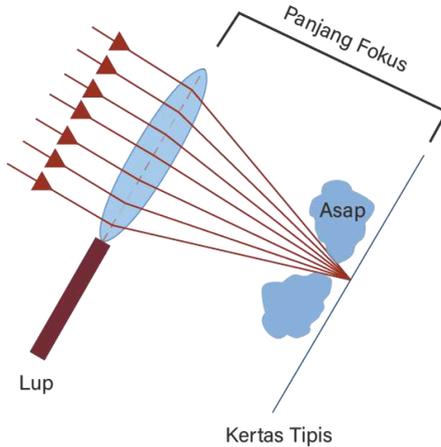
dome (Gambar 2.7). Teknologi ini, meskipun masih dalam tahap pengerjaan, dapat menghasilkan air tawar dengan cara yang lebih bersih dibandingkan *reverse osmosis* maupun *multi effect distillation* yang menggunakan sumber energi bahan bakar fosil. *Solar dome* pada prinsipnya sama dengan *solar still*, yakni menguapkan air laut, kondensasi uap pada sisi penutup, dan mengalirkan air terkondensasi ke saluran luar. Jika *solar still* menggunakan modifikasi benda hitam, maka *solar dome* menggunakan metode pemantulan dari cermin-cermin (*heliostat*) di sekitar *solar dome* untuk dikonsentrasikan pada bagian dalam kubah. Hasilnya adalah kapasitas pengumpulan panas yang lebih besar, meningkatkan laju penguapan air laut dan tentunya mendapatkan produksi air tawar yang lebih banyak.



Gambar 2.7 Model *solar dome* untuk produksi air tawar [25]

Pemanfaatan *photothermal* yang terakhir, dan menjadi inti pembahasan pada buku ini adalah *Concentrated Solar Power* (CSP). Teknologi ini merupakan pengembangan dari *Solar Death Ray* karya Archimedes. Konsepnya sangat sederhana, dan pasti kebanyakan dari kita telah melakukan metode ini dengan menggunakan kaca pembesar (Gambar 2.8). Cahaya matahari yang terpusat pada satu titik (*focal point*) menyebabkan konsentrasi panas yang tinggi. Efeknya dapat menyebabkan

api atau terbakar jika diserap oleh benda dengan titik leleh dan titik nyala rendah (misalnya kayu, kertas dan plastik).



Gambar 2.8 Model pemfokusan cahaya matahari menggunakan kaca pembesar [26]

Konsep ini kemudian dikembangkan lebih lanjut, terstruktur dan canggih menggunakan teknologi *Concentrated Solar Power*. Temperatur yang dihasilkan dari teknologi *Concentrated Solar Power* model *parabolic dish* dapat mencapai 700 °C (Gambar 2.9). Hal ini yang sangat menarik dalam pengembangan CSP karena potensinya yang sangat tinggi untuk dijadikan alternatif sumber energi panas. Detail tentang CSP akan dibahas pada Bagian berikutnya.



Gambar 2.9 *Concentrated solar power farm model parabolic dish* [27]

D. PENYIMPANAN ENERGI DARI SISTEM PEMANFAATAN ENERGI MATAHARI

Sifat *intermittent* matahari dan juga ketidakpastian suplai akibat adanya fenomena alam seperti mendung, berawan dan hujan menyebabkan teknologi pemanfaatan energi matahari membutuhkan sistem penyimpanan energi. Gambar 2.2 menunjukkan dengan jelas metode yang digunakan untuk penyimpanan energi pada sistem *photoelectric* dan *photothermal*. Terlihat bahwa dua metode pemberdayaan energi matahari tersebut memiliki metode penyimpanan yang berbeda. *Photoelectric* membutuhkan penyimpanan berupa baterai listrik sedangkan pada *photothermal*, apapun model teknologinya, membutuhkan unit penyimpanan energi termal (TES). Dari perspektif ini sebenarnya sudah terlihat fleksibilitas penyimpanan yang lebih baik dapat diperoleh dari teknologi *photothermal* dengan menggunakan TES. Namun kembali perlu diperhatikan bahwa tiap metode penyimpanan memiliki keuntungan dan kerugian masing-masing.



Gambar 2.10 Penyimpanan baterai listrik skala besar untuk *solar farm* dan *excess production* dari *power plant* [28]

Sistem baterai listrik merupakan teknologi yang sudah banyak digunakan sebagai media penyimpanan listrik. Keuntungan utamanya adalah energi yang tersimpan dapat langsung digunakan dan dimungkinkannya untuk penggunaan *mobile*. Permasalahan mungkin menjadi lebih jelas ketika sudah masuk ke skala besar untuk *solar farm* (Gambar 2.10). Tiga tantangan utama dihadapi oleh sistem baterai listrik skala besar. Pertama terkait dengan usia baterai yang cenderung rendah. Kedua terkait dengan biaya penyimpanan energi. Terakhir terkait dengan *life cycle assessment* (LCA) dari baterai itu sendiri, bagaimana material baterai diperoleh dan didaur ulang.

Tabel 2.1 Tantangan dan alternatif solusi dari penyimpanan baterai listrik skala besar

Permasalahan	Alternatif Solusi
Usia pakai baterai	<ul style="list-style-type: none"> - Perbaiki pola siklus baterai - Modifikasi siklus kerja berdasarkan <i>Depth of Discharge</i> (DoD) - Rekayasa material baru
Biaya	<ul style="list-style-type: none"> - Perbaiki model manufaktur baterai - Subsidi sistem penyimpanan baterai listrik skala besar - Pola <i>buyback</i> baterai antara <i>user</i> dengan <i>producer</i>

LCA	<ul style="list-style-type: none"> - Analisis dampak risiko proses penambangan material baterai - Analisis proses manufaktur baterai, pertimbangkan alternatif metode produksi - Analisis <i>recycling</i> baterai
-----	---

Tabel 2.1 menunjukkan alternatif solusi yang dapat dipertimbangkan untuk meminimalisir permasalahan terkait penyimpanan baterai listrik skala besar. Artinya, peluang optimasi masih bisa dilakukan untuk mengatasi masalah tersebut dan jika diperhatikan lebih seksama, tiap masalah sebenarnya saling berhubungan. Pola kerja baterai yang baik akan memperpanjang usia baterai, dengan demikian nilai LCA baterai menjadi lebih positif dan biaya energi dapat ditekan lebih murah. Masih dibutuhkan studi lanjutan untuk dapat menggabungkan seluruh solusi tersebut agar saling terintegrasi sehingga memberikan dampak yang lebih optimal.

Photothermal memanfaatkan sistem penyimpanan termal energi. Metode ini sebenarnya cukup mudah dilakukan, seperti menyimpan air panas pada termos dengan *insulator* yang baik. Pada skala rumahan, metode ini sudah menjadi kesatuan dengan *solar water heater* (Gambar 2.11). Air panas ini kemudian dapat digunakan pada malam hari saat matahari tidak bersinar. Sistem sederhana ini memiliki keterbatasan pada kapasitas penyimpanan energi termal.



Gambar 2.11 Penyimpanan air panas pada *solar water heater* [29]

Namun kembali, jika sudah masuk pada skala besar penyimpanan, maka diperlukan analisis dan metode penggunaan yang optimal. Gambar 2.12 menunjukkan tangki *molten salt* sebagai media penyimpanan energi termal pada CSP *farm*. Terlihat dengan jelas skala kapasitas yang lebih besar dibutuhkan untuk keperluan pembangkitan yang lebih besar. Dengan demikian, perhitungan dan analisis menjadi lebih kompleks dibandingkan dengan sistem sederhana seperti penyimpanan air hangat pada sistem *solar water heater*.



Gambar 2.12 *Molten salt tank* sebagai TES pada CSP *farm* [30]

Keuntungan utama dari TES adalah biaya yang relatif lebih murah dibandingkan sistem penyimpanan listrik melalui baterai. Usia material yang lebih panjang dan kecenderungan memiliki LCA yang aman baik saat penambangan, produksi, dan setelah operasi. Akan tetapi, kendala utama yang menjadi tantangan adalah energi termal ini tidak dapat langsung didistribusikan dengan mudah layaknya listrik yang cukup dengan jaringan kabel saja. Dibutuhkan unit penukar kalor (*heat exchanger*), sistem pemompaan, sistem monitor operasi, unit pendingin dan beberapa piranti pendukung lainnya. Sehingga, masih banyak kendala yang cukup genting untuk diselesaikan pada sistem TES. Terlebih, TES beroperasi dengan kaidah Termodinamika ke-0 terkait dengan perbedaan temperatur, sehingga penting untuk memperhatikan siklus termodinamika pada sistem untuk mencapai efisiensi optimal. Kembali, integrasi dan optimasi menjadi kunci terpenting dalam proses peningkatan kualitas sistem *engineering*.

E. KEBUTUHAN PEMBANGUNAN SISTEM ENERGI MATAHARI

Penggunaan bahan bakar fosil merupakan faktor utama yang mengakibatkan perubahan iklim dan pemanasan global. Satu-satunya harapan yang paling penting untuk dilakukan adalah penggunaan energi bersih untuk pembangkitan listrik dan sumber energi kendaraan. Hal ini yang menjadi alasan paling utama untuk mengembangkan sistem energi terbarukan, seperti pemanfaatan energi matahari. Konferensi Paris (Desember 2015) menargetkan kenaikan temperatur bumi kurang dari 2 °C. Sayangnya, tingkat emisi tetap menunjukkan kenaikan dengan rerata konsentrasi CO₂ di atmosfer sebesar 410 ppm. Perlu diketahui bahwa batasan kenaikan 2 °C memiliki estimasi konsentrasi CO₂ sebesar 450 ppm. Untuk menghindari kenaikan temperatur di atas 2 °C, dibutuhkan dekarbonasi yang menyeluruh dari suplai energi pada dekade mendatang. Ironisnya, konsumsi energi bahan bakar fosil dunia cenderung meningkat tiap tahun, khususnya untuk produksi listrik. Kenaikan ini dapat dilihat dari ekspor skala besar batubara dari Amerika Serikat dan Australia ke negara Jepang dan China. Isu lain yang tak kalah penting adalah pengurangan ketergantungan terkait impor bahan bakar karena berkaitan dengan keamanan nasional.



Gambar 2.13 Ilustrasi penerapan *solar cell* untuk wilayah *remote* [31]

Setelah era disrupsi minyak pada tahun 1970an, ketimbang mengurangi ketergantungan impor, banyak Negara yang malah meningkatkan ketergantungan impor suplai minyak dari Negara lain.

Ketergantungan ini tidak hanya berdampak pada kebijakan energi nasional, namun juga berdampak pada instabilitas politik global dan terbukti banyak terjadinya perang terselubung dengan tujuan utamanya adalah tambang minyak. Penciptaan lapangan kerja merupakan isu yang lebih penting, dan ketimbang menghabiskan biaya yang tinggi untuk impor minyak, dana tersebut dapat digunakan untuk pengembangan lokal, material, manufaktur, dan investasi untuk teknologi energi matahari dan sumber energi terbarukan lainnya. Lebih lanjut, pengembangan dan penelitian berkelanjutan pada aspek energi matahari dan teknologi energi terbarukan lainnya dapat memberikan dampak positif melalui perdagangan internasional. Pengembangan teknologi energi matahari dan infrastrukturnya berdampak pada kestabilan yang lebih baik dan jaminan industri yang lebih permanen dibandingkan industri minyak, yang kelak akan berhenti ketika sudah habis. Teknologi energi matahari dan model energi terbarukan lainnya dapat menjadi warisan bagi anak cucu kelak yang memberikan pengaruh positif bagi kehidupan mereka karena sumber energi ini secara teori tidak akan habis.

Hampir sepertiga dari populasi global (sekitar 2 Milyar manusia, khususnya untuk wilayah Asia, Pasifik, dan sub-sahara Afrika) hidup tanpa akses jaringan listrik, maka teknologi pemanfaatan energi matahari untuk produksi listrik memberikan jaminan yang lebih baik untuk peningkatan standar kehidupan mereka, dan tentunya mengurangi emisi *greenhouse gas* akibat sistem listrik lokal menggunakan mesin diesel dan sejenisnya. *Solar cell* dapat dengan mudah digunakan untuk wilayah *remote* pada daerah yang hangat, dan umumnya memiliki lahan yang cukup untuk instalasi panel tersebut (Gambar 2.13). Dengan adanya tren *solar cell* yang murah dan peningkatan efisiensi lampu LED (*light emitting diode*), maka teknologi ini sendiri dapat menjadi solusi yang relatif murah dan aman untuk menggantikan lampu minyak. Tidak dibutuhkan suplai bahan bakar untuk produksi listrik, dan lebih hebatnya, panel *solar cell* dapat secara langsung menghasilkan listrik di tempat tersebut dan tidak membutuhkan jaringan transmisi yang rumit dan mahal. Pertimbangan lainnya yang cukup unik adalah pada negara berkembang, jumlah penggunaan telepon genggam (*handphone*) sangat tinggi, meskipun infrastruktur untuk

recharging battery terbatas. Dengan demikian, panel *solar cell* juga dapat mengatasi masalah tersebut.



Gambar 2.14 Pemanfaatan *solar cooker* untuk wilayah *remote* [32]

Lantas bagaimana dengan *photothermal system*? Pada aspek ini, *photoelectric system* memiliki keunggulan karena dapat secara langsung digunakan untuk penerangan dan kebutuhan lainnya. Meskipun demikian, *photothermal* sendiri dapat menunjang kehidupan pada wilayah tersebut dan digabungkan dengan *photovoltaic system*. Contoh paling mudah untuk penggunaan langsung teknologi *photothermal* adalah teknologi *solar cooker* (Gambar 2.14). Proses memasak yang sebelumnya menggunakan kayu maupun bahan lainnya melalui proses pembakaran dapat dengan mudah digantikan dengan *solar cooker*. Teknologi ini juga cenderung lebih bersih dan aman ketimbang kompor arang yang relatif berbahaya dan mencemari lingkungan. Teknologi *solar cooker* juga dapat digunakan secara mandiri dan dapat dijadikan sebagai metode memasak pada keadaan darurat (misalnya saat terjadi bencana alam).

Untuk teknologi yang lebih maju, hibridisasi antara *photoelectric* dan *photothermal system* dapat memberikan pengaruh dan manfaat yang lebih besar. Sebagai contoh, penerapan *solar dryer* untuk pengeringan produk pertanian dengan memanfaatkan panas dari *solar collector* dan kebutuhan pemompaan dari *solar cell* (Gambar 2.15). Pemanfaatan teknologi ini memberikan pengaruh yang sangat baik untuk ekonomi pada wilayah tersebut, meningkatkan kualitas produksi pertanian tanpa

meningkatkan emisi karbon. Kombinasi yang optimal antara *photoelectric* dan *photothermal system* selanjutnya dapat dikembangkan lebih jauh untuk proses manufaktur yang lebih mudah, sehingga biaya menyeluruhnya dapat turun dan lebih terjangkau untuk wilayah tersebut.



Gambar 2.15 Hibridisasi *photoelectric* dan *photothermal* untuk proses pengeringan hasil pertanian [33]

F. TANTANGAN PENERAPAN TEKNOLOGI ENERGI MATAHARI

Meskipun banyak “manfaat” dari penerapan energi matahari untuk menunjang kehidupan *modern*, tantangan penerapan teknologi energi matahari masih harus dihadapi. Energi matahari dianggap lebih bersih dan bersifat jangka panjang dengan sedikit menimbulkan dampak lingkungan dibandingkan dengan bahan bakar fosil, akan tetapi proses transformasi dari bahan bakar fosil ke energi matahari tidaklah mudah. Pertama adalah ketergantungan yang sangat tinggi oleh masyarakat terhadap industri minyak. Kedua, seluruh jenis bahan bakar fosil, baik gas, minyak, dan batubara, memiliki densitas energi yang sangat tinggi dan terbilang sangat kompak sebagai sumber energi dengan hanya sedikit memerlukan ruang, berbanding jauh dengan *renewable energy*, khususnya tenaga matahari. Konsentrasi alami pada bahan bakar fosil, yang secara teori merupakan

akumulasi proses selama dua (2) juta tahun, menyebabkan posisi bentuk *renewable energy* terlihat sangat tidak menguntungkan.

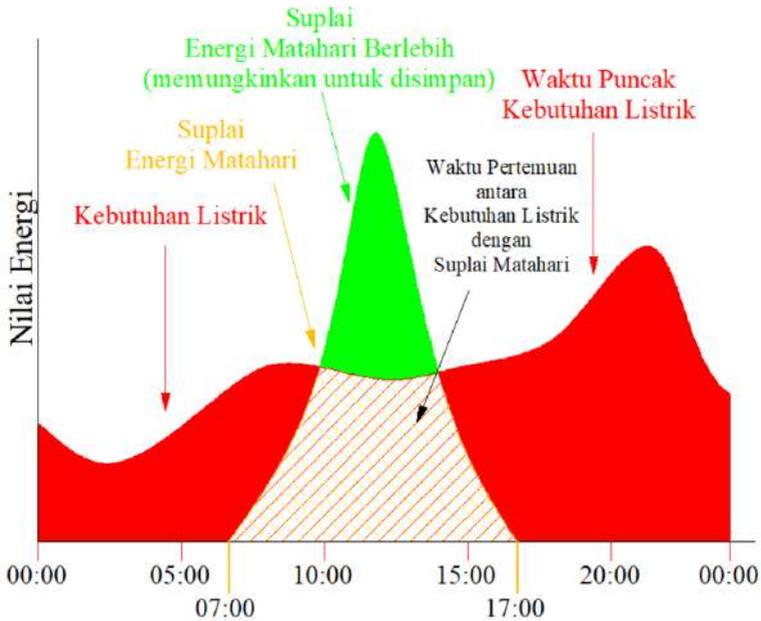
Akan tetapi, kita dipaksa (**dan sudah biasa dipaksa**) untuk beradaptasi dengan perubahan ini, meskipun relatif berjalan dengan lambat. Terdapat tiga alasan kuat yang menjadi faktor "**pemaksa**" perubahan ini. Pembakaran skala besar batubara untuk kebutuhan pembangkit maupun industri menyebabkan asap yang sangat pekat, sehingga berdampak pada kesehatan untuk wilayah tersebut. Kondisi ini memaksa pemerintah (secara khusus untuk wilayah China dan Eropa) untuk menghilangkan ketergantungan dari batubara dan mulai beralih ke bentuk energi yang lebih ramah, seperti *renewable energy*. Di wilayah Beijing, sekolah sering harus diliburkan karena banyaknya asap dan penggunaan masker menjadi pemandangan umum di wilayah tersebut. Fenomena yang sama juga dapat diamati untuk wilayah lain seperti India. Faktor berikutnya adalah tren biaya produksi dan eksplorasi sumber tambang minyak dan gas yang semakin mahal. Hal ini menjadi sangat tepat untuk era sekarang dimana penemuan tambang baru sudah sangat sulit, dan umumnya berlokasi pada wilayah yang sulit dijangkau, menyebabkan pembuatan akses jalan dan kelengkapan lainnya menjadi semakin rumit dan berdampak pada pembengkakan biaya yang sangat tinggi. Terlebih adanya kemungkinan konflik sosial yang lebih tinggi pada wilayah tambang, semakin menyulitkan para pelaku industri minyak untuk eksplorasi wilayah tambang baru. Faktor yang paling dominan adalah penurunan harga dari *renewable energy*, khususnya untuk *solar cell* dan turbin angin yang semakin cepat, membuat harganya lebih kompetitif dan bisa menjadi lebih murah dibandingkan bahan bakar fosil.

Sebagai catatan tambahan, ada dua faktor utama yang menyebabkan sulitnya pemanfaatan energi matahari skala besar:

1. Sifat alami energi matahari yang memiliki kerapatan energi yang rendah. Sebagai contoh, untuk dapat memproduksi listrik sebesar 1 Giga-Watt (sebagai perbandingan untuk pembangkit listrik bahan bakar fosil skala besar) dengan menggunakan *solar cell* pada wilayah tropis dengan puncak energi pada saat siang sebesar 1200 W/m^2 , maka ukuran *solar farm* yang dibutuhkan berkisar antara 20-25 km^2 . Ukuran tersebut sudah termasuk untuk panel yang digunakan, jarak

antar panel, akses dan koridor jalan yang sengaja disiapkan untuk kehidupan flora/fauna wilayah setempat. Pada wilayah yang relatif lebih sejuk, misalnya di Britania Raya, untuk mencapai kapasitas 1 GW dibutuhkan lebih dari dua kali luasan lahan tersebut. Jika kita menganggap luasan lahan tersebut terlalu besar, maka hal ini perlu dilihat pada aspek objektif yang jelas. Jika membandingkan dengan tambang batubara berdasarkan *life cycle analysis*, maka ukuran tambang batubara lebih luas dibandingkan dengan *solar farm* kapasitas 1 GW. Terlebih jika *solar cell* dipasang pada atap rumah, maka masalah terkait dengan luasan lahan tidak akan berdampak signifikan.

2. Masalah ini terjadi pada banyak Negara, khususnya untuk wilayah yang relatif sejuk, ketika siang hari, permintaan untuk listrik cenderung turun. Puncak beban (*peak load*) pada banyak Negara umumnya terjadi di pagi hari dan sore-malam hari, dimana pada waktu tersebut matahari sudah terbenam atau baru terbit (Gambar 2.16). Estimasi rerata produksi listrik dari *solar farm* pada wilayah sejuk hanya berkisar 20% dari durasi efektif penyinaran matahari, dan untuk wilayah dengan radiasi matahari yang tinggi dapat melebihi hingga 35%.



WAKTU (ESTIMASI WILAYAH TROPIS DENGAN PENYINARAN EFEKTIF 10 JAM)

Gambar 2.16 Ilustrasi ketimpangan antara beban listrik dan suplai energi matahari [34]

Dua kendala tersebut menyebabkan sulitnya penetrasi *solar farm* ke jaringan listrik nasional (*national grid*). Hal ini disebabkan produksi dan pemakaian listrik harus seimbang sepanjang waktu. Meskipun demikian, *solar farm* skala besar pada prinsipnya ramah utilitas, dalam artian dapat dengan cepat menyesuaikan dengan karakteristik beban (*load*) dan menjadi penyokong kebutuhan jaringan utama (*main grid*). Lebih lanjut, tren sistem penyimpanan skala besar mendapatkan angin segar dimana semakin responsif dan memiliki densitas energi yang lebih baik. Model penyimpanan kombinasi seperti memanfaatkan *pumped hydro storage* dan *compressed air storage* yang digabungkan dengan baterai listrik maupun *thermal energy storage* memberikan pengaruh yang lebih besar untuk sistem.

G. KESIMPULAN BAGIAN II

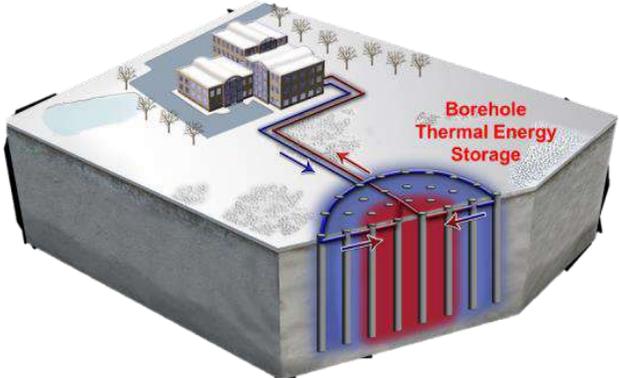
Pemanfaatan energi matahari untuk menunjang kehidupan *modern* memberikan rasa optimis yang lebih tinggi untuk menanggulangi masalah pencemaran dan perubahan iklim. Meskipun banyak kendala yang ada selama proses penyempurnaan, tren perkembangan dengan jelas menunjukkan arah yang lebih positif, pelayanan yang lebih baik dengan harga yang lebih kompetitif. Kondisi ini memungkinkan untuk mengalahkan penetrasi pasar dari bahan bakar fosil, yang sudah sangat berakar pada kehidupan *modern* ini. Tantangan dan kendala untuk memaksimalkan sistem dapat diatasi dengan mengedepankan konsep optimasi, integrasi dan hibridisasi sehingga model energi terbarukan, khususnya energi matahari dapat semakin lebih diandalkan.

CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP)

A. CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP) SEBAGAI PHOTOTHERMAL SYSTEM

Bagian II telah menyinggung sedikit tentang *concentrated solar power* (CSP) sebagai bagian dari teknologi *photothermal system*. Bagian III membahas lebih detail tentang sistem CSP. Sistem CSP menggunakan kombinasi cermin atau lensa untuk mengkonsentrasikan radiasi langsung sinar matahari. Cahaya yang terfokuskan tersebut dikonversi untuk menjadi energi yang berguna seperti panas, listrik, atau bahan bakar dengan bantuan teknologi hilir lainnya. Tren perkembangan *renewable energy* selalu mengarahkan ke listrik, sehingga cukup sulit untuk membandingkan CSP dengan sistem lain seperti *solar cell* dan *wind turbine*. Namun, melalui tulisan ini, tim penulis ingin memberikan perspektif lain **bahwa *renewable energy* ≠ listrik**. *Renewable energy* dapat digunakan untuk keperluan lain yang intinya menggantikan peran bahan bakar fosil. Produksi air bersih melalui *solar dome*, penggunaan *solar water heater*, *solar cooker*, dan bahkan produksi *solar fuel* melalui rekayasa termal CSP mendapat perhatian serius dari **para engineer profesional di bidang *renewable energy***. Sehingga dengan gagasan ini, maka pengembangan CSP di Indonesia diharapkan mendapatkan perhatian lebih mendalam, terlebih dengan potensi matahari di Indonesia yang sangat tinggi dan ideal untuk sistem CSP.

Aplikasi *photothermal* memiliki potensi yang lebih besar untuk keperluan industri dan utilitas pendukung selain listrik. Sebagai contoh, produksi air bersih melalui proses desalinasi dilakukan dekat pembangkit listrik dikarenakan membutuhkan panas dan energi yang cukup besar dalam prosesnya. Dengan menggunakan *solar dome* atau teknologi CSP yang secara khusus dialamatkan untuk proses pemanasan air laut, maka peran bahan bakar fosil dapat tergantikan dengan *solar energy*, dan tentunya konsep ini cocok untuk didefinisikan sebagai *renewable energy*. Contoh lain yang cukup unik adalah pengeringan hasil pertanian skala industri. Model pengeringan industri umumnya menggunakan minyak bakar untuk mempercepat prosesnya. Peran teknologi *solar dryer* dapat dengan lebih baik memberikan fungsi pengeringan, yang jika digabungkan dengan *thermal energy storage* dapat memperpanjang operasi kerjanya, sehingga ongkos produksi turun tanpa harus mengandalkan minyak bakar. Contoh lain yang paling jelas adalah *solar water heater*, khususnya untuk wilayah empat (4) musim. Konsumsi energi listrik ataupun gas untuk keperluan pemanasan air sangat tinggi, dan ini dapat digantikan dengan mudah dengan *solar water heater*. Saking dominannya teknologi *solar water heater*, bahkan dibuatkan *thermal energy storage* bawah tanah yang dapat digunakan antar musim (Gambar 3.1).



Gambar 3.1 Contoh *thermal energy storage* antar musim (model borehole) [35]

Investasi global untuk *renewable energy* terus meningkat dimana produser dan pengguna sama-sama menikmati efek positif dari tren ini. Sebagaimana yang telah diceritakan pada Bagian II, tren penurunan harga

renewable energy menunjukkan sinyal positif dan dapat menyaingi sistem pembangkit bahan bakar fosil. Sistem CSP sendiri mulai dikembangkan untuk tujuan komersial pada tahun 1984 dan 1995, namun tidak mengalami peningkatan hingga kembali dibuat pada tahun 2005, meskipun pada rentang tersebut pengembangan berkelanjutan dan peningkatan fungsi teknologi terus dilakukan secara masif. Setelah masa tersebut, penyebaran teknologi CSP komersial mendapatkan sambutan yang baik dan memperoleh momentum untuk terus berkembang. Meskipun tetap saja, dibandingkan sistem *solar cell*, pengembangan teknologi CSP untuk produksi listrik masih kalah jauh. Konsep teknologi CSP sendiri sudah dikenalkan sejak lama dan dari perspektif sejarah dapat dilihat pada aspek berikut:

1. *Solar death ray* Archimedes sudah diperkenalkan pada era 200 sebelum masehi
2. Diocles, ahli matematika Yunani, memperkenalkan sifat optik untuk model *parabolic trough* pada era abad kedua (2) sebelum masehi
3. Desain *Heliostat* telah dikembangkan oleh Comte de Buffon pada tahun 1746
4. Pada pameran universal di Paris (1878), Augustin Mouchot mendemonstrasikan mesin uap dari dari piringan parabola

Kontribusi yang lebih signifikan dilakukan oleh Frank Schumann pada tahun 1913 di Mesir yang membuat sistem pemompaan dengan memanfaatkan *parabolic trough*. Eksperimen dan prototipe terus dilakukan pada abad ke-20. Momen kelahiran yang sesungguhnya dari sistem CSP terjadi pada Tahun 1980an di California. Kebijakan pemerintah pada masa tersebut memberikan kesempatan untuk membuat 9 (Sembilan) sistem terpisah dari *parabolic trough*, dengan label *Solar Electric Generating Systems* (SEGS) dengan kapasitas terpasang sebesar 354 MW_e (*Mega-Watt of Electricity*). Sistem tersebut menggunakan minyak sebagai *heat transfer fluid* (fluida pemindah panas) untuk menggerakkan turbin uap.



Gambar 3.2 Pembangkit *Solar Electric Generating System* (SEGS) di California [36]

Pembangkit SEGS memiliki luasan cermin lebih dari 2,000,000 m², terus beroperasi dengan skenario *utility ownership* setelah lebih dari 20 tahun yang telah membuktikan bahwa teknologi ini terbukti secara komersial (Gambar 3.2). Tantangan utama dari CSP dari perspektif bisnis adalah ketergantungan pada turbin uap, yang mana sangat berisiko bagi teknologi baru yang masih berkembang. Namun seiring dengan bergesernya model investasi ke arah *renewable energy*, permasalahan ini mulai terkikis dengan model bisnis yang lebih baik seiring dengan perkembangan teknologi yang lebih mutakhir. Terlebih dengan semakin tingginya tekanan untuk meminimalisir pencemaran lingkungan yang berdampak pada perubahan iklim, dukungan pada teknologi *renewable energy* semakin kuat. Terdapat kebangkitan pengembangan sistem CSP setelah tahun 2005, yang diiringi dengan kesadaran bahwa teknologi ini dapat dengan cepat mengurangi emisi *greenhouse gas*, dan memberikan banyak manfaat melalui distribusi energi termal yang terintegrasi dengan *thermal energy storage*.

Pengembangan CSP yang paling signifikan dimulai oleh Spanyol dengan skema ekonomi yang spesifik dan pemberian subsidi yang tepat dimana model CSP yang dikembangkan terbukti sangat sukses. Sekitar 2,400 MW disetujui oleh pemerintah untuk beroperasi pada Tahun 2014.

Pemerintah Amerika Serikat juga mengikuti jejak yang sama dengan memberikan pinjaman lunak dan model pajak yang bijak untuk proses instalasi CSP dengan kapasitas 1.8 GW. Terlebih pada era sekarang, sistem CSP telah dilengkapi dengan *thermal energy storage* yang dapat beroperasi hingga 6 jam lebih. Semangat ini kemudian diikuti oleh banyak negara seperti Maroko, Aljazair, Mesir, China, India, Australia, Portugal, Italia dan Malta. Proyek yang paling signifikan dilakukan oleh India dan China. India menargetkan kapasitas terinstal hingga 20 GW_e menggunakan model kombinasi (hibridisasi) *solar cell* dan CSP. China juga mengikuti jejak tersebut dengan menargetkan kapasitas CSP hingga 1 GW.

B. KONSEP KERJA CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP)

Konsep kerja dari sistem *concentrated solar power* sangat berbeda dengan *solar cell*, sehingga penting untuk menjabarkan prinsip sistem *concentrated solar power* pada bagian awal penjelasan. Sistem CSP sebagai teknologi *photothermal*, memiliki fungsi yang sederhana yakni mengumpulkan energi panas matahari sebesar-besarnya. Panas yang dikumpulkan lalu dimanfaatkan sesuai dengan keperluannya. Bergantung kepada jenis sistem, panas tersebut dapat langsung digunakan untuk dikonversi menjadi energi atau produk yang berguna atau diserap oleh fluida kerja untuk proses distribusi energi. Pengumpulan panas dilakukan dengan bantuan cermin atau bahan reflektif (*reflector*) yang diarahkan pada satu area spesifik. Akibatnya, terjadi kenaikan suhu pada area penerima (*receiver*) pantulan cahaya tersebut dan proses konversi *photo to thermal* terjadi pada bagian ini. Dengan memanfaatkan prinsip pemantulan cahaya, model *reflector* dapat dikembangkan pada berbagai model.

Ilustrasi kerja sederhana dari prinsip *photo to thermal* sistem CSP disajikan pada Gambar 3.3. Cahaya matahari yang datang ke *reflector* dipantulkan pada satu area spesifik. Bentuk parabola memungkinkan adanya pertemuan titik cahaya yang dipantulkan pada area *focal point*. Ketika seluruh cahaya yang dikonsentrasikan (*concentrated solar ray*) saling terkumpul di *focal point*, pada area ini konsentrasi maksimal cahaya diperoleh. Kemudian pada area *focal point*, ditempatkan *receiver* (penerima) yang berfungsi untuk menyerap cahaya dan mengubahnya

menjadi panas. Akibatnya, terjadi kenaikan temperatur yang signifikan pada area *receiver*. Temperatur yang tinggi, sebagaimana umumnya sistem termal, merupakan energi yang memiliki kualitas tinggi, yang kemudian dapat digunakan untuk keperluan lain, seperti pembangkitan listrik, pemanasan air dan pengering.

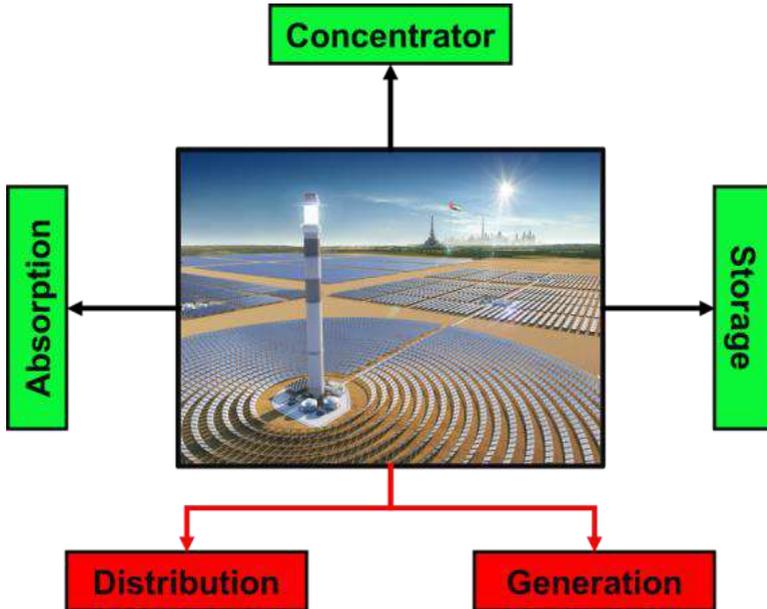


Gambar 3.3 Ilustrasi prinsip konversi *photo to thermal* sistem CSP [37]

Sebagai sistem konversi tidak langsung, maka terdapat 5 (lima) aspek utama dari sistem CSP (Gambar 3.4). *Concentrator* (alat pemantul) berperan untuk memantulkan cahaya matahari ke area penerima untuk proses *absorption* (penyerapan). Pada prinsipnya, determinasi model CSP dan kelengkapan sistemnya bergantung kepada model *concentrator* yang digunakan. *concentrator* ideal memiliki tingkat akurasi pemantulan yang tinggi, reflektivitas yang mendekati 100%, dan ketahanan terhadap kerusakan akibat paparan lingkungan.

Absorption (penyerapan) merupakan proses konversi *photo to thermal*. Cahaya yang dipantulkan diserap oleh unit penerima (*receiver*). Suhu konsentrasi pada unit *receiver* dapat mencapai 700 °C. Unit penyimpanan (*storage*) berfungsi untuk menampung energi panas dari proses konsentrasi. Unit *storage* dapat bekerja dengan bantuan sistem distribusi dengan memanfaatkan *heat transfer fluid* atau HTF (fluida pemindah panas). Kemudian panas yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk pembangkitan (*generation*) maupun tujuan pemanfaatan lain. Terlihat

dengan jelas bahwa sistem CSP berbeda jauh dengan sistem *solar cell* yang sangat sederhana. Hal ini yang kadang menjadi *barrier* dari penerapan sistem CSP untuk keperluan *renewable energy*.

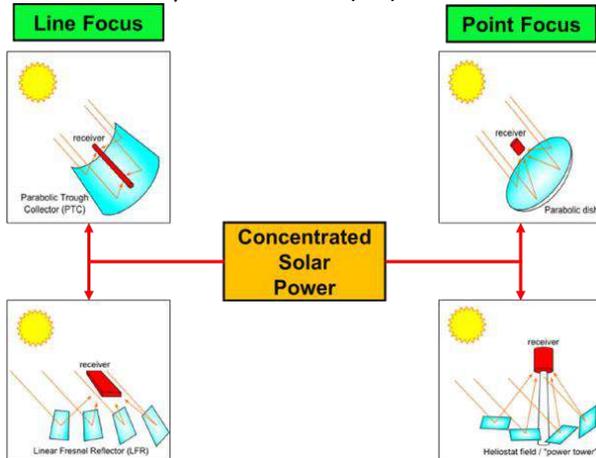


Gambar 3.4 Aspek utama pada teknologi CSP

C. KARAKTERISTIK KINERJA SISTEM *CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP)*

Sebagai sistem energi, penting untuk memahami karakteristik kinerja pada sistem CSP. Buku ini fokus pada pembahasan untuk CSP sebagai pembangkit listrik dan juga fokus pada konseptual sistem, bukan pada analisis menyeluruh. Terdapat 2 (dua) tipe besar dari 4 (empat) model sistem CSP yang dikembangkan yakni model *line focus* dan *point focus* (Gambar 3.5). Model *line focus* terdiri dari *parabolic trough collector* (PTC) dan *linear Fresnel reflector* (LFR). Ciri model *line focus* adalah *absorption* panas dilakukan memanjang dan distribusi HTF dilakukan di dalam pipa *receiver*. Model *point focus* menggunakan *receiver* tunggal yang

didalamnya dialiri fluida kerja (HTF). Model *point focus* yang dikembangkan terdiri dari *parabolic dish* (PD) dan *solar tower* (ST).



Gambar 3.5 Dua metode fokus pada sistem CSP: *line* dan *point focus* [38]

Performa umum tiap model CSP disajikan pada

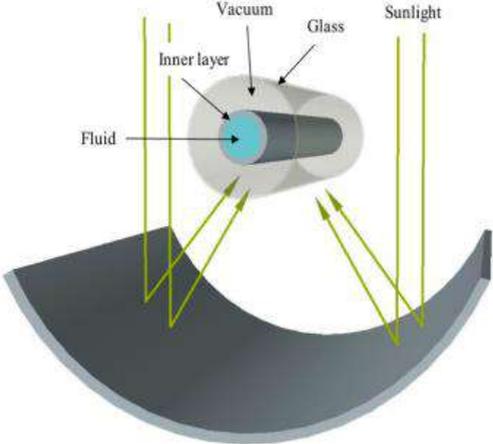
Tabel 3.1. Pada aspek ini terlihat dengan jelas tipikal performa antara *line* dan *point focus*. Tingkat konsentrasi yang tinggi pada model *point focus* (*Parabolic dish* dan *Solar Tower*) memungkinkan untuk capaian temperatur yang lebih tinggi.

Tabel 3.1 Performa umum model CSP

Model	Efisiensi (%)		Suhu Kerja (°C)	Rasio Konsentrasi
	Tahunan	Puncak		
PTC	14	25	400	80
LFR	13	18	300-400	30
<i>Solar Tower</i>	16	22	400-600	1000
<i>Parabolic Dish</i>	20	32	550-750	1500

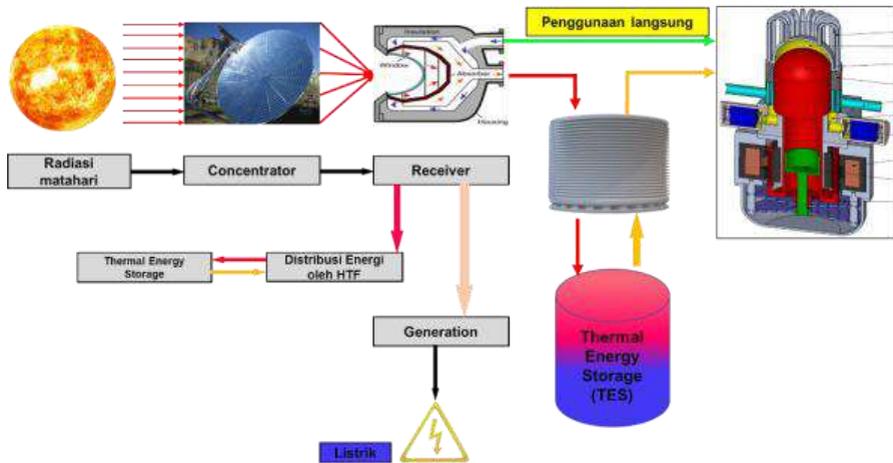
Rasio konsentrasi pada CSP diibaratkan seperti kapasitas mesin (yang biasa disebut *cc*), semakin tinggi kapasitas maka capaian kinerja mesin semakin baik. Dengan tingginya capaian temperatur, maka efisiensi teoritis dapat diperoleh lebih baik. Satu keunikan yang mungkin perlu diperhatikan bahwa untuk model PTC temperatur kerja ditulis pada angka tetap. Hal ini terjadi karena kemajuan sistem PTC yang sangat tinggi

sehingga batasan operasi kerja sudah dibuat dengan tetap dan tidak berada dalam batasan tertentu. Cahaya terkonsentrasi yang diterima *receiver* dikonversi menjadi panas. *Receiver* pada model *line focus* merupakan *tube* baja yang dikelilingi oleh *glass tube*, antara *tube* baja dan *glass tube* dibuat vakum untuk meminimalisir kerugian konveksi (Gambar 3.6). Pada model *point focus*, desain *receiver* umumnya menggunakan tipe *cavity* yang memiliki banyak aliran *tube* lebih kecil.



Gambar 3.6 Skema kerja *receiver tube* untuk model *line focus* [36]

Sistem termal memiliki risiko kerugian selama proses dan juga batasan efisiensi Carnot. Perbedaan temperatur antara sistem dan lingkungan tentunya berdampak pada kerugian termal selama proses distribusi. Proses perpindahan secara skematik disajikan pada Gambar 3.7. Radiasi matahari difokuskan oleh *concentrator* dan diterima oleh *receiver*. Panas dari *receiver* kemudian didistribusikan ke *thermal energy storage* (proses *charging*) dan mesin kalor (misalnya *Stirling Engine*). *Stirling Engine* mengkonversi panas menjadi listrik melalui proses termodinamika. Ketika malam hari, panas dari *thermal energy storage* dilepaskan (*discharging*) ke *Stirling Engine* agar produksi listrik tetap berlangsung.



Gambar 3.7 Skema distribusi energi pada sistem CSP (contoh untuk *parabolic dish*)

Proses kerja sistem ini mengacu kepada perbedaan temperatur. Sehingga, banyak ditemukan *losses* (kerugian-kerugian) selama proses perpindahan energi. Masing-masing proses perpindahan energi sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.7 berkontribusi pada efisiensi total sistem yang dapat dituliskan berdasarkan Persamaan 3.1.:

$$\eta_{system} = \eta_{optical} \times \eta_{receiver} \times \eta_{transport} \times \eta_{storage} \times \eta_{conversion} \quad 3.1.$$

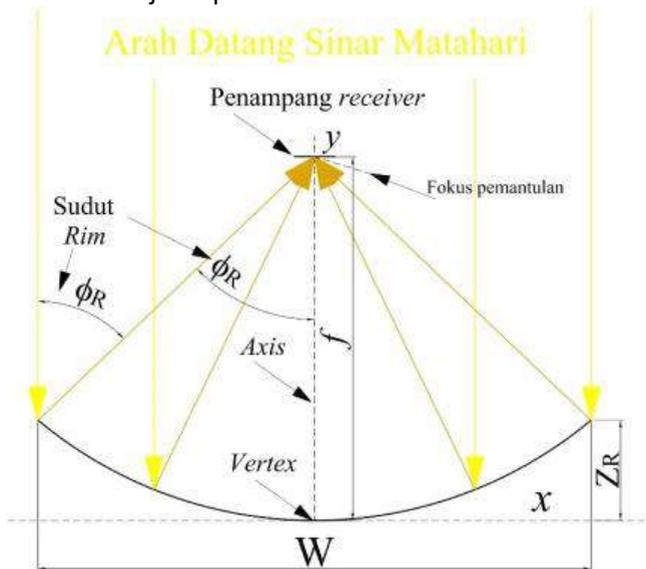
Persamaan 3.1. menjadi indikator global dari sistem CSP. Efisiensi sistem dipengaruhi oleh efisiensi optikal pada sisi *concentrator*. Banyaknya energi yang dipantulkan dari *concentrator* diterima oleh *receiver* dengan nilai efisiensi tertentu. Proses perpindahan panas (*transport*) melalui HTF memiliki nilai efisiensi tertentu. Penyimpanan panas memiliki efisiensi tersendiri dan juga proses konversi panas menjadi listrik. Keseluruhan faktor ini yang bertanggung jawab terhadap efisiensi sistem CSP. Dengan demikian, faktor terpenting dari kemampuan CSP meliputi:

1. Konversi akhir melalui proses termodinamika (panas menjadi listrik) akan lebih efektif jika memiliki temperatur kerja yang tinggi;
2. Kerugian pada *receiver* cenderung terjadi pada temperatur yang tinggi, sehingga modifikasi tambahan harus dilakukan melalui perbaikan sifat optik dan permukaan *receiver*;

3. Faktor biaya dan batasan sifat material kadang mengharuskan ada penurunan temperatur kerja sistem (misalnya penggunaan temperatur yang tinggi untuk HTF berisiko terhadap kegagalan sistem)

D. BATASAN KERJA OPTIK SISTEM CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP)

Efisiensi optik menjadi kunci utama dari sistem CSP karena menentukan keseluruhan proses konversi energi. Besar kecilnya energi yang dikumpulkan bergantung pada aspek *reflector* dan juga sifat optik sistem. Model *parabolic dish* ataupun *parabolic trough collector* digunakan untuk keperluan proses pemantulan dan analisis optik sistem CSP. Detail properti parabola disajikan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Properti pada parabola sebagai *concentrator* [39]

Peran utama dari bentuk parabola pada sistem CSP berkaitan dengan kemampuannya untuk memfokuskan cahaya secara paralel ke satu titik dengan jarak f dari titik *vertex* parabola. Parabola merupakan bentuk lengkung dua dimensi, dengan fungsi hubungan parabola (Persamaan 3.2):

$$y = x^2/4f \tag{3.2}$$

Sudut *rim* (ϕ_R) merupakan sudut antara *axis* dan garis dari fokus pemantulan cahaya terhadap ujung *concentrator*. Dengan mempertimbangkan panjang *focal* dan sudut *rim* dari parabola, luas permukaan *concentrator* dapat ditentukan. Sudut *rim* sendiri dapat diperoleh dengan Persamaan 3.3:

$$\tan\phi_R = \frac{W/2}{f-Z_R} = \frac{4fW/2}{4f^2-(W/2)^2} \quad 3.3.$$

Dimana nilai W merupakan lebar *concentrator* dan Z_R adalah kedalaman (*depth*) parabola dari titik sudut *rim*.

Idealnya seluruh model *concentrator* dapat mencapai rasio konsentrasi yang sangat tinggi. Namun pada praktiknya, hal ini dibatasi oleh sifat alami sudut datangnya cahaya Matahari ke Bumi yang memiliki divergensi terbatas akibat faktor jarak. Kondisi ini yang menyebabkan adanya perbedaan rasio konsentrasi untuk tiap model (

Tabel 3.1). Nilai rasio maksimal (C_{max}) ditentukan oleh besarnya sudut *rim* (ϕ_R) dan divergensi sudut matahari ke bumi (ϑ_{sun}). Persamaan 3.4 dan 3.5 digunakan untuk menentukan rasio konsentrasi maksimal model *line focus* (satu *axis*) dan *point focus* (dua *axis*).

$$C_{max,1-axis} = \frac{\sin \phi_R}{\sin \theta_{sun}} \quad 3.4.$$

$$C_{max,2-axis} = \left(\frac{\sin \phi_R}{\sin \theta_{sun}} \right)^2 \quad 3.5.$$

Nilai divergensi sudut matahari ke bumi (ϑ_{sun}) adalah 4.8 mrad (*milli-radian* atau 0.275°). Persamaan 3.4 dan 3.5 digunakan untuk menentukan rasio konsentrasi maksimal model *line focus* (satu *axis*) dan *point focus* (dua *axis*). Dari sini terlihat mengapa model *point focus* cenderung memiliki rasio konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan model *line focus*. Efek fokus parabola ke satu titik fokus hanya dapat terjadi pada radiasi yang datang tegak lurus ke *concentrator*. Sayangnya, adanya divergensi dan juga kemiringan datangnya cahaya matahari menyebabkan adanya beberapa batasan teknis berikut:

1. Keterbatasan Pada Receiver Model Datar

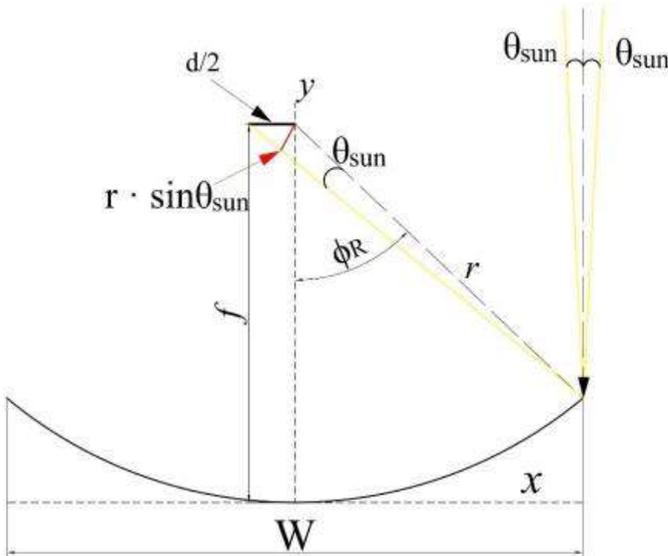
Keterbatasan bentuk *receiver* datar secara khusus dapat diperhatikan berdasarkan Gambar 3.9. Tiap titik pada cermin parabola akan memantulkan kerucut sinar yang sesuai dengan distribusi sudut datangnya matahari (θ_{sun}). Bentuk kerucut sinar pemantulan akan menghasilkan simpangan pada sisi *receiver* model datar. Sinar yang datang dari ujung *rim* parabola memiliki penyimpangan paling jauh di sisi *receiver*. Jarak x dari titik pemantulan dapat diperoleh dengan Persamaan 3.6:

$$x = 2 \cdot r \cdot \sin\phi_R \tag{3.6}$$

dan lebar titik fokus pada bidang fokus akibat pantulan dari titik ini adalah (Persamaan 3.7):

$$d = \frac{2 \cdot r \cdot \theta_{sun}}{\cos\phi_R} \tag{3.7}$$

Bentuk pantulan sinar kerucut dari satu titik pada cermin akan membentuk elips pada wilayah *receiver* dengan panjang *axis* d . Metode ini berlaku untuk model *parabolic dish* dan juga *parabolic trough*.



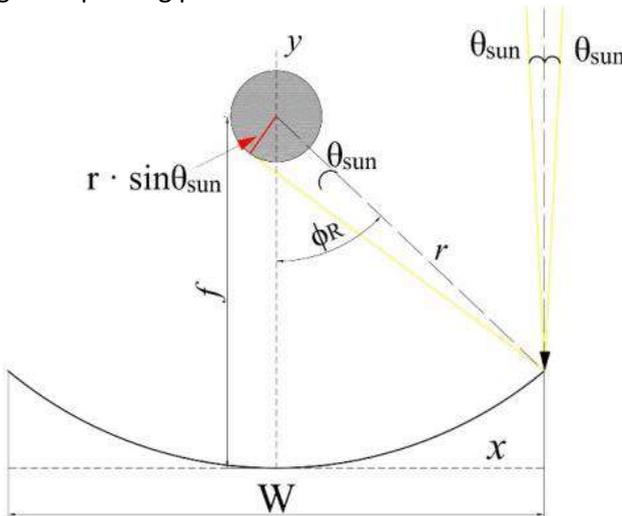
Gambar 3.9 Proses pemantulan radiasi matahari dengan cermin parabola sempurna untuk *receiver* datar [39]

2. Keterbatasan Pada Receiver Model Bulat

Opsi *receiver* model bulat digunakan untuk kasus penggunaan *tube*, seperti pada model *receiver* di *parabolic trough* (Gambar 3.10). Target diameter dari *receiver* diperoleh melalui Persamaan 3.8:

$$d = 2 \cdot r \cdot \sin\theta_{sun} \quad 3.8.$$

Dari model ini terlihat dengan jelas bahwa sebagian area *tube* menerima pantulan lebih maksimal. Lebih lanjut, hal terpenting yang harus dipahami adalah pemodelan ini dilakukan hanya dengan prinsip geometri, sedangkan pada sistem aktual bisa menjadi lebih rumit. Kondisi ini yang menyebabkan penempatan efisiensi optik dan *receiver* sebagai pertimbangan terpenting pada sistem CSP.



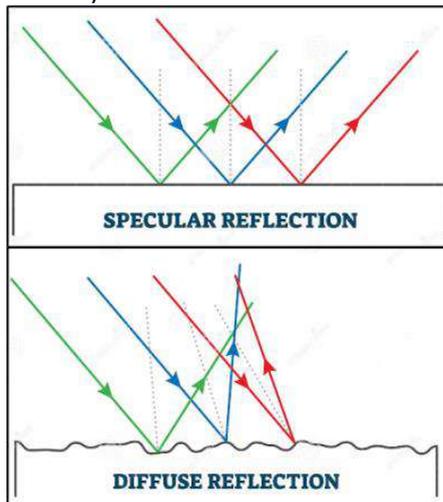
Gambar 3.10 Proses pemantulan radiasi matahari dengan cermin parabola sempurna untuk *receiver tube* [39]

3. Kerugian Optik Aktual

Berbagai kerugian optik aktual terjadi pada penerapan sistem CSP. Hal ini tentunya dapat menurunkan rasio konsentrasi aktual pada sistem yang berdampak pada penurunan yang signifikan untuk proses berikutnya. Kondisi ini disebabkan oleh *error* pada aspek cermin yang digunakan, baik pada skala mikron hingga *centimeter*. Kerugian optik tersebut meliputi:

1) *Specularity Error*

Specularity (spekularitas) mengacu kepada kualitas cermin yang berfungsi sebagai reflektor, yang lebih spesifik menunjukkan sifat kemampuan ideal reflektor sesuai dengan hukum refleksi cahaya. Nilai ini (σ_{sp}) menunjukkan pantulan ideal dimana sudut pantulan sama dengan sudut datangnya cahaya. Kondisi sebaliknya diistilahkan dengan *diffuse* (tersebar) reflektor yang menyebabkan pantulan cahaya tersebar ke segala arah (Gambar 3.11).



Gambar 3.11 Perbandingan antara refleksi *specular* dan *diffuse* [40]

2) *Surface Sloop Error*

Cermin *concentrator* memiliki bentuk gelombang kecil dan distorsi pada permukaannya, hal ini umum terjadi pada ukuran *reflector* yang relatif besar. Nilai penyimpangan ini menyebabkan kecenderungan pemantulan cahaya yang miring dan tidak mengenai target. *Surface slope error* (σ_{surf}) identik dengan *diffuse error*, namun lebih disebabkan oleh posisi dan kondisi permukaan ketimbang sifat pemantulan cahaya

3) *Shape Error*

Pada perspektif skala besar, bentuk cermin *concentrator* umumnya berbentuk persegi yang sangat mungkin untuk mengalami penyimpangan akibat penempatan atau orientasi yang tidak sesuai (σ_{sh}). Distorsi pada

struktur juga sangat mungkin terjadi akibat adanya ekspansi termal, tiupan angin, dan faktor *stress* lainnya.

4) **Tracking Error**

Seluruh *concentrator* pada sistem CSP menggunakan mode aktif, yang berarti mengikut gerakan matahari. Agar dapat mengikuti gerakan matahari, maka rakitan *concentrator* dilengkapi dengan *solar tracking system*. *Solar tracking* bekerja dengan menggunakan beberapa sensor, *controller* dan motor penggerak. Sangat mungkin terjadi *error* dalam proses *tracking* akibat pembacaan yang salah dari sensor dan juga pertimbangan kondisi pantulan matahari yang tidak sempurna sehingga terjadi kesalahan pembacaan. Umumnya sistem *tracking* sudah memperhitungkan nilai *error* ini (σ_{tr}).

5) **Combinations Error**

Kombinasi seluruh *error* bisa digabungkan untuk menentukan nilai *error* kumulatif (σ_{tot}) dari *concentrator*. Pendekatan matematis yang akurat dapat dijadikan patokan untuk menentukan tiap *error* yang sudah disebutkan pada bagian sebelumnya. Pendekatan matematis tersebut juga digabungkan dengan beberapa uji eksperimen maupun pengukuran untuk memperhatikan nilai distribusi normal. Jika nilai tersebut diketahui untuk tiap komponen *error*, maka nilai *combinations error* diperoleh pada Persamaan 3.9:

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{sp}^2 + \sigma_{surf}^2 + \sigma_{sh}^2 + \sigma_{tr}^2} \quad 3.9.$$

E. BATASAN KERJA RECEIVER

Pada kondisi tunak (*steady state*), total energi bersih yang mengalir ke *receiver* dari konsentrasi radiasi matahari oleh *concentrator* akan setimbang dengan energi yang dibawa keluar oleh *heat transfer fluid* atau proses konversi energi lainnya dari *receiver*, termasuk juga beberapa faktor kerugian energi yang disebabkan oleh pantulan yang tidak diinginkan seperti emisi radiatif, konduksi dan konveksi. Rugi keseluruhan dari empat faktor tersebut dapat dihitung dengan Persamaan 3.10:

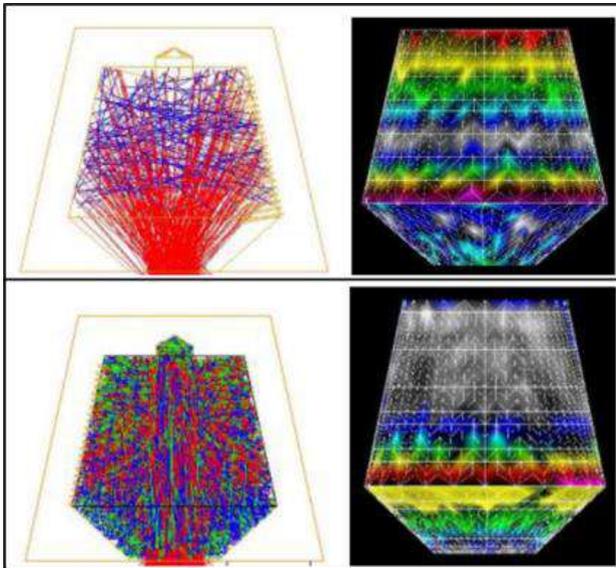
$$\dot{Q}_{loss} = \dot{Q}_{ref} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{cond} \quad 3.10.$$

Efisiensi energi dari *receiver* merupakan rasio antara energi yang berhasil dikonversi menjadi panas dibandingkan dengan energi yang diberikan oleh *concentrator*, yang ditulis dengan Persamaan 3.11:

$$\eta_{rec} = \frac{\dot{Q}_{converted}}{\dot{Q}_{input}} = \frac{\dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{loss}}{\dot{Q}_{input}} \quad 3.11.$$

1. Kerugian Radiatif

Kerugian *radiative* merupakan gabungan antara net emisi radiasi dari *receiver* sebagai akibat dari temperatur dan pantulan sebagian sinar yang datang dari *concentrator*. Permukaan akan memancarkan dan menyerap radiasi sebagai proses esensial yang independen, yang mana net perpindahan energi yang terjadi merupakan faktor kombinasi keduanya. Setiap permukaan *receiver* akan memancarkan radiasi sebanding dengan pangkat empat suhunya (T^4), pada tingkat yang diberikan oleh daya pancar benda hitam dikalikan dengan emisivitasnya (**Prinsip Radiasi**).

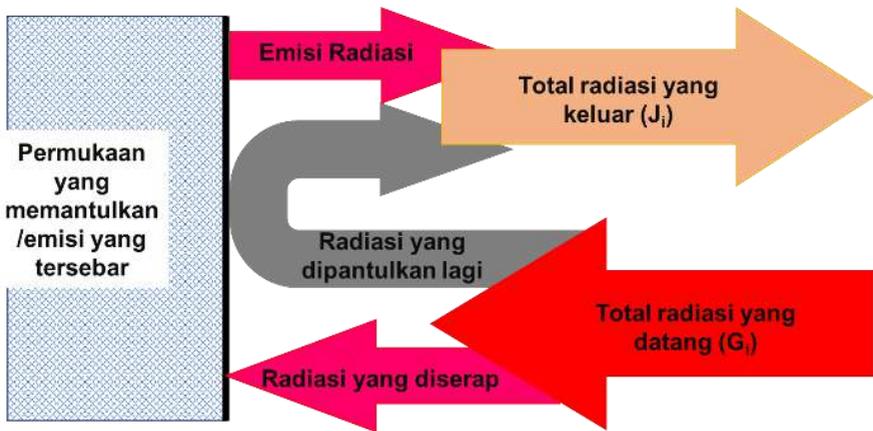


Gambar 3.12 Proses simulasi kontinu untuk memodelkan pemantulan pada *cavity* [41]

Sebagian fraksi dari radiasi yang datang akan dipantulkan kembali dari suatu permukaan. Fraksi radiasi ini yang merupakan aspek kerugian *receiver* bergantung kepada geometrinya. Jika penutup kaca digunakan pada *receiver*, maka kerugian radiasi juga akan tetap terjadi sehingga dibutuhkan *anti-reflective coatings*. Khusus untuk model *cavity receiver*, radiasi yang dipantulkan atau diemisikan dari satu bagian *receiver* akan menjadi radiasi lagi untuk bagian lainnya, sehingga proses perhitungan radiasi bersih yang diserap membutuhkan solusi yang lebih detail untuk seluruh proses (Gambar 3.12).

Kesetimbangan energi pada sisi *receiver* dapat dimodelkan seperti Gambar 3.13. Radiasi yang datang ke *receiver* sejumlah G_i terpecah menjadi dua bagian yakni radiasi yang dapat diserap oleh *receiver* dan radiasi yang dipantulkan kembali oleh permukaan *receiver*. Radiasi yang diserap oleh *receiver* sebagian lagi diemisikan ke luar sistem. Emisi dari *receiver* bersama dengan radiasi yang dipantulkan lagi oleh permukaan *receiver* menjadi total radiasi yang keluar (J_i). Beberapa simulasi numerik menggunakan *software* dapat membantu proses pemodelan ini. Perhitungan matematis sederhana dapat menggunakan Persamaan 3.12. Nilai F_{RS} adalah simplifikasi faktor bentuk antara *receiver* dengan lingkungan.

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \cdot A \cdot \varepsilon \cdot F_{RS}(T_{rec}^4 - T_{env}^4) \tag{3.12}$$



Gambar 3.13 Model kesetimbangan energi pada *receiver* [42]

2. Kerugian Konveksi

Kerugian konveksi terjadi pada sistem CSP akibat adanya pergerakan udara pada permukaan *receiver* yang panas. Beberapa usaha dapat dilakukan untuk meminimalisir kerugian ini, seperti menggunakan penutup kaca atau menggunakan *evacuated tube* (tabung kaca vakum) seperti pada sistem *parabolic trough*. Beberapa model *parabolic dish* dan *solar tower* menggunakan kaca kuarsa yang dapat tahan pada kondisi fluks radiasi tinggi. Pada kasus lain, *receiver* merupakan sistem *cavity* terbuka yang menghadap ke bawah untuk meminimalisir kerugian konveksi dari udara sekitar dan hanya dipengaruhi oleh efek *buoyancy* dari udara panas di sekitar *receiver*.

Aspek kerugian konveksi, baik dari aspek konveksi paksa akibat angin maupun konveksi alami akibat efek *buoyancy* dari udara panas, sangat sulit untuk diukur dan disimulasikan. Kesulitan ini terjadi karena kerugian konveksi terjadi secara simultan bersama dengan kerugian *radiative*. Kombinasi antara efek radiasi dan konveksi pada sisi *receiver* menjadi lebih sulit dianalisis dengan mempertimbangkan temperatur dan kerugian akibat adanya aliran *heat transfer fluid* pada sisi bagian dalam *receiver*, baik model *evacuated tube* maupun *cavity*. Pendekatan yang dilakukan umumnya menggunakan asumsi temperatur yang merata pada dinding *receiver*, atau asumsi fluks merata ke *heat transfer fluid*.

Pengukuran kerugian konveksi nyaris tidak mungkin dilakukan secara teknis, sehingga pendekatan yang digunakan biasanya menggunakan kesetimbangan energi bersih dengan memperhatikan rugi keseluruhan sistem. Pemodelan konveksi yang lebih detail dapat dilakukan dengan *software* komersial *computational fluid dynamic* (CFD) seperti *FLUENT* dan *star-CCM+*. *Software open-source* seperti *OpenFOAM* (**OpenFoam Foundation, 2011**) juga dapat dijadikan alternatif pemodelan tersebut. Untuk analisis dasar semi empiris, model simplifikasi dapat digunakan dengan memperhatikan korelasi antara konveksi natural dan paksa dari aspek *heat transfer fluid*, namun akurasinya cukup terbatas dengan rentang $\pm 20\%$. Ketika nilai korelasi konveksi rerata (h) telah diturunkan, maka kerugian konveksi *receiver* dapat dihitung dengan Persamaan 3.13.

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A(T_{rec} - T_{amb}) \quad 3.13.$$

3. Kerugian Konduksi

Selalu ada kerugian konduksi dalam sistem perpindahan panas, terlepas bagaimanapun model insulasi termal yang digunakan. Hal ini juga terjadi pada sistem CSP. Terjadi kerugian termal pada bagian sisi luar *receiver* dan seluruh jalur termal antara permukaan *receiver* yang panas dengan sekelilingnya. Kerugian seperti ini sifatnya mendekati linear dan proporsional terhadap perbedaan temperatur dan berbanding terbalik terhadap insulasi termal menyeluruh (R_{th}) yang bergantung kepada sifat dan ukuran material yang digunakan. Model kerugian panas sederhana dapat diperhitungkan dengan Persamaan 3.14.

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{(T_{rec} - T_{env})}{R_{th}} \quad 3.14.$$

F. DISTRIBUSI DAN PENYIMPANAN ENERGI

Perpindahan energi pada sistem CSP secara esensial berkaitan dengan perpindahan HTF bersuhu tinggi pada jaringan pemipaan sistem. Perpindahan energi berbasis reaksi kimia saat ini juga sedang dikembangkan untuk mengatasi batasan operasi dari model HTF berbasis minyak. Jaringan HTF bisa sangat panjang dan kompleks yang mengelilingi seluruh *solar collector*, khususnya untuk sistem *parabolic trough collector*, sedangkan jaringan ini relatif lebih kecil dan pendek untuk model *solar tower*. Pendekatan mendasar untuk mengetahui penurunan tekanan (*pressure drop*) dan daya pemompaan, termasuk juga aspek kerugian panas pada jaringan pipa (termasuk yang sudah menggunakan insulasi termal) telah banyak dikembangkan dan sudah sampai ke tahap yang mapan. Meskipun pendekatan tersebut dikatakan sudah mapan dari aspek keilmuan *engineering*, pendekatan standar tekno-ekonomik juga dipertimbangkan lebih mendalam untuk proses optimisasi ukuran diameter dan ketebalan insulasi pipa.

Sistem penyimpanan energi sendiri sudah mendapat perhatian yang sangat masif dikarenakan sistem CSP menggunakan penyimpanan energi berbasis termal. Penyimpanan model ini, secara harga, teknologi, dan *life cycle analysis* jauh lebih baik dibandingkan dengan penyimpanan listrik melalui teknologi baterai. Hal ini yang membuat teknologi penyimpanan energi termal menjadi lebih menarik untuk digunakan pada skala besar,

termasuk untuk kebutuhan perumahan dan bangunan. Penyimpanan termal dapat memanfaatkan sifat sensibel dan perubahan fasa dari material yang digunakan. Penggunaan reaksi termokimia juga menarik untuk dikembangkan karena memiliki efisiensi dan peluang harga yang lebih baik dari material sensibel dan laten. Secara umum, performa dari berbagai macam model TES dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter umum model TES [43]

Model	Kapasitas (kWh/t)	Daya (MW)	Efisiensi (%)	Durasi Penyimpanan	Biaya (€/kWh)
Sensibel	10-50	0.001-10.0	50-90	Hari/bulan	0.1-10
Laten	50-150	0.001-1.0	75-90	Jam/bulan	10-50
Termokimia	120-250	0.01-1.0	75-100	Jam/hari	8-100

Karakteristik operasi dan model sistem yang dikembangkan dari *thermal energy storage* bergantung kepada banyak faktor, terutama terkait dengan suhu kerja dan pertimbangan biaya serta lama operasi. Tabel 3.2. hanya memberikan gambaran umum terkait dengan karakteristik dari model material *thermal energy storage*.

G. SIKLUS TENAGA UNTUK CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP)

Berbagai macam model dapat digunakan untuk konversi energi matahari menjadi listrik melalui sistem CSP. Sub bab berikut menunjukkan beberapa contoh umum siklus tenaga yang digunakan untuk konversi termal menjadi listrik pada sistem CSP. Pengetahuan mendasar tentang siklus tenaga (*power cycle*) pada kajian *textbook* termodinamika menjadi modal penting untuk pembahasan ini. Khususnya terkait dengan batasan kerja sistem dan efisiensi energi dari proses konversi panas menjadi listrik. Dengan demikian, pengetahuan yang komprehensif dan peluang pemahaman yang baik dapat dicapai. Hal ini sangat penting untuk dikuasai mengingat banyak *misleading information* yang menyesatkan karena dibuat oleh *incompetent person* dan disebarakan oleh *high degree person* pada era sekarang yang seolah dapat mengkonversi energi secara gratis (*free energy*) seperti *perpetual motion* dan bahan bakar air.

1. Turbin Uap

Hampir seluruh listrik yang diproduksi pada pembangkit listrik menggunakan turbin uap. Umumnya sumber panas turbin uap pembangkit bersumber dari bahan bakar fosil atau nuklir. Salah satu kelebihan utama CSP sebagai *thermal collector* adalah kemudahannya diintegrasikan dengan siklus tenaga yang membutuhkan panas dan dapat digabungkan dengan sumber panas alternatif lainnya. Hal ini berdampak pada penggunaan turbin uap pada sistem CSP. Siklus turbin uap (*Rankine Cycle*) bekerja dengan prinsip berikut:

- 1) Proses kompresi *feedwater* (air umpan) murni menjadi tekanan tinggi (contohnya di atas 10 MPA);
- 2) Uap mendidih dan *superheated* di *boiler* dapat ditempatkan pada titik fokus *concentrator*, atau menggunakan *heat exchanger* dengan bantuan distribusi termal dari *heat transfer fluid*;
- 3) Uap diarahkan ke turbin untuk menghasilkan energi mekanik yang kemudian digunakan untuk menggerakkan generator;
- 4) Proses kondensasi kemudian dilakukan dengan bantuan pendingin, lalu siklus berulang lagi dengan pemanasan.

Siklus *Rankine* memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika menggunakan temperatur dan tekanan uap yang lebih tinggi pada sisi masukan turbin (seperti umumnya untuk mesin kalor). Beberapa optimasi yang umum dilakukan berupa teknologi *economizer* dan pemanasan awal *feedwater* sebelum masuk *boiler*. Detail standar siklus *Rankine* dapat dipelajari pada *Textbook Thermodynamic*.

Sistem siklus *Rankine* bisa lebih efisien jika dibuat untuk skala besar dan bekerja pada beban penuh. Kebanyakan (meskipun tidak semua) ukuran efisiensi yang ideal berkisar untuk kapasitas 50-100 MW_e. Sistem yang lebih besar juga cenderung lebih murah per satuan kapasitas. Pembangkit listrik besar untuk turbin uap dengan bahan bakar batu bara biasanya memiliki kapasitas hingga 500 MWe. Untuk model CSP, ukuran ideal yang disarankan sekitar 250 MW_e. Turbin model baru sangat *efisiens* apabila menggunakan uap pada suhu 700 °C. Batasan suhu ini menjadi isu terkait dengan penggunaan HTF (400 °C) pada CSP, khususnya *model parabolic trough* dan LFR, atau menggunakan HTF alternatif dengan

metode *direct steam generation* (DSG) yang dapat mencapai 400 °C. Model *parabolic dish* dan *solar tower* dapat mencapai target temperatur ideal untuk turbin uap, namun ketahanan material pada sistem masih menjadi kendala, khususnya terkait dengan HTF yang digunakan. Turbin saat sekarang juga beroperasi pada kondisi uap super kritis untuk memaksimalkan konversi. Uap super kritis berada pada tekanan dan temperatur di atas titik kritis (22 MPa, 374 °C)

Perbedaan paling mendasar dari operasional turbin uap dengan menggunakan bahan bakar fosil dan tenaga termal matahari (CSP) adalah sifat *intermittent* suplai panas. Penggunaan *fossil fuel* menjamin suplai panas yang kontinu, sedangkan penggunaan CSP masih *intermittent*, sehingga hal ini berdampak pada 2 (dua) kemungkinan:

- 1) Variasi kecepatan turbin (naik/turun) menjadi lebih sering dan terjadi pada rentang yang lebih cepat dibandingkan dengan operasi *steady* (tunak) pada sistem dengan bahan bakar fosil
- 2) Menggunakan beban *partial* (di bawah target kapasitas)

Penggunaan *thermal energy storage* memberikan mitigasi terkait dampak tersebut, namun hanya pada kondisi dan batasan tertentu. Transfer teknologi dan batasan kerja ideal untuk turbin uap bahan bakar fosil tidak dapat dilakukan secara langsung ke turbin uap untuk CSP. Pada prinsipnya, optimasi dibutuhkan untuk menyesuaikan karakteristik operasional turbin uap untuk sistem CSP. Beberapa pabrikan turbin mulai mengembangkan turbin uap khusus untuk CSP dengan mempertimbangkan karakteristik operasional CSP. Sebagai contoh, turbin uap khusus untuk CSP dapat mencapai daya maksimal dalam waktu 30 menit pada kondisi *cold start* dan bisa lebih cepat pada kondisi yang lebih hangat. Biasanya, konversi panas menjadi listrik (AC) menggunakan turbin dapat mencapai efisiensi hingga 40% untuk beban penuh pada sistem CSP.

2. Organic Rankine Cycle (ORC)

Konsep ORC pada prinsipnya sama dengan siklus turbin uap, perbedaan utamanya adalah fluida kerja. Pada turbin uap, air murni digunakan sebagai fluida kerja, sedangkan fluida organik yang memiliki titik didih lebih rendah dari air digunakan untuk ORC. ORC digunakan

untuk operasi yang memiliki sumber panas dengan suhu rendah. Kebalikan dengan turbin uap air, ORC dapat mencapai efisiensi yang lebih baik pada ukuran kecil (kisaran beberapa MW_e). Namun, tantangan paling besar dari sistem ORC adalah biaya awal dan biaya operasi/perbaikan (*Operation & Maintenance*) lebih mahal dibandingkan dengan turbin uap air. Teknologi ORC dikembangkan untuk memanfaatkan panas bumi (*geothermal*) dengan karakteristik suhu yang rendah. Sistem ORC sudah diterapkan pada beberapa CSP model *line focus* (*Parabolic trough* dan LFR).

3. *Stirling Engine*

Stirling Engine kembali memiliki panggung pada era *modern* sekarang setelah lama vakum akibat pertimbangan efisiensi yang rendah karena keterbatasan peralatan pada masa awal penciptaannya. Berkat optimisasi berkelanjutan, mesin ini telah mencapai taraf yang sangat maju dan digunakan pada aplikasi khusus seperti pembangkit listrik untuk *space station*. *Stirling Engine* merupakan mesin piston bolak-balik dengan sumber panas berasal dari luar mesin (kadang disebut dengan istilah *external combustion engine*), menggunakan fluida kerja pada jumlah yang sama (*closed loop*). Untuk meningkatkan efektivitas sistem, biasanya fluida kerja yang digunakan adalah hidrogen (H) dan helium (He). Siklus ideal *Stirling Engine* menggabungkan proses adiabatik dan temperatur tetap (isothermal). Perspektif siklus ideal menunjukkan peluang efisiensi tertinggi secara termodinamika di antara dua batasan tetap temperatur kerja.

Stirling Engine sudah lama digunakan untuk CSP model *parabolic dish*. Bahkan beberapa literatur menyebut *parabolic dish* sebagai *dish Stirling system*. Sejauh ini, *Stirling Engine* belum digunakan untuk model *concentrator* lainnya. Terdapat dua tipe umum *Stirling Engine*, yakni model *piston-crankshaft* dan *free piston*. Model *piston-crankshaft* memiliki konfigurasi dan prinsip kerja yang sama dengan kebanyakan mesin piston lainnya (mesin bensin dan diesel). Tipe *free-piston* memiliki model khusus dan menggunakan *build-in linear generator*, memiliki efisiensi yang lebih baik dikarenakan tidak perlu mengkonversi gerakan translasi (naik-turun) menjadi gerak rotasi (berputar) seperti pada tipe *piston-crankshaft*. Kedua tipe *Stirling Engine* sudah diterapkan untuk *parabolic dish*. Sampai saat ini, *Stirling Engine* masih memegang rekor tinggi untuk rasio konversi energi

matahari menjadi listrik dibanding teknologi lain. Konversi total dari energi menjadi matahari dapat mencapai 30% pada penempatan di wilayah dengan DNI (*Direct Normal Irradiation*) sesuai. *Stirling Engine* sangat dimungkinkan untuk dibuat dalam ukuran kecil dibandingkan siklus *Rankine*. Optimasi masih diperlukan untuk penempatan *thermal energy storage* pada *Dish Stirling System*.

4. Siklus Brayton

Siklus ini merupakan siklus mendasar dari mesin jet dan generator turbo untuk pembangkit listrik turbin gas. Perlu sedikit diluruskan, turbin gas kadang didefinisikan sebagai pembangkit yang menggunakan bahan bakar gas, padahal penamaan turbin gas dimaksudkan untuk turbin yang menggunakan gas (biasanya udara) sebagai fluida kerja (turbin uap menggunakan air yang dipanaskan menjadi uap sebagai fluida kerja). Pada mode penggunaan bahan bakar, segala jenis bahan bakar hidrokarbon (avtur, solar, LPG, *propane*, *bio-gas*) dapat digunakan untuk mendapatkan pemanasan yang diinginkan. Alternatif tambahan, panas dari CSP dapat digunakan untuk menaikkan temperatur dari udara bertekanan sebelum ekspansi. Sistem dapat bekerja dengan efektif jika dengan capaian temperatur fluida kerja hingga 1,000 °C sebelum proses ekspansi, yang mana model ini cocok untuk CSP model *parabolic dish* dan *solar tower*.

Untuk siklus Brayton yang menggunakan bahan bakar fosil, pembangkit listrik umumnya menggunakan kombinasi siklus tenaga yang menggunakan gas buang dari turbin yang memiliki temperatur tinggi untuk digunakan sebagai *heat recovery steam generator* agar dapat menghasilkan uap untuk siklus tenaga uap. Secara potensial, model kombinasi ini menunjukkan proses konversi paling optimal secara komersial dengan capaian efisiensi lebih dari 50%. Hal yang sama juga menarik untuk dijadikan acuan dalam penerapan siklus Brayton pada CSP karena memiliki prinsip kerja yang sama dan dapat digabungkan dengan siklus uap maupun ORC. Untuk *parabolic dish*, siklus Brayton berpotensi untuk mengurangi biaya operasi/perawatan (O&M) dibandingkan dengan *Stirling Engine*. Penelitian lebih lanjut juga dilakukan terkait dengan penggunaan gas CO₂ sebagai fluida kerja karena memiliki sifat termodinamika yang lebih baik dibandingkan dengan udara.

5. Alternatif Siklus Lain

Ada beberapa alternatif lain yang dapat dikembangkan untuk pemanfaatan *solar thermal* menjadi listrik melalui siklus tenaga, seperti:

1. Siklus Kalina, merupakan modifikasi dari siklus *Rankine* yang menggunakan campuran air dan amonia pada rentang komposisi tertentu. Siklus ini menawarkan performa yang tinggi untuk rentang suhu kerja antar 200°C-300 °C. Model ini dikembangkan untuk tujuan komersial dan mendapatkan atensi yang baik juga untuk aplikasi *geothermal*.
2. *Thermoelectric conversion* menggunakan semi-konduktor yang dapat menghasilkan listrik dari panas. Secara prinsip konsep ini mirip dengan *solar cell*, perbedaan yang mendasar adalah *solar cell* menggunakan absorpsi *photon* untuk menyebabkan aliran elektron sedangkan model *thermoelectric conversion* fokus pada pemanfaatan panas dari *concentrator*.
3. *Thermionic converter*
4. *Thermo-photovoltaic*
5. *Magneto-hydrodynamic*

H. MENINGKATKAN EFISIENSI SISTEM CSP

Bagian sebelumnya dengan jelas menunjukkan beberapa *error* yang terjadi pada aspek optik, *concentration ratio* dan juga *thermal losses* dari *receiver* serta fluida kerja (HTF). Seluruh aspek tersebut digabungkan untuk menjadi Persamaan 3.1. Penulisan efisiensi optik ($\eta_{optical}$) biasanya memperhitungkan aspek *concentrator*/optik berdasarkan reflektivitas dan kehilangan fluks dari proses pemantulan sinar hingga mencapai permukaan *receiver*. Efisiensi *receiver* ($\eta_{receiver}$) memperhitungkan seluruh kerugian yang ada pada *receiver* yakni: kerugian reflektif, kerugian panas melalui radiasi, konveksi dan konduksi. Efisiensi distribusi dan penyimpanan ($\eta_{transport}$) memperhatikan aspek jaringan distribusi pipa dari fluida kerja (HTF) ke *unit* penyimpanan energi dan mesin kalor (atau beban termal lainnya), termasuk juga kerugian pada aspek alat penukar kalor untuk masing-masing bagian (*thermal energy storage* dan *thermal load*). Efisiensi penyimpanan ($\eta_{storage}$) harus memasukkan kerugian panas selama proses penyimpanan energi yang terjadi dari unit penyimpanan

(disebut *bed storage* atau *storage tank/container*), kerugian reaksi (jika menggunakan reaksi kimia untuk proses penyimpanan), dan keseluruhan kerugian panas terkait proses pertukaran panas antara fluida kerja dengan unit penyimpanan dan beban termal. Terakhir berkaitan dengan efisiensi proses konversi energi ($\eta_{conversion}$) memperhitungkan aspek termal, gesekan, dan kerugian listrik selama siklus tenaga berlangsung, yang semuanya dibatasi oleh **hukum kedua termodinamika**.

1. Analisis Hukum Kedua Termodinamika dan Exergy

Memaksimalkan efisiensi sistem menyeluruh merupakan tujuan berkelanjutan yang ada pada seluruh sistem energi. Perlu diketahui juga, mempertimbangkan seluruh permasalahan yang ada dari perspektif energi tidak dapat memberikan informasi menyeluruh untuk proses optimisasi karena berkaitan juga dengan faktor lain (misalnya material). Hukum kedua termodinamika membahas tentang sifat permanen dari proses tidak-mampu balik (*irreversibility*) yang menunjukkan batasan tertinggi dari proses konversi energi untuk mesin kalor di antara *reservoir* isothermal, yang dituliskan dalam batasan efisiensi Carnot (Persamaan 3.15):

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad 3.15.$$

Pada Persamaan 3.15, temperatur yang digunakan adalah temperatur mutlak (*absolute*), yang ditulis dalam satuan SI = 0 Kelvin (K) = - 273.15 °C. Hal ini dengan jelas menunjukkan bahwa mesin kalor harus beroperasi pada suhu tinggi untuk mencapai efisiensi yang lebih baik. Sebagai bukti sederhana,

Tabel 3.1 mengindikasikan sistem *parabolic dish* dengan temperatur kerja tertinggi dan efisiensi puncak tertinggi dibandingkan model CSP lainnya.

Stirling Engine merupakan satu-satunya siklus tenaga yang memiliki efisiensi konversi yang paling mendekati dengan konsep efisiensi Siklus Carnot. *Stirling Engine* ditempatkan di *receiver* pada posisi tetap sehingga dapat bekerja pada *reservoir* panas tetap (*receiver*) dan *reservoir* dingin tetap (lingkungan sekitar). Untuk sistem yang menggunakan distribusi HTF antara *receiver* dengan mesin kalor, mesin kalor tidak beroperasi di antara

reservoir isothermal efektif. Efisiensi Carnot secara spesifik dialamatkan untuk kasus khusus dari maksimal jumlah kerja yang dapat dimanfaatkan di antara dua *reservoir* isothermal. Hal ini yang menjadi indikator penting pada aspek termodinamika yang sangat jarang dibahas, yakni **EXERGY**. *Exergy* menjadi kunci penting jika sudah bicara terkait konversi energi dari mesin kalor. *Textbook* termodinamika karangan Çengel dan Boles, serta Moran dan Shapiro dapat digunakan untuk memberikan pengetahuan dasar terkait dengan konsep *exergy*.

Exergy dari suatu sistem didefinisikan sebagai banyaknya jumlah kerja yang digunakan (*work-done*) dengan tetap membawa sistem (secara termodinamik) mencapai titik kesetimbangan dengan lingkungan. Pada konteks ini, sebuah sistem sederhana dapat saja berupa suatu nilai massa dari zat seperti HTF. Berdasarkan definisi energi, tiap laju aliran energi dapat berasosiasi dengan besaran kuantitatif yang berhubungan dengan laju *exergy*. Perspektif ini tepat karena fluida dapat membawa jumlah energi tertentu yang bisa diekstrak dan digunakan sebagai kerja. Analisis *exergy* merupakan *tool* yang sangat hebat untuk memahami dan meningkatkan performa dari sistem CSP (dan sistem energi lainnya) agar dapat mencapai titik puncak energi bersih yang dapat dihasilkan. Persamaan 3.1 menunjukkan efisiensi tiap sistem dan tentunya memiliki nilai efisiensi *exergy* tertentu. Persamaan tersebut sudah memperhitungkan listrik yang diproduksi (*exergy* murni, karena kita mengharapkan listrik), entah memaksimalkan keseluruhan efisiensi energi atau *exergy* akan membentuk ke satu desain dan nilai parameter operasi yang sama.

Tabel 3.3 memberikan ilustrasi rasio *exergy* dan energi terkait efisiensi Carnot yang bergantung pada temperatur untuk beberapa jenis HTF pada sistem CSP. Terlihat bahwa operasi dari sistem termal pada temperatur yang realistis menunjukkan penurunan yang sangat tinggi terkait dengan potensial untuk menghasilkan kerja dibandingkan dengan suhu permukaan matahari (5,800 K). Dapat juga dipahami bahwa perpindahan panas dari sumber isothermal ke HTF yang sesungguhnya (dengan nilai panas spesifik yang bervariasi terhadap temperatur) dan dipanaskan pada suhu yang sama juga mengurangi potensi untuk mengekstraksi kerja. Artinya, ini adalah proses *irreversible* yang menghancurkan *exergy*. Pada

temperatur tertentu, efisiensi Carnot untuk operasi dari sumber panas isothermal tak terbatas lebih tinggi dibandingkan rasio *exergy*/energi dari fluida kerja. Konsep pemanasan *regenerative feedwater* pada siklus uap menggunakan “*bleed steam*” merupakan contoh pemahaman *exergy* yang cukup tepat untuk dipahami. Sebagian ekspansi uap telah memberikan sebagian *exergy*-nya untuk pembangkitan daya, sehingga kembali menggunakan uap tersebut untuk pemanasan mula *feedwater* merupakan pilihan tepat dibandingkan harus memberikan air ke sumber panas tertinggi (bahan bakar) untuk memanaskan air dari suhu lingkungan.

Tabel 3.3 Matriks efisiensi termodinamika relatif terhadap lingkungan (1 bar, 298 K)

Temp.		η_{carnot} (%)	E/N HTF* (%)	E/N uap (%) saat tekanan	
°C	K			15 MPA	5 MPA
5,527	5,800	94.9	84.1	-	-
1,000	1,273	77.0	56.1	-	-
700	973	69.9	48.3	48.0	44.6
400	673	56.5	35.9	43.4	40.2
300	573	48.9	29.8	31.5	39.0
200	473	38.0	22.0	-	-

* E/N → Rasio *Exergy*-Energi

* HTF yang digunakan dianggap memiliki panas spesifik konstan

2. Perpindahan Panas Antar Fluida

Faktor yang paling utama menyebabkan kerugian *exergy* di sistem CSP terkait fluida kerja. Proses distribusi fluida kerja (HTF) dari sumber panas dan ke sistem lain menyebabkan kerugian *exergy* karena adanya perbedaan suhu dengan lingkungan. Fluida kerja menggunakan alat penukar kalor untuk proses perpindahan panas dan biasanya area penempatan alat penukar kalor adalah:

- 1) Dari HTF ke material penyimpanan energi (material TES)-*charging cycle*
- 2) Dari HTF ke fluida kerja untuk siklus tenaga (misalnya air untuk siklus uap)
- 3) Dari media penyimpanan energi ke fluida kerja siklus tenaga (*discharging cycle*)

- 4) Dari fluida kerja untuk siklus tenaga ke lingkungan (kondensor atau menara pendingin)

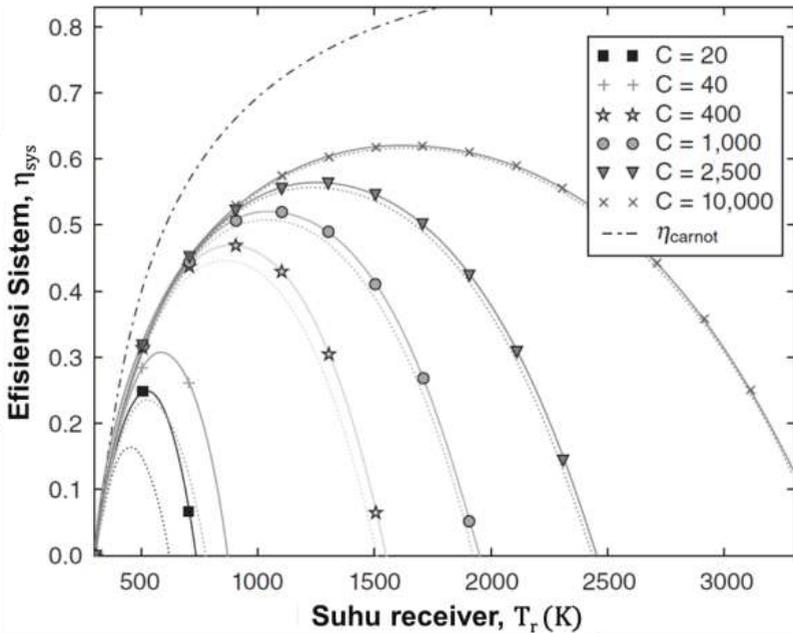
Desain alat penukar kalor yang ideal atau didesain sebaik mungkin memiliki luasan area pertukaran antar dua aliran fluida yang sangat besar, yang mana memungkinkan proses pertukaran panas terjadi dengan sedikit penurunan temperatur, meskipun koefisien perpindahan panas menyeluruh tidak tinggi. Namun demikian, model ini akan sangat mahal untuk dibuat sehingga dibutuhkan pendekatan optimisasi untuk meminimalisir harga tersebut.

Sistem dengan kemampuan minim tahapan perpindahan panas yang tidak diinginkan mendapatkan perhatian yang besar untuk dikembangkan saat ini, termasuk juga untuk sistem dengan produksi uap langsung, dan penggunaan *molten-salt* (garam cair) untuk *parabolic trough collector*. Terlepas dari koefisien perpindahan panas keseluruhan yang dicapai dalam penukar panas, fluida yang digunakan mungkin tidak memiliki profil kenaikan entalpi yang sama terhadap kenaikan suhu. Hal ini sangat tepat karena adanya perubahan fasa (air menjadi uap). Dengan demikian, kondisi ini sangat memungkinkan untuk kerugian *exergy*. Pada sistem yang kompleks dengan kebutuhan beberapa proses pemanasan dan pendinginan, *pinch analysis*, merupakan metode yang cukup direkomendasikan karena menggabungkan seluruh profil perpindahan panas untuk mencapai target optimal.

3. Optimisasi Temperatur Kerja

Dilematis sering terjadi pada proses konversi energi, dan ini juga terjadi pada sistem CSP. Berangkat dari prinsip mesin kalor mampu-balik (*reversible*), kita mengetahui bahwa mesin tersebut bekerja pada suatu siklus yang mengambil panas dari sumber dengan temperatur tinggi, semakin tinggi temperatur pada sumber tersebut maka efisiensi yang lebih tinggi dapat dicapai. Akan tetapi, sebagaimana yang sudah dijelaskan, kerugian termal pada *receiver* terjadi pada temperatur yang lebih tinggi. Kondisi dilema ini yang menyebabkan proses penelitian dan optimasi dilakukan secara terus-menerus. Pada kajian ini, kita hanya melihat dari perspektif yang disederhanakan untuk kasus pada sistem CSP.

Menggunakan persamaan dan penjabaran yang disederhanakan terkait dengan mekanisme kerugian yang ada, termasuk beberapa nilai parameter umum, maka efisiensi *receiver* merupakan fungsi rasio konsentrasi (**C**) dan temperatur (Gambar 3.14). Terlihat dengan jelas pada temperatur rendah, seluruh efisiensi sangat rendah. Kenaikan temperatur berdampak pada kenaikan efisiensi sampai batas tertentu. Seluruh sistem memperlihatkan adanya batasan temperatur tertentu sebelum efisiensinya turun pada temperatur yang lebih tinggi. Kemudian terlihat juga sistem dengan rasio konsentrasi (**C**) yang lebih tinggi memiliki efisiensi yang lebih baik ketika temperatur kerja meningkat.



Gambar 3.14 Model hubungan antara suhu *receiver*, rasio konsentrasi (**C**) dan efisiensi sistem [42]

Untuk mensimulasikan daerah operasi ideal agar memaksimalkan produksi energi, efisiensi *receiver* harus dikalikan dengan efisiensi konversi siklus tenaga untuk mendapatkan efisiensi sistem menyeluruh. Meskipun demikian, karakteristik operasional dari siklus tenaga sangat bergantung

pada banyak hal dan sulit hanya dipertimbangkan dari satu aspek saja. Proses simulasi harus mempertimbangkan *heat loss* pada seluruh sistem dan karakteristik kurva performa dari mesin kalor yang digunakan. Keseluruhan aspek tersebut harus dibandingkan dengan uji empiris untuk mendapatkan nilai estimasi yang akurat. Meskipun demikian, nilai ini pada akhirnya akan bergantung dari temperatur operasi sehingga penitikberatan pada aspek temperatur HTF sangat penting untuk dioptimalkan.

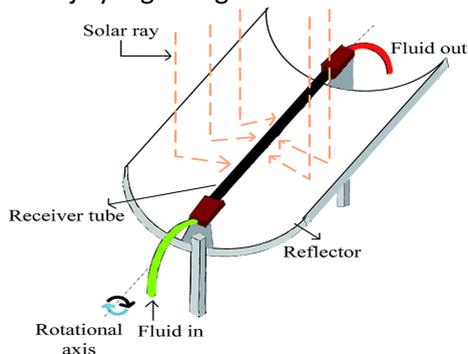
I. KESIMPULAN BAGIAN III

Proses konversi energi pada sistem CSP sangat kompleks dan memiliki banyak faktor yang berpengaruh pada seluruh unit kerjanya. Permasalahan mendasar yang menjadi pertimbangan adalah konversi terjadi dengan mengubah energi panas menjadi kerja untuk menghasilkan listrik. Namun demikian, pada sisi lain hal ini yang menjadi kelebihan dari sistem operasi CSP sebagai *thermal generator*. Operasi pada temperatur tinggi memberikan peluang pemanfaatan yang lebih luas, dan tidak terbatas pada pembangkitan listrik. Opsi pilihan siklus tenaga untuk proses konversi lebih banyak dan memungkinkan untuk menghasilkan energi bersih yang lebih stabil. Pembahasan berikutnya akan mengulas lebih detail tentang teknologi *parabolic trough collector* (PTC) sebagai perwakilan dari konsep *line-focus technology* dan *solar tower* sebagai perwakilan dari *point-focus technology*. *Linear Fresnel collector* tidak dibahas lebih lanjut karena memiliki kesamaan konsep kerja dengan model PTC. Dan terakhir, *parabolic dish collector* disajikan sebagai konsep sistem mandiri dan sistem dengan efisiensi tertinggi.

PARABOLIC TROUGH COLLECTOR (PTC) SYSTEM

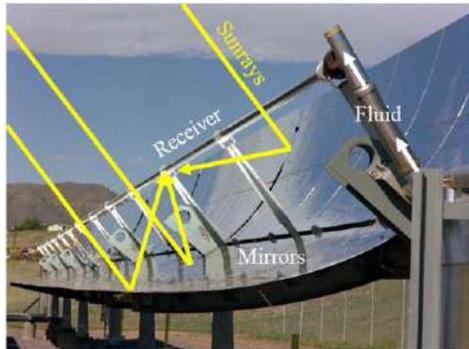
A. PENGANTAR *PARABOLIC TROUGH COLLECTOR* (PTC) PADA SISTEM CSP

Model *parabolic trough collector* (PTC) masuk dalam kategori kolektor jenis *line-focus*. Model ini terdiri dari *concentrator* berbentuk parabola yang memanjang untuk memantulkan cahaya matahari ke *receiver* atau *absorber* (Gambar 4.1) yang ditempatkan pada titik fokus parabola. Bentuk penampang *concentrator* yang luas memantulkan cahaya matahari ke bagian kecil *receiver/absorber* pada titik fokus parabola, hal ini memanaskan fluida kerja yang mengalir di dalam *receiver*.



Gambar 4.1 Konsep dasar model *parabolic trough collector* [44]

Absorber mengubah cahaya menjadi panas. Panas ini diserap oleh fluida kerja yang menyebabkan kenaikan suhu. Umumnya, *absorber* ditempatkan sepanjang garis PTC untuk memaksimalkan proses penyerapan panas (Gambar 4.2). Untuk memaksimalkan operasi sistem, digunakan fluida kerja dengan titik didih tinggi (biasanya minyak sintetik), dan secara umum dapat mencapai 400 °C. Panas dari HTF digunakan pada pengoperasian siklus tenaga untuk menghasilkan listrik atau beban termal lainnya.



Gambar 4.2 Contoh model *parabolic trough collector* [44]

Beberapa catatan sejarah menunjukkan perkembangan PTC dimulai tahun 1913 yang diikuti dengan beberapa modifikasi minor pada sistem. Kemudian saat krisis energi terjadi di tahun 1970an, pengembangan CSP mendapat perhatian serius sebagai sumber energi alternatif. Beberapa perusahaan mulai menggunakan PTC dan menjualnya ke pasar untuk kebutuhan proses industri termal skala kecil dan sebagai pembangkit tenaga matahari kecil (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Beberapa model PTC yang diujicobakan era tahun 1980an

	Coolidge (USA)	Sunshine (Jepang)	IEA-DCS (Spanyol)	STEP-100 (Australia)
Daya bersih	0.15 MW _e	1 MW _e	0.5 MW _e	0.1 MW _e
Luas permukaan	2,140 m ²	12,856 m ²	7,622 m ²	920 m ²
HTF	Minyak sintesis	Air/uap	Minyak sintesis	Minyak sintesis
Kapasitas <i>storage</i>	5 MW _{th}	3 MW _{th}	0.8 MW _{th}	117 MW _{th}
Lama operasi	1980-82	1981-84	1981-87	1982-85

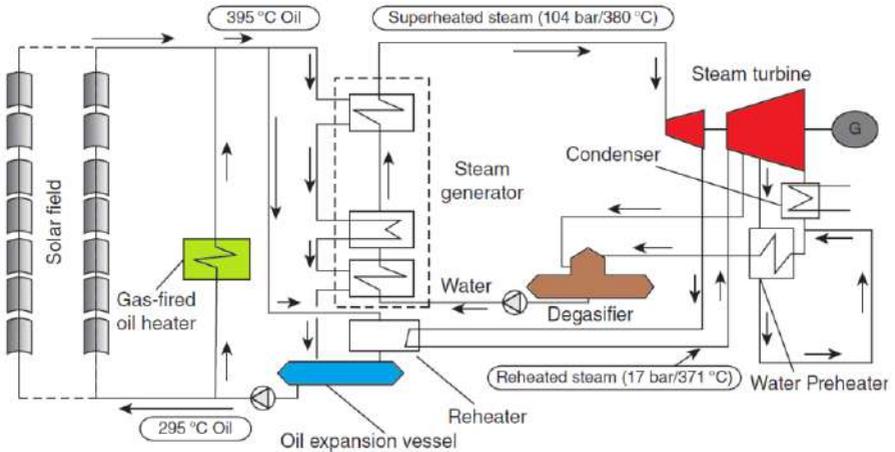
Terlihat kapasitas pembangkitan yang cukup rendah dan juga tidak adanya hubungan yang linear antara luas permukaan dengan kapasitas. Beberapa perusahaan lain juga mencoba sistem ini, misalnya *Industrial Solar Technologies* (IST), yang kemudian sukses membuat desain PTC yang diperuntukkan aplikasi panas pada proses industri. Capaian yang paling tinggi terkait dengan teknologi PTC pada abad ke-20 adalah desain dan implementasi dari sembilan *plant* sistem SEGS (*Solar Electricity Generating System*) di gurun Mohave (California, USA) oleh perusahaan LUZ mulai tahun 1981 (SEGS I) hingga 1990 (SEGS IX).

Tabel 4.2 menyajikan detail teknis operasi pada SEGS I – IX. Terdapat peningkatan kapasitas dan efisiensi (*solar*) pada tiap model yang dikembangkan. Kemudian Gambar 4.3 memperlihatkan foto dari *plant* SEGS yang terdiri dari banyak PTC.



Gambar 4.3 Foto dari pabrik SEGS di California, USA [44]

Prinsip operasi dari sistem SEGS diperlihatkan pada Gambar 4.4. Minyak sintetik dipompakan melalui susunan *absorber* yang kemudian dipanaskan oleh sinar matahari yang difokuskan pada area *absorber*. Panas dari minyak sintetik digunakan untuk menghasilkan uap pada alat penukar kalor dan kemudian kembali mengalir ke *absorber* untuk pemanasan ulang. Uap yang dihasilkan berguna untuk menggerakkan turbin agar dapat memutar generator untuk produksi listrik. Meskipun ada sistem penyimpanan, SEGS menggunakan pembakaran gas alam untuk menjamin suplai yang kontinu saat matahari tidak bersinar.



Gambar 4.4 Skema kerja *plant* PTC SEGS [44]

Dengan total daya pembangkit mencapai 354 MW dan luas *parabolic trough collector* area lebih dari 2,000,000 meter persegi, SEGS mendapatkan bantuan yang cukup banyak untuk pengembangan dan komersialisasi. *Plant* ini masih beroperasi hingga saat sekarang dan mendapatkan keyakinan yang tinggi dari para investor dan pengembang. Lebih dari itu, SEGS tidak hanya berkontribusi sebagai langkah awal komersialisasi PTC dengan bertindak sebagai “ujicoba teknologi” untuk proyek yang disponsori di abad ke-20, namun langkah ini juga berkontribusi untuk pemenuhan komponen sistem pada skala industri, seperti *receiver tube* dan *reflector*. SEGS dapat dibangun dengan adanya kondisi khusus saat itu dan mendapat dukungan penuh dari pemerintah negara setempat karena adanya krisis minyak. Namun, insentif dan dukungan tersebut dicabut begitu harga minyak turun sehingga pengembangan *plant* PTC baru menjadi tidak *feasible*.

Tabel 4.2 Spesifikasi teknis sistem SEGS yang dibuat oleh LUZ

	SEGS								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Lama operasi	1984–skrng	1985–skrng	1986–skrng	1986–skrng	1987–skrng	1988–skrng	1988–skrng	1989–skrng	1990–skrng
Daya bersih	13.8 MW _e	30.0 MW _e						80.0 MW _e	
Efisiensi (<i>sektor</i>) (%)	28.5	29.4	30.6	30.6	30.6	37.7	37.5	37.6	37.6
Model PTC	LS1	LS1/ LS2	LS2				LS3		
Luas area	83,000	188,990	230,300	230,300	233,120	188,000	194,280	464,340	483,960
T _{in} - T _{out} (°C)	241/307	248/320	248/349	248/349	248/349	293/393	293/393	293/390	293/390
Jenis HTF (minyak sintetik)	ESSO-500	M-VP1							

B. PARABOLIC TROUGH COLLECTOR (PTC) SKALA KOMERSIAL

1. Skala Besar *Parabolic Trough Collector* (PTC)

Salah satu keberhasilan dari LUZ adalah pembangunan tiga desain PTC yang reliabel yakni: LS1, LS2 dan LS3, yang sukses diimplementasikan dan beroperasi pada *plant* SEGS. Meskipun LS1 dipasang oleh LUZ di SEGS-I tahun 1984 memiliki panjang 50.2 m dengan lebar parabola sebesar 2.5 m, mirip dengan desain serupa yang dikembangkan pada era tahun 1980an, teknologi ini kemudian menjadi bukti bahwa PTC yang lebih besar akan dibangun untuk *plant* CSP lainnya. Hal ini yang mendasari LUZ untuk membuat desain berikutnya, LS2 dan LS3, dengan dimensi 235 dan 545 m² untuk masing-masing tipe *collector*.

Model *parabolic trough collector* (PTC) masuk dalam kategori kolektor jenis *line-focus*. Model ini terdiri dari *concentrator* berbentuk parabola yang memanjang untuk memantulkan cahaya matahari ke *receiver* atau *absorber* (Gambar 4.1) yang ditempatkan pada titik fokus parabola. Bentuk penampang *concentrator* yang luas memantulkan cahaya matahari ke bagian kecil *receiver/absorber* pada titik fokus parabola, hal ini memanaskan fluida kerja yang mengalir di dalam *receiver*. Setelah **berakhirnya** era LUZ, salah satu halangan terberat dari instalasi skala besar CSP adalah kekurangan model PTC yang layak. Menghadapi kondisi ini, konsorsium Eropa yang terdiri dari industri, firma *engineering*, dan pusat *Research & Development* dibentuk pada tahun 1988 untuk mengembangkan model PTC yang sesuai untuk aplikasi CSP skala besar. Hasilnya adalah desain dari EuroTrough-100 (ET-100) dan EuroTrough-150 (ET-150), yang kemudian dikembangkan lebih lanjut menghasilkan desain yang lebih baik dengan nama SKAL-ET yang merupakan model *collector*

yang dipasang di *plant* ANDASOL–1 di Spanyol pada tahun 2007. Gambar 4.5 memperlihatkan model struktur baja dari EuroTrough-100 dengan detail teknisnya pada Tabel 4..



Gambar 4.5 Struktur baja dari desain *collector* EuroTrough-100 [45]

Tabel 4.3 Parameter desain dari desain *collector* EuroTrough-100

Parameter	Nilai
Lebar parabola (m)	5.76
Panjang menyeluruh dari satu <i>collector</i> (m)	147.5
Panjang tiap <i>module</i> (m)	12.27
Jumlah <i>module parabolic trough</i>	12
Diameter luar baja pipa <i>receiver</i> (m)	0.07
Diameter dalam baja pipa <i>receiver</i> (m)	0.065
Luas area <i>collector</i> (m ²)	822.5
Reflektivitas cermin	0.93
Tingkat absorpsi pipa <i>receiver</i>	0.90
Puncak efisiensi optik	0.75

Rakitan struktur baja yang sangat presisi dibutuhkan untuk mencapai bentuk sempurna *parabolic* dari *concentrator* dengan tingkat kekakuan menyeluruh dari struktur, dan pada saat yang sama tentunya menjaga agar biaya semurah mungkin. Sehingga, meskipun tidak semua desain PTC membutuhkan *jig*, kebanyakan desain saat sekarang membutuhkan *jig* agar dapat mencapai toleransi desain, sekitar ± 1 mm. Desain *collector*

pada Gambar 4.5 memiliki rangka khusus pada bagian tengah, diistilahkan dengan *torque box*, yang berfungsi untuk menjaga tingkat kekakuan dan mencegah defleksi, yang mana sangat penting untuk menjamin performa optik dan geometri yang optimal saat terjadi angin cukup kencang (di bawah 35 km/jam). Keuntungan utama penggunaan *torque box* adalah performa dan kekakuan yang lebih baik saat terjadi angin, sedangkan kerugian utamanya adalah biaya perakitan yang tinggi karena banyaknya struktur profil baja dan tingkat presisi yang tinggi pada model ini.

2. Skala Kecil *Parabolic Trough Collector* (PTC)

Meskipun kebanyakan R&D pada era akhir abad 20 dan awal abad 21 fokus pada pengembangan PTC skala besar untuk pembangkit *solar thermal*, beberapa sistem kecil dikembangkan untuk proses industri panas dengan target suhu sekitaran 300 °C. *Collector* ini dapat menghasilkan panas yang cukup untuk kebutuhan aplikasi proses industri yang dapat menggantikan peran gas alam seperti pengeringan hasil tani dan preparasi makanan. Proses industri seperti produksi *biofuel*, pemurnian air, desalinasi dan pendingin udara model *absorption-chiller* untuk kebutuhan bangunan komersial dan gedung dapat juga memanfaatkan model PTC skala kecil. IST sangat aktif dalam pengembangan beberapa model *collector* dan memasangnya pada beberapa *plant* komersial di USA. Tahun 2007 IST dibeli oleh grup perusahaan dari Spanyol, Abengoa, dan produknya adalah *collector* IST-PT1 dan IST-RMT yang dipasarkan oleh Abengoa Solar IST. Masing-masing jenis *collector* memiliki suhu maksimal sebesar 288 °C dan 204 °C.

Jenis lain dari PTC skala kecil yang digunakan untuk proses industri adalah *collector* PTC-1800 yang dikembangkan oleh perusahaan Jerman-Turki, SOLITEM. Temperatur kerja maksimal dari *collector* model ini adalah 200 °C dengan luasan *collector* sebesar 36.65 m². Perusahaan Australia, NEP Solar, juga mengembangkan PTC skala kecil, PolyTrough-1200, dengan temperatur kerja sekitar 230 °C. Panjang *collector* ini 24 m, dengan lebar 1.2 m, menggunakan komposit *reflector aluminum sheet* yang dapat dipasang pada atap maupun rangka khusus. SOPOGY membuat *module* PTC dengan ukuran panjang 3.7 m dan lebar 1.35 m dengan nama merk Sopenova 4.0 (Gambar 4.6), yang cocok untuk proses industri dan juga

pembangkitan listrik. Tabel 4. memberikan perbandingan tiap model PTC tersebut.



Gambar 4.6 Contoh model Soponova 4.0 [44]

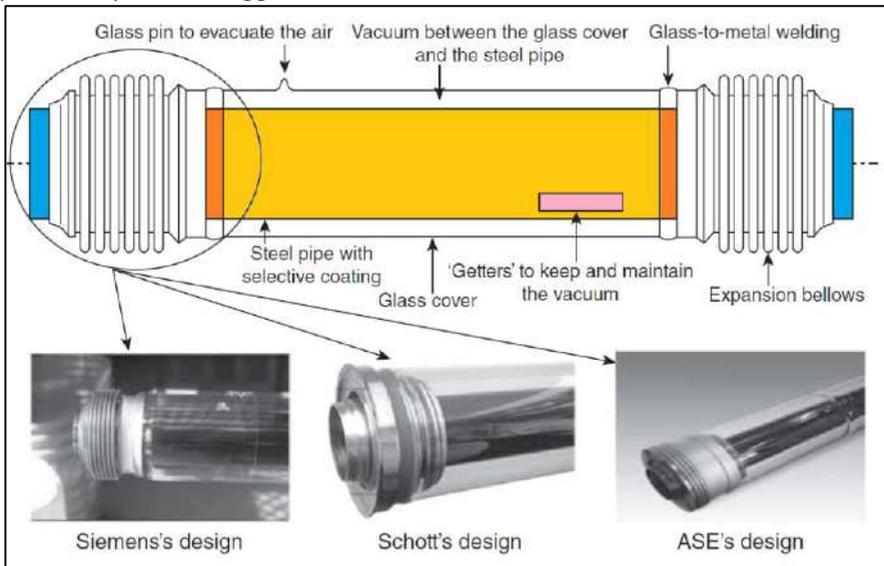
**Tabel 4.4 Parameter teknis untuk model PTC skala kecil
(semuanya *non-evacuated tube*)**

Parameter	IST-RMT	IST-PT1	PCT-1800	Soponova 4.0
Struktur	Baja/Al	Baja/Al	Al	Baja/Al
Reflector	Polished Al	Al acrylic	Al coating (0.5 mm)	Al
Ukuran module	3.66 × 1.13 m	6.1 × 2.69 m	5.09 × 1.8 m	3.66 × 1.52 m
Receiver tube	Black-chrome coating		Selective coating	
T _{max} (°C)	204	288	~200	260

3. Receiver

Model umum dari *receiver tube* untuk PTC biasanya terdiri dari *concentric pipe*, yakni pipa baja bagian dalam yang berisi fluida kerja dan pipa kaca bagian luar yang mengelilingi pipa baja tersebut. Pipa kaca terbuat dari kaca borosilika rendah besi untuk meningkatkan *transmittance* dari radiasi matahari. Permukaan luar dari pipa baja memiliki lapisan khusus dengan kemampuan optik yang baik untuk menyerap radiasi matahari dan memiliki emitasi rendah. Pipa kaca umumnya dilengkapi juga dengan lapisan *anti-reflective* untuk mencapai

transmittance cahaya matahari yang tinggi dan menjaga performa tahunan tetap optimal. *Receiver* untuk PTC dapat diklasifikasikan pada dua kategori yakni *evacuated* dan *non-evacuated*. Model *evacuated* umumnya digunakan untuk temperatur kerja lebih dari 300 °C karena memiliki tingkat kevakuman yang tinggi (sekitar 10^{-5} mbar) di antara pipa baja dan pipa kaca, sehingga kerugian termal dapat diminimalisir dan menjaga efisiensi menyeluruh dari PTC tetap maksimal, khususnya untuk operasi pada temperatur tinggi.



Gambar 4.7 Model umum dari *evacuated receiver* untuk aplikasi PTC [44]

Gambar 4.7 menyajikan model umum dari *receiver* tipe *evacuated* untuk aplikasi PTC. Penutup kaca (pipa kaca) dari *receiver* tersebut dihubungkan dengan pipa baja menggunakan *stainless steel expansion bellow* yang berfungsi untuk mengimbangi perbedaan ekspansi termal antara kaca dan baja ketika *receiver tube* bekerja pada temperatur normal. *Bellow* juga berfungsi untuk menjaga kevakuman di dalam *receiver* dengan menjamin adanya sambungan lingkaran sesak pada bagian ujungnya. Salah satu bagian ujungnya secara langsung disambung dengan metode las ke bagian luar dari pipa baja, dan bagian lain dihubungkan dengan metode sambungan khusus antara kaca dan baja. Terlihat pada Gambar 4.7

“getters” yang ditempatkan di antara pipa baja dan pipa gelas untuk menyerap molekul gas dari fluida kerja yang mungkin keluar dari pipa baja. *Evacuated tube* harganya sangat mahal karena kompleksitas yang tinggi, sehingga penggunaannya hanya untuk suhu tinggi karena dapat mencapai efisiensi yang lebih besar dan biaya yang mahal dapat diimbangi dengan energi luaran yang tinggi.

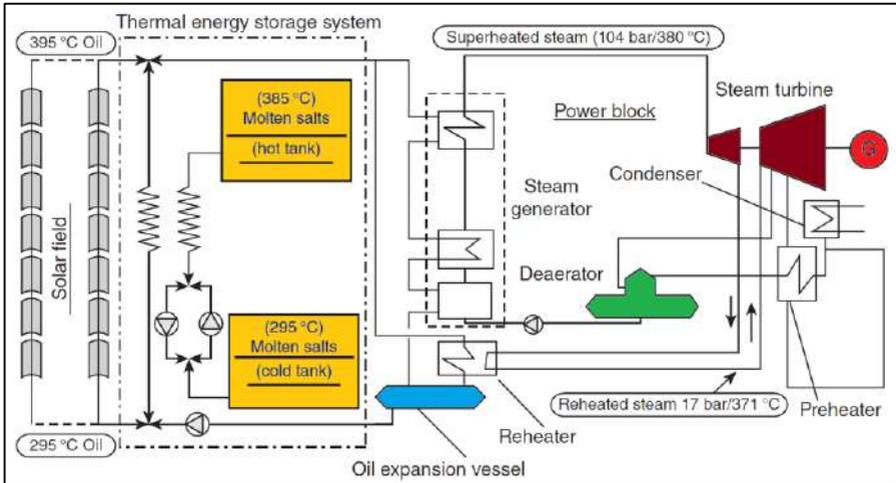
Terdapat tiga perusahaan manufaktur yang memproduksi *evacuated receiver* PTC: Schott, Siemens dan ASE. Gambar 4.7 menunjukkan bagaimana tiga perusahaan tersebut menyambung penutup kaca (pipa kaca) dan bagian dalam pipa baja dengan menggunakan *bellow* fleksibel. Las *glass-to-metal* digunakan untuk menghubungkan penutup kaca ke *bellow* fleksibel merupakan bagian yang rentan pada rakitan *receiver tube* dan harus diberikan proteksi dari radiasi matahari yang terkonsentrasi yang dapat menyebabkan retakan pada sambungan las tersebut akibat adanya *mechanical* dan *thermal stress*. Pelindung dari alumunium biasanya ditempatkan di atas *bellow* fleksibel untuk melindungi sambungan las pada area tersebut. Tabel 4. menyajikan parameter teknis untuk *receiver tube* rakitan ketiga perusahaan tersebut.

Tabel 4.5 Parameter teknis untuk *receiver tube* Schott, Siemens dan ASE

Parameter	Schott PTR-70	Siemens UVAC-2010	ASE HEMS08
<i>Solar absorptance</i>	≥ 0.95	≥ 0.96	≥ 0.95
<i>Solar transmittance</i>	≥ 0.96	≥ 0.96	<i>n.a.</i>
<i>Thermal emittance</i>	$\leq 0.1 @ 400\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 0.09 @ 400\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 0.1 @ 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\leq 0.14 @ 580\text{ }^{\circ}\text{C}$
Pipa baja OD/ID	70/65 (mm)		
Kerugian termal	250 W/m @ 400 °C	<i>n.a.</i>	250 W/m @ 400 °C
Penutup kaca	Borosilika		
HTF T_{max} (°C)	400	400	550

C. PEMBANGKIT TERMAL SOLAR PARABOLIC TROUGH COLLECTOR (PTC)

Gambar 4.8 memperlihatkan model umum untuk tata letak dan sistem kerja CSP model PTC. Fluida kerja yang digunakan merupakan minyak termal. Sistem ini, sebagaimana sudah ditetapkan menjadi standar industri untuk sistem CSP model PTC per tahun 2010, dapat dibagi menjadi tiga (3) subsistem, yakni:



Gambar 4.8 Model tata letak umum untuk sistem CSP model PTC [44]

1. Solar field

Bagian ini merupakan area dimana *concentrator* ditempatkan untuk memantulkan sinar matahari ke *receiver* agar terjadi proses konversi *photothermal*. Panas diserap oleh fluida kerja berdasarkan panas sensibel dari HTF yang digunakan. Fluida bersirkulasi di antara *power block* dan unit TES. *Solar field* terdiri dari barisan *solar collector* yang disusun secara paralel.

2. Thermal Energy Storage (TES) System

Seperti terlihat pada Gambar 4.8 bahwa sistem TES tidak bersifat esensial untuk operasi *plant* karena tidak ada ketergantungan dari TES untuk operasional sistem. Namun demikian, penggunaan TES pada sistem CSP memberikan manfaat yang sangat besar untuk meningkatkan durasi operasi sistem, khususnya pada malam hari.

Lebih lanjut, penggunaan TES sendiri menjadi kestabilan operasi dan suplai energi dari sistem, khususnya saat terjadi mendung dan penurunan temperatur tiba-tiba karena faktor lain. Hal ini berdampak pada tingkat keamanan turbin yang lebih tinggi karena dapat terhindar atau meminimalisir dampak kerusakan akibat operasi yang tidak stabil atau fluktuasi.

3. **Power Block**

Merupakan bagian paling esensial, yakni sebagai unit pembangkit. Bagian ini mengubah energi termal yang dihasilkan oleh *solar field* maupun yang disimpan di TES untuk menjadi listrik. Siklus tenaga yang biasa digunakan adalah Siklus *Rankine*.

Sebagai catatan khusus meskipun tidak terlihat pada skematik di Gambar 4.8, *plant* CSP biasanya dilengkapi pemanas minyak tenaga gas untuk menjaga operasi sistem saat kasus mendung parah dan tidak memiliki cadangan energi di TES. Belajar dari pengalaman pengoperasian sistem SEGS, pemanas minyak biasanya dipasang secara paralel ke *solar field* dikarenakan penempatan pemanas gas dekat dengan *power block* sangat kompleks. Meskipun metode ini memberikan efisiensi yang lebih baik jika ditempatkan dekat dengan *power block*, namun perubahan mode kerja dari pemanas *solar* menjadi pemanas gas sangat rumit.

Pada hari cerah, sistem *solar tracking* (sistem penggerak otomatis dengan cara mendeteksi posisi matahari) mulai bekerja ketika radiasi matahari langsung berada pada rentang 100-300 W/m². Pada menit awal operasi, minyak termal bersirkulasi secara kontinu di *solar field* hingga mencapai target suhu operasi. Ketika sudah mencapai suhu operasi, fluida mengalir ke TES dan *power block*. Selama waktu siang hari ketika musim panas, *plant* dengan TES dapat memproduksi panas yang cukup ke *power block* untuk bekerja pada beban penuh dan di saat yang sama tetap melakukan *charging* (pengisian) ke sistem TES. *Solar collector* biasanya dipasang dengan orientasi sumbu putar utara-selatan, dengan pertimbangan *output* termal dari sistem saat perbedaan musim terjadi kurang lebih sama dengan saat musim panas. Perbedaan utamanya saat musim dingin hanya cukup untuk menjaga kerja *power block* dan tidak

dapat digunakan untuk *charging* TES. Beberapa *plant* CSP model PTC yang pernah dikembangkan dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4.6 Beberapa contoh *plant* CSP model PTC

Nama <i>Plant</i>	Nominal Power (MW_e)	Lokasi
SEGS I–IX	354	California, USA
Solnova I, III dan IV	150	Sevila, Spanyol
Andasol I dan II	100	Granada, Spanyol
Nevada Solar One	64	Nevada, USA
Ibersol Puertollano	50	Puertollano, Spanyol
Alvaradol	50	Badajoz, Spanyol
Extresol I	50	Badajoz, Spanyol
La Florida	50	Badajoz, Spanyol
Archimedes Solar Power Plant	5	Sisilia, Italia
Saguaro Solar Power Station	1	Arizona, USA
Keahole Solar Power Plant	2	Hawai, USA
La Risca	50	Badajoz, Spanyol
Planta Termoel. de Majadas	50	Caceres, Spanyol
La Dehesa	50	Badajoz, Spanyol
Hassi`R Mel–1	20	Laghoutat, Aljazair
Kuraymat	40	Kuraymat, Mesir

D. PARAMETER DASAR PTC

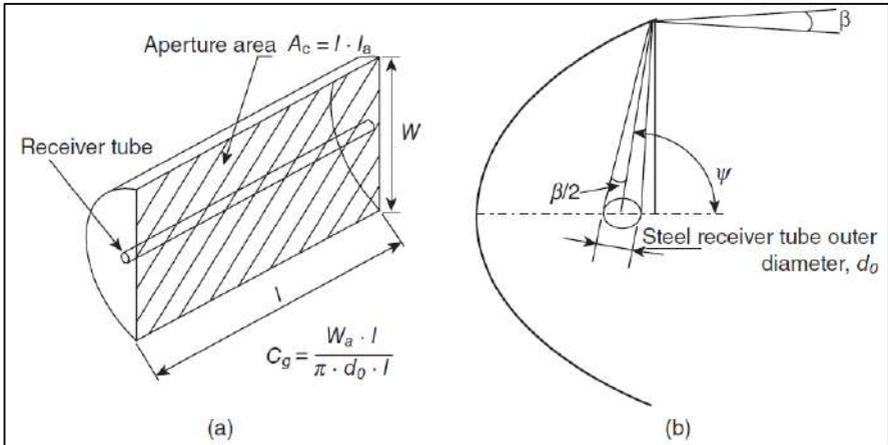
Desain komersial PTC untuk *solar thermal plant* memiliki panjang antara 100 m hingga 150 m, dengan lebar parabola hingga 6 m, menghasilkan luasan area (*aperture*) antara 550 m² hingga sekitar 825 m². Sebagai alat untuk mengumpulkan energi matahari, PTC membutuhkan *solar tracking system* untuk menyesuaikan posisi *concentrator* terhadap gerakan matahari antara waktu terbit hingga terbenam. Pergerakan model PTC hanya dimungkinkan pada satu sumbu saja. PTC harus selalu mendapatkan sinar matahari yang secara tepat dipantulkan untuk *receiver*. Kerugian atau salah perhitungan sudut datangnya matahari dengan posisi PTC dapat menyebabkan kerugian yang sangat parah karena *absorber* tidak dapat menerima panas maksimal. Vektor posisi matahari harus disesuaikan dengan posisi dan algoritma pemantulan antara *concentrator* dengan *absorber*, oleh karena itu dibutuhkan sistem yang dapat bekerja

secara akurat untuk mengatur posisi ini, termasuk juga sistem untuk menjamin model pemantulan yang terjadi sudah sesuai dengan target dan posisi matahari yang tepat.

Parameter paling penting dari PTC meliputi *concentration ratio* (rasio konsentrasi), *acceptance angle* (sudut penerimaan), *rim angle*, dan puncak efisiensi optik. Geometrik *concentration ratio* merupakan rasio antara luas (*aperture*) area *collector* dan total luas area pipa *absorber* (Gambar 4.9). Nilai konsentrasi ini umumnya hanya 25, meskipun secara teoritis dapat mencapai 70. *Concentration ratio* yang tinggi berhubungan erat dengan capaian temperatur. Semakin tinggi nilai *concentration ratio*, semakin tinggi temperatur kerja sistem CSP. Nilai *concentration ratio* dapat diperoleh dengan Persamaan 4.1.

$$C_g = \frac{W \cdot l}{\pi \cdot d_o \cdot l} = \frac{W}{\pi \cdot d_o} \tag{4.1}$$

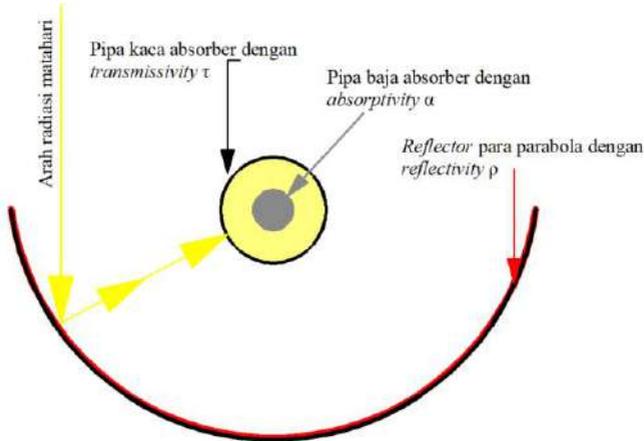
Dimana d_o merupakan diameter luar pipa *absorber*, l merupakan panjang *collector* dan W adalah lebar parabola.



Gambar 4.9 (a) Detail parameter dasar untuk *concentration ratio* (C_g), (b) *acceptance angle* (β), dan *aperture angle* (ψ) untuk PTC [44]

Acceptance angle, β , merupakan nilai sudut maksimal yang dapat dibentuk dari dua sinar yang datang pada arah *transversal* ke permukaan *collector* sedemikian rupa, ketika dipantulkan oleh *reflector*, kedua cahaya

itu saling memotong/menyilang di *absorber*. Semakin lebar nilai *acceptance angle* dari *collector*, maka semakin kecil akurasi dari *solar tracking system*. Nilai *acceptance angle* yang kecil berkaitan dengan *concentration ratio*, yang membutuhkan instalasi yang akurat dari *solar tracking system*, dan tentunya berdampak pada peningkatan biaya instalasi dan peralatan *tracking*. Nilai minimum *acceptance angle* adalah 32' (0.53 °), yang merupakan rerata *solid angle* antara matahari dengan bumi. Oleh karenanya, PTC dengan nilai *acceptance angle* kurang dari nilai minimum tersebut, akan selalu kehilangan fraksi radiasi matahari yang dapat diterima. Desain komersial PTC umumnya menggunakan ukuran *acceptance angle* antara 1-2°, dengan geometrik *concentration ratio* antara 20-30.



Gambar 4.10 Kerugian optik pada *parabolic trough collector*

Rim angle (ψ) secara langsung berhubungan dengan panjang busur *concentrator* dan merupakan fungsi dari jarak *focal* parabola (f) dan lebar permukaan parabola (W), sehingga dapat dihitung dengan Persamaan 4.2.

$$\frac{8 \cdot f \cdot W}{W^2 - 16 \cdot f^2} = \tan \psi \tag{4.2}$$

Biasanya nilai *rim angle* berkisar antara 70–110°. *Rim angle* yang lebih kecil tidak disarankan karena membuat luas permukaan *concentrator* menjadi lebih kecil. *Rim angle* lebih dari 110° tidak efektif berdasarkan

pertimbangan biaya karena harus memperluas ukuran penampang *concentrator* tanpa memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai konversi *photothermal*.

Kerugian optik sangat penting untuk diperhatikan pada *parabolic trough collector* karena nilainya dapat mencapai hingga 25% dari total fluks sinar matahari yang datang ke permukaan *concentrator* PTC. Gambar 4.10 memperlihatkan properti penting terkait dengan kerugian optik pada PTC, yakni:

1. Reflectivity, ρ , dari permukaan reflektif *concentrator*

Nilai *reflectivity* dari permukaan reflektif pada *concentrator* kurang dari 1, maka hanya sebagian dari fluks sinar matahari yang dapat dipantulkan ke arah *receiver tube*. Sebagai gambaran, nilai *reflectivity* dari cermin kaca standar hanya mencapai nilai 0.93.

2. Intercept factor (faktor persinggungan), γ

Sebagian dari sinar matahari yang berhasil dipantulkan oleh *concentrator* tidak dapat mengenai *receiver tube* dikarenakan beberapa faktor seperti adanya cacat mikroskopik pada permukaan reflektif, kesalahan instalasi sehingga tidak menjadi akurat dalam proses pemantulan, deformasi mekanis dari penampang PTC, *bellow* fleksibel atau efek bayangan dari rangka penopang *receiver*.

3. Transmissivity, τ , dari penutup kaca (pipa kaca pada *receiver*)

Pipa baja pada bagian dalam *receiver* dikelilingi oleh pipa kaca untuk meminimalisir kerugian termal. Sebagian fraksi sinar yang dipantulkan dari *concentrator* ke *receiver* tidak dapat menembus ke pipa baja karena ada kemungkinan dipantulkan kembali oleh elemen pada pipa kaca dan faktor lainnya. Nilai rasio antara radiasi yang dapat masuk ke pipa baja (atau dapat menembus pipa kaca) dibandingkan dengan total radiasi yang datang dari *concentrator* disebut dengan *transmissivity* (τ). Nilai umum *transmissivity* adalah 0.93 dan dapat ditingkatkan hingga 0.96 dengan menggunakan *anti-reflective coating* pada pipa kaca.

4. Absorptivity dari pipa baja, α

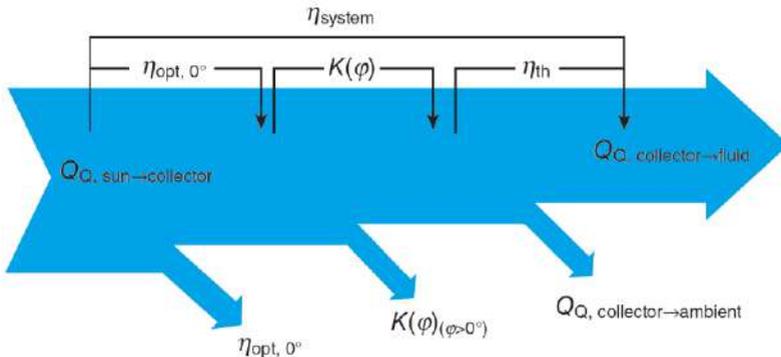
Parameter ini merupakan kuantitas dari banyaknya energi yang diserap oleh pipa baja pada *receiver* terhadap total radiasi yang datang dari sisi luar pipa baja. Nilai ini umumnya dapat mencapai

angka 0.95 jika menggunakan *cermet* (keramik logam) *coating* khusus, dan cenderung lebih rendah jika pipa tersebut dilapisi oleh nikel hitam atau krom.

E. KESETIMBANGAN ENERGI PADA SISTEM PTC

Gambar 4.11 memberikan ilustrasi dari kesetimbangan energi (*energy balance*) pada sistem PTC. Banyaknya energi yang datang dalam bentuk fluks radiasi matahari ke permukaan *concentrator* PTC, $\dot{Q}_{sun_collector}$, ditempatkan pada sisi kiri gambar sebagai energi input. Kemudian, besarnya energi panas efektif yang dikirimkan dari PTC, $\dot{Q}_{collector_fluid}$, ditempatkan pada sisi kanan sebagai representasi energi keluaran. Tiga sumber kehilangan energi pada sistem PTC antara lain:

1. Kerugian optik akibat *reflectivity* dari cermin, *intercept factor*, sifat *transmissivity* pipa kaca, dan *absorptance* dari pipa baja *receiver*
2. Kerugian optik lanjutan dan juga kerugian geometri akibat sudut datangnya sinar lebih dari 0° ($K(\phi)$)
3. Kerugian termal dari pipa *receiver* ke lingkungan, $\dot{Q}_{collector_ambient}$.



Gambar 4.11 Ilustrasi model kesetimbangan energi pada sistem PTC [44]

Mempertimbangkan seluruh aspek pada kesetimbangan energi di sistem PTC sesuai dengan Gambar 4.11, maka efisiensi menyeluruh dari sistem PTC, η_{system} , dihitung berdasarkan rasio bersih antara daya keluaran termal yang diberikan oleh *collector*, $\dot{Q}_{collector_fluid}$, terhadap banyaknya fluks sinar radiasi matahari yang datang ke *concentrator*, $\dot{Q}_{sun_collector}$.

Persamaan 4.3–4.5 menyajikan hubungan matematis seluruh aspek tersebut, yakni:

$$\eta_{system} = \frac{Q_{Q,collector \rightarrow fluid}}{Q_{Q,sun \rightarrow fluid}} \quad 4.3$$

$$\dot{Q}_{sun_collector} = A_c \cdot E_d \cdot \cos(\phi) \quad 4.4$$

$$\dot{Q}_{collector_fluid} = \dot{m} \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad 4.5$$

Dimana nilai A_c adalah luas permukaan *collector*, E_d radiasi matahari langsung, ϕ merupakan sudut datang sinar, \dot{m} adalah laju aliran massa fluida kerja yang mengalir di *receiver*, h_{in} adalah spesifik entalpi dari fluida kerja pada sisi *inlet collector*, dan h_{out} adalah spesifik entalpi dari fluida kerja pada sisi *outlet collector*.

Persamaan 4.5 digunakan ketika PTC sudah beroperasi dan laju aliran massa beserta temperatur dari fluida kerja diketahui. Dikarenakan nilai laju aliran massa dari fluida kerja beserta temperaturnya tidak dapat diketahui saat proses desain, maka total energi termal bersih yang diharapkan dari sistem harus diperhitungkan secara teori berdasarkan prinsip kesetimbangan energi Gambar 4.11. Sebagai tambahan, pertimbangan dari radiasi solar langsung, rerata suhu udara sekitar lokasi, sudut datang sinar, serta parameter optik, termal dan geometri dari PTC juga harus dimasukkan ke dalam perhitungan, sehingga Persamaan 4.5 dapat ditulis menjadi Persamaan 4.6, yakni:

$$\dot{Q}_{collector_fluid} = A_c \cdot E_d \cdot \cos(\phi) \cdot \eta_{opt,0^\circ} \cdot K(\phi) \cdot F_e - \dot{Q}_{collector_ambient} \quad 4.6$$

F_e merupakan *soiling factor*, atau faktor pengotoran. Penempatan *concentrator* pada luar ruangan dapat menyebabkan terjadinya penumpangan kotoran/debu yang mempengaruhi proses pemantulan cahaya dari permukaan *reflector*. Nilai ini diperoleh berdasarkan rerata nilai *reflectivity* dari cermin selama operasi di lapangan dan nilai awal *reflectivity* sebelum digunakan. Sebagai contoh, nilai *reflectivity* awal menunjukkan angka 0.93 dan setelah penggunaan di lapangan serta dibersihkan, nilainya turun menjadi 0.89, maka rerata *reflectivity* dari

kondisi tersebut adalah $(0.93+0.89)/2 = 0.91$, sehingga nilai $F_e = 0.91/0.93 = 0.978$. Nilai F_e untuk PTC komersial biasanya pada rentang $0.95 < F_e < 1$.

Reflector dengan kualitas optik tinggi digunakan untuk operasi PTC dengan suhu tinggi, sejalan dengan proses perakitan yang dilakukan secara presisi, maka nilai terbaik dari efisiensi puncak optik ($\eta_{opt,0^\circ}$) sekitar 0.74-0.79. Efisiensi optik yang tinggi dan kerugian termal yang kecil akibat penggunaan *evacuated tube receiver* menyebabkan capaian efisiensi menyeluruh yang tinggi dari fluida kerja, hingga mencapai 70% dengan suhu operasi 375 °C.

F. DESAIN PLANT CSP MODEL PTC

Plant CSP tipe *parabolic trough collector* (PTC, Gambar 4.12) terdiri dari banyak *concentrator* untuk memaksimalkan kinerja dari *plant*. *Concentrator* ini disusun secara paralel (Gambar 4.13). Beberapa *collector* pada baris yang sama dihubungkan secara seri agar fluida kerja dipanaskan secara kontinu ketika melewati *receiver* dari saluran masuk hingga saluran keluar dengan harapan suhu kerja yang tinggi dapat dicapai. Terdapat tiga tahapan dari desain *plant* PTC, yakni:

1. Tahap 1: Menentukan poin desain, yang merupakan rangkaian asumsi desain yang telah ditetapkan;
2. Tahap 2: Menghitung jumlah *concentrator* yang dihubungkan secara seri untuk tiap baris paralel;
3. Tahap 3: Menghitung banyaknya baris paralel yang akan dipasang pada *plant solar field*.



Gambar 4.12 *Plant* CSP model PTC [46]

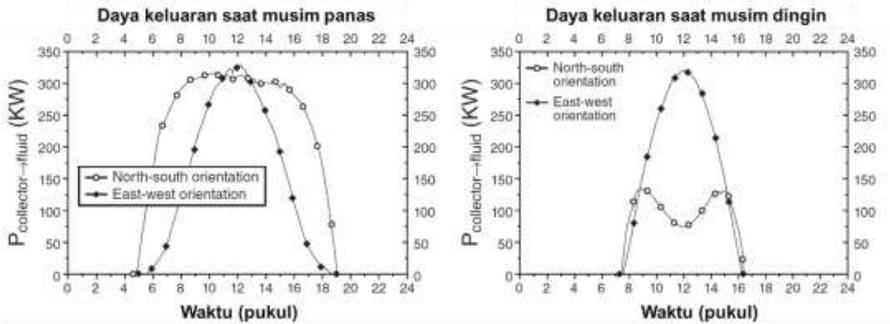
Pada tahap 1, desainer dari *solar field* harus mempertimbangkan cuaca setempat, parameter dari desain PTC yang dipilih dan juga kebutuhan dari pengguna. Karena energi matahari tidak bersifat konstan, maka energi termal yang dihasilkan dari *plant* juga tidak akan konstan. Berarti, akan ada fluktuasi daya termal yang diberikan dari *plant* yang bisa jadi lebih tinggi (misalnya saat terik) maupun lebih rendah (misalnya saat mendung parah, karena kalau saat malam pasti sudah diperhitungkan di proses desain) dari target yang ditetapkan. *Solar fields* menghasilkan daya yang dikehendaki sesuai dengan target daya yang ditetapkan saat proses desain apabila kondisi kerja dan parameternya sama dengan asumsi awal yang digunakan. Parameter dan kondisi kerja yang biasanya dipertimbangkan saat awal meliputi:

1. Orientasi susunan *collector*
2. Tanggal (hari, bulan) dan waktu acuan desain
3. Koordinat lokasi (lintang dan bujur)
4. Radiasi matahari langsung (DNI, *direct normal irradiance*) dan rerata suhu udara sekitar berdasarkan tanggal dan waktu desain acuan
5. Target total daya termal yang dihasilkan oleh *solar field*
6. *Soiling factor* dari *solar field* pada lokasi tersebut
7. Target suhu masuk/keluar dari *solar field*
8. Fluida kerja yang digunakan
9. Target debit aliran fluida kerja.



Gambar 4.13 Model susunan PTC secara paralel [47]

Orientasi *collector* merupakan hal paling esensial dari proses desain pada tahap 1. Hal ini dikarenakan pertimbangan musim yang dapat mempengaruhi performa dari *plant* PTC. Sebagai contoh, Gambar 4.14 memperlihatkan daya keluaran rerata dari model umum PTC yang ditempatkan di bagian selatan Spanyol pada saat kondisi cerah di musim panas (a) dan musim dingin (b) yang menggunakan dua pendekatan sumbu orientasi (utara-selatan dan timur-barat). Terlihat pengaruh dari sumbu orientasi terhadap daya keluaran sistem, dimana variasi yang tinggi antara daya keluaran saat musim panas dengan musim dingin ketika menggunakan orientasi sumbu utara-selatan. Dari kondisi ini terlihat bahwa puncak daya keluaran saat musim dingin kurang dari 50% daya puncak dari musim panas, sedangkan untuk sumbu orientasi timur-barat cenderung tidak dipengaruhi oleh musim (daya keluaran rerata tetap sama antara musim panas dan dingin). Akan tetapi, musim panas cenderung lebih panjang dan lebih cerah, sehingga orientasi utara-selatan memiliki luasan daya tahunan yang lebih tinggi.



Gambar 4.14 Rerata daya keluaran dari model EuroTrough-100 pada lokasi spesifik [39]

Desainer dari *solar field* harus memperhitungkan dengan cermat untuk penetapan sumbu orientasi *collector* dikarenakan adanya pengaruh musim yang cukup signifikan. Termasuk juga jika penempatan di lokasi dengan garis khatulistiwa karena memiliki nilai lintang yang berbeda dibanding kebanyakan *plant* CSP yang sudah dibangun (berada pada rentang lintang 20-40° utara). Kebutuhan daerah juga dapat diperhitungkan untuk menentukan kapan daya maksimal dari *plant* sangat

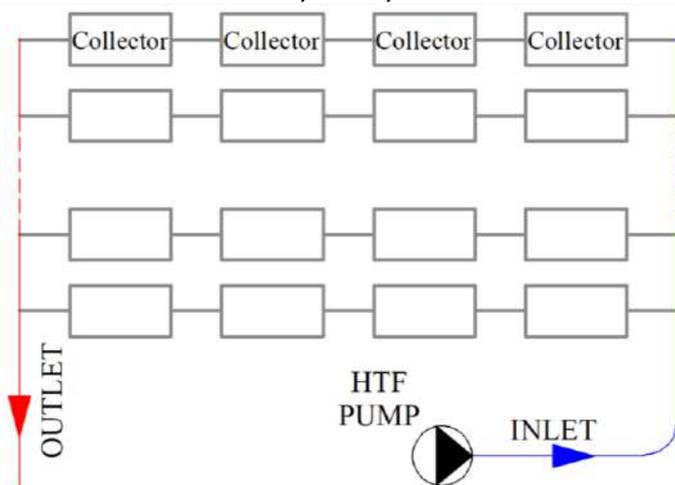
dibutuhkan. Sebagai contoh, pertimbangan lanjutan untuk menggunakan sumbu orientasi utara-selatan pada contoh di atas adalah kebutuhan listrik yang cenderung tinggi saat musim panas untuk keperluan penyejuk udara. Ketika adanya kenaikan permintaan, maka harga listrik akan lebih mahal, dan ini bisa menjadi pertimbangan penting untuk operasional *plant*.

Pada tahap 2, penentuan waktu dan tanggal operasi diperhitungkan yang biasanya dilakukan saat siang hari di musim panas dengan asumsi puncak energi ada pada saat ini (misalnya tanggal 21 Juni {*vernal equinox*} untuk belahan bumi utara). Pertimbangan lainnya adalah untuk menghindari salah perhitungan kapasitas TES yang digunakan karena jika penentuan waktu dan tanggal dilakukan saat musim dingin, maka akan dibutuhkan kapasitas TES yang lebih besar dan akan menjadi berlebihan saat nanti musim panas. Setelah penentuan waktu dan tanggal, penentuan lokasi dilakukan dan biasanya sudah ditetapkan oleh klien. Desainer *solar field* lebih fokus kepada pengumpulan data meteorologi yang dilakukan secara empiris maupun dari laporan tahunan yang dikumpulkan oleh stasiun meteorologi setempat.

Penentuan target daya termal keluaran dari *solar field* dan juga temperatur masuk/keluar dari fluida kerja harus dipertimbangkan berdasarkan kebutuhan, apakah untuk keperluan pembangkitan atau keperluan proses industri. Untuk keperluan pembangkitan, biasanya desain suhu masuk/keluar fluida kerja adalah 293°C/393°C karena adanya batasan temperatur kerja dari minyak termal yang digunakan. Untuk keperluan proses industri, suhu keluaran fluida kerja dari *solar field* harus lebih tinggi paling tidak 15 °C dari suhu uap yang dibutuhkan untuk keperluan proses industri. Sebagai contoh, jika proses industri membutuhkan uap dengan suhu 305 °C, maka minyak termal dari *solar field* paling tidak harus mencapai suhu 320 °C. Hal ini bertujuan untuk mengimbangi segala kemungkinan kerugian termal dalam proses distribusi antara *solar field* dan *steam generator*.

Penentuan dari jenis fluida kerja yang digunakan (HTF) untuk *solar field* PTC juga masuk ke dalam tahap desain. Fluida fasa tunggal memiliki koefisien perpindahan panas terbaik dan operasi yang stabil. Minyak termal umumnya digunakan untuk PTC dengan suhu operasi di atas 200 °C. Air digunakan juga sebagai fluida kerja dan dijaga fasanya agar tetap cair

dengan cara menaikkan tekanan sistem di dalam *receiver*. Akan tetapi, tekanan yang lebih tinggi membutuhkan komponen tambahan, penguatan pada sambungan dan pemipaan yang pada akhirnya menaikkan biaya operasi *plant* PTC. Untuk operasi pada suhu di bawah 200 °C, alternatif campuran air/etilena glikol maupun air murni bertekanan bisa digunakan karena tidak membutuhkan tekanan yang besar untuk menjaga fasa fluida tetap cair untuk kebutuhan suhu ini. Konversi langsung air cair menjadi uap jenuh tekanan tinggi atau *superheated* juga dapat dipertimbangkan dan model ini sudah terbukti kelayakannya.

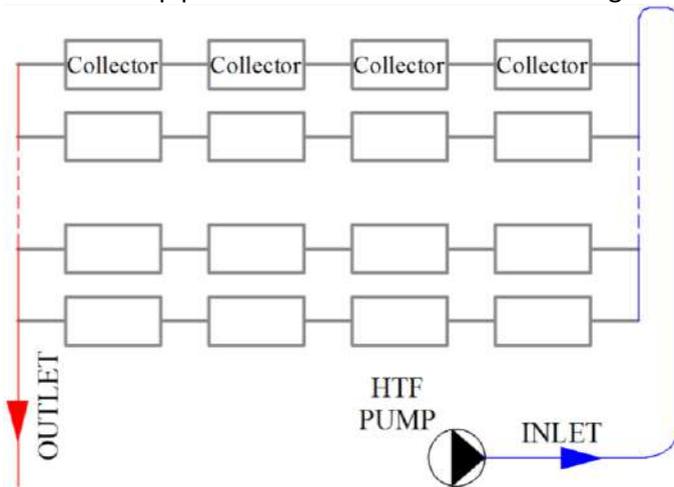


Gambar 4.15 Model tata letak *direct return* untuk *plant* CSP model PTC

Plant CSP model PTC skala besar memiliki jaringan *collector* yang dapat mencapai panjang total 80 km jika disusun secara seri yang menjadi pertimbangan penting dalam penentuan tata letak model paralel. Terlebih, distribusi yang terlalu panjang juga dapat menyebabkan kerugian panas selama fluida mengalir dan penurunan tekanan, yang berdampak pada kenaikan ongkos listrik untuk pompa dan penurunan efisiensi termal sistem. Sehingga, pengaturan tata letak harus dilakukan seefektif mungkin untuk memaksimalkan serapan panas dan meminimalisir biaya operasi. Terdapat tiga tata letak dasar dari *plant* CSP model PTC yang umum dikembangkan, yakni: *direct return*, *reverse return* dan *center feed* (Gambar 4.15-Gambar 4.17). Tiap model tata letak memiliki kesamaan

dimana saluran pipa *outlet* (minyak panas) selalu lebih pendek dibandingkan dengan saluran pipa masuk (minyak dingin) untuk meminimalisir kerugian termal. Tiap jenis susunan memiliki keunggulan dan kekurangan masing-masing.

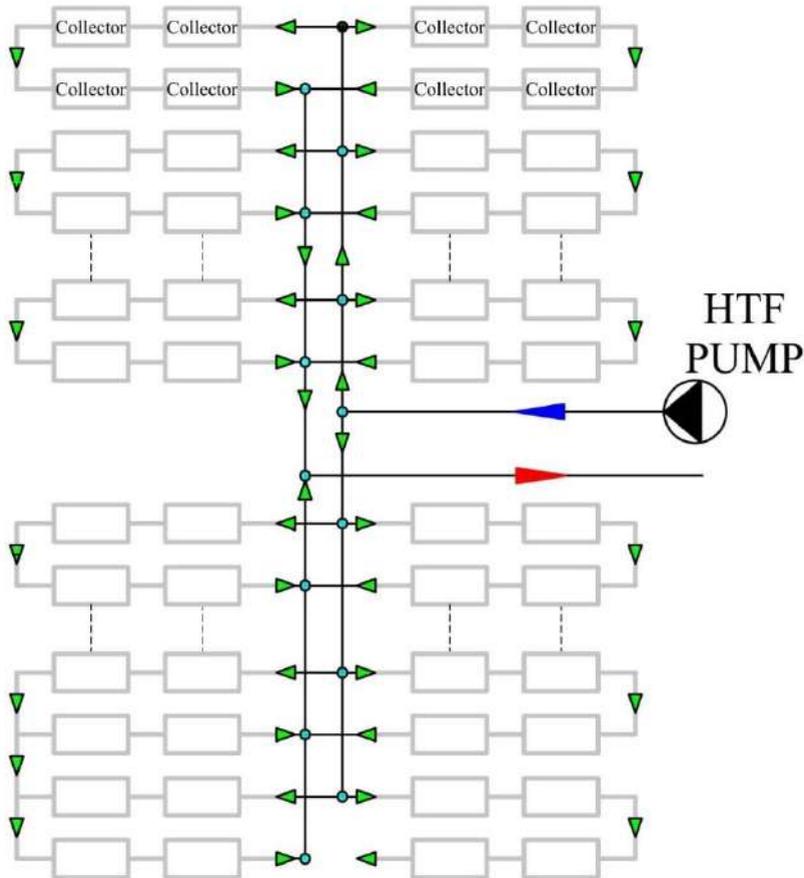
Model tata letak *direct return* (Gambar 4.15) merupakan model yang paling sederhana dan digunakan pada hampir seluruh *solar field* skala kecil. Kerugian utama konfigurasi ini adalah perbedaan tekanan yang terlalu besar di antar saluran masuk susunan paralel *concentrator*, sehingga katup manual harus dipasang untuk menjaga aliran tetap konstan pada tiap susunan seri *concentrator*. Di sisi lain, kehadiran katup tersebut menyebabkan adanya penurunan tekanan pada tiap saluran, yang berkontribusi terhadap penurunan tekanan sistem secara signifikan.



Gambar 4.16 Model tata letak *reverse return* untuk *plant* CSP model PTC

Penurunan tekanan ini berdampak pada konsumsi energi yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi *reverse return* (Gambar 4.16), dimana fluida kerja masuk ke susunan *collector* di ujung yang berlawanan dan baris yang memiliki saluran masuk yang lebih panjang akan memiliki saluran keluar yang lebih pendek, sehingga memberikan penurunan tekanan yang lebih merata untuk tiap baris. Permasalahan utama konfigurasi ini adalah adanya kenaikan yang signifikan terkait panjang saluran pemipaan yang secara langsung berhubungan dengan kerugian

termal selama proses distribusi, meskipun tidak terlalu masalah jika *plant* beroperasi secara maksimal saat hari cerah. Modifikasi tambahan juga dilakukan untuk konfigurasi *reverse return* untuk menjamin aliran yang seragam pada tiap pipa, yakni dengan menyesuaikan ukuran *diameter* pipa.



Gambar 4.17 Model tata letak *center feed* untuk *plant* CSP model PTC

Konfigurasi *center feed* diperlihatkan pada Gambar 4.17 yang umumnya digunakan untuk *plant* CSP model PTC skala besar. Layaknya model *direct return*, kerugian tekanan pada *solar field* akan tinggi jika

penggunaan katup penyeimbang pada saluran masuk tiap baris. Konfigurasi *center feed* dapat mengurangi panjang pemipaan karena tidak ada pipa yang mengalir sepanjang baris *collector*. Selain itu, akses langsung ke tiap *baris collector* sangat mungkin dilakukan tanpa harus menggunakan pipa bawah tanah. Keuntungan ini yang menyebabkan penggunaan *center feed* untuk *plant* skala besar digemari karena memberikan akses yang mudah untuk proses perawatan dan pencucian *collector*. Catatan penting yang harus diperhatikan adalah penggunaan insulasi termal harus optimal untuk pemipaan guna menghindari kerugian termal selama proses operasi. Selain itu, saluran kuras dan katup pembuangan juga harus disediakan agar tidak ada gelembung udara yang terperangkap di dalam sistem dan kemudahan dalam proses instalasi serta perawatan sistem. Terakhir, minyak termal memiliki sifat mampu bakar dan polusi tinggi untuk lingkungan, sehingga penanganannya harus hati-hati.

G. OPERATION DAN MAINTENANCE (O&M)

Keuntungan utama pembangkit *solar plant* dan seluruh pembangkit dari sumber *renewable energy* adalah tidak memperhitungkan biaya bahan bakar karena energi diperoleh dari alam. Meskipun demikian, tantangan biaya terbesar datang dari kegiatan *operation* dan *maintenance* yang meliputi pekerja dan penggunaan alat spesifik selama kegiatan. Kegiatan O&M yang paling sering dilakukan untuk *solar field* adalah pengukuran berkala untuk tingkat reflektivitas cermin dan pembersihan. Reflektivitas cermin secara langsung berdampak pada banyaknya energi termal yang dapat dikumpulkan oleh *collector*, karena kenaikan 10% tingkat reflektivitas cermin berarti kenaikan 10% untuk energi termal yang dapat diproduksi, dan sebaliknya. Debu yang dibawa udara secara terus-menerus akan bertumpuk di bagian permukaan cermin dan secara signifikan dapat mengurangi reflektivitas. Tingkat reflektivitas cermin kaca standar sebesar 0.93. Pengotoran (*soiling*) dari cermin sangat bergantung pada spesifikasi lokasi penempatan *plant*. Sebagai contoh, di Spanyol saat musim panas, terjadi penurunan reflektivitas cermin dengan laju harian sebesar 0.0025% selama dua minggu pertama setelah pencucian akhir. Artinya, dalam waktu 10 hari, tingkat reflektivitas cermin akan turun

hingga 0.90 sehingga cermin itu harus dicuci lagi untuk menjamin suplai energi tetap optimal. Saat musim dingin kasus *soiling* tidak begitu parah dan kadang tidak dibutuhkan pencucian selama periode ini.

Metode pencucian cermin dilakukan secara khusus untuk *plant* CSP. Air demineralisasi diangkut menggunakan truk tangki dan memompanya dengan tekanan hingga 200 bar untuk menghilangkan debu yang menempel pada cermin. Gambar 4.18 a) memperlihatkan alat khusus untuk pembersih cermin yang digunakan di *plant* SEGS. Ketika cermin tidak terlalu kotor dan tidak banyak mengalami penumpukan, maka semburan air biasa dengan bantuan truk sudah cukup dilakukan (Gambar 4.18 b). Konsumsi air demineralisasi untuk *plant* CSP sekitar 0.7 l/m². Meskipun foto di Gambar 4.18 memperlihatkan proses pencucian saat pagi hari, biasanya kegiatan ini dilakukan di malam hari untuk menjamin operasi *plant* yang efektif pada siang hari.



Gambar 4.18 Metode pembersihan cermin di *plant* CSP, a) *robotic arm*, b) manual [48]

Sebagai suatu kesatuan unit energi, penyimpanan energi memiliki nilai-nilai tersendiri yang menjadi tolak ukur untuk proses desain, penggunaan dan juga asesmen rencana penggunaan. Nilai parameter ini sangat penting untuk diketahui dari suatu media penyimpanan energi karena akan berpengaruh terhadap rencana aplikasi dan juga modal (*capital cost*) yang dibutuhkan. Sebelum masuk lebih mendalam, perhatikan dua ilustrasi di bawah ini untuk memberikan pemahaman mendasar tentang parameter operasi penyimpanan energi.

Kegiatan perawatan *solar field* lainnya adalah pengecekan posisi kelurusan dari *collector* dan *solar tracking system*. Perubahan kecil dari fondasi beton atau malfungsi pada *tracking system* dapat menyebabkan posisi yang tidak tepat antara *collector* dan *receiver* sehingga mengurangi *intercept factor*. Terakhir adalah minyak termal yang digunakan harus diperhatikan parameter kerjanya dan kondisi yang optimal untuk tiap tahun penggunaan. Sampel diambil dari minyak termal yang digunakan kemudian dikirim ke *supplier* yang bertanggung jawab untuk keperluan analisis. Meskipun secara teori durabilitas minyak termal yang digunakan pada *plant* sangat baik, temperatur penggunaan maksimal dari minyak tersebut tidak boleh dilewati karena dapat menyebabkan degradasi kualitas yang berakibat pada penggantian minyak yang terlalu sering di tiap tahun operasi. Dengan O&M yang sesuai, kurang dari 3% minyak termal harus diganti tiap tahunnya, dan jika operasi melebihi batasan temperatur maksimal, nilai yang diganti dapat mencapai lebih dari 20%.

H. TREN DI MASA MENDATANG UNTUK PTC

Plant CSP model PTC cukup menguntungkan di beberapa Negara dikarenakan adanya insentif khusus. Namun, tetap dibutuhkan peningkatan kualitas sistem, efisiensi energi dan juga metode untuk O&M dari *plant* agar biaya produksi tetap dibuat serendah mungkin dan menghasilkan listrik yang murah dari sumber yang bersih. Nilai insentif yang diberikan berangsur turun pada tahun mendatang dikarenakan insentif pada awal proyek bertujuan untuk meyakinkan para investor bahwa proyek *plant* CSP model PTC sangat layak dan menguntungkan. Dikarenakan adanya kebutuhan untuk perbaikan tersebut, banyak perusahaan dan akademisi yang fokus pada *Research and Development* (R&D) untuk *plant* CSP model PTC dengan harapan dapat membuat produksi listrik dari sistem ini lebih murah dan semakin handal. Pengembangan yang dilakukan juga dimotivasi oleh semakin tingginya permintaan untuk energi bersih melalui teknologi yang memang sudah terbukti, seperti *plant* CSP model PTC ini.

I. KESIMPULAN BAGIAN IV

Terbukti bahwa penerapan teknologi tidak bisa dilakukan secara *simsalabim*, melainkan butuh waktu dan proses terstruktur untuk mencapai tingkat kelayakan dari teknologi yang dikembangkan. Model awal PTC mengalami perubahan yang signifikan, namun secara konsep tetap sama yakni sebagai pengumpul energi panas matahari. Penyesuaian aplikasi dilakukan untuk panas yang dihasilkan, apakah digunakan untuk kebutuhan pembangkitan listrik ataupun kebutuhan panas proses industri. Apapun bentuk akhir penggunaannya, konsep pemanfaatan *renewable energy* dilakukan dengan serius sebagai bentuk pengurangan konsumsi bahan bakar fosil.

Perbaikan secara kontinu dilakukan untuk *plant* CSP model PTC. Entah terkait dengan teknologi dan rekayasa material untuk seluruh bagian sistem, maupun pemodelan dan penentuan metode O&M yang sesuai. Tren ini juga bertujuan membuat tarif dasar listrik yang dihasilkan agar lebih murah sehingga dapat lebih menarik minat investor. Dukungan pemerintah sebagai *initiator* proyek merupakan langkah yang tepat karena dapat dijadikan titik tolak untuk teknologi yang sudah siap, sehingga investor tertarik untuk bergabung dan mendirikan proyek yang sama. Pemenuhan tenaga kerja dan *professional* juga harus disiapkan oleh sekolah vokasi maupun pendidikan tinggi dengan cara menerapkan model kurikulum yang sesuai dan mengikuti perkembangan pada masa sekarang.



BAB
5

SOLAR TOWER SYSTEM

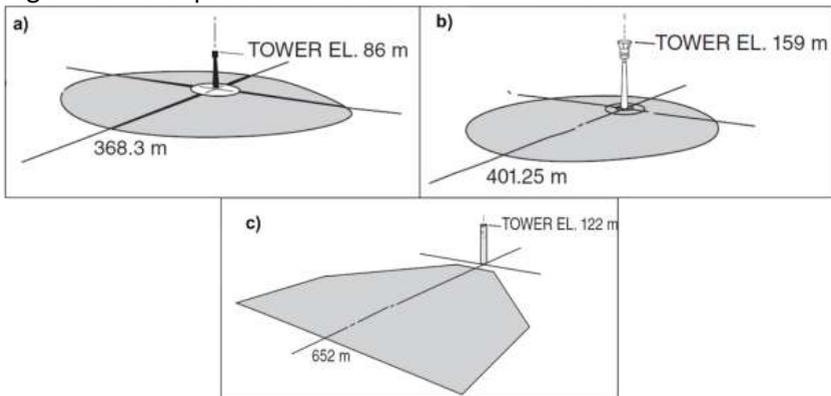
A. PENGANTAR SOLAR TOWER SYSTEM

Solar tower, kadang disebut *central receiver*, merupakan model *focus point concentrated solar power* yang terdiri dari banyak susunan cermin kecil atau *heliostat* yang disusun sedemikian rupa untuk menghindari *intercept factor* antar cermin maupun singgungan mekanis lainnya. Seluruh cermin memantulkan cahaya matahari yang datang ke satu lokasi *receiver* berupa *tower* yang ditinggikan untuk menerima seluruh pantulan dari cermin *heliostat*. *Receiver* secara cermat didesain untuk menyerap cahaya matahari dan mengubahnya menjadi panas yang dapat mencapai temperatur tinggi. Panas yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk keperluan mesin kalor sebagai pembangkit maupun kebutuhan panas untuk proses industri.

Keuntungan utama *solar tower* adalah seluruh proses konversi energi terjadi di lokasi yang sama yakni *receiver* pada *central tower*. Hal ini menguntungkan karena *receiver* dibuat secara permanen, tidak membutuhkan jaringan distribusi energi yang kompleks, dan memiliki nilai investasi yang lebih menarik untuk meningkatkan efisiensi dan penyempurnaan proses konversi energi. Model *solar tower* skala besar banyak dibangun untuk kebutuhan pembangkit listrik melalui siklus tenaga uap, dan ada sedikit tren yang menunjukkan untuk aplikasi skala kecil dengan menggunakan beberapa *tower* kecil.

B. KONFIGURASI DASAR

Konfigurasi dari *solar tower* sangat ditentukan dengan posisi *receiver* dan bisa dibentuk kepada tiga konfigurasi dasar (Gambar 5.1). Jika *receiver* terdiri dari sebuah *external cylinder*, permukaan yang berfungsi untuk menyerap cahaya dapat dilihat dari seluruh sisi, membuat *heliostats* dapat ditempatkan mengelilingi *solar field* berdasarkan pertimbangan efektivitas untuk memantulkan cahaya matahari ke *receiver*. Model pada Gambar 5.1a, yakni model McDonnell Douglass memiliki luasan area 29.5 ha dengan jumlah *heliostats* sebanyak 1760 buah. Keuntungan utama dapat dilihat berdasarkan tinggi *tower* yang lebih rendah sehingga biaya pembuatan *tower* dan *piping* menjadi lebih hemat. Permasalahan utamanya adalah risiko kerugian panas sangat tinggi karena permukaan *receiver* kembali meradiasikan panas yang ada yang diperparah dengan kerugian konveksi pada sistem distribusi HTF internal.



Gambar 5.1 Sketsa model tata letak *plant solar tower*, a) McDonnell Douglas, b) Honeywell, c) Martin Marietta [49]

Alternatif yang dapat dikembangkan adalah penggunaan *cavity receiver* dimana permukaan yang dipanaskan berada pada satu tempat yang diisolasi (Gambar 5.1b dan Gambar 5.1c). Kondisi ini berdampak pada model penyusunan *heliostats* dikarenakan cahaya yang dikumpulkan hanya efektif pada sisi tertentu saja sehingga tidak memerlukan penyebaran area *heliostats* yang mengelilingi *tower*. Gambar 5.1b merupakan model HoneyWell yang memiliki luasan area 206 ha dan jumlah *heliostats* sebanyak 1598, sedangkan Gambar 5.1c adalah model

Martin Marietta dengan luas area sebesar 33.7 ha dan jumlah *heliostats* sebanyak 1555. Namun pun demikian, model ini mengharuskan penempatan *tower* yang lebih tinggi dan luasan area yang lebih besar. Terlihat untuk model HoneyWell dan Martin Marietta memiliki tinggi *tower* masing-masing 159 m dan 122 m dengan luasan area yang lebih besar dari model pertama (Gambar 5.1a).

Cavity receiver memiliki peran penting ketika *output* temperatur yang dibutuhkan sangat tinggi (lebih dari 1,000 K). Lebih lanjut, *cavity receiver* memiliki kerugian termal yang lebih kecil dibandingkan dengan *external cylinder*. Bentuk topografi wilayah menjadi tantangan sendiri untuk *tower* dengan *cavity receiver* karena posisi dari *cavity receiver* harus sedikit menunduk ke arah bawah. Alternatifnya adalah penggunaan beberapa *cavity receiver* untuk satu *tower* yang ditempatkan pada arah berbeda berdasarkan titik pemantulan *heliostats* (misalnya: timur laut, barat laut, timur, utara dan selatan).

C. PERKEMBANGAN AWAL SOLAR TOWER

Energi matahari dalam bentuk panas akan berguna berdasarkan perspektif termodinamika apabila suhunya di atas 100 °C, sehingga membutuhkan *tracking system* untuk menjamin suplai yang kontinu. Untuk dapat menghasilkan jumlah *energy* yang signifikan sebagai nilai yang berguna, baik untuk keperluan pembangkitan listrik maupun proses industri, *solar collector* harus berjumlah banyak dan dapat mencapai luasan hingga beberapa kilometer dikarenakan densitas energi matahari yang sangat kecil. Dengan demikian, model *solar tracking* yang dikembangkan tidak dapat menggunakan struktur *monolithic*. Konsep awal yang dikembangkan adalah menggunakan *point focus (dish) collector* maupun *line focus collector* untuk mencapai target luaran tersebut. Metode ini membutuhkan beberapa sistem yang fokus pada pengumpulan energi matahari (*solar field*) dan jaringan distribusi energi untuk menyerap panas pada *solar field* dan mengirimnya ke bagian yang membutuhkan (*thermal load*).

Ide revolusioner dicetuskan oleh Victor Baum (Rusia, 1957) yakni dengan memecah bagian *collector* menjadi beberapa segi bagian kecil yang ditanam di tanah dan memproyeksikan pantulan ke arah satu

receiver tunggal. Segmen *collector*, *heliostats*, dapat secara mandiri melakukan *tracking* pergerakan matahari untuk menjaga proses pemantulan yang optimal ke arah *receiver*. Ide yang diteruskan adalah menggunakan sebuah rel khusus dimana reflektor dipasang pada rel tersebut dan bekerja dengan mengelilingi matahari sesuai dengan posisi matahari. Namun karena ide ini tidak mendapatkan pendanaan, maka tidak dikembangkan lebih lanjut. Selanjutnya konsep ini dikembangkan oleh Professor Giovanni Francia (Italia, 1968) menggunakan sistem mekanis dengan cara kerja yang sama dengan sistem pergerakan jam untuk mengatur posisi *collector* ke arah *receiver*. Beberapa pengaturan manual diperlukan tiap minggu untuk menyesuaikan posisi pantulan *collector* ke arah *receiver*.



Gambar 5.2 Fasilitas *solar furnace* di Prancis kapasitas 1 MW [42]

Ide revolusioner lainnya dicetuskan oleh Professor Felix Trombe (Prancis, 1950an) yang membuat beberapa *solar furnace* (tungku matahari) dengan menggunakan sebuah cermin tunggal dengan *tracking system*. Kapasitas terbesar yang dibuatnya adalah 1 MW_{th} (Gambar 5.2). Parabola dengan luasan area $\approx 2,000 \text{ m}^2$ diarahkan ke sebuah Gedung yang tepat berada di depan parabola dengan jarak *focal point* yang sesuai yakni 30 m.

Kemudian, dia memecah bagian cermin seluas 2,835 m² menjadi bentuk *heliostat* dengan ukuran 45 m² untuk mengisi bentuk parabola yang telah dibuat. Pekerjaan yang membutuhkan tingkat kepresisian yang tinggi ini tidak sia-sia. Hasil yang signifikan dicapai dimana nilai puncak kerapatan fluks mencapai hingga ~ 13,500 *suns*.

D. FASILITAS UJI COBA INTERNASIONAL DAN PILOT PLANT

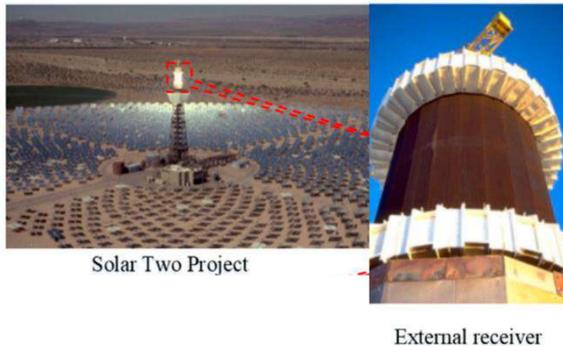
Pada tahun 1980 sampai 1990, beberapa fasilitas uji coba internasional dan *pilot plant* dibuat dan dioperasikan (Tabel 5.1). Karena ukurannya yang relatif kecil (kecuali model Solar One dan Solar Two), desain “*north field*” digunakan (untuk belahan bumi utara) dengan menerapkan panel datar atau *cavity receiver* berukuran kecil. Fasilitas ini memberikan pengalaman baru terkait dengan berbagai macam model *heliostats* dan juga fluida kerja (HTF) yang meliputi minyak termal, uap air, *molten salt* dan *sodium*. Kebanyakan dari fasilitas ini menggunakan unit TES skala kecil yang diperuntukkan pembangkitan listrik, meskipun tujuan pembangunan bukan fokus pada aspek komersial. Banyak pelajaran yang bisa diterima dari fasilitas yang sudah diujicobakan, seperti model sistem kendali, *heliostats*, pompa, katup, *receiver* dan tentunya fluida kerja. Pelajaran yang paling penting sebenarnya adalah dari proses pemilihan komponen yang saat itu fokus pada produk komersial yang tersedia, dan bukan didesain secara spesifik untuk kebutuhan *solar power system* skala besar. Kadang produk tersebut didesain untuk tahan terhadap beberapa ratus hingga ribu siklus termal selama proyeksi usia hidupnya, namun *solar plant* memiliki siklus harian yang lebih dari sekali, sehingga usia “hidup” nya hanya bertahan selama satu sampai dua tahun, dan berakhir dengan kegagalan.

Tabel 5.1 Ringkasan beberapa model demonstrasi *solar tower* yang sudah dikembangkan untuk keperluan pembangkit listrik

Info	Eurolys	Sunshine	ISA-CRS	Solar One	Solar Two	CESA 1	Themis	MSEF	SFS 3
Negara	Italia	Jepang	Spainyol	USA	USA	Spainyol	Petancis	USA	Rusia
Kapasitas Turbin	1 MW _t	1 MW _t	0.5 MW _t	10 MW _t	10 MW _t	1.2 MW _t	2.5 MW _t	0.75 MW _t	~
Kapasitas Termal	~	5.95 MW _t	7.7 MW _t	43.4 MW _t	56 MW _t	7.7 MW _t	8.9 MW _t	5.5 MW _t	5 MW _t
Radiasi (W/m ²)	850	750	7,920	950	950	700	1,040	~1,000	800
Luas <i>reflector</i> (m ²)	6,260	12,912	3,655	71,095	81,344	11,880	10,740	7,845	40,584
Luas lahan (ha)	3.5	~ 2	~ 2	29.1	35	7.7	~ 2		
Tinggi <i>receiver</i> (m)	55	69	43	80	80	60	106	61	80
<i>Receiver</i>	<i>Cavity</i>	<i>Cone/Cavity</i>	<i>Cavity</i>	<i>External cylinder</i>	<i>External cylinder</i>	<i>Cavity</i>	<i>Cavity</i>	<i>Cavity</i>	<i>External</i>
HTF	Air/uap	Air/uap	Sodium	Air/uap	Molten Salt	Air/uap	Molten salt	Molten salt	Uap/air
Kapasitas TES (MWh _{th})	0.036	3	1.0	28	107	3.5	12.5	2.5	1.5

E. STUDI KASUS: PROYEK SOLAR ONE DAN SOLAR TWO, CALIFORNIA, USA

Model *central receiver* dari proyek Solar One dan Solar Two di gurun Mojave, California, layak mendapatkan perhatian lebih sebagai contoh kasus perkembangan *solar tower system*. Sistem pada Solar One dan Solar Two memberikan representasi penting dari *milestone* perkembangan proyek *solar tower* dan menjadi contoh ideal dari *pilot plant* sebelum masuk ke pasar komersial. Permulaan proyek ini dibangun dengan nama *plant "Solar One"*, yang kemudian dikonfigurasi ulang dan *dilansir* kembali sebagai *"Solar Two"* (Gambar 5.3). Pengalaman dan pelajaran dari pendirian proyek ini merupakan tonggak penting dari model komersial yang ada pada saat sekarang untuk *plant solar tower*.



Gambar 5.3 Fasilitas Solar Two dengan kapasitas 28 MWth [50]

Tahun 1973, pendanaan dari National Science Foundation di USA diberikan untuk University of Houston dalam rangka uji kelayakan dari *"Solar Thermal Power System Based on Optical Transmission"*. Studi ini mengarahkan ke proses konstruksi dari Solar One, *pilot plant* dengan kapasitas 10 MW_e yang akan dihubungkan dengan jaringan listrik pesisir selatan California. Fasilitas yang dibangun merupakan prototipe skala kecil dari optimisasi *solar tower system* dengan kapasitas 100 MW_e yang menggunakan uap sebagai fluida kerja dengan target akhir listrik untuk dijual. Tiga tim dengan perbedaan desain yang sangat signifikan (Gambar 5.1) berkompetisi di Departemen Energi USA dengan tujuan perolehan dana hibah untuk studi *pilot plant solar tower*. Detail tiga konsep itu antara lain:

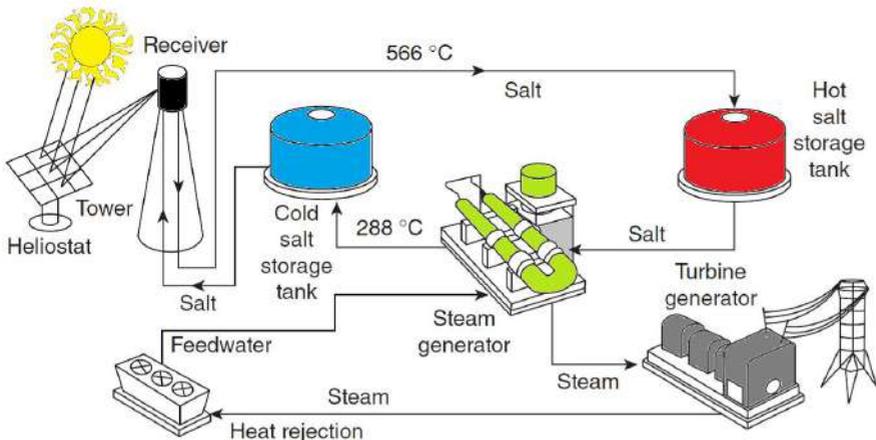
1. McDonnell Douglass: Menggunakan *pedestal heliostats* yang mengelilingi *receiver* model *cylinder*
2. Honeywell: Menggunakan *heliostat* yang terdiri dari empat cermin dengan *tracking* yang dipasang pada bingkai berputar untuk memantulkan cahaya ke *cavity-receiver* yang miring ke arah bawah
3. Martin Marietta: menggunakan *heliostat* alas tipe rangka-U yang ditempatkan di sisi kutub *cavity receiver* yang menghadap ke arah yang sama (kutub)

Proses desain optik untuk bagian *heliostat*, *tower* dan *receiver* diusahakan semaksimal mungkin untuk menurunkan biaya modal ditambah *present value* dari operasi dan pemeliharaan; dibagi dengan energi panas tahunan yang dapat dihasilkan. Tata letak *field* yang optimal dipilih untuk mendapatkan nilai sekecil mungkin *levelized cost* dari panas yang diproduksi untuk hipotesis tujuan komersial pada sistem dengan daya 100 MW_e. Proses iterasi yang dilakukan terhadap tinggi *focal*, ukuran *receiver*, dan *heliostat field* memberikan variasi yang beragam terhadap densitas fluks yang diterima. Untuk kasus Solar One, hasil yang diperoleh tersebut tidak dioptimisasi ulang, namun dibuat pada skala 10 MW_e sehingga *pilot plant* dapat memberikan tiruan yang lebih baik terkait permasalahan yang mungkin terjadi pada fasilitas skala komersial. Solar One menggunakan konsep “aliran *superheated steam*” dimana air yang masuk langsung berubah menjadi *superheated steam* setelah melewati *receiver*, sehingga batasan konservatif fluks pada *receiver* hanya 300 kW/m², yang menyebabkan ukuran *receiver* harus cukup besar (tinggi 13.7 m dan dengan 7 m diameter untuk mengatasi 45 MW_{th} energi yang diserap secara maksimal).

Sistem penyimpanan panas pada *pilot plant* Solar One menggunakan tangki tunggal yang terdiri dari batu, pasir dan minyak dengan prinsip *thermocline* yang memiliki ukuran untuk menyuplai operasi turbin selama 4 jam dengan daya 7 MW_e. Pada bagian bawah, *superheated steam* (440 °C) dibagi ke dua bagian yakni saluran masuk turbin dan alat penukar kalor. Alat penukar kalor yang digunakan adalah Caloria HT-43 berfungsi untuk mengirimkan panas pada suhu 304 °C untuk *charging* unit penyimpanan, dan ketika dibutuhkan, akan mengekstrak kembali

(*discharge*) panas yang disimpan untuk keperluan pembangkitan. Operasional unit penyimpanan sangat memuaskan, dan hanya digunakan untuk keperluan pengetesan dan mengirimkan uap tambahan untuk keperluan *start-up* dan *backup* saat kondisi mendung. Pengoperasian pada mode TES hanya dapat mencapai 70% dikarenakan suhu uap yang rendah, sekitar 277 °C.

NO₃ salt (Na 60%, K 40%) dipilih sebagai fluida kerja (HTF) untuk *receiver*, dan material TES dengan pertimbangan memiliki kalor spesifik dan titik didih yang tinggi, sifat perpindahan panas yang baik, tidak beracun, relatif murah. Garam ini lebih baik dibandingkan dengan *sodium* cair, meskipun *sodium* memiliki sifat perpindahan panas yang jauh lebih optimal, namun sangat sulit untuk diterapkan pada sistem dan secara harga lebih mahal. Hal ini dibuktikan dari berbagai uji coba skala kecil dari *pilot plant* yang dilakukan pada tahun 1980an. Konfigurasi ulang dari Solar One menjadi Solar Two menerapkan pertimbangan ini, menggantikan uap air dengan *molten salt* sebagai fluida kerja. Dengan demikian, model *receiver* yang dikembangkan menjadi lebih baik dan memungkinkan untuk menerima fluks energi tiga kali lebih besar. Berarti, ukuran *receiver* dapat dibuat lebih kecil. Penyesuaian sistem dilakukan dengan mengatur jaringan pipa, pompa dan tangki penyimpanan agar dapat menggunakan *molten salt*.



Gambar 5.4 Skematik desain kerja *plant* Solar Two dengan dua tangki penyimpanan *molten salt* (panas dan dingin) [42]

Skematik kerja dari Solar Two disajikan pada Gambar 5.4. Model ini membuat konsep dengan fleksibilitas yang baik. *Molten salt* dapat ditampung terlebih dahulu untuk tujuan penyimpanan, kemudian pindah ke sistem pembangkit turbin untuk proses perpindahan panas dan menghasilkan uap bertekanan. Alternatif lain juga dibuat ketika sistem penuh atau ada kebutuhan lain dimana *molten salt* dapat langsung masuk ke sistem pembangkit. Hasil yang sangat baik dicapai oleh sistem karena memiliki fleksibilitas perpindahan energi dan mode kerja yang baik. Tekanan yang lebih kecil dengan *molten salt* memungkinkan *receiver* untuk menggunakan dinding yang lebih tipis. Hal ini mengurangi dampak *thermal stress* pada *receiver*, dan juga memberikan karakteristik perpindahan panas yang lebih baik dengan kemungkinan kerapatan fluks energi yang lebih besar hingga 1 MW/m^2 .

F. PERIODE TRANSISI

Era tahun 1990 sampai 2005 merupakan masa *paceklik* bagi sistem energi matahari, khususnya *solar tower*, dikarenakan biaya investasi yang besar. Selama periode “*embargo*” ini, optimalisasi sistem dilakukan secara masif, misalnya dengan perbaikan desain *heliostat* sehingga diperoleh model yang lebih murah dan performa yang lebih baik. Sebagai tambahan, *coating* untuk *receiver* juga ditingkatkan kualitasnya, termasuk juga perbaikan dari karakteristik *molten salt* agar memiliki titik beku yang lebih rendah (model sebelumnya memiliki titik beku yang terlalu tinggi, $\sim 220 \text{ }^\circ\text{C}$) dan rentang suhu kerja yang lebih tinggi. Pertimbangan penggunaan fluida lain, seperti *supercritical* karbon dioksida (CO_2) memberikan kenaikan turbin generator efisiensi yang cukup baik. Akan tetapi, proses kerja dengan temperatur dan tekanan yang tinggi mengharuskan penyesuaian terhadap material sistem yang berarti harga yang lebih mahal.

Konsep alternatif *receiver* dikembangkan dengan menggunakan model *volumetric receiver* dimana udara pada suhu lingkungan dihisap melalui jaringan kawat yang tebal yang secara simultan dipanaskan oleh fluks energi. Model ini dapat dioperasikan pada tekanan ruang maupun tekanan tinggi. Sistem ini dapat mencapai suhu lebih dari $900 \text{ }^\circ\text{C}$ dan sangat ideal untuk operasi siklus Brayton. Beberapa upaya lain dilakukan lebih ekstensif dengan tujuan mampu menghasilkan desain *solar tower* yang

optimal dalam mengambil energi matahari, memiliki karakteristik operasi yang stabil, murah dalam biaya operasi dan perawatan serta memiliki nilai investasi yang meyakinkan untuk tujuan komersial dengan bantuan subsidi pada masa awal, berlanjut dengan sistem harga mandiri setelah periode balik modal.

G. KEBANGKITAN SETELAH TAHUN 2005

1. Penelitian, Demonstrasi dan Pengembangan Lanjut

Sistem CSP mendapatkan atensi yang tinggi setelah tahun 2005, menandakan masa awal kebangkitan untuk *solar tower* dan intervensi industri yang mulai aktif pada periode ini. Beberapa peristiwa penting terjadi pada masa awal kebangkitan, meliputi:

- 1) Fasilitas uji coba di Sandia dan Plataforma ditingkatkan secara besar-besaran, menyediakan fasilitas untuk uji coba dan verifikasi proyek skala kecil
- 2) Themis *site* telah ditargetkan untuk tes desain hingga kapasitas 4 MW_{th} menggunakan *volumetric receiver*
- 3) Abengoa *Solar New Technologies* telah mengoperasikan *tower* dengan kapasitas 5 MW di antara *tower* PS10 dan PS20.
- 4) CSIRO di Australia membangun dua buah *tower* ukuran kecil dengan fluks energi yang tinggi (600 kW_{th} dan 1.2 MW_{th}) untuk tujuan pengembangan konsep temperatur tinggi menggunakan uap, unit penyimpanan, *solar fuel*, dengan udara dan *supercritical* karbon dioksida (CO₂) untuk siklus Brayton.
- 5) Jülich, Jerman, membangun *tower* dengan kapasitas 1.5 MW_e dengan *volumetric receiver*. Model ini mampu beroperasi hingga suhu 650 °C
- 6) Jepang melakukan hal yang sama dengan membuat *plant* Mitaka Kohki untuk keperluan riset
- 7) Cina juga membuat *plant solar tower* untuk keperluan riset yang berlokasi dekat dengan wilayah Beijing di bawah naungan *Chinese Academy of Sciences*
- 8) Korea membuat kapasitas *tower* 200 kW_e di Daegu, di bawah naungan *Korean Institute of Energy Research*

Beberapa perusahaan besar sangat tertarik untuk pengembangan fasilitas skala besar untuk keperluan komersialisasi. *Platform* uji coba telah dibuat oleh *Abeonga Solar*, *BrightSource* dan beberapa perusahaan kecil untuk pemenuhan komponen seperti *heliostats*, sistem kendali dan *receiver*. Tahun 2009, *BrightSource* melanjutkan pembangunan fasilitas dengan kapasitas 29 MW_{th} untuk keperluan *recovery* minyak di wilayah *Coalinga*. Model yang dikembangkan memiliki 3,822 cermin untuk pembangkitan uap pada *receiver* dengan ketinggian *tower* ~ 100 m.



Gambar 5.5 Citra satelit dua *plant solar tower* (PS10 dan PS20) di Abengoa, Spanyol [51]

Tahun 2009, *eSolar* membuat dua modul demonstrasi dari 10-14 unit untuk *plant* komersial yang beroperasi di California. Model yang digunakan memiliki *cavity receiver* dengan posisi menghadap utara dan selatan. *Heliostats* yang digunakan memiliki ukuran 1.14 m² dengan struktur tanam untuk meminimalisir biaya instalasi di lapangan. Pada fasilitas demonstrasi tersebut, 24,000 *heliostats* digunakan yang dapat menghasilkan *superheated steam* hingga suhu 400 °C dengan daya < 10 MW_{th} untuk tiap modul. Uji coba ini dimaksudkan untuk menguji dan mendemonstrasikan model *heliostats* yang dikembangkan, termasuk untuk kemampuan sistem kendali dan *receiver*. India juga ikut melakukan uji coba dengan kapasitas 100 MW_e menggunakan *molten salt* di wilayah Rajasthan.

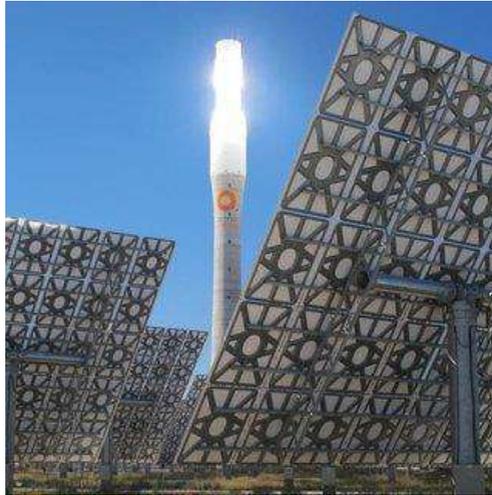
2. *Plant* Komersial

Beberapa perusahaan secara aktif terlibat dalam pengembangan *plant* skala besar untuk keperluan komersial menggunakan teknologi *solar tower*. Abengoa Solar di Spanyol dan Afrika Selatan, *eSolar* di Amerika dan India, *Sener-Torresol Energy* di Spanyol, *BrightSource* dan *SolarReserve* di Amerika. Tiap model yang dikembangkan memiliki keunikan tersendiri. Keunikan ini dapat dilihat dari model dan konsep penggunaan *heliostats*, desain *receiver*, fluida kerja, metode penyimpanan, konfigurasi *solar field*, dan ukuran *plant*. Tiap perusahaan ini telah memiliki *plant* skala komersial yang sudah beroperasi.



Gambar 5.6 *Plant Sierra Sun Tower* di USA dengan kapasitas $2 \times 10 \text{ MW}_{\text{th}}$ [51]

Abengoa Solar, perusahaan besar di Spanyol yang telah memiliki banyak *plant* PTC, telah membangun *plant solar tower* PS10 di Sevilla. PS10 memiliki kapasitas 10 MW_e , menggunakan model *cavity receiver* setengah lingkaran dengan ketinggian *tower* 100 m, menghasilkan uap jenuh pada suhu $240 \text{ }^\circ\text{C}$. Sebagai tambahan untuk menghasilkan daya di turbin, uap jenuh dapat menghasilkan penyimpanan TES dengan kapasitas 20 MWh. Kesuksesan PS10 selanjutnya digunakan untuk membangun *plant* kedua, yakni PS20 dengan kapasitas 20 MW_e (Gambar 5.5).



Gambar 5.7 *Plant Torresol Gemasolar* dengan kapasitas 19.9 MW_e [51]

eSolar melakukan pendekatan yang sangat berbeda dibandingkan model Abengoa, menggunakan susunan *heliostats* yang saling berdekatan (Gambar 5.6). Konsep komersial pada *plant* ini ditargetkan untuk menghasilkan daya 50 MW_{th} untuk tiap *tower* (10-14 unit *tower* yang ditargetkan dapat mencapai kapasitas kumulatif antara 500-700 MW_{th} untuk menghasilkan uap yang digunakan pada turbin dengan kapasitas 100 MW_e dengan faktor kapasitas antara 50-75%, menggunakan tangkin *molten salt* sebagai TES). *Torresol Energy* membangun fasilitas *solar tower* menggunakan *molten salt* (*Gemasolar*) yang dapat menampung energi hingga 15 jam (Gambar 5.7). Ringkasan dari tiap *plant* disajikan pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Ringkasan teknologi *solar tower* skala komersial

Info	PS10	PS20	Sierra Sun Tower	Gemasolar	Chevron	Ivanpah	Crescent Dunes	Bikaner
Negara	Spain	Spain	USA	Spain	USA	USA	USA	India
Organisasi	Abengoa	Abengoa	eSolar	Torresol	BrightSource Industry	BrightSource Industry	SolarReserve	eSolar
Kapasitas Turbin	10 MW _e	20 MW _e	5 MW _e	19.9 MW _e	<i>Proses industri</i>	3 x 130 MW _e	110 MW _e	100 MW _e
Kapasitas Termal	55 MW _{th}	110 MW _{th}	2 x 10 MW _{th}	220 MW _{th}	29 MW _{th}	3 x 3,000 MW _{th}	565 MW _{th}	10 x 50 MW _{th}
Radiasi (W/m ²)	~ 800	~ 800	~ 900	~ 800	~	~	950	~
Luas <i>reflector</i> (m ²)	75,216	~150,000	2 x 13,600	304,750	53,500	3 x 900,000	1,081,000	10 x 68,000
Luas lahan (ha)	-	-	-	185	-	-	540	-
Tinggi <i>receiver</i> (m)	100	140	65	130	100	130	180	~ 100

H. TATA LETAK *HELIOSTAT* DAN PENGGUNAAN LAHAN

Seperti yang sudah disajikan pada bagian sebelumnya, *solar tower* membutuhkan luasan area yang cukup besar untuk mencapai taraf komersil. Dengan demikian, pengaturan tata letak *heliostat* dan penggunaan lahan penting untuk diperhatikan karena berkaitan dengan dua hal esensial pada sistem: efektivitas energi untuk *receiver* dan biaya penggunaan lahan. Konsep **optimasi “sembarangan”** fokus pada peningkatan jumlah *heliostats* dan meninggikan *tower* yang berdampak pada kenaikan kapasitas *plant*, namun berdampak pada peningkatan biaya yang tak masuk akal untuk penentuan biaya dasar listrik (*levelized cost of electricity*, LCOE). Berarti, memperbanyak jumlah *heliostats* dan meninggikan posisi *receiver* tidak dapat disebut sebagai konsep yang *linear* jika bicara *plant* skala besar.

Pengaturan tata letak yang tepat memberikan banyak keuntungan untuk *plant*, khususnya terkait dengan pengurangan biaya investasi dan peningkatan densitas fluks energi sistem. Sebagai contoh, model susunan melingkar (*radial-staggered* atau RS) dan bersusun terbukti lebih efektif dibandingkan hanya model susunan lingkaran/susun saja. Konfigurasi RS dapat mengatasi permasalahan jarak antar cermin yang minimal menggunakan dua (2) kali jarak diameter total cermin. Posisi *heliostat* yang dekat dengan *tower* terbukti aman dari *blocking* bayangan *tower* saat jam tertentu dan mampu memberikan energi yang baik sepanjang waktu. Kondisi lain yang harus diperhatikan juga kontur tanah sekitar, apakah sepenuhnya rata, ada bukit atau pertimbangan lainnya, karena kadang ***tanah yang murah*** relatif ***memiliki karakteristik uniknya*** tersendiri.



Gambar 5.8 Proses pembersihan cermin *heliostat* pada *plant solar tower* [51]

Seperti halnya dengan *plant* CSP model PTC, akses dari susunan cermin harus diperhatikan untuk tujuan operasi dan perawatan tentunya. Gambar 5.8 memperlihatkan proses pembersihan cermin *heliostat* yang menggunakan truk khusus. Berbeda dengan strategi pembersihan *concentrator* PTC, pembersihan *heliostats* untuk *solar tower* membutuhkan waktu yang lebih besar karena posisi cermin tersebar dan tidak menyatu sebagai satu baris layaknya dengan PTC. Model susunan RS juga memberikan fleksibilitas yang lebih baik untuk proses pembersihan sehingga memudahkan akses kendaraan untuk lewat dengan tetap menjaga densitas fluks energi yang lebih baik.

I. TREN DI MASA MENDATANG UNTUK SOLAR TOWER

Penelitian dan pengembangan (R&D) yang berkelanjutan di institusi penelitian dan di industri akan menghasilkan sistem yang lebih baik, memiliki usia yang lebih panjang untuk *reflector* dan *absorber*, yang dapat menurunkan biaya instalasi sistem secara signifikan. Produksi massal dan sistem distribusi yang optimal akan menurunkan biaya manufaktur dan kebutuhan material produksi. Desain skala kecil yang dilakukan dengan efektif dapat mengalahkan *plant* skala besar, selama dibuat dalam satu klaster tertentu untuk mencapai nilai kelayakan ekonomi tertentu, termasuk juga proses gabungan dengan industri untuk memperoleh bantuan dana sebagai bentuk subsidi produktif dan penelitian terapan yang dapat menghasilkan alternatif energi termal untuk proses industri itu sendiri.

Pengoperasian sistem yang efektif menjadi kunci untuk mengurangi beban proses O&M. Penerapan robot pembersih atau alternatif skenario pembersihan yang sesuai dapat dengan optimal memangkas biaya. Permasalahan sering terjadi ketika suatu *plant* baru untuk *renewable energy* hanya difokuskan untuk aspek teknologi, namun tidak untuk aspek tenaga kerja dan sistem perawatan/perbaikan yang sesuai. Akibatnya, biaya operasi yang membengkak dapat mengalahkan biaya instalasi karena biaya operasi dilakukan setiap hari. Aspek penyimpanan, yakni teknologi *thermal energy storage*, juga berkontribusi terhadap efektivitas sistem karena memungkinkan *plant* dapat beroperasi lebih lama bergantung dari banyak sedikitnya kapasitas dan efektivitas TES yang

digunakan. Model penyimpanan energi, skenario alat penukar kalor dan material penyimpanan energi mendapatkan perhatian yang masif untuk terus dikembangkan. Sehingga, upaya berkelanjutan masih dan tetap terus dilakukan untuk mencapai taraf layak secara ekonomi dan *reliable* dalam aspek penggunaan bagi *plant CSP model solar tower*.

J. KESIMPULAN BAGIAN V

Teknologi *solar tower* sebagai bukti pengembangan berkelanjutan semakin menguatkan bahwa difusi dan instalasi teknologi memang memerlukan waktu dan usaha yang terukur dan terstruktur. Banyak pendanaan dan hibah yang harus rela dibuang untuk sekedar uji coba atau pembuatan *pilot plant* agar karakteristik operasi sistem dapat diketahui. Namun pun demikian, banyak pelajaran yang diambil dari tiap proses instalasi dan uji coba yang dilakukan. Teknologi yang ada pada saat sekarang, merupakan buah dari kesalahan masa lalu yang diperbaiki untuk dijadikan acuan agar model yang dikembangkan menjadi lebih baik. Berbagai macam tipe susunan *heliostats* ditawarkan, jenis *receiver* dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan, penggunaan ragam fluida kerja dan sistem *tracking* menjadi bukti bahwa perbaikan terus menerus harus dilakukan oleh semua pihak, baik institusi penelitian, industri dan pemerintah.

Solar tower menawarkan operasi temperatur yang lebih tinggi dibandingkan PTC, sehingga model ini banyak digemari oleh pelaku industri, baik dari aspek pembangkit maupun kebutuhan panas untuk proses industri. Di sisi lain, temperatur yang lebih tinggi mengharuskan ada banyak penyesuaian terhadap operasi dan komponen sistem. Suhu terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada *molten salt*, namun jika terlalu rendah dapat menurunkan efisiensi sistem. Terlepas dari itu semua, ketertarikan pada *solar tower* sepertinya lebih besar dibandingkan model PTC jika mengacu kepada target temperatur keluaran.

A square box with a grey background and a white border. Inside the box, the word "BAB" is written in white capital letters at the top, and a large white number "6" is centered below it.

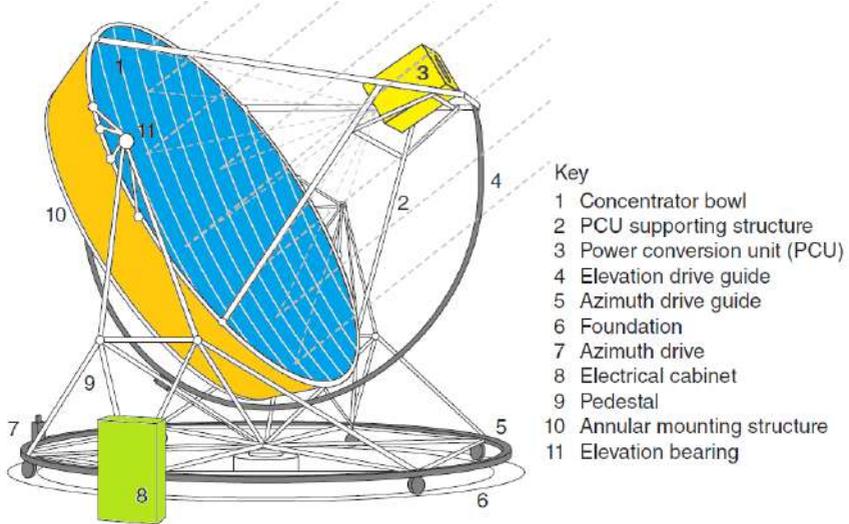
BAB
6

PARABOLIC DISH SYSTEM

A. PENGANTAR PARABOLIC DISH SYSTEM

Teknologi yang paling sederhana dari *solar thermal plant* adalah *parabolic dish* dikarenakan sistem ini menggunakan peristiwa sederhana terkait pengaruh konsentrasi panas matahari pada satu titik tertentu. *Parabolic dish* menggunakan cermin *concentrator* berbentuk parabola yang dilengkapi dengan *tracking system*. Cahaya matahari dari *concentrator* difokuskan pada *receiver* yang untuk keperluan *photothermal conversion*. Panas yang dihasilkan kemudian dipindahkan untuk proses konversi berikutnya yang dapat digunakan untuk proses pembangkitan listrik menggunakan mesin kalor atau menggunakan HTF untuk keperluan beban termal lain seperti proses industri. *Solar parabolic dish system* memegang rekor performa tertinggi untuk efisiensi optik, efisiensi proses konversi menyeluruh pada sistem dan rasio konsentrasi dari semua model CSP. *Parabolic dish* sering disebut dengan *dish Stirling* dikarenakan sistem yang umum dikembangkan adalah penggunaan *Stirling Engine* untuk keperluan konversi panas menjadi energi mekanik untuk menghasilkan listrik. Meskipun demikian, dengan efisiensi dan performa yang sangat tinggi, banyak opsi lain yang dapat diterapkan dengan menggunakan panas yang dikumpulkan oleh *dish concentrator*.

Parabolic dish menunjukkan demonstrasi performa terbaik dibandingkan seluruh sistem CSP lainnya dengan pembuktian konversi efektif sebesar 30% dari banyaknya energi matahari langsung (DNI) yang diterima oleh sistem. Pembangunan yang berkelanjutan dari *dish engine* dilakukan lebih dari 30 tahun lalu dengan fokus utama untuk peningkatan performa sistem, penurunan biaya investasi dan komponen, serta pembukaan peluang aplikasi yang lebih luas untuk keperluan proses industri. *Dish engine* memiliki biaya sekitar 10,000 \$ USD per kW, yang mana nilai ini masih berpotensi untuk turun dengan adanya perbaikan dan optimasi berkelanjutan, termasuk juga untuk produksi masal dari sistem dan komponen kelengkapannya. Upaya lebih lanjut juga diarahkan terkait aspek O&M untuk menekan biaya operasi dari sistem.



Gambar 6.1 Desain skematik yang menunjukkan bagian penting pada *dish system* [52]

Estimasi biaya untuk saat ini menunjukkan tren yang baik, dimana ada penurunan hingga mencapai 3,000 \$ USD per kW. Pasar yang semakin menjanjikan di bidang energi hijau dan juga penyebaran teknologi yang semakin cepat menyebabkan banyak yang melirik untuk investasi lebih besar pada teknologi ini. Peningkatan yang sangat signifikan juga didukung dengan banyaknya restrukturisasi pasar utilitas, peningkatan kesadaran

global terkait dengan pasar energi hijau dan kenaikan permintaan suplai energi bersih memberikan motivasi lebih untuk terus mengembangkan teknologi *solar dish engine*. Tren teknologi skala kecil dan menengah, memungkinkan untuk produksi dan penyebaran yang lebih baik, mulai dari skala beberapa kW hingga MW, terlebih model *solar dish engine* cocok untuk wilayah terpencil yang tidak memiliki jaringan distribusi permanen.

B. PRINSIP DASAR SOLAR DISH SYSTEM

Komponen dan desain utama dari *solar dish system* diperlihatkan pada Gambar 6.1. Sistem ini terdiri dari:

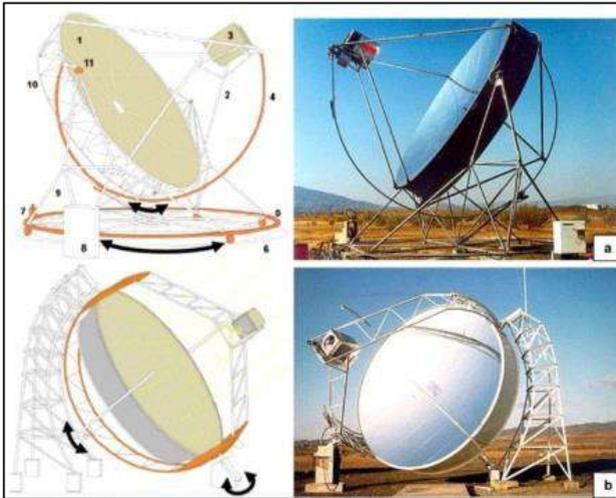
- a. *Concentrator* berbentuk parabola
- b. *Solar tracking system*
- c. *Photothermal converter* atau *receiver*
- d. (opsional) Mesin kalor dan generator, biasanya rakitan *Stirling Engine*
- e. Sistem pengendali

Dish concentrator melacak pergerakan matahari pada kedua arah (*azimuth* dan *elevation*) sehingga sumbu optik *concentrator* tetap menghadap ke arah matahari. Radiasi matahari difokuskan oleh *concentrator* ke arah *focal point*. *Receiver* ditempatkan pada *focal point* untuk proses konversi *photothermal*. Pada *receiver* bisa ditempatkan *Stirling Engine* atau model *receiver* yang melibatkan aliran fluida untuk kebutuhan transportasi panas yang digunakan untuk proses industri, bergantung kepada kebutuhan.



Gambar 6.2 Skema pemantulan cahaya dari *dish concentrator* ke arah *receiver* [27]

Gambar 6.2 memperlihatkan model pemantulan dari *solar dish system*. Permukaan *reflective* berbentuk parabola berfungsi sebagai *concentrator*. Permukaan *reflective* bisa menggunakan *metallized glass* atau *plastic*. Cahaya yang datang dipantulkan ke area yang lebih kecil dengan jarak sesuai dengan titik *focal* parabola. Bentuk ideal untuk *solar dish system* adalah *paraboloid*. Kualitas dan ukuran pemantulan bergantung pada tingkat kepresisian penampang *concentrator*, tingkat reflektivitas, kondisi operasi dan jarak titik *focal*. Secara umum, *solar dish system* memiliki geometri rasio konsentrasi sekitar 1,500-4,000. Ukuran umum dari *dish concentrator* berkisar antara 1-2 m hingga ada yang mencapai 25 m.



Gambar 6.3 Prinsip kerja dari (a) *azimuth-elevation* dan (b) *polar-equatorial mounted systems* [53]

Agar dapat melacak peredaran matahari, maka parabola harus bisa bergerak pada dua sumbu. Terdapat dua metode yang digunakan untuk model pergerakan *solar tracking* untuk *dish system*, yakni:

1. *Azimuth-elevation tracking* (Gambar 6.3a), dimana *dish* berputar pada bidang yang sejajar dengan permukaan bumi (*azimuth*) dan mengeliling sumbu yang tegak lurus padanya (*elevation*), menyebabkan putaran *dish* yang dapat bergerak naik/turun dan kiri/kanan. Tingkat rotasi pada kedua sumbu bervariasi sepanjang hari namun dapat diperkirakan kecenderungannya

2. *Polar-equatorial* (Gambar 6.3b), *dish* berputar pada sumbu yang sejajar dengan sumbu rotasi bumi. *Dish* berputar dengan nilai konstanta yang ditetapkan, yakni $15^\circ/\text{jam}$, sama dengan kecepatan rotasi bumi. Sumbu rotasi lainnya, sumbu deklinasi, tegak lurus terhadap sumbu kutub. Pergerakan pada sumbu ini terjadi dengan lambat dengan total $\pm 23.5^\circ/\text{tahun}$ (atau maksimal $0.016^\circ/\text{jam}$).

Model sistem *tracking* untuk *dish* umumnya digerakkan oleh motor listrik yang dilengkapi dengan *gearbox*, dan ada alternatif lain juga yang menggunakan sistem hidrolik. Sensor digunakan untuk mendeteksi posisi matahari yang diatur dengan algoritma kontrol yang presisi untuk memperhitungkan dan mengestimasi posisi matahari dengan tepat berdasarkan nilai sensor dan waktu (tanggal, bulan dan tahun). Seluruh proses kendali pada sistem penggerak termasuk juga pengaturan pada unit *Stirling Engine* dilakukan dengan bantuan *microcontroller* yang terhubung dengan komputer khusus. Seluruh operasi bisa dilakukan secara otomatis dan sangat memungkinkan untuk kendali secara *remote* dengan bantuan internet.

Receiver pada *dish system* memiliki dua fungsi: 1) untuk menyerap radiasi matahari yang dipantulkan oleh *concentrator* sebanyak mungkin, 2) untuk memindahkan energi dalam bentuk panas ke fluida kerja. Bentuk pantulan matahari aktual tidaklah sejajar yang menyebabkan tidak dapat dipantulkan ke satu lokasi secara akurat. Lebih lanjut, seluruh *concentrator* yang digunakan memiliki batasan bentuk yang tidak mungkin mencapai bentuk parabola sempurna. Sehingga, radiasi yang dipantulkan umumnya tersebar pada area yang kecil di *focal point*, dengan fluks energi tertinggi tentunya pada bagian tengah dengan distribusi fluks yang lebih kecil pada sisi luar titik pusat. Model *receiver* yang efisien untuk *solar dish system* adalah *cavity receiver* dengan menggunakan penampang kecil yang terbuka pada area tengah untuk jalan masuknya pantulan yang dikonsentrasikan. *Absorber* ditempatkan di belakang bagian ini untuk mengurangi intensitas fluks matahari yang terlalu tinggi pada area *receiver*. Insulasi dibuat di antara bagian tersebut untuk mengurangi kerugian panas.



Gambar 6.4 Model *concentrator* Vanguard 1 [54]

Perkembangan teknologi *solar dish system* pada prinsipnya sama dengan perkembangan model *concentrated solar power* yang lain. Loncatan besar pengembangan teknologi ini terjadi pada era 1980an setelah belajar dari pengalaman krisis energi pada dekade sebelumnya. Fokus pengembangan secara masif dilakukan di USA pada era awal perkembangan ini. Banyak model dan *prototype dish* yang didesain dan dibangun oleh para peneliti, baik dari organisasi kecil maupun besar, termasuk juga perusahaan. Model pertama untuk prototipe komersial menggunakan *Stirling Engine* dengan kapasitas 25 kW dibangun oleh ADVANCO di selatan California dengan nama *plant Vanguard System*. Model ini mendapatkan kesuksesan yang tinggi dengan memecahkan rekor dunia untuk konversi bersih dari energi matahari menjadi listrik hingga 29.4%. *Vanguard dish* menggunakan lembaran kaca berbentuk *dish* dengan ukuran diameter 10.5 m, menggunakan metode *direct insolation receiver (DIR)* dengan mesin aksi ganda kinematik *United Stirling 4-95 Mark II* (Gambar 6.4).



Gambar 6.5 Model *concentrator* dengan *metal membrane* berukuran 17 m [55] dan [56]

Pada tahun 1984, dua produk *dish Stirling system* dibuat, yang kemudian dipasang dan beroperasi di Riyadh, Arab Saudi, oleh perusahaan *schlaich bergemann und partner* (sbp), Stuttgart, Jerman. Unit yang sama juga di pasang di fasilitas Pusat Luar Angkasa Jerman (DLR), Lampoldhausen, Jerman. *Dish* dengan diameter 17 m menggunakan *concentrator* model *stretched-membrane*, dengan menggunakan metode vakum untuk bagian belakang antara *membrane* dengan *dish rim* dan struktur utama *dish*. Permukaan optik dari *dish* dibuat dengan cara menempelkan kaca kotak kecil di depan *membrane*. Model *receiver* yang digunakan adalah *direct illuminated tube receiver* dengan mesin kinematik *United Stirling 4-275* (Gambar 6.5).



Gambar 6.6 Model *concentrator* korporasi McDonell Douglas [57]

Model *dish Stirling system* lainnya dibangun oleh McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDAC) pada tahun 1980an. MDAC berhenti mengembangkan teknologi tersebut, dan hak pengembangan selanjutnya diakuisisi oleh Southern California Edison (SCE). Komponen untuk delapan sistem yang direncanakan dibuat, dan tiga sistem berhasil diujicobakan pada awal tahun 1980an. Model MDAC/SCE merupakan desain *dish Stirling system* yang secara sengaja dibuat sebagai produk komersial (Gambar 6.6). Model ini dibangun berdasarkan desain dari *Vanguard dish Stirling system*, dengan teknologi *receiver* yang sama (DIR) dan menggunakan model mesin yang sama juga yakni USAB 4-94 Mark II. SCE mengoperasikan mesin ini dari tahun 1985 sampai 1988, lalu *Stirling Energy System* (SES), Arizona, mengakuisisi hak atas sistem *hardware* dan teknologinya di tahun 1996 dan terus melanjutkan perkembangan sistem ini.



Gambar 6.7 Sistem *polar tracking* untuk *dish* dengan *metal membrane* [58]

Tahun 1989, perusahaan *schlaich bergemann and partner* (sbp), membangun model pertama yang dikembangkan oleh mereka dengan ukuran yang lebih kecil, yakni 7.5 dan 8.5 meter dengan desain *concentrator* yang sama dan dilengkapi dengan mesin 10 kW SOLO V160 *Stirling Engine*. Model pertama menggunakan konfigurasi *polar tracking*, lalu dikembangkan menjadi *azimuth-elevation tracking*. Total ada enam (6) sistem yang beroperasi secara bersamaan dengan durasi lebih dari 30,000 jam untuk *plant* Plataforma Solar de Almeria, pesisir selatan Spanyol (Gambar 6.7).



Gambar 6.8 Model *concentrator* CPG-460 [59]

Tahun 1991, *Cummins Power Generation*, bekerja melalui kesepakatan pembiayaan bersama dengan departemen energi (DoE) USA dan Sandia National Laboratories, memulai pengembangan dua jenis *dish Stirling system*, satu tipe dengan kapasitas 7 kW untuk penempatan secara *remote* dan satu mesin dengan kapasitas 25 kW untuk dihubungkan dengan jaringan listrik (Gambar 6.8). *Cummins* memberikan sentuhan inovatif untuk *dish Stirling system* yang dikembangkannya, menggunakan teknologi yang lebih maju pada desain seperti penggunaan *concentrator* dengan penggerak *polar-axis* dan segi polimer *stretched-membrane*, *receiver* dengan menggunakan *heat-pipe*, dan *Stirling Engine* model *free-piston* (piston bebas). *Receiver heat-pipe* memindahkan energi panas yang diterimanya ke *Stirling Engine* dengan menguapkan sodium kemudian mengkondensasikannya ke pipa pemanas pada bagian *head* mesin. *Receiver* bekerja sebagai *thermal buffer* di antara *concentrator* dan mesin, dan dikarenakan menggunakan metode kondensasi untuk memindahkan panas ke mesin, operasi yang lebih stabil pada suhu tinggi menjadi lebih seragam pada seluruh bagian *head* mesin dan efisiensi yang optimal dapat dicapai. Dua program yang dilakukan *Cummins* memiliki progres yang baik, namun dihentikan pada tahun 1996 ketika induk perusahaan melakukan restrukturisasi bisnis. Aset dari sistem operasi energi matahari yang dikembangkan oleh *Cummins* dijual ke *Kombassan*, sebuah perusahaan dari Alanya, Turki.

Pada awal proyek yang dikembangkan, *dish Stirling system* menunjukkan kinerja yang baik untuk keperluan pembangkitan listrik yang dapat digunakan untuk jaringan utama (*grid*) dan aplikasi *remote* dengan efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik yang optimal. Sejalan perkembangan awal tersebut, seluruh sistem hanya diproduksi untuk satu produk saja sehingga memiliki nilai investasi yang terlalu tinggi. Lebih lanjut, layaknya mesin yang beroperasi pada umumnya, *Stirling Engine* tetap memerlukan pemeliharaan. Sehingga tujuan pengembangan berikutnya fokus pada peningkatan reliabilitas sistem dan penurunan biaya produksi. Usaha berikutnya fokus untuk menghasilkan reliabilitas sistem yang baik melalui pendekatan aktual dengan cara mengidentifikasi komponen yang membutuhkan peningkatan, desain ulang dan pergantian. Sejalan dengan usaha tersebut, komponen yang lebih maju seperti sistem kendali dan perbaikan pada permukaan optik, memberikan keyakinan untuk peningkatan efisiensi dan reliabilitas sistem dengan biaya yang lebih murah. Hal ini juga didukung oleh industri dengan mulai dikembangkannya produksi komponen pada skala industri. Pendekatan yang baru juga mulai dibuka yakni mengganti mesin *Stirling* dengan metode *receiver* lainnya untuk proses kebutuhan pembangkitan energi panas yang dapat digunakan untuk proses industri.



Gambar 6.9 *Plant La Jet solar dish system* di California dengan 700 unit *dish* [60]

Demonstrasi yang cukup mencolok sebagai usaha untuk menghasilkan sistem yang dapat beroperasi untuk skala komersial adalah *Solar Plant 1*, La-Jet, yang dibangun di California pada tahun 1984 dengan kapasitas 4.9 MW_e. Sebagaimana terlihat pada Gambar 6.9, *plant* ini memiliki 700 La Jet *dish* (secara esensial sama dengan teknologi yang dikembangkan oleh Cummins) yang menggunakan elemen cermin *stretched-membrane*. Luasan area pengumpulan sinar matahari mencapai 30,590 m². Enam ratus (600) *dish* memproduksi uap jenuh dengan tekanan 6 MPa dimana sisanya (100 *dish*) digunakan untuk pemanasan lanjut hingga mencapai suhu 460 °C. *Plant* ini beroperasi hingga tahun 1990. Unjuk kerja yang dilakukan memberikan kesan yang baik terkait dengan konsep pembangkitan uap yang terpusat dengan menggunakan teknologi *solar dish*. Akan tetapi, permasalahan terkait durabilitas cermin *membrane* yang digunakan muncul dikarenakan usia pakai dari *polymer film* yang digunakan mengalami penuaan (*aging*) dan juga isu waktu mulai sistem yang cukup lama dikarenakan efek inersia pada *receiver*.



Gambar 6.10 Instalasi Australia National University di White Cliffs [61]

Di Australia, kerja awal yang diinisiasi oleh kelompok dari Australia National University (ANU) menghasilkan konstruksi *dish* berukuran 14 m untuk keperluan wilayah *remote* di White Cliff, New South Wales (Gambar 6.10). Tiap *dish* memiliki luas permukaan hingga 20 m² yang menggunakan cermin kecil berukuran persegi yang ditempelkan di *base* berbentuk

paraboloid dari bahan *fiber*. Uap panas lanjut (*superheated*) dihasilkan secara langsung menggunakan *monotube semi-cavity receiver* yang dihubungkan dengan *power block* terpusat, menggunakan mesin uap bolak-balik dengan kapasitas pembangkitan 25 kW_e. Tahun 1999 dan 2000, *WG Associates* mendesain *WGA-500 dish concentrator*, MOD1 dan MOD2, dengan diameter masing-masing 8.8 m dan 41 m. Dua prototipe tersebut dibuat dan beroperasi dengan menggunakan *SOLO 161 Stirling Engine* berkapasitas 10 kW.

C. PERKEMBANGAN SAAT SEKARANG

1. *Stirling Energy System (SES)*

Pada tahun 1996, *Stirling Energy System, tbk (SES)* dibentuk dan mengakuisisi seluruh desain dan paten *engineering* dari teknologi *solar dish Stirling system* yang telah dikembangkan lebih dari tiga dekade oleh *MDAC/SCE*. *SES* melakukan dua strategi penting yakni melakukan kolaborasi kerja sama publik/privat dengan *Sandia National Laboratory*, Albuquerque, New Mexico dan departemen energi USA (*DoE*) dengan tujuan untuk komersialisasi teknologi *solar dish system*.



Gambar 6.11 Model baru *Stirling Energy Systems* kapasitas 25 kW [62]

Selama periode ini, *SES* melakukan rekayasa ulang dari lisensi teknologi yang dimilikinya, melakukan perbaikan desain, peningkatan performa dan penurunan harga, dengan tetap menargetkan efisiensi

konversi *solar to electricity* yang tinggi. Pada masa sekarang, teknologi SES diberi label dengan nama SunCatcher menggunakan *Stirling Engine* kinematik aksi ganda dengan kapasitas 25 kW berdasarkan model yang dikembangkan oleh *United Stirling* di Swedia (Gambar 6.11). *Plant* yang dikembangkan memiliki 60 *dish*, berlokasi di Phoenix, USA, dengan total kapasitas pembangkitan 1.5 MW_e menggunakan teknologi ini (SunCatcher). SES bersama dengan perusahaan lain yakni Tessler Solar North America telah menandatangani beberapa perjanjian *power purchase agreements* (PPA) untuk dua *plant* skala besar dengan kapasitas pembangkitan 709 dan 850 MW di USA. Sayangnya, SES mengalami kebangkrutan setelah gagal menerima jaminan pinjaman dari pemerintah.

2. *Schlaich bergemann* UND partner (sbp)

Tahun 1998 sbp bersama dengan mitra Eropa lainnya memulai pengembangan EuroDish (Gambar 6.12). Pada tahap awal, *dish concentrator* berukuran diameter 8.5 m dilengkapi dengan *Stirling Engine* generasi terbaru dibangun dan diujicobakan di *Plataforma Solar de Almería* (PSA).



Gambar 6.12 Model *solar dish* kapasitas 10 kW (EuroDish) [63]

EuroDish menggunakan model *concentrator* baru yang dibuat dengan model susunan *sandwich* dari serat-kaca yang diperkuat dengan plastik. Model ini menggunakan mesin aksi tunggal SOLO *Stirling* 161 dengan

kapasitas pembangkitan sebesar 10 kW_e. Model *tracking* yang digunakan mengalami kemajuan yang lebih baik dimana memiliki algoritma yang lebih sederhana, dan memungkinkan untuk penggunaan kendali jarak jauh. Dua prototipe EuroDish didirikan di Spanyol. Prototipe ini diujicoba secara kontinu dan membawa hasil yang baik sebagai referensi untuk pengembangan pada negara lain. Pengembangan ini kemudian dilakukan lebih lanjut untuk wilayah Spanyol lainnya, Jerman, Prancis, Italia dan India.

3. *Infinia Corporation*

Infinia Corporation berlokasi di Utah, USA, merupakan perusahaan privat yang memiliki teknologi *free piston Stirling Engine* sejak tahun 1967. Pada tahun 2006, *Infinia* mulai mengembangkan *PowerDish* berukuran diameter 4.7 m yang dilengkapi dengan *free piston Stirling Engine* (kapasitas 3.2 kW) yang merupakan karya dari desain mandiri, murah, memiliki usia pakai yang panjang dan bebas perawatan.



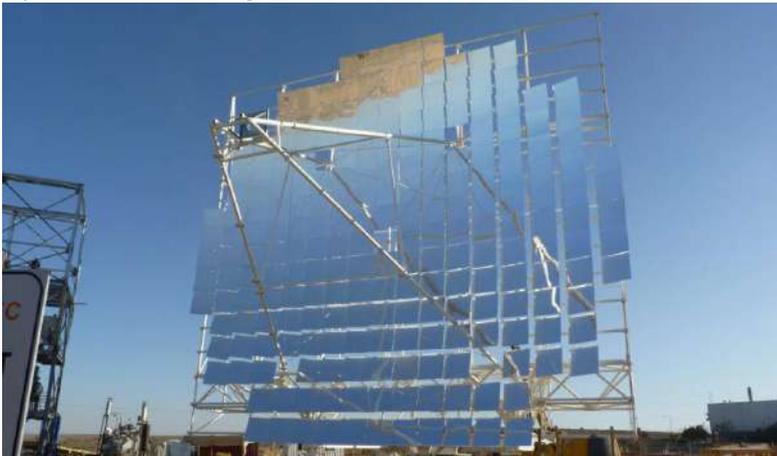
Gambar 6.13 Instalasi *solar dish system (PowerDish)* di Arizona 2010 [64]

Dish yang digunakan merupakan produk kerja sama dengan sbp. Sistem bekerja dengan otomatis, bekerja dengan mandiri dan tidak memerlukan perawatan untuk *seal* kedap udara pada mesin sehingga memiliki usia pakai hingga 25 tahun (berdasarkan klaim *Infinia*). Prototipe pertama didirikan pada tahun 2007. Proses pra-produksi dan pengujian unit tetap berlangsung di beberapa belahan dunia. Komision pertama yang

dilakukan untuk 30 unit di Arizona, USA, pada tahun 2010 (Gambar 6.13). Proyek masih dikembangkan lebih lanjut untuk beberapa negara Eropa dan India.

4. HelioFocus

Teknologi HelioFocus memiliki keunikan sendiri dibandingkan dengan desain lainnya. Teknologi ini cenderung lebih murah dan menggunakan *dish* berukuran besar hingga 500 m² (Gambar 6.14). Prototipe pertama dibangun pada tahun 2011 sebagai bagian dari proyek *solar boosting* untuk pemanfaatan energi bersih dari matahari.



Gambar 6.14 Model HelioFocus 500 m² *dish* [65]

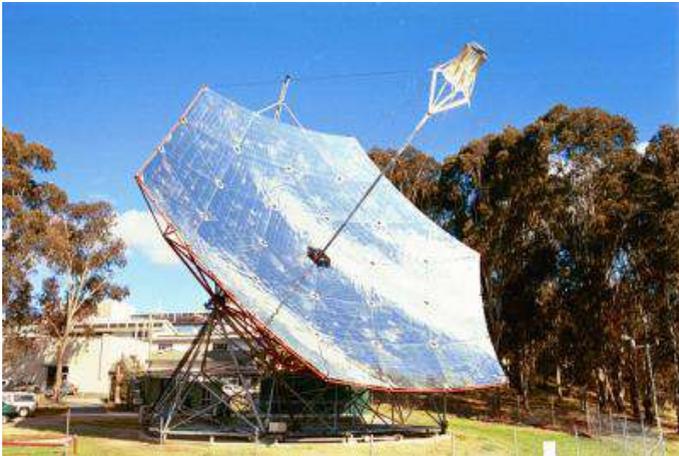
Dish dibuat dengan struktur datar dengan susunan cermin mirip dengan model Fresnel. Sistem dilengkapi dengan *solar tracking system* yang menggunakan penggerak hidrolis. Aplikasi pertama menggunakan udara sebagai HTF dengan bantuan *volumetric receiver* bertekanan untuk menghasilkan udara bersuhu tinggi. Uap dihasilkan melalui alat penukar kalor dan digunakan untuk membantu pembangkit listrik tenaga bahan bakar fosil (sehingga sistem ini disebut dengan *solar boosting*). Teknologi lanjutan yang dikembangkan adalah penggunaan turbin berukuran mikro.

5. *Solar Catch/SouthWest Solar*

SouthWest Solar Technologies of Phoenix, Arizona, USA, mengembangkan *dish* berukuran besar dengan diameter 23 m dan luasan area mencapai 320 m². Prototipe pertama berhasil dibangun pada tahun 2011. Model ini digunakan untuk pembangkit menggunakan turbin berukuran kecil dengan siklus Brayton. Target kapasitas mesin adalah 80 kW_e. Tahap lanjut yang dilakukan adalah rencana untuk memungkinkan hibridisasi operasi dan penggunaan sistem penyimpanan dengan udara bertekanan (*compressed air storage*).

6. *Australian National University (ANU)*

Melanjutkan dari program dan prototipe 14 *dish* di White Cliffs pada Tahun 1994, model baru dikembangkan dan dibangun oleh *Australian National University (ANU)* dengan ukuran lebih besar yakni 400 m² dan diberi nama SG3 (Gambar 6.15). Model ini dibuat dari 54 cermin datar berbentuk segitiga pada rangka berbentuk parabola. *Concentrator* dipasang pada rangka yang dapat berputar pada arah *azimuth* dengan menggunakan rakitan enam roda.



Gambar 6.15 ANU 400 m² *dish* SG3 [66]

Receiver yang digunakan merupakan model *monotube boiler* yang berfungsi untuk menghasilkan uap panas lanjut. Ukuran dibuat lebih besar didasari analisis yang menunjukkan bahwa ukuran *dish* lebih besar

memiliki biaya per satuan luas yang lebih murah dibandingkan model *dish* ukuran kecil. Target penggunaan uap lanjut adalah mesin turbin uap yang dipasang terpisah dari sistem, sehingga ukuran penempatan *receiver* pada *focal point* tidak menjadi masalah penting dari desain ukuran *dish* yang besar.



Gambar 6.16 ANU/Wizard Power 500 m² dish [66]

Di tahun 2009, desain *dish* dengan luas permukaan 500 m² berhasil didesain dan dibangun oleh ANU yang bekerja sama dengan Wizard Power Pty Ltd, sebuah perusahaan *startup* dengan fokus untuk komersialisasi teknologi *solar dish system*. Desain *dish* yang baru telah melewati proses optimisasi untuk keperluan produksi massal agar dapat digunakan untuk *plant* skala besar. Fitur utama dari *dish* ini adalah penggunaan 380 panel cermin persegi yang dapat diganti dan ditukar posisi (Gambar 6.16). Panel ditempatkan pada rangka struktur utama yang dapat berputar untuk mengikuti arah gerakan matahari.

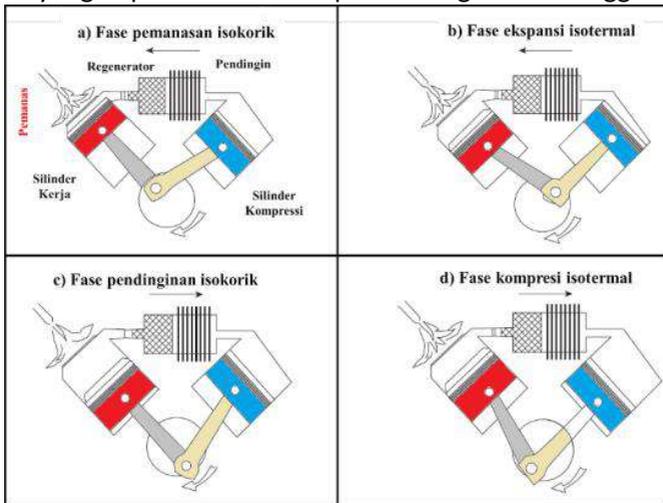
D. KONVERSI ENERGI, SIKLUS TENAGA DAN KELENGKAPAN SOLAR DISH SYSTEM

Siklus Brayton telah diujicobakan pada *solar dish system* dan mendapatkan atensi yang baik sehingga mulai dikembangkan untuk turbin versi mikro yang diperuntukkan *solar dish system*. Akan tetapi, *Stirling Engine* model kinematik dan *free-piston* memiliki kecenderungan

performa yang lebih baik sehingga mesin ini yang digunakan pada kebanyakan model *solar dish system*, khususnya untuk skala komersial. *Stirling Engine* lebih digemari karena memiliki efisiensi yang sangat tinggi dengan nilai rekor konversi energi panas menjadi mekanis lebih dari 40%, memiliki densitas daya yang tinggi (40-70 kW/liter untuk penggunaan pada *solar dish*), potensi usia jangka panjang dan minim perawatan selama bekerja. Keunikan lain dari *Stirling Engine* adalah modular, yang berarti tiap sistem memiliki generator langsung, memudahkan untuk instalasi mesin ke dalam *plant*, baik ukuran kecil beberapa kilowatt hingga puluhan megawatt.

1. *Stirling Engine*

Energi termal yang dihasilkan oleh radiasi solar terkonsentrasi dapat diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan *Stirling Engine* yang dihubungkan dengan generator listrik. *Stirling Engine* masuk ke dalam grup mesin dengan udara panas dan menggunakan siklus termodinamika tertutup. Siklus tertutup berarti menggunakan gas kerja yang sama di seluruh siklus mesin. Berbanding terbalik dengan mesin Otto dan Diesel yang menggunakan pembakaran dalam, *Stirling Engine* menggunakan sumber panas dari luar, sehingga sangat cocok untuk operasi pada *solar dish system* yang dapat memberikan panas dengan suhu tinggi ke mesin.



Gambar 6.17 Prinsip kerja dari *Stirling Engine* [67]

Prinsip kerja paling mendasar dari *Stirling Engine* adalah proses siklus kompresi dan ekspansi udara pada suhu yang berbeda untuk menghasilkan konversi energi bersih dari energi termal menjadi mekanik. Siklus ideal pada mesin ini meliputi kombinasi kompresi isothermal dari fluida dingin dan ekspansi isothermal dari media panas serta proses pemanasan dan pendinginan isokorik (pada volume yang sama). Gambar 6.17c menyajikan skema kerja dari *Stirling Engine* saat proses pendinginan isokorik. Perubahan temperatur periodik berlangsung secara kontinu selama proses kerja mesin dengan bantuan perpindahan fluida kerja pada dua ruangan/silinder yang berbeda di mana satu ruang/silinder selalu menerima panas dan satu ruang/silinder selalu membuang panas.

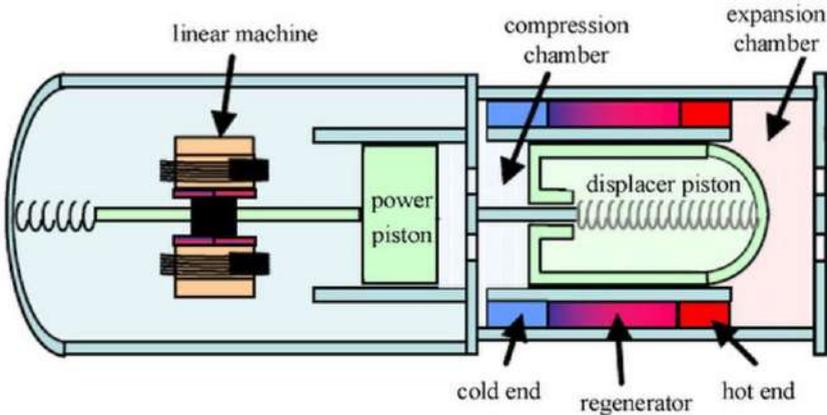
Mesin kinematik, atau mesin yang menggunakan hubungan *piston-crankshaft*, bekerja secara kontinu selama siklus termodinamik berlangsung. Piston kompresi bergerak ke arah TMA, mendorong fluida kerja dingin ke bagian silinder hangat melewati regenerator. Regenerator melepas sebagian panas yang diserap pada proses sebelumnya ke fluida kerja (proses pemanasan isokorik, Gambar 6.17a). Fluida kerja menjadi panas sesuai dengan temperatur pada sisi ruang/silinder panas sedangkan generator menjadi dingin mengikuti temperatur pada sisi ruang/silinder diringin. Selanjutnya, fluida kerja pada ruang/silinder panas mengembang secara isothermal dan menyerap panas dari ruangan tersebut (proses ekspansi isothermal, Gambar 6.17b).

Ekspansi fluida kerja mendorong piston sehingga melakukan kerja mekanik. Ketika *piston* melewati batasan titik mati tengah dan mulai naik kembali ke atas, fluida kerja panas terdorong melewati regenerator dan pindah ke ruang/silinder dingin. Panas dipindahkan ke regenerator secara isokorik (Gambar 6.17c). Fluida kerja didinginkan sesuai dengan suhu pada sisi ruang/silinder dingin sementara regenerator menjadi hangat mendekati suhu pada sisi ruang/silinder panas. Selanjutnya, fluida kerja terkompresi secara isothermal dan melepaskan panas ke sisi ruang/silinder dingin (proses kompresi isothermal, Gambar 6.17d).

Komponen utama dari sistem ini meliputi silinder kerja (panas), silinder kompresi (dingin) dan regenerator sebagai penyimpanan energi termal sementara. Pada banyak model, regenerator merupakan bodi yang memiliki banyak rongga dengan kalor spesifik yang tinggi. Bodi berongga

memiliki massa termal lebih besar dibandingkan dengan massa gas yang melewati bodi. Semakin besar transmisi panas yang terjadi pada regenerator, maka akan semakin meningkatkan perbedaan temperatur antara silinder panas dan dingin, sehingga efisiensi *Stirling Engine* menjadi lebih tinggi. Jika piston kompresi dihubungkan dengan piston kerja pada *phase angle* yang tepat melalui mekanisme penggerak atau menggunakan sistem getaran, seluruh sistem dapat dianggap sebagai mesin kalor.

Dalam perspektif desain mekanis, mesin aksi tunggal (*single acting*) dan ganda (*double acting*) kadang digunakan. Pada mekanisme aksi tunggal, hanya satu sisi dari piston kompresi/ekspansi yang mengalami fluktuasi tekanan di dalam ruang kerja, sedangkan tekanan dari fluida kerja efektif pada kedua sisi ruang kerja jika menggunakan mekanisme aksi ganda. Pada aksi ganda, kedua piston bekerja secara simultan untuk saling melakukan kompresi dan ekspansi pada masing-masing ruang/silinder.



Gambar 6.18 Skematik desain dari *free piston Stirling Engine* [68]

Stirling Engine dapat dikategorikan sebagai mesin kinematik dan mesin piston bebas (*free-piston*). Kinematik menggunakan *crankshaft* untuk transmisi daya. Generator bisa dihubungkan dengan poros tersebut untuk mengubah gerak putar mekanis menjadi listrik. Model *free-piston* tidak memiliki jaringan *piston-crankshaft* dan silinder yang berbeda untuk proses perpindahan fluida Gambar 6.18. Kedua piston bebas bergerak pada sisi silinder. Energi mekanis yang dihasilkan dikonversi menjadi listrik dengan generator *linear*. Hubungan mekanis untuk mengatur gerakan

kedua piston dibantu oleh *damping system* dengan menggunakan pegas, sehingga hanya ada dua komponen yang bergerak pada sistem *free-piston Stirling Engine*. Mesin dapat dibuat kedap udara (*hermetically sealed*) sehingga masalah pengencangan dan sambungan dapat dihindari. *Free-piston* memberikan banyak keuntungan teoritis terkait dengan desain yang sangat sederhana dan reliabilitas yang tinggi, namun sangat sulit dalam proses pengembangan dan pembuatan mesinnya, sehingga cenderung penggunaan *Stirling Engine* adalah model kinematik. Mesin yang digunakan pada *solar dish system* menggunakan helium (He) atau hidrogen (H) sebagai fluida kerja pada suhu operasi antara 600-800 °C. Daya keluaran diatur dengan memvariasikan tekanan efektif fluida kerja maupun gerak langkah piston.

2. Kelengkapan Sistem

a. Alternator

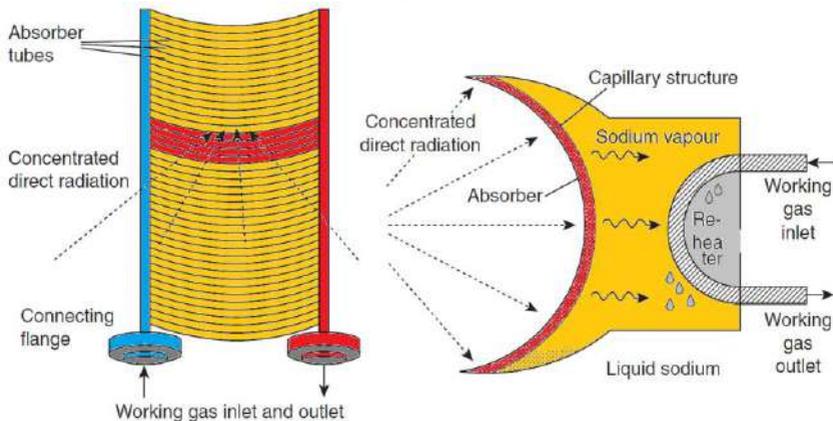
Konversi energi mekanis menjadi listrik pada *solar dish system* bergantung kepada jenis mesin yang digunakan dan keperluan aplikasinya. Generator induksi digunakan untuk *Stirling Engine* model kinematik yang dihubungkan dengan jaringan listrik. Generator induksi menyesuaikan dengan distribusi tegangan pada jaringan dan dapat menghasilkan keluaran satu/tiga fasa dengan pilihan tegangan 230 atau 400 volt. Generator induksi merupakan mesin konversi yang sudah sangat maju dan dapat mencapai konversi mekanis menjadi listrik hingga 94% sesuai dengan kapasitas dayanya. Alternator kadang digunakan juga untuk mengatasi ketidaksesuaian antara kecepatan luaran mesin dan daya pembangkitan listrik yang konstan pada jaringan distribusi. Alternator merupakan alat konversi mekanis menjadi listrik, memiliki luaran yang sudah dikondisikan dengan *rectification* (konversi menjadi DC) yang kemudian di-*invert* untuk menghasilkan daya AC. Sebagai contoh, kecepatan operasi turbin gas sangat tinggi, lalu dikonversikan menjadi tegangan AC dengan frekuensi tinggi menggunakan alternator kecepatan tinggi, lalu diubah lagi menjadi DC dengan bantuan *rectifier*, kemudian dikonversi untuk mencapai frekuensi 50-60 Hz untuk satu fasa, atau daya tiga fasa dengan bantuan *inverter* lagi. Pendekatan ini memberikan keuntungan untuk menjaga operasi mesin yang stabil.

b. Sistem Pendingin

Mesin kalor harus melepaskan panas ke lingkungan. *Stirling Engine* menggunakan *radiator* untuk melepas limbah panas dari mesin ke lingkungan sekitar. Untuk siklus terbuka seperti mesin Brayton, sebagian besar limbah panas dibuang melalui gas buang (*exhaust*). Daya ekstra dibutuhkan untuk menggerakkan sistem pendingin. Untuk *Stirling Engine*, daya yang dibutuhkan untuk kelengkapan sistem pendingin yang meliputi kipas dan pompa, termasuk juga untuk penggerak *concentrator* dan sistem kendalinya berkisar antara 0.5-1 kW_e untuk tiap kapasitas pembangkitan 10 kW_e.

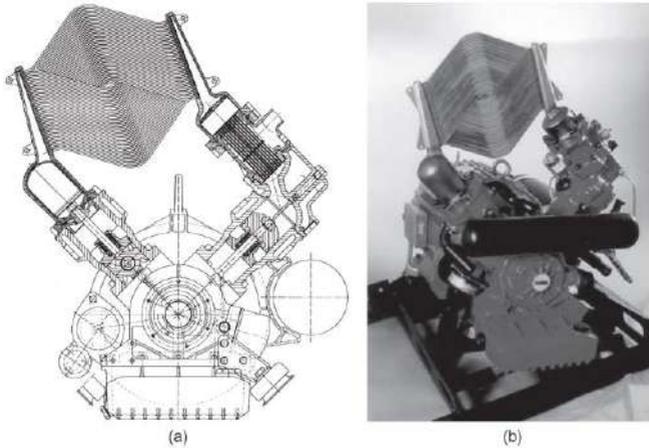
c. Receiver

Receiver merupakan komponen yang sangat vital pada *solar dish system*. Secara umum, model yang dikembangkan menempatkan *Stirling Engine* pada *receiver*. Terdapat dua metode yang digunakan untuk memindahkan radiasi matahari yang diserap ke fluida kerja (Gambar 6.19).



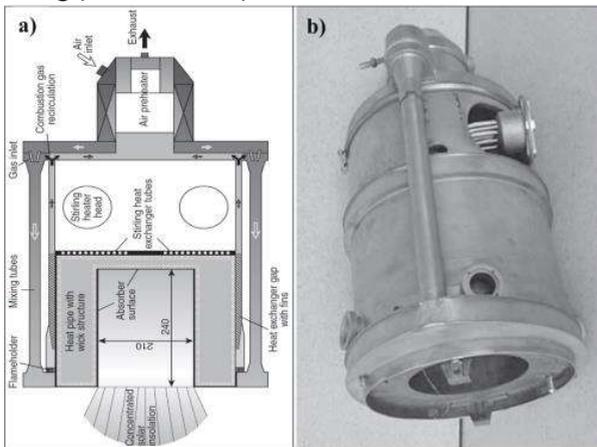
Gambar 6.19 Prinsip desain receiver: (a) *direct illuminated tube receiver* (DIR); (b) *heat pipe receiver* [69]

Pada tipe pertama yakni model *directly illuminated tube receiver* (DIR), pipa kecil yang dialiri fluida kerja mesin ditempatkan langsung untuk menyerap fluks energi matahari terkonsentrasi dari *concentrator*. Susunan pipa ini menghasilkan bentuk permukaan *absorber* sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6.20.



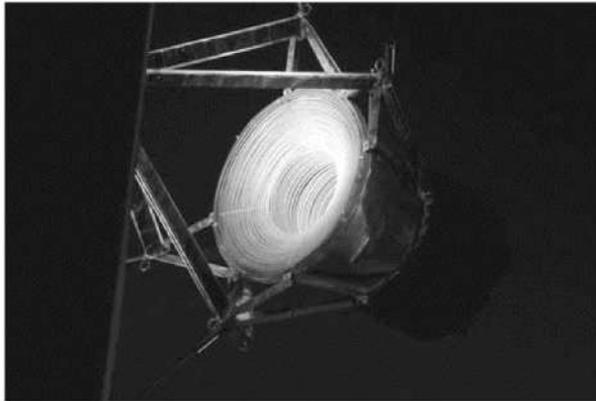
Gambar 6.20 Contoh dari model *receiver* DIR untuk *Stirling Engine* kapasitas 10 kW tipe SOLO, gambar potongan (a) dan tampilan mesin (b) [70]

Model *receiver* menggunakan logam cair sebagai fluida kerja sementara untuk keperluan perpindahan panas. Fluida kerja menguap dipermukaan *absorber* dan terkondensasi di pipa yang mengalir fluida kerja dari mesin. Model kedua *receiver* ini disebut dengan *heat pipe receiver* karena uap terkondensasi dan mengalir kembali untuk pemanasan ulang (Gambar 6.21).



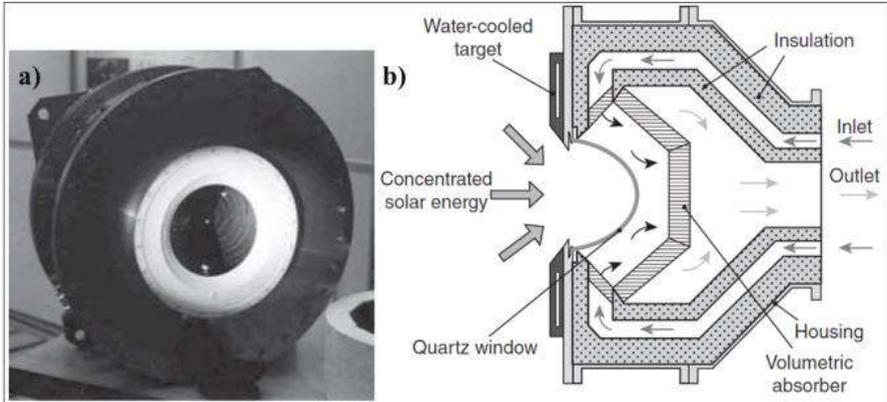
Gambar 6.21 Gambar skematik (a) dan prototipe (b) dari *Stirling hybrid heat pipe receiver* untuk mesin kapasitas 10 kW (DLR) [71]

Untuk desain *receiver* yang menggunakan logam cair sebagai media perpindahan panas sementara, dua metode untuk mensuplai logam cair ke *absorber* digunakan: *pool boiler* dan *heat pipe*. Pada metode *pool boiler*, *pool* dari logam cair selalu bersentuhan dengan permukaan *absorber*. Metode kedua melibatkan sumbu yang dipasang di bagian belakang *absorber*. Gaya kapilaritas pada sumbu menarik logam cair pada di atas permukaan *absorber* yang kemudian logam cair ini menguap. Untuk keperluan pembangkitan uap, *monotube receiver* dikembangkan. Model ini terdiri dari jaringan pipa panjang yang membentuk permukaan *absorber* (Gambar 6.22). Air menguap ketika mengalir melewati susunan pipa ini.



Gambar 6.22 Contoh dari model *monotube open receiver* (ANU) [66]

Model lain yang diperuntukkan proses industri menggunakan metode *volumetric receivers*. Pada model ini, udara panas dihasilkan untuk siklus Brayton ataupun digunakan untuk mendorong terjadinya reaksi termokimia (Gambar 6.23) Cahaya matahari yang terkonsentrasi diserap oleh permukaan berpori yang menggunakan material tahan panas. Panas dipindahkan ke udara yang mengalir di dalam *absorber*. Biasanya udara bertekanan (sekitar 10 bar) digunakan untuk siklus ini sehingga membutuhkan sistem yang kedap dan memiliki konstruksi yang tahan terhadap tekanan dan juga penggunaan kaca kuarsa transparan untuk proses penyerapan cahaya yang baik.



Gambar 6.23 Contoh dari model *volumetric pressurized receiver*:
 (a) tampilan dan (b) gambar potongan [72]

E. PERFORMA SISTEM

Secara umum, performa menyeluruh sistem bergantung pada parameter desain, seperti efisiensi mesin, beban kerja dari mesin dan juga performa optik dari *concentrator* (misalnya tingkat reflektivitas dari cermin, akurasi permukaan dari reflektor, kekakuan dari struktur, dll) dan ketersediaan energi matahari dalam bentuk *direct normal irradiation* (DNI). Suhu lingkungan bertindak sebagai *reservoir* suhu rendah untuk siklus termodinamik dari mesin yang digunakan, sehingga berdampak juga pada efisiensi mesin. Tabel 6.1 menyajikan beberapa desain dan informasi umum dari instalasi dan lokasi *solar dish system*. Pembahasan secara khusus difokuskan untuk *Stirling Engine* yang pada prinsipnya akan mirip dengan siklus maupun aplikasi lainnya. Efek kelembaman termal (*thermal inertia*) sangat rendah untuk *Stirling system*, sehingga respon kerja dari *solar dish system* yang menggunakan *Stirling Engine* sangat cepat. Kondisi operasi tunak (*steady*) dapat dicapai dalam beberapa menit setelah sistem beroperasi.

Pola pembangkitan listrik harian dari *Stirling Engine* untuk *solar dish system* dapat dilihat berdasarkan pengamatan parameter operasi umum dan uji coba prototipe yang telah dilakukan. Secara khusus, *solar dish Stirling system* dapat mulai membangkitkan listrik dengan nilai minimal DNI antara 200-300 W/m² pada pagi hari, namun tetap bergantung kepada

kerugian mekanis dan termal dari mesin serta performa optik dari *concentrator*. Daya keluaran tertinggi biasanya diperoleh saat DNI mencapai 1,000 W/m². Pada kasus penggunaan *concentrator* besar, daya keluaran maksimal bisa diperoleh pada nilai DNI lebih rendah yakni sekitar 800 W/m².

Tabel 6.1 Kondisi operasi umum dari *solar dish system*

Parameter	Nilai
Kecepatan angin	15-20 m/s
Ketahanan kecepatan angin	45 m/s pada posisi membelakangi angin
Suhu lingkungan	-10-50 °C
Kelembaban	~ 100% RH
Daya keluaran maksimal	pada 800-1,000 W/m ² DNI
Tekanan kerja mesin	0-15 MPa
Batasan suhu gas kerja	500-700 °C
Koneksi ke jaringan	Sistem tunggal yang terhubung jaringan dengan tegangan 230/400 V

F. SISTEM KERJA HIBRID

Sistem kerja *hibrid* menggabungkan sumber energi alternatif untuk keperluan operasi sistem tanpa bergantung pada kondisi cuaca, misalnya saat malam hari maupun kondisi mendung/hujan. Penggunaan energi lain seperti bahan bakar fosil (biasanya dalam bentuk gas) maupun sumber energi alternatif lain seperti *biogas* dimaksudkan untuk menjamin suplai listrik yang stabil dari sistem. Sistem ini telah diuji dan terbukti efektif untuk keperluan suplai kontinu pada jaringan listrik utama. Sistem kerja *hibrid* umumnya menggunakan metode otomasi yang dapat langsung berpindah dengan cepat ketika target keluaran listrik dari *Stirling Engine* turun di bawah ambang batas minimal.

G. SISTEM KERJA MANDIRI (*STAND ALONE OPERATION*)

Salah satu keunikan *solar dish system* adalah dimungkinkannya operasi mandiri (*standalone*) yang tidak membutuhkan *grid* atau jaringan. Aplikasi yang paling diminati adalah untuk keperluan militer dan pertanian.

Sebagai contoh, wilayah pertanian yang luas umumnya jauh dari jaringan listrik utama, sehingga untuk keperluan pemompaan air menggunakan mesin diesel. Tentu hal ini dapat digantikan dengan penerapan *solar dish Stirling system* dimana daya listrik keluaran langsung dihubungkan dengan pompa untuk proses penghisapan air dari sumur. Model ini pernah dikembangkan oleh Sandia National Labs pada tahun 2000 untuk kebutuhan pompa air mandiri dengan menggunakan *solar dish Stirling system*.

H. TREN DI MASA MENDATANG UNTUK SOLAR DISH SYSTEM

1. Aplikasi Desentralisasi

Dari sejak awal pengembangan *solar dish Stirling system*, target penggunaan utama untuk sistem ini adalah desentralisasi pembangkit listrik atau suplai energi untuk wilayah *remote*, dengan target beberapa kW hingga MW. Namun demikian, pengembangan teknologi ini pada beberapa tahun terakhir fokus untuk pembangkitan skala besar antara 10 MW hingga 1 GW. Alasannya sederhana, yakni biaya yang lebih hemat untuk pembangunan skala besar, dan juga teknologi ini diharapkan lebih kompetitif dibandingkan CSP model PTC maupun *solar panel*. Pertimbangan lebih lanjut adalah kesiapan teknologi untuk mencapai taraf komersialisasi. Kebanyakan teknologi yang dibangun masih berupa prototipe maupun uji coba awal (TKT 5-7). Uji coba yang dilakukan juga belum memadai karena belum memasukan seluruh aspek penting terkait dengan segala kemungkinan yang ada, misalnya jaminan suplai listrik stabil saat musim penghujan, tantangan dari angin, operasi dan kegalatan sistem yang bisa terjadi kapan saja. Penelitian lebih lanjut masih sangat diperlukan untuk meningkatkan reliabilitas sistem, khususnya untuk aplikasi desentralisasi.

2. Ukuran Sistem

Ukuran yang dikembangkan saat ini untuk *solar dish Stirling system* umumnya sekitar beberapa kW sampai dengan 25 kW. Permasalahan utama dengan ukuran yang kecil ini akan meningkatkan biaya komponen seperti sistem kelistrikan, sistem kendali, dan juga pengkabelan sistem. Untuk kapasitas yang sama, banyak komponen yang harus dirakit pada

sistem. Pada aspek lain, ukuran yang kecil membuat banyaknya komponen yang harus diproduksi dan memungkinkan untuk produksi pada skala besar, khususnya untuk produksi teknologi yang sudah diketahui dari industri otomotif. Sebagai contoh, sistem Infinia dengan kapasitas 3 kW menggunakan jalur produksi ini, dengan menggunakan banyak komponen yang sudah tersedia pada industri otomotif. Lebih lanjut, beban angin pada ukuran *dish* yang lebih kecil dan juga beban untuk sistem penggerak bisa lebih kecil dan proporsi terhadap ukuran *dish* yang lebih kompak. Beban angin berdampak pada struktur dari *dish* dan menyebabkan tendensi untuk mengembangkan sistem dengan massa spesifik yang rendah (kg/m^2 untuk tiap *concentrator*). Sebaliknya, meskipun sistem yang lebih besar menguntungkan dari aspek produksi massal dan komponen, sistem ini cenderung memiliki massa spesifik yang lebih besar dan berdampak pada pembebanan angin dan sistem penggerak.

Ukuran optimum dari aspek ekonomis bergantung pada banyak variabel. Banyak desainer menemukan ukuran optimum untuk *solar dish Stirling system* bervariasi antara 10-25 kW_e, dengan ukuran *dish* bervariasi antara 50-120 m². Namun demikian, banyak dari sistem yang dikembangkan saat ini, entah untuk tujuan komersial maupun tahapan pra-komersial memiliki ukuran yang lebih beragam. Batasan atas dari *solar dish Stirling system* dicapai oleh ANU dengan ukuran *dish* terbesar yakni 400 m² dan 500 m². Sistem ini memiliki fungsi tambahan untuk tujuan reaktor *solar-chemical* atau *receiver* yang didesain untuk produksi uap. Batasan bawah dari ukuran *dish* dicapai oleh Infinia *dish Stirling system* dengan ukuran kapasitas pembangkit dan *dish* 3 kW dan 15 m². Terkhusus untuk *dish Stirling system*, pertimbangan tambahan untuk menentukan ukuran juga harus memperhatikan desain optimum dari kapasitas *Stirling Engine* yang biasanya bervariasi pada ukuran tertentu.

3. Sistem Penyimpanan Energi

Keuntungan utama yang dimiliki dari sistem sentral seperti *solar tower* dan *parabolic trough collector* adalah peluang penggunaan sistem penyimpanan energi melalui unit *thermal energy storage*. Opsi penyimpanan akan menaikkan faktor kapasitas dari sistem dan sangat esensial untuk produksi listrik skala besar skala utilitas yang dapat

beroperasi dengan stabil, khususnya saat malam hari ketika mencapai beban puncak dan tidak ada suplai energi dari matahari. Teknologi penyimpanan energi termal sangat ideal untuk *solar dish Stirling system* dikarenakan memiliki kelembaman inersia yang rendah dan kapasitas pembangkitan sepenuhnya mengikuti radiasi yang masuk dengan kerugian termal yang lebih sedikit. Dengan demikian, penerapan *thermal energy storage* untuk *solar dish Stirling system* akan sangat menguntungkan dan memberikan reliabilitas yang lebih besar pada sistem ini.

Terdapat dua opsi untuk unit *thermal energy storage* pada *solar dish Stirling system*: penempatan langsung pada unit *Stirling Engine* dan penempatan terpusat pada unit pembangkit. Permasalahan pada penempatan langsung di *Stirling Engine* adalah peningkatan beban pada mesin. Teknologi *thermal energy storage* pada masa sekarang hanya dapat beroperasi beberapa jam saja dan bergantung pada massa/volume *material storage* yang digunakan. Dengan demikian, penempatan pada sisi *Stirling Engine* akan meningkatkan beban, membutuhkan penguatan rangka, dan menaikkan beban sistem sehingga dibutuhkan penyesuaian terhadap sistem mekanis dan beban dari penggerak. Lebih lanjut, ukuran *thermal energy storage* yang kecil memiliki peluang kerugian termal yang tinggi akibat proses perpindahan panas yang terjadi, baik konduksi maupun konveksi. Alternatif penggunaan sentral *thermal energy storage* juga mengalami masalah yang sama karena harus mendistribusikan fluida kerja dari unit *concentrator/receiver* ke unit *storage tank*, dengan jarak yang panjang tentunya akan berdampak juga pada kerugian termal yang lebih besar.

Kedua opsi penyimpanan yang telah disebutkan harus dapat mencapai suhu penyimpanan yang tinggi. Dengan teknologi *Stirling Engine* yang digunakan saat ini, paling tidak suhu dari fluida kerja harus mencapai nilai antara 600-700 °C. Tentu dibutuhkan nilai yang lebih tinggi pada unit *thermal energy storage* untuk mengakomodir kerugian termal yang terjadi sehingga kapasitas, material dan kelengkapan sistem harus dapat mendukung capaian suhu ini. Sejauh ini, belum ada teknologi *thermal energy storage* yang diterapkan pada unit *solar dish Stirling system*, yang dapat menjadi indikasi tantangan ekonomi dan teknis yang sulit dalam penerapannya. Teknologi *thermal energy storage* sangat atraktif, namun

masih sangat diperlukan riset berkelanjutan yang dapat mengatasi tantangan teknologi dan keekonomisan dari unit ini.

4. Sistem Operasi Hibrid

Konsep *hibrid* memberikan peluang serapan teknologi yang lebih baik. Mirip dengan *plant* yang memiliki unit *thermal energy storage*, sistem *hibrid* pada *solar power plant* memungkinkan untuk penggabungan serapan energi matahari yang datang dan energi listrik yang dihasilkan untuk tujuan pembangkitan yang lebih baik. Terlebih kombinasi yang sesuai juga dapat digunakan untuk proses industri dan *waste heat recovery* untuk skala industri. Skema umum yang dapat diterapkan adalah penyesuaian kapasitas produksi dari unit pembangkit utama (misalnya turbin uap dengan *fossil fuel*) saat permintaan sedikit yang dapat disubsidi dari unit *solar dish Stirling system*. Kemudian saat permintaan puncak (*peak load*), unit pembangkit utama dapat beroperasi secara penuh dan dibantu sedikit dengan *solar dish Stirling system*. Tingkat kelayakan sistem ini sangat tinggi dan sudah dilaporkan di beberapa proyek yang telah dikembangkan, namun masih dalam tahap uji eksperimen saja. Tantangan paling tinggi adalah mengatasi masalah teknis terkait fluktuasi permintaan listrik dan juga fluktuasi dari energi matahari yang datang (khususnya pertimbangan cuaca). Dengan algoritma kontrol yang baik, didukung oleh data dan kecenderungan pola konsumsi, model sistem *hibrid* yang ditawarkan akan sangat menguntungkan, baik untuk *solar dish Stirling system* maupun untuk unit pembangkit utama karena beban konsumsi bahan bakar fosil akan berkurang signifikan.

I. KESIMPULAN BAGIAN VI

Solar dish technology memiliki keuntungan utama terkait dengan rasio konsentrasi yang optimal, capaian temperatur terbaik, dan tingkat efisiensi teoritis yang paling tinggi dibandingkan *concentrated solar power* lainnya. Pemanfaatan *Stirling Engine* sebagai unit konversi panas menjadi listrik menawarkan opsi yang baik terkait dengan efektivitas pembangkitan. Terlebih, sistem ini dapat dikembangkan untuk tujuan desentralisasi dan juga untuk wilayah *remote*. Pada aspek industri, panas yang tinggi dari *solar dish system* dapat digunakan untuk mendorong produksi "*solar fuel*",

mengganti kebutuhan energi termal dengan energi panas dari matahari dan juga dikombinasikan untuk *waste heat recovery*. Banyaknya ukuran *dish* yang dikembangkan dan juga model operasi yang diteliti menjadi bukti banyaknya ketertarikan peneliti global pada sistem ini.

Terlepas dari semua keuntungan yang ada pada *solar dish system*, masih banyak kendala teknis yang harus dihadapi untuk mencapai taraf layak dari segi teknologi. Penelitian dan pengembangan terarah menjadi kunci dari pemecahan masalah ini. Kesesuaian teknologi unit *thermal energy storage*, peningkatan efektivitas operasi sistem dan juga peluang produksi skala besar untuk menurunkan biaya unit menjadi prioritas penting untuk diselesaikan. Secara bersamaan, skema pembiayaan listrik, model algoritma kendali untuk sistem *hibrid* dan model distribusi energi termal untuk keperluan proses industri bisa dilakukan juga untuk meningkatkan peluang penggunaan teknologi. Optimisme yang tinggi dan semangat pembaruan untuk melepaskan diri dari ketergantungan terhadap bahan bakar fosil merupakan motivasi utama dari peningkatan kualitas *solar dish Stirling system*.



TREN *CONCENTRATED SOLAR POWER*

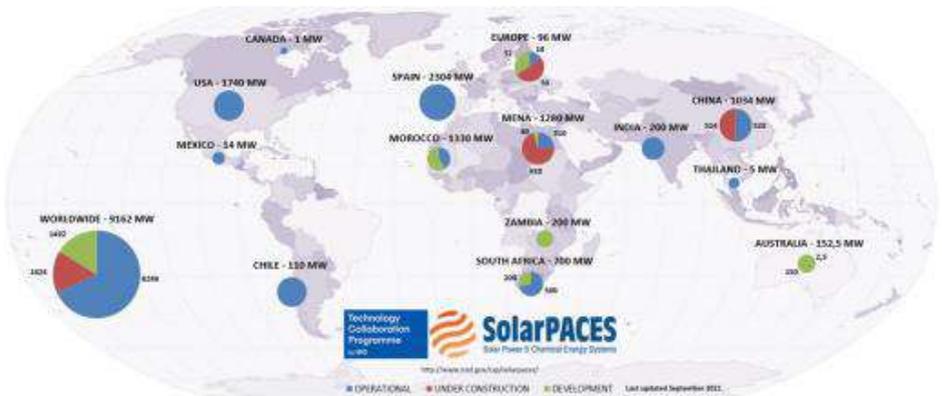
A. PERKEMBANGAN *PLANT CONCENTRATED SOLAR POWER* GLOBAL

Upaya berkelanjutan untuk mengatasi tantangan teknologi dari sistem *concentrated solar power* dapat dilihat dari tren pembangunan *plant concentrated solar power* di dunia. Gambar 7.1 memperlihatkan tren perkembangan global untuk teknologi CSP, baik pada tahap pembangunan, dalam proses konstruksi dan sudah beroperasi. Data dengan jelas menunjukkan kapasitas CSP global mencapai 9,162 MW, dengan status sudah beroperasi mencapai rasio 68.17 %. Hal ini mengindikasikan bahwa semangat perubahan untuk menghidupkan sumber energi bersih menjadi perhatian serius pada beberapa Negara yang sudah mengembangkan teknologi ini.

Kapasitas *plant* yang sudah beroperasi dipimpin oleh Spanyol dan USA, yang mana ini adalah suatu kewajaran melihat usaha berkelanjutan yang dilakukan oleh Negara tersebut. Hal yang cukup unik adalah perkembangan teknologi CSP untuk wilayah Benua Amerika Tengah (Meksiko) dan Amerika Selatan (Chili) yang masing-masing sudah memiliki kapasitas terpasang 14 MW dan 110 MW. Untuk wilayah Asia, secara khusus masih dimenangkan oleh Cina dan India dimana Cina memiliki

target kapasitas hingga 1.034 GW dan India sudah memiliki kapasitas terpasang hingga 200 MW.

Dari wilayah ASEAN, Thailand tercatat memiliki kapasitas unit terpasang untuk teknologi CSP dengan *plant* berukuran 5 MW. Jika melihat data ini, tentu terlihat masih sangat kecil dibandingkan peta sumber energi terbarukan lainnya maupun untuk pembangkit model konvensional (bahan bakar fosil). Belajar dari perkembangan teknologi CSP yang masif dilakukan, maka kelak akan datang masanya di mana teknologi ini memiliki nilai keekonomisan yang baik dan dapat dengan mudah diterapkan untuk Negara yang memiliki iklim sesuai. Artinya, semangat optimisme perubahan ke arah energi bersih terlihat dengan cukup jelas dan sudah saatnya kita aktif dalam membangun teknologi, terlebih untuk wilayah tropis seperti Indonesia dengan potensi suplai matahari sepanjang tahun.



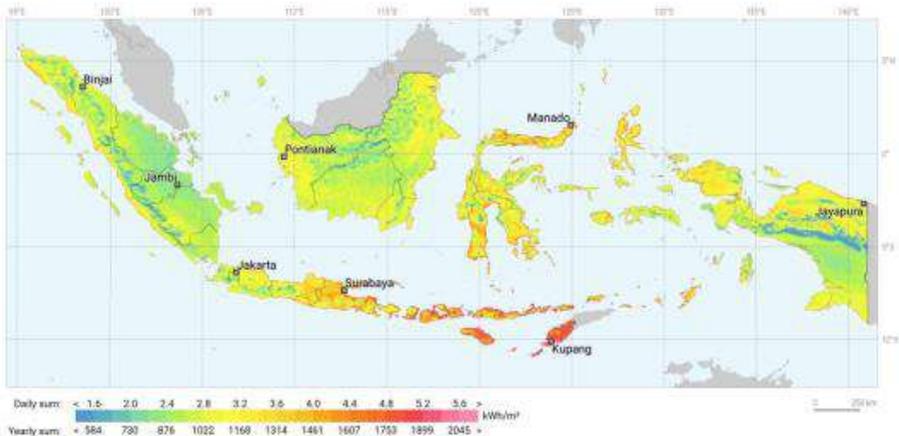
Gambar 7.1 Peta global perkembangan teknologi *concentrated solar power* (sumber: SolarPACES)

B. POTENSI MATAHARI DI INDONESIA

Sebagai Negara tropis, wilayah Indonesia mendapatkan suplai energi matahari sepanjang tahun. Bentuk pancaran energi yang dapat dimanfaatkan untuk CSP adalah radiasi langsung (*Direct Normal Irradiation*, DNI) dalam satuan kWh/m². Gambar 7.1 menunjukkan peta potensi DNI pada beberapa wilayah di Indonesia. Citra ini memperlihatkan tidak seluruh wilayah Indonesia memiliki potensi DNI yang tinggi. Jika mengacu ke perspektif ideal untuk *plant* CSP, maka nilai harian DNI harus mencapai

paling tidak 4.0 kWh/m². Dari peta terlihat, hanya wilayah Nusa Tenggara Timur dan sebagian Nusa Tenggara Barat yang memiliki potensi ini. Namun demikian, kelebihan dari wilayah Indonesia adalah suplai kontinu dari energi matahari, sehingga dapat meningkatkan kelayakan sistem berdasarkan nilai kumulatif tahunan.

Perkembangan CSP pada beberapa Negara, khususnya wilayah subtropis, terkendala pada suplai matahari yang tidak merata sepanjang tahun. Keuntungan geografis ini selayaknya dapat dimaksimalkan dengan mulai mengembangkan teknologi CSP, baik untuk kebutuhan listrik maupun untuk kebutuhan termal lainnya seperti proses industri. Belajar dari pengalaman Negara lain yang sudah masif mengembangkan teknologi ini, seluruhnya memperlihatkan adanya uji coba yang dilakukan secara kontinu dan bertahun-tahun untuk mencapai kesiapan teknologi yang layak. Dengan demikian, maka tahapan terpenting yang perlu dilakukan adalah mulai membangun teknologi ini dan menjadikan bagian dari riset prioritas.



Gambar 7.2 Peta potensi radiasi matahari langsung (*Direct Normal Irradiation-DNI*) untuk wilayah Indonesia [73]

Mungkin kita tidak harus memulai dari bawah karena sudah banyak tersedia laporan dan literatur yang mendukung untuk capaian dari teknologi CSP. Yang perlu dilakukan saat ini adalah memulai secara

terencana untuk melakukan penelitian dan pengembangan berkelanjutan dari teknologi CSP. Aspek penting yang perlu diperhatikan dari teknologi CSP antara lain: material *reflector*, material untuk *thermal energy storage*, bentuk desain dan struktur rangka, teknologi *photo-thermal conversion*. Kemudian aspek lingkungan dan bisnis dapat diperhatikan dari *feasibility study* dan *business model canvas*. Sehingga keseluruhan aspek, baik teknologi, lingkungan dan ekonomi, dapat mencapai kelayakan yang tinggi.

C. SEMANGAT PERUBAHAN

Seluruh kajian dengan jelas memperlihatkan bahwa upaya berkelanjutan dilakukan untuk memaksimalkan proses implementasi teknologi *concentrated solar power* (CSP) sebagai alternatif pemanfaatan energi matahari. Proses ini memang belum menunjukkan hasil yang maksimal dalam artian berhasil menggantikan fungsi pembangkitan energi tenaga bahan bakar fosil secara penuh. Namun, paling tidak usaha yang dilakukan ini mulai mendapatkan perhatian yang lebih dari seluruh pihak yang terlibat. Terlihat dengan jelas tren kenaikan kapasitas secara global dan juga peningkatan teknologi pendukung dari *concentrated solar power*.

Usaha berkelanjutan yang dilakukan memiliki peluang untuk mencapai taraf komersial tingkat lanjut, menjadikannya layak sebagai teknologi pembangkitan energi bersih yang dapat menunjang kehidupan modern. Sudah saatnya seluruh pihak, baik dari sisi akademik, pemangku kepentingan dan industri untuk saling mendukung dalam program ini. Alternatif metode yang digunakan, peluang aplikasi yang lebih luas dapat dilihat pada beberapa aspek berikut:

a. Bidang Agrikultur

Teknologi bersih dari CSP dapat dimanfaatkan untuk bidang agrikultur dalam bentuk pembangkitan panas dan juga pemanfaatan listrik yang dibangkitkan untuk mendukung proses pertanian. Penggunaan pompa air tenaga CSP bisa dijadikan alternatif pengganti untuk pompa air tenaga bahan bakar fosil. Lebih lanjut, metode pengeringan menggunakan CSP sebagai *thermal generator* dapat dipertimbangkan lebih lanjut karena dengan penggunaan *thermal energy storage*, proses pengeringan dapat dilakukan dengan lebih bersih dan kontinu sepanjang hari.

b. Bidang Industri

Beberapa industri membutuhkan energi dalam bentuk panas untuk proses industri. Energi panas yang awalnya bersumber dari proses pembakaran dapat digantikan dengan panas dari sistem CSP. Metode *solar boiler* dan *regenerative heat exchanger* dapat dipertimbangkan oleh pelaku industri. Memang teknologi ini masih terbilang baru dan kadang membuat ragu untuk pengambilan keputusan, namun jika mempertimbangkan aspek keberlanjutan jangka panjang, maka sekiranya teknologi ini layak untuk dipertimbangkan. Terlebih beberapa proses industri tidak membutuhkan suhu air panas yang terlalu tinggi, cukup pada kisaran suhu 80-150 °C. Suhu ini dapat dengan mudah dihasilkan oleh sistem CSP, terlebih jika menggunakan model *parabolic dish* yang dapat bekerja secara mandiri.

c. Bidang Perhotelan dan Industri Air Panas

Meskipun Indonesia masuk ke dalam wilayah tropis, namun tetap membutuhkan pembangkitan air hangat untuk keperluan industri pariwisata, dalam hal ini hotel. Banyak energi yang harus dibangkitkan untuk proses pemanasan air mandi di bidang Hotel, dan tentunya ini merupakan suatu pemborosan dari perspektif energi listrik dan konsumsi energi harian. Alternatifnya, air panas dapat dihasilkan melalui penerapan teknologi CSP yang digabungkan dengan *thermal energy storage* agar sistem dapat melakukan suplai air panas secara kontinu, khususnya di malam hari. Lebih lanjut, beberapa wilayah di Indonesia juga dapat saja cukup dingin, khususnya wilayah dataran tinggi, maka industri air panas dapat mempertimbangkan potensi pemanfaatan sistem CSP yang digabungkan dengan TES untuk pemenuhan kebutuhan air panas pada wilayah tersebut.

d. Desalinasi

Produksi air bersih dari air laut melalui proses desalinasi menjadi perhatian penting untuk kebutuhan penyediaan air bersih. Model umum yang biasa dilakukan adalah menggunakan *reverse osmosis* atau proses *thermal* yang keduanya bersumber dari energi bahan bakar fosil. Alternatif

yang dapat dipertimbangkan adalah penerapan teknologi CSP untuk produksi air bersih, layaknya *solar dome* yang sedang dikembangkan.

e. Pembangkit untuk Wilayah 3T (Tertinggal, Terdepan, dan Terluar)

Wilayah Indonesia terdiri dari banyak pulau dan masih banyak wilayah yang belum mendapatkan aliran listrik, khususnya wilayah 3T. Kondisi geografis yang cukup sulit kadang menjadi pertimbangan untuk instalasi jaringan utama (*grid*) karena tidak ekonomis. Alternatifnya, pembangkit tenaga diesel biasa digunakan untuk mengatasi hal ini. Pertimbangan lebih lanjut dapat dipertimbangkan dengan menggunakan CSP untuk produksi listrik pada wilayah ini, misalnya dengan penggunaan *parabolic dish* yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik mandiri.

D. SOSIAL DAN EKONOMI

Diffusi teknologi, khususnya yang menyangkut ke masyarakat, tidak hanya dapat dinilai dari aspek teknologi saja, namun juga perlu diperhatikan terkait dengan aspek sosial dan ekonomi. Integrasi yang baik antar pihak yang terlibat, khususnya yang aktif di bidang sosial dan ekonomi dapat memaksimalkan proses difusi teknologi ini. Misalnya dari aspek sosial, perilaku hidup bersih, kesadaran dalam perilaku hemat energi dan air bersih, dapat dibangun secara mendasar untuk menghindari kondisi *overload* dari proses pembangkitan yang digunakan. Termasuk yang cukup penting diperhatikan adalah aspek pembangunan kapasitas penduduk, untuk mau menerima teknologi baru dan menjaga fasilitas yang diberikan dan proses pemberdayaan masyarakat setempat sebagai operator untuk pembangkit yang disediakan, dapat memberikan efek domino yang optimal.

Pertimbangan terpenting yang berikutnya adalah aspek ekonomi. Sebagai salah satu bentuk bisnis, maka proses penerapan teknologi pembangkitan listrik ataupun energi alternatif lainnya yang bersumber dari energi baru terbarukan tetap harus memperhatikan aspek ekonomi. Ekonomi yang dimaksud tentunya tetap memperhatikan keuntungan dari pelaku industri dan proyeksi jangka panjang dari sistem yang dikembangkan. Meskipun sudah jelas biasanya hal ini menjadi tantangan tersendiri, terkhusus untuk teknologi baru yang masih membutuhkan

biaya besar, namun dengan beberapa skema subsidi yang tepat dan juga pertimbangan insentif dari emisi karbon maka dapat dijadikan motivasi tambahan bahwa teknologi yang dihasilkan bukan hanya terkait dengan ekonomi saja namun juga dampak lingkungan.

Dengan demikian, aspek sosial, ekonomi dan teknologi perlu terintegrasi dengan baik. Dan tentunya, upaya berkelanjutan yang terstruktur, terukur dan terarah dapat memberikan dampak positif bagi semua pihak. Memang hasilnya tidak langsung dirasakan, sebagaimana yang sudah disajikan sebelumnya, bahwa proses yang dilakukan membutuhkan waktu beberapa dekade. Namun demikian, semangat optimisme energi bersih dengan tetap menjaga tatanan kehidupan manusia dan alam yang baik dapat dipertimbangkan lebih mendalam. Harapannya adalah anak cucu yang kelak akan merasakan manfaat tertinggi dari energi bersih yang dikembangkan, termasuk juga dalam halnya kemandirian energi, Kesehatan lingkungan dan peningkatan kualitas pendidikan melalui distribusi energi yang lebih baik dan penyediaan air bersih yang dapat memberikan kelayakan hidup yang lebih baik.

E. PENUTUP

Buku ini dibuat untuk mendorong proses difusi teknologi *concentrated solar power* di Indonesia, dengan harapan dapat menjadi referensi penting bagi seluruh pihak yang ingin mengembangkan teknologi ini. CSP sebagai sistem yang masih berkembang memiliki peluang untuk penguasaan teknologi yang lebih baik. Hal ini tentunya menjadi keuntungan tersendiri karena bisa saja teknologi CSP yang lebih handal dapat dikuasai Bangsa Indonesia. Jika demikian, maka hal ini dapat memberikan dampak ekonomi yang lebih besar karena proses produksi teknologi, termasuk kelengkapan komponennya, dapat dilakukan secara swasembada di dalam Negeri. Lebih lanjut, nilai TKDN (Tingkat Komponen Dalam Negeri) akan menjadi lebih tinggi dan memberikan keuntungan bagi penyediaan lapangan kerja nasional.

Memang ini semua membutuhkan waktu, namun lebih baik terlambat daripada tidak memulai sama sekali. Penguasaan teknologi energi bersih dan penyediaan komponen, termasuk dengan sumber daya manusia (SDM)

akan menghasilkan kekuatan yang lebih besar untuk menjadi bangsa yang mandiri energi. Serapan tenaga kerja yang lebih luas, nilai investasi yang positif dan distribusi teknologi energi yang lebih luas sekiranya dapat menjadi kenyataan jika seluruh pihak mau bersama-sama melakukan upaya nyata untuk implementasi target bauran energi bersih yang lebih tinggi. Untuk itu. Sudah saatnya kita memulai dari pengembangan dan implementasi teknologi energi bersih, perbaikan pola hidup bersih dan hemat energi, serta peningkatan kualitas riset berkelanjutan dari seluruh pihak yang terlibat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Lamrani, A. Khouya, B. Zeghmati, and A. Draoui, "Mathematical modeling and numerical simulation of a parabolic trough collector: A case study in thermal engineering," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 8, pp. 47–54, 2018.
- [2] K. Boopathi *et al.*, "Optimization of the wind farm layout by repowering the old wind farm and integrating solar power plants: A case study," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 10, no. 3, pp. 1287–1301, 2020.
- [3] Y. M. Yunus, H. H. Al-Kayiem, and K. A. K. Albaharin, "Design of a biomass burner/gas-to-gas heat exchanger for thermal backup of a solar dryer," *Journal of Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, pp. 1929–1936, 2011.
- [4] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 2021.
- [5] S. Ahmadvand, M. Khadivi, R. Arora, and T. Sowlati, "Bi-objective optimization of forest-based biomass supply chains for minimization of costs and deviations from safety stock," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 11, p. 100101, 2021.
- [6] D. B. Dillard-Wright, "Gaia Theory and the Anthropocene: Radical Contingency in the Posthuman Future," *Sanglap: Journal of Literary and Cultural Inquiry*, vol. 2, no. March, pp. 1–9, 2019.
- [7] M. Radovan and M. Perdih, "Developing Guidelines for Evaluating the Adaptation of Accessible Web-Based Learning Materials I sis (SNA) in OnlineCourses Developing Guidelines for Evaluating the Adaptation of Accessible Web-Based Learning Materials Radovan and Perdih," *International Review of Research in Open and Distributed Learning*, vol. 17, pp. 166–181, 2016.
- [8] R. Joppen, S. Von Enzberg, A. Kuhn, and R. Dumitrescu, "A practical Framework for the Optimization of Production Management Processes," *Procedia Manufacturing*, vol. 33, pp. 406–413, 2019.

- [9] Asian Development Bank, *Energy Sector Assessment, Strategy, and Road Map: Indonesia*, no. December. 2020.
- [10] T. Basso, J. Hambrick, and D. DeBlasio, "Update and review of IEEE P2030 smart grid interoperability and IEEE 1547 interconnection standards," *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT 2012*, vol. 2030, no. April, 2012.
- [11] IRENA, *Innovation Outlook: Thermal Energy Storage*. 2020.
- [12] E. W. Schaefer, G. Hoogsteen, J. L. Hurink, and R. P. van Leeuwen, "Sizing of hybrid energy storage through analysis of load profile characteristics: A household case study," *Journal of Energy Storage*, vol. 52, no. PA, p. 104768, 2022.
- [13] F. K. Malik, M. M. Khan, H. F. Ahmed, M. Irfan, and I. U. Ahad, "Performance characteristics of PCM based thermal energy storage system for fluctuating waste heat sources," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 34, no. March, p. 102012, 2022.
- [14] C. Bertrand, C. Housmans, J. Leloux, and M. Journée, "Solar irradiation from the energy production of residential PV systems," *Renewable Energy*, vol. 125, pp. 306–318, 2018.
- [15] J. J. C. S. Santos, J. C. E. Palacio, A. M. M. Reyes, M. Carvalho, A. J. R. Freire, and M. A. Barone, "Concentrating Solar Power," *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, vol. 1, pp. 373–402, 2018.
- [16] A. M. Pantaleo, S. M. Camporeale, A. Sorrentino, A. Miliozzi, N. Shah, and C. N. Markides, "Hybrid solar-biomass combined Brayton/organic Rankine-cycle plants integrated with thermal storage: Techno-economic feasibility in selected Mediterranean areas," *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 2913–2931, 2020.
- [17] M. Mansoor O, S. P. Simon, K. A. Kumar, K. Sundareswaran, P. S. R. Nayak, and N. P. Padhy, "Impact and economic assessment on solar PV mirroring system – A feasibility report," *Energy Conversion and Management*, vol. 203, no. June, p. 112222, 2020.
- [18] A. R. Ali, M. Z. Akhter, and F. K. Omar, "Performance enhancement of a small-scale wind turbine featuring morphed trailing edge," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, no. April, p. 101229, 2021.

- [19] B. Paul and L. Pascal, "Simulation of a latent heat thermal energy storage for the solar air-conditioning system of a net-zero energy hotel," *WSEAS Transactions on Environment and Development*, vol. 15, pp. 510–526, 2019.
- [20] N. U. Blum, R. Sryantoro Wakeling, and T. S. Schmidt, "Rural electrification through village grids - Assessing the cost competitiveness of isolated renewable energy technologies in Indonesia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 482–496, 2013.
- [21] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series," 2012.
- [22] P. Lad, R. Saxena, and J. Patel, "Study on PCM Assisted Constant Temperature Water Heating System," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1146, no. 1, p. 012025, 2021.
- [23] A. A. M. Junior and M. B. H. Mantelli, "Thermal performance of a novel flat thermosyphon for avionics thermal management," *Energy Conversion and Management*, vol. 202, no. October, p. 112219, 2019.
- [24] H. Jafari Mosleh, S. J. Mamouri, M. B. Shafii, and A. Hakim Sima, "A new desalination system using a combination of heat pipe, evacuated tube and parabolic through collector," *Energy Conversion and Management*, vol. 99, pp. 141–150, 2015.
- [25] A. S. Abdullah, M. M. Younes, Z. M. Omara, and F. A. Essa, "New design of trays solar still with enhanced evaporation methods – Comprehensive study," *Solar Energy*, vol. 203, no. February, pp. 164–174, 2020.
- [26] V. Le and L. Caracoglia, "Generation and characterization of a non-stationary flow field in a small-scale wind tunnel using a multi-blade flow device," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 186, no. August 2018, pp. 1–16, 2019.
- [27] P. Heller, "Introduction to CSP Systems and Performance," in *The Performance of Concentrated Solar Power (CSP) Systems: Analysis, Measurement and Assessment*, Elsevier Ltd., 2017, pp. 1–29.

- [28] T. Yun, W. Zedi, L. Yan, M. Qian, H. Qian, and L. Shubin, "A multi energy storage system model based on electricity heat and hydrogen coordinated optimization for power grid flexibility," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 266–274, 2019.
- [29] M. A. Essa, I. Y. Rofaiel, and M. A. Ahmed, "Experimental and Theoretical Analysis for the Performance of Evacuated Tube Collector Integrated with Helical Finned Heat Pipes using PCM Energy Storage," *Energy*, vol. 206, p. 118166, 2020.
- [30] K. E. Elfeky, A. G. Mohammed, and Q. Wang, "Cycle cut-off criterion effect on the performance of cascaded, sensible, combined sensible-latent heat storage tank for concentrating solar power plants," *Energy*, vol. 230, p. 120771, 2021.
- [31] S. Yilmaz, H. Binici, and H. R. Ozcalik, "Energy supply in a green school via a photovoltaic-thermal power system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 713–720, 2016.
- [32] S. M. M. Ahmed, M. R. Al-Amin, S. Ahammed, F. Ahmed, A. M. Saleque, and M. Abdur Rahman, "Design, construction and testing of parabolic solar cooker for rural households and refugee camp," *Solar Energy*, vol. 205, no. April, pp. 230–240, 2020.
- [33] Y. Mohana, R. Mohanapriya, T. Anukiruthika, K. S. Yoha, J. A. Moses, and C. Anandharamakrishnan, "Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances," *Solar Energy*, vol. 208, no. February, pp. 321–344, 2020.
- [34] R. A. Rahman, D. Rahmalina, Y. Kurniawan, D. Setiawan, and R. Anggrainy, *Energy storage system*, vol. 147–149. 2021.
- [35] H. Skarphagen, D. Banks, B. S. Frengstad, and H. Gether, "Design Considerations for Borehole Thermal Energy Storage (BTES): A Review with Emphasis on Convective Heat Transfer," *Geofluids*, vol. 2019, 2019.
- [36] G. Zhu, D. Kearney, and M. Mehos, "On characterization and measurement of average solar field mirror reflectance in utility-scale concentrating solar power plants," *Solar Energy*, vol. 99, pp. 185–202, 2014.

- [37] A. M. Daabo, E. Bellos, S. Pavlovic, M. A. Bashir, S. Mahmoud, and R. K. Al-Dadah, "Characterization of a micro thermal cavity receiver – Experimental and analytical investigation," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 18, no. March, p. 100554, 2020.
- [38] The World Bank, *Concentrating Solar Power: Clean Power on Demand 24/7*. 2021.
- [39] G. K. Manikandan, S. Iniyan, and R. Goic, "Enhancing the optical and thermal efficiency of a parabolic trough collector – A review," *Applied Energy*, vol. 235, no. November 2018, pp. 1524–1540, 2019.
- [40] A. C. Pescheux, O. Raccurt, D. Bourdon, and E. Le Baron, "Accelerated aging tests and characterizations of innovated anti-soiling coatings for solar receiver glasses," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 256, no. August, p. 123646, 2020.
- [41] Y. Wang, G. Xu, Y. Quan, X. Luo, and H. Li, "Design and Optimization of a New Solar Dish Cavity Receiver/Absorber," *3rd International Conference on Energy and Environmental Science*, vol. 54, no. 4, pp. 16–20, 2013.
- [42] A. G. Konstandopoulos, C. Pagkoura, and S. Lorentzou, *Solar fuels and industrial solar chemistry*. 2012.
- [43] I. Sarbu and C. Sebarchievici, "A comprehensive review of thermal energy storage," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 1. 2018.
- [44] M. K. Islam, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, "`,", *RSC Advances*, vol. 5, no. 15, 2019.
- [45] R. Osuna *et al.*, "Development of a Low Cost European Parabolic Trough Collector - EUROTrough," *European Commission*, pp. 1–20, 2001.
- [46] A. Poullikkas, G. Kourtis, and I. Hadjipaschalis, "Parametric analysis for the installation of solar dish technologies in Mediterranean regions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 2772–2783, 2010.
- [47] R. Andika, Y. Kim, S. H. Yoon, D. H. Kim, J. S. Choi, and M. Lee, "Techno-economic assessment of technological improvements in thermal energy storage of concentrated solar power," *Solar Energy*, vol. 157, no. August, pp. 552–558, 2017.

- [48] F. Buendía-Martínez, F. Sutter, J. Wette, L. Valenzuela, and A. Fernández-García, "Lifetime prediction model of reflector materials for concentrating solar thermal energies in corrosive environments," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 224, 2021.
- [49] J. C. Sattler *et al.*, "Review of heliostat calibration and tracking control methods," *Solar Energy*, vol. 207, no. June, pp. 110–132, 2020.
- [50] T. W. Paret, M. Wöhrbach, R. Buck, and G. Weinrebe, "Incidence angles on cylindrical receivers of solar power towers," *Solar Energy*, vol. 201, no. June 2019, pp. 1–7, 2020.
- [51] M. Saghafifar, K. Mohammadi, and K. Powell, "Design and analysis of a dual-receiver direct steam generator solar power tower plant with a flexible heliostat field," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 39, no. October 2019, p. 100698, 2020.
- [52] A. Buscemi, V. Lo Brano, C. Chiaruzzi, G. Ciulla, and C. Kalogeri, "A validated energy model of a solar dish-Stirling system considering the cleanliness of mirrors," *Applied Energy*, vol. 260, no. October 2019, p. 114378, 2020.
- [53] W. Schiel and T. Keck, "Parabolic dish concentrating solar power (CSP) systems," in *Concentrating Solar Power Technology*, 2012, pp. 284–322.
- [54] C. (USA). E. T. E. C. Rockwell International Corp., Canoga Park, "Performance of the Vanguard Solar Dish-Stirling Engine Module," 1986.
- [55] T. R. Mancini, "Fifty KW Solar Membrane Concentrator," 1997.
- [56] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, "Experimental investigation of energy and exergy efficiencies of domestic size parabolic dish solar cooker," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, 2012.
- [57] A. M. Daabo, S. Mahmoud, and R. K. Al-Dadah, "The effect of receiver geometry on the optical performance of a small-scale solar cavity receiver for parabolic dish applications," *Energy*, vol. 114, pp. 513–525, 2016.

- [58] V. Thirunavukkarasu and M. Cheralathan, "An experimental study on energy and exergy performance of a spiral tube receiver for solar parabolic dish concentrator," *Energy*, vol. 192, p. 116635, 2020.
- [59] M. Uzair, T. N. Anderson, and R. J. Nates, "Modeling of convective heat loss from a cavity receiver coupled to a dish concentrator," *Solar Energy*, vol. 176, no. October, pp. 496–505, 2018.
- [60] J. Yan, Y. duo Peng, and Z. ran Cheng, "Optimization of a discrete dish concentrator for uniform flux distribution on the cavity receiver of solar concentrator system," *Renewable Energy*, vol. 129, pp. 431–445, 2018.
- [61] A. B. Awan, M. Zubair, R. P. Praveen, and A. R. Bhatti, "Design and comparative analysis of photovoltaic and parabolic trough based CSP plants," *Solar Energy*, vol. 183, no. March, pp. 551–565, 2019.
- [62] P. D. Malali, S. K. Chaturvedi, and R. Agarwala, "Effects of circumsolar radiation on the optimal performance of a Stirling heat engine coupled with a parabolic dish solar collector," *Applied Thermal Engineering*, vol. 159, no. June, p. 113961, 2019.
- [63] J. Garrido, L. Aichmayer, A. Abou-Taouk, and B. Laumert, "Experimental and numerical performance analyses of Dish-Stirling cavity receivers: Radiative property study and design," *Energy*, vol. 169, pp. 478–488, 2019.
- [64] U. R. Singh and A. Kumar, "Review on solar Stirling engine: Development and performance," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 8, no. August, pp. 244–256, 2018.
- [65] R. Conceição, F. M. Lopes, A. Tavares, and D. Lopes, "Soiling effect in second-surface CSP mirror and improved cleaning strategies," *Renewable Energy*, vol. 158, pp. 103–113, 2020.
- [66] K. Lovegrove, G. Burgess, and J. Pye, "A new 500m² paraboloidal dish solar concentrator," *Solar Energy*, vol. 85, no. 4, pp. 620–626, 2011.
- [67] S. Amoedo, E. Thebaud, M. Gschwendtner, and D. White, "Novel parameter-based flexure bearing design method," *Cryogenics*, vol. 76, pp. 1–9, 2016.
- [68] F. Rinderknecht, "The linear generator as integral component of an energy converter for electric vehicles." pp. 35–42, 2019.

- [69] B. Jiang, B. Guene Lougou, H. Zhang, W. Wang, D. Han, and Y. Shuai, "Analysis of high-flux solar irradiation distribution characteristic for solar thermochemical energy storage application," *Applied Thermal Engineering*, vol. 181, no. June, p. 115900, 2020.
- [70] A. Z. Hafez, A. Soliman, K. A. El-Metwally, and I. M. Ismail, "Design analysis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 1019–1036, 2017.
- [71] F. Liu, K. Wu, Z. Rao, and Y. Peng, "Spatial layouts and absorbing surface design of heater tube arrays of direct-illumination receiver used in high power dish/stirling system," *Energy*, vol. 188, 2019.
- [72] H. Von Storch, M. Roeb, H. Stadler, C. Sattler, and B. Hoffschmidt, "Efficiency potential of indirectly heated solar reforming with different types of solar air receivers," *Applied Thermal Engineering*, vol. 92, pp. 202–209, 2016.
- [73] World Bank Group, *Solar Resource and Photovoltaic Potential of Indonesia*, no. May. 2017.

PROFIL PENULIS

Reza Abdu Rahman, S.Pd., M.T.



Pendidikan vokasi Teknik Otomotif berhasil diselesaikan pada Tahun 2008, kemudian melanjutkan program Strata-I di Universitas Negeri Jakarta dan lulus pada tahun 2014 untuk program studi pendidikan teknik mesin. Penulis aktif pada bidang pendidikan. Penulis aktif di Pendidikan Vokasi mulai tahun 2013-2019 di SMKN 10 Kota Bekasi dan menjabat sebagai Kepala Program Keahlian Teknik Otomotif. Penulis melanjutkan pendidikan S2 di Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila dan lulus pada tahun 2020. Mulai tahun 2019, penulis aktif pada bidang STEM dengan fokus pada *Engineering Program for High School*, dan menjadi Guru tamu di *HighScope* Indonesia Institute serta mulai aktif menjadi Dosen di Universitas Pancasila Sejak Tahun 2021. Fokus penelitian penulis adalah bidang penyimpanan energi dan hibridisasi sistem *renewable energy*, khususnya *solar thermal system*.

Ir. Dibyo Setiawan, S.Pd., M.T.



Penulis dilahirkan pada tanggal 22 April 1991 di Jakarta. Penulis menempuh pendidikan mulai tahun 1997 s.d 2022 di SDN Arjasari 2 Kabupaten Indramayu, SMP PGRI 2 Jakarta, SMKN 7 (Grafika) Jakarta, S1 Program Studi Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta, S2 Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Pancasila Pendidikan Profesi Insinyur Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya. Mulai tahun 2010 s.d saat ini penulis aktif terlibat di bidang Jasa Konsultansi Perencanaan seperti Perencanaan Sistem Mekanikal Bangunan Gedung dan Utilitas Sumber Daya Air. Penulis juga aktif terlibat di bidang Jasa Konstruksi seperti Pelaksanaan Kegiatan Konstruksi Bangunan Gedung, Pelaksanaan

Pemasangan Sistem Mekanikal Bangunan Gedung antara lain Pelaksanaan Instalasi Sistem Transportasi Dalam Gedung, Pelaksanaan Instalasi Sistem Tata Udara, Pelaksanaan Instalasi Sistem Proteksi Kebakaran, Pelaksanaan Sistem Pompa Mekanik Dan Plumbing dan K3. Penulis aktif di bidang akademik sebagai Dosen Tetap pada Program Studi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Mpu Tantular sejak tahun 2021, ASN Dosen pada Program Studi D-IV Proses Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung sejak tahun 2022. Fokus penelitian penulis adalah bidang Perawatan Mekanik Mesin, *Hydropower Electric* dan Energi Baru Terbarukan.

Apri Wiyono, S.Pd., M.T.



Penulis dilahirkan di Jakarta pada tanggal 23 April 1992. Pada Tahun 2017, meraih gelar Magister Teknik di Universitas Indonesia dengan predikat *cumlaude* dan gelar Sarjana Pendidikan di Universitas Negeri Jakarta tahun 2014 dengan predikat *cumlaude*. Saat ini penulis berkarier sebagai dosen PNS dan peneliti di Departemen Pendidikan Teknik Mesin dan Otomotif di Universitas Pendidikan Indonesia, dengan fokus penelitian dan aplikasi di bidang konversi energi, *renewable energy* dan *waste to energy*. Penulis berperan sebagai *Chief in Editor* pada *Journal of Mechanical Engineering Education* dan tim *Reviewer* PKM UPI. Secara profesional penulis aktif sebagai Pembina di Yayasan Menara Bumi Cendekia dan *entrepreneur* di bidang pencinta alam yaitu *Owner Green Campus Outdoor*. Selain itu beliau menjadi bagian dari Asosiasi Biomassa dan Bioenergi Indonesia (ABBEI) dalam membangun jejaring keilmuan bidang konversi energi dan EBT. Beberapa prestasi yang pernah ditorehkan antara lain Medali Silver sebagai Dosen Pembimbing tim mahasiswa kategori *Environment* pada *International Invention Competition for Young Moslem Scientist (IICYMS) 2021*, *Best Keynote Speaker* pada Seminar Pendidikan Indonesia oleh BIF EDU CENTER, serta kolaborasi riset dan publikasi jurnal internasional dengan kolega di *Institute Technology of Tokyo* dan *Tunku Abdul Rahman University* melalui MoU Kerja sama U to U.

Rani Angrainy, S.Pd., M.T.



Penulis dilahirkan pada tanggal 10 Januari 1992 di Jakarta, Indonesia. Penulis menempuh pendidikan dasar di MI Al-Muawanatul Khaeriyah Jakarta, SMPN 63 Jakarta dan SMAN 19 Jakarta. Pada Tahun 2014, penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Jakarta. Penulis melanjutkan pendidikan S2 di Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila dan lulus pada tahun 2018. Mulai Agustus tahun 2018, penulis mulai aktif menjadi Dosen di Universitas Krisnadwipayana, Bekasi, Jawa Barat. Sejak Maret tahun 2022 penulis memulai karier barunya sebagai ASN, yaitu Dosen di Universitas Negeri Jakarta pada Prodi Pendidikan Teknik Mesin. Fokus penelitian penulis adalah bidang rekayasa energi dan optimasi energi bidang otomotif.

Danies Seda Yuseva, S.T., M.T.



Penulis dilahirkan pada tanggal 18 Januari di Semarang. Penulis menempuh pendidikan vokasi di SMKN 7 (STM Pembangunan) Semarang pada tahun 2005-2009, S1 Program Studi Teknik Mesin Universitas Singaperbangsa Karawang dan menyelesaikan S2 Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila konsentrasi konversi energi tahun 2019. Mulai tahun 2011 s.d saat ini penulis aktif sebagai enjiner *professional* di bidang CAD/CAM/CAE di Perusahaan Percetakan Uang RI. Mulai tahun 2020 Penulis juga merintis tempat riset, kreatif dan pembelajaran teknik dengan mendirikan Kreatif YTI. Penulis aktif di bidang akademik sebagai Dosen pada Program Studi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Buana Perjuangan sejak tahun 2019. Fokus penelitian penulis adalah bidang Perancangan Konstruksi Mesin, Optimasi Desain dan Perancangan *Hydropower Electric* dan Energi Baru Terbarukan.

TEKNOLOGI CONCENTRATED SOLAR POWER

Referensi Perkembangan Teknologi Photo-Thermal Conversion
Sebagai Alternatif Sumber Energi Baru Terbarukan

Energi matahari memiliki potensi yang luas sebagai sumber energi baru terbarukan. Pemanfaatan energi matahari tidak terbatas hanya pada teknologi *solar cell*, melainkan dapat dikembangkan lebih lanjut melalui teknologi *concentrated solar power* (CSP).

Buku ini menyajikan dengan detail terkait dengan teknologi *concentrated solar power* (CSP) yang memiliki peluang pemanfaatan yang lebih luas yang tidak terbatas hanya pada pembangkitan listrik saja, namun juga untuk aplikasi lain seperti proses industri, pengering hasil pertanian, desalinasi dan pengadaan air panas. Buku ini didesain sebagai referensi penting untuk pengembangan *concentrated solar power* (CSP) dengan menyajikan konsep kerja mendasar dari sistem, tantangan dari sisi teknologi dan juga tren perkembangan global dari sistem *concentrated solar power* (CSP).

Buku ini dibuat dengan motivasi tertinggi untuk penyajian teknologi pemanfaatan energi matahari melalui *concentrated solar power* (CSP) mengingat potensi matahari di Indonesia yang sangat besar. Lebih lanjut, peluang pengembangan teknologi ini masih sangat tinggi sehingga sangat dimungkinkan untuk hilirisasi teknologi di Indonesia. Konsep kerja sistem *concentrated solar power* (CSP) yang unik mampu memaksimalkan proses pemanfaatan energi matahari sebagai sumber energi bersih sehingga diharapkan dapat menekan angka emisi karbon dan juga memberikan peluang kemandirian teknologi yang lebih luas.