

BAB II

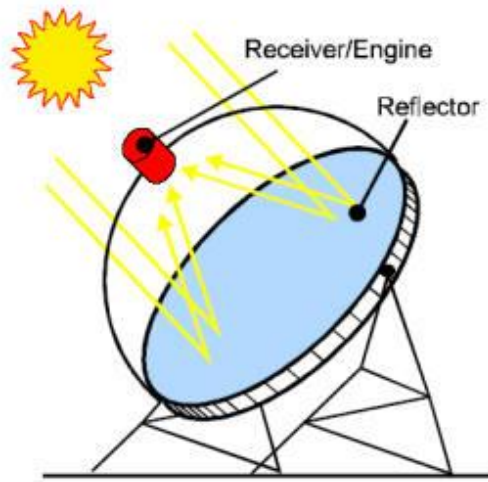
TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memaparkan landasan teori yang menjadi acuan dalam perancangan dan pembuatan prototipe kolektor surya parabolic dish berbahan reflektor kaca. Pembahasan mencakup gambaran umum teknologi parabolic dish, prinsip kerja sistem, komponen utama, perbandingan dengan teknologi sejenis, aplikasi di Indonesia, serta tinjauan terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang relevan. Pemahaman menyeluruh terhadap aspek-aspek ini menjadi fondasi penting dalam menghasilkan desain yang efisien, adaptif terhadap kondisi iklim tropis Indonesia, dan relevan secara ilmiah.

2.1 Kolektor Surya *Parabolic Dish*

Kolektor surya parabolic dish adalah salah satu jenis sistem pemusatan energi surya (*Direct Normal Irradiance/DNI*) yang menggunakan cermin berbentuk parabola tiga dimensi untuk memfokuskan radiasi matahari ke satu titik tunggal yang disebut titik fokus. Pada titik fokus tersebut ditempatkan sebuah *receiver* (penyerap panas) yang berfungsi mengkonversi energi radiasi surya menjadi energi termal

bersuhu tinggi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Desain *parabolic dish*

Sumber : <https://www.solarpaces.org/how-csp-works/>

Teknologi ini dikenal sebagai sistem *point-focus concentrator* karena radiasi matahari dipusatkan secara terfokus ke satu titik fokus. Karakteristik geometris tersebut menghasilkan rasio konsentrasi yang sangat tinggi, yaitu berkisar antara 1.000 hingga 4.000 kali. Hal ini memungkinkan sistem mencapai suhu operasional ekstrem mulai dari 300°C hingga melampaui 1.000°C, menjadikannya teknologi *Concentrated Solar Power* (CSP) dengan potensi temperatur tertinggi di antara jenis kolektor surya lainnya (García-Ferrero et al., 2025). Melalui kemampuan termal tersebut, *parabolic dish* sangat cocok diaplikasikan untuk berbagai kebutuhan energi termal bersuhu tinggi, seperti pembangkit listrik skala kecil, proses pemanasan industri, sterilisasi, hingga manufaktur termal lainnya.

Secara historis, pengembangan sistem surya pemusat pekat telah dimulai sejak abad ke-19, namun penelitian sistematis baru dilakukan secara intensif sejak tahun 1970-an seiring dengan terjadinya krisis energi global. Di era modern, teknologi ini

telah menjadi salah satu opsi energi terbarukan yang menjanjikan, khususnya di negara-negara kawasan tropis dan subtropis dengan intensitas radiasi matahari tinggi yang konstan sepanjang tahun, termasuk Indonesia (Asrori et al., 2022). Meskipun potensi surya nasional sangat masif mencapai 3.294 GW, realisasi pemanfaatannya baru menyentuh 1.494 MW pada tahun 2025 (Kementerian ESDM, 2026). Hal tersebut menunjukkan besarnya ruang pengembangan teknologi surya termal pekat seperti tipe *parabolic dish* untuk memenuhi kebutuhan energi panas fungsional yang belum terlayani oleh sistem fotovoltaik konvensional.

2.2 Prinsip Kerja Parabolic Dish

Prinsip kerja *parabolic dish* didasarkan pada hukum optika geometris, khususnya sifat refleksi cahaya pada permukaan kurva parabola. Setiap berkas sinar datang yang sejajar dengan sumbu utama parabola akan dipantulkan dan dikonsentrasikan tepat pada satu titik yang disebut titik fokus. Oleh karena itu, apabila piringan (*dish*) diarahkan secara presisi ke arah matahari sehingga sumbu utamanya sejajar dengan arah datangnya sinar matahari, maka seluruh radiasi surya yang mengenai permukaan cermin akan terpantul dan terkumpul di titik fokus tersebut (García-Ferrero et al., 2025).

Proses konversi energi dalam sistem parabolic dish berlangsung dalam beberapa tahap. Pertama, radiasi surya langsung (Direct Normal Irradiance/DNI) mengenai permukaan reflektor parabola. Kedua, reflektor memantulkan radiasi tersebut menuju titik fokus dengan efisiensi optis yang ditentukan oleh reflektivitas material, akurasi geometri parabola, dan faktor intercept. Ketiga, energi yang terkumpul di titik fokus diserap oleh receiver dan dikonversikan menjadi energi termal.

2.3 Komponen Utama *Parabolic Dish*

Sistem kolektor surya *parabolic dish* terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi. Setiap komponen memiliki fungsi dan spesifikasi teknis tersendiri yang menentukan kinerja keseluruhan sistem.

2.3.1 Reflektor Parabola

Reflektor Parabola merupakan komponen utama dalam sistem *Parabolic Dish* yang berfungsi mengumpulkan dan memfokuskan radiasi surya. Reflektor ini memiliki diameter 1,2 meter (120 cm) dan dirancang dengan geometri paraboloid putar sesuai persamaan matematis parabola. Dengan *mounting Vertical – Horizontal* yang sudah terintegrasi. Dapat dilihat pada gambar 2.2

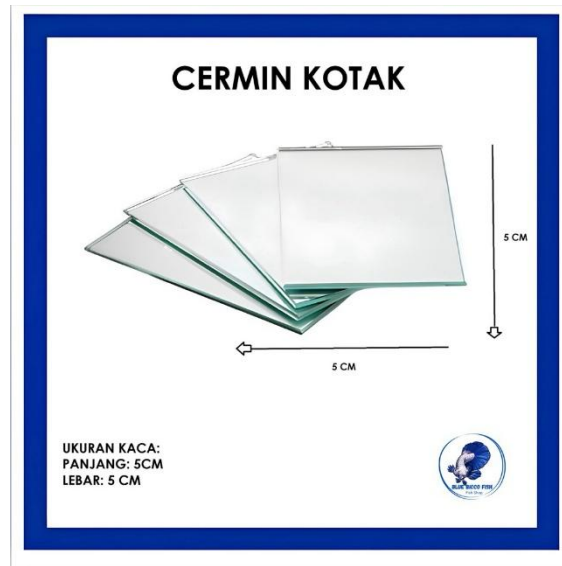


Gambar 2. 2 Visual *Parabolic Dish*

Sumber : <https://electronics.stackexchange.com/q/299365>

2.3.2 Silvered Glass Mirror

Material reflektor yang dipilih dalam penelitian ini adalah *Silvered Glass Mirror* (cermin kaca berbasis perak) berbentuk kotak dengan ukuran panjang 5 cm, lebar 5 cm, dan ketebalan 5 mm, yang memiliki tingkat reflektivitas spekular tinggi sebesar $\rho \geq 92\text{-}95\%$ (Aramesh et al., 2019). Cermin kotak ini disusun secara bertingkat (seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3) untuk membentuk geometri paraboloid putar yang berfungsi mengumpulkan radiasi surya menuju *Focal Point*. Material cermin kaca ini dipilih karena menawarkan durabilitas operasional yang sangat baik terhadap risiko penuaan struktural akibat paparan sinar UV serta kelembapan lingkungan (Aramesh et al., 2019). Karakteristik tersebut jauh lebih unggul dibandingkan penggunaan lembaran tipis seperti *aluminum tape* yang rentan mengalami korosi permukaan, distorsi kelengkungan optik, dan penurunan daya pantul secara drastis saat ditempatkan pada kondisi luar ruangan jangka panjang (Ibrahim et al., 2020; Robiandi et al., 2022). Selain keunggulan termal dan optik tersebut, ketersediaan kaca komersial berukuran 5 cm x 5 cm yang melimpah di pasar domestik sangat mendukung aspek skalabilitas ekonomi serta kelayakan fabrikasi dalam pembuatan *prototype* ini.



Gambar 2. 3 *Silvered glass mirror*

Sumber : <https://shopee.co.id/Cermin-Ikan-Cupang-5x5-cm-10-pcs-i.183555649.51854836301>

Teknik pemasangan reflektor menggunakan segmentasi (*faceting*) dengan cermin kotak *Silvered Glass* berukuran 5 cm x 5 cm x 5 mm, yaitu potongan – potongan cermin datar yang disusun bertingkat membentuk aproksimasi permukaan parabola. Setiap cermin kotak dipasang pada *backing structure* dengan toleransi penempatan $\pm 0,5$ mm untuk memastikan sudut kemiringan (*slope*) masing – masing segmen sesuai kurva parabola target.

2.3.3 Receiver dan Absorber

Receiver adalah komponen yang ditempatkan di titik fokus dish untuk menyerap energi radiasi yang dipantulkan oleh reflektor. Dalam penelitian ini digunakan panci presto Happy Call berkapasitas 8 liter dengan diameter 24 cm dan tinggi 15 cm, berbahan aluminium tebal, yang dapat dilihat pada gambar 2.4.

aluminium dipilih karena kombinasi antara konduktivitas termal yang cukup tinggi ($237 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), kemampuan fabrikasi mudah, dan ketersediaan komersial di pasaran Indonesia. Permukaan luar panci dilapisi dengan cat hitam tahan panas hingga $600 - 800^\circ\text{C}$ untuk memaksimalkan absorptansi termal ($\alpha \geq 0,8$). Desain panci bertekanan (*Pressure Cooker*) di pilih karena:

1. Geometri *cavity* yang tertutup meminimalkan kehilangan panas konveksi dan radiasi
2. *Pressure seal* meningkatkan efisiensi termal dengan meningkatkan titik didih fluida kerja
3. Struktur *double-wall* memberikan insulasi tambahan di bandingkan absorber jenis *flat plate*

Analisis performa termal *receiver parabolic dish* dilakukan melalui tiga parameter utama : (2.1) energi radiasi matahari yang diterima reflektor (Q_{solar}), (2.2) energi termal yang diserap oleh fluida kerja (Q_{useful}), dan (2.3) energi yang hilang melalui radiasi permukaan panci ($Q_{\text{rad_loss}}$). Q_{solar} dihitung dari *irradiance* DNI, luas aperture reflektor, dan durasi pengukuran. Q_{useful} ditentukan dari perubahan suhu air dan kapasitas panas spesifik air selama interval waktu pengukuran. $Q_{\text{rad_loss}}$ diestimasi menggunakan hukum Stefan-Boltzmann dengan mempertimbangkan emisivitas permukaan, luas panci, dan perbedaan suhu antara panci dan ambient. Efisiensi termal collector (η) dinyatakan sebagai perbandingan antara Q_{useful} dan Q_{solar} , diekspresikan dalam persen.

Berikut persamaan pertama (Martini et al. 2019) :

$$Q_{solar} = I \times A_{aperture} \times \Delta_t \quad (2.1)$$

Keterangan :

I = irradiance / intensitas radiasi matahari (W/m^2), diukur dengan solar power meter

$A_{aperture}$ = luas bukaan kolektor parabolic (m^2)

Δ_t = lama interval waktu pengukuran (detik)

Persamaan untuk Q_{useful} (Sornek et al., 2026).

$$Q_{useful} = m_{air} \times C_p \times \Delta T_{air} \quad (2.2)$$

Keterangan :

m_{air} = massa air dalam panci (kg)

C_p = kalor jenis air

ΔT_{air} = kenaikan suhu air pada interval tersebut ($^{\circ}\text{C}$)

Hukum stefan boltzman (Martini et al., 2019)

$$Q_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times A_{permukaan} (T_{permukaan}^4 - T_{ambient}^4) \quad (2.3)$$

Keterangan :

ε = emisivitas permukaan panci

σ = konstanta Stefan-boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$A_{permukaan}$ = luas permukaan panci yang terkena radiasi (m^2)

$T_{permukaan}$ dan $T_{ambient}$ = harus dalam Kelvin ($^{\circ}\text{C} + 273.15$), karena hukum

Stefan-Boltzmann berbasis suhu absolut

Pada kondisi $\text{DNI} = 950 \text{ W/m}^2$, fluks panas yang diterima diperkirakan mencapai $350.000\text{--}500.000 \text{ W/m}^2$. Untuk menerapkan konsep *cavity receiver* dengan biaya terjangkau, penelitian ini menggunakan panci presto Happy Call 8 liter (diameter 24 cm, alumunium) sebagai *receiver vessel*. Panci ini dilengkapi dengan lapisan isolasi termal (Gambar 2.4) untuk mencapai target koefisien heat loss (U_L) dibawah $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ di kondisi iklim tropis Indonesia (kelembapan $70 - 90\%$). Desain ini memungkinkan validasi konsep sekaligus memanfaatkan *seal pressure* panci untuk meingkatkan performa termal.



Gambar 2. 4 *Receiver cavity* atau panci presto

2.3.4 Rangka dan Struktur Penyangga

Rangka penopang reflektor *Parabolic Dish* menggunakan penyangga original dari Parabola Tanaka SOLID 120 cm dengan base dudukan berukuran 2 inci yang dirancang untuk menahan beban reflektor dan receiver di bawah kondisi angin hingga 10 m/s . Material penyangga menggunakan baja karbon, yang berdiameter 30 cm



Gambar 2. 5 Rangka penopang

2.3.5 Sistem Solar Manual

Sistem pelacak surya manual merupakan komponen kritis yang berfungsi mengarahkan permukaan reflektor agar selalu tegak lurus terhadap arah datangnya sinar matahari. Pada prototipe ini, digunakan sistem *solar tracker* manual satu sumbu (*single-axis*) dengan penyesuaian posisi berkala setiap 15 menit, sebagaimana digambarkan secara jelas pada Gambar 2.6. Pengoperasian sistem ini difokuskan pada rentang waktu pukul 10.00–14.00 WIB, saat kondisi radiasi matahari langsung (*Direct Normal Irradiation*) berada pada puncaknya. Jeda waktu penyesuaian posisi ini sangat krusial, mengingat penelitian terdahulu oleh Asrori et al. (2022) menegaskan bahwa frekuensi pergerakan kolektor surya berpengaruh signifikan terhadap performa termal, di mana interval pelacakan yang lebih rapat mampu meningkatkan efisiensi penyerapan panas secara drastis. Langkah interval penyesuaian waktu ini sejalan dengan strategi pemodelan optimasi surya harian yang menunjukkan bahwa pengaturan posisi kolektor yang tepat pada jam-jam puncak radiasi sangat menentukan efektivitas pengumpulan energi termal secara keseluruhan (Goel & Manik, 2023).

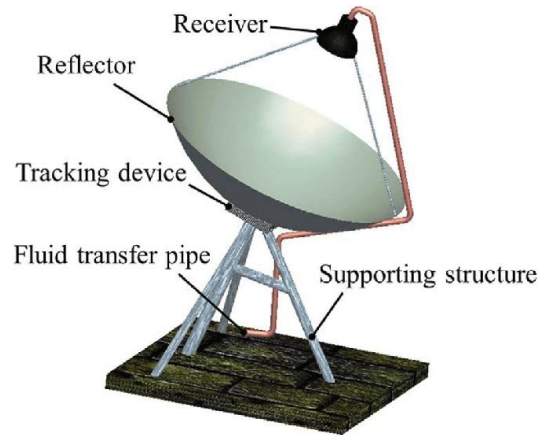


Gambar 2. 6 Sistem kolektor manual

Sumber : <https://www.solarpaces.org/how-csp-works/>

2.3.6 Kolektor Otomatis

Kolektor dengan sistem pelacak (*tracking*) otomatis menggunakan sensor dan aktuator untuk mengarahkan posisi permukaan reflektor secara kontinu mengikuti pergerakan matahari tanpa intervensi manual, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.7. Mekanisme otomatisasi ini mampu mengoptimalkan nilai efisiensi optis secara signifikan karena memiliki tingkat akurasi pengarahannya yang jauh lebih tinggi dan presisi (Liu et al., 2022). Namun demikian, tingginya kompleksitas komponen elektronik serta biaya fabrikasi sistem otomatisasi membuatnya kurang ekonomis untuk diterapkan pada skala prototipe laboratorium. Terlebih lagi, jika dikorelasikan dengan kondisi makro, realisasi investasi subsektor EBTKE nasional baru mencapai USD 2,4 miliar, yang menunjukkan bahwa adopsi teknologi surya termal pekat di Indonesia masih menghadapi tantangan pembiayaan struktural (Kementerian ESDM, 2026). Berdasarkan pertimbangan efisiensi biaya tersebut, sistem pelacak manual satu sumbu dipilih untuk memfasilitasi pembuatan prototipe penelitian ini, dengan potensi pengembangan menuju sistem pelacak otomatis penuh pada tahap riset lanjutan.



Gambar 2. 7 Sistem kolektor otomatis

Sumber :Parabolic dish collector (Suman, Khan, and Pathak 2015).

2.3.7 Instrumen Pengukuran

Instrumen pengukuran yang digunakan dipilih berdasarkan rentang pengukuran, akurasi, dan ketersediaan di pasar lokal Indonesia. Termokopel tipe K digunakan untuk mengukur suhu *receiver* dengan rentang hingga 1.200°C dan akurasi $\pm 1^\circ\text{C}$. Solar power meter digunakan untuk mengukur intensitas DNI. Thermo Imager digunakan untuk mengetahui suhu pada panci presto/receiver.

2.4 Parameter Kinerja *Parabolic Dish*

Kinerja sistem parabolic dish dievaluasi melalui beberapa parameter teknis yang saling berkaitan dan menjadi acuan dalam perancangan, fabrikasi, serta pengujian sistem.

2.4.1 Efisiensi Termal

Efisiensi termal (η) menggambarkan kemampuan sistem dalam mengkonversi energi surya yang diterima menjadi energi termal yang berguna, dirumuskan sebagai:

$$\eta = \frac{Q_{useful}}{Q_{solar}} \times 100\% \quad (2.4)$$

di mana Q_{useful} adalah energi panas yang berhasil dimanfaatkan oleh sistem, dan Q_{solar} adalah energi surya yang mengenai aperture dish. Pada suhu operasi tinggi, kehilangan panas melalui radiasi menjadi dominan, sehingga turut memengaruhi nilai Q_{useful} yang dapat dimanfaatkan. Pengujian difokuskan pada kondisi $DNI \geq 900$ W/m², dengan mempertimbangkan variabilitas cuaca tropis seperti tutupan awan parsial yang dapat mengurangi DNI hingga 20%.

Analisis Tekanan dan Entalpi Saturasi:

Data tekanan gauge yang tercatat dikonversi menjadi tekanan absolut menggunakan persamaan:

$$P_{abs} = P_{gauge} + P_{atm} \quad (2.5)$$

dengan P_{atm} merupakan tekanan atmosfer lokasi pengujian. Nilai P_{abs} kemudian digunakan untuk membaca atau menginterpolasi suhu saturasi T_{sat} serta nilai entalpi cairan jenuh h_f, h_{fg}, h_g dari tabel *saturated water* (Cengel, 2015) berdasarkan tekanan. Apabila nilai P_{abs} tidak tersedia langsung pada tabel, dilakukan interpolasi linear di antara dua baris tekanan terdekat. Nilai entalpi penguapan (kalor laten) digunakan sebagai indikator kualitatif besarnya energi yang diperlukan sistem untuk mengubah fase cair menjadi uap pada tekanan operasi tersebut, mengingat massa uap aktual yang terbentuk tidak terukur langsung dalam penelitian ini.

Persamaan interpolasi sebagai berikut :

$$y = y_1 + \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) (x - x_1) \quad (2.6)$$

Keterangan :

x : Nilai yang diketahui/dicari (misalnya: Tekanan, P).

y : Nilai properti yang ingin dihitung/dicari (misalnya: Suhu (T_{sat}), Entalpi h), dll).

x_1, y_1 : Nilai titik data terdekat yang lebih kecil di tabel.

x_2, y_2 : Nilai titik data terdekat yang lebih besar di tabel

2.4.2 Analisis Kehilangan Panas

Pada sistem kolektor surya *parabolic dish*, tidak seluruh energi radiasi matahari yang diterima reflektor dapat dikonversi menjadi energi termal yang berguna. Sebagian energi mengalami kehilangan (*heat loss*) melalui tiga mekanisme perpindahan kalor, yaitu radiasi, konveksi, dan konduksi. Pemahaman terhadap ketiga mekanisme ini penting untuk mengevaluasi performa termal sistem secara menyeluruh.

a) Kehilangan Panas melalui Radiasi (*Radiation Loss*)

Kehilangan panas melalui radiasi terjadi pada permukaan luar panci presto yang berfungsi sebagai *receiver*. Ketika permukaan panci menyerap energi radiasi terkonsentrasi dari reflektor dan mencapai suhu tinggi, permukaan tersebut secara bersamaan memancarkan kembali energi termal ke lingkungan sekitarnya dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Peristiwa ini berlangsung tanpa memerlukan medium perantara dan terjadi sepanjang durasi pengujian selama permukaan panci memiliki suhu yang lebih tinggi dari lingkungan. Besarnya kehilangan panas melalui radiasi dinyatakan menggunakan Hukum Stefan-Boltzmann sebagai berikut (Martini et al., 2019):

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{permukaan} \cdot (T_{permukaan}^4 - T_{ambient}^4) \quad (2.3)$$

Keterangan:

- ε = emisivitas permukaan panci (-)
- σ = konstanta Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²·K⁴)
- $A_{permukaan}$ = luas permukaan luar panci yang terkena radiasi (m²)

- $T_{\text{permukaan}}$ = suhu permukaan luar panci/receiver (K)
- T_{ambient} = suhu udara lingkungan sekitar (K)
- Catatan: $T_{\text{permukaan}}$ dan T_{ambient} harus dikonversi ke Kelvin ($^{\circ}\text{C} + 273,15$)

b) Kehilangan Panas melalui Konveksi (*Convection Loss*)

Kehilangan panas melalui konveksi terjadi pada permukaan luar panci presto yang bersentuhan langsung dengan udara sekitar. Ketika suhu permukaan panci jauh lebih tinggi dari suhu udara di sekitarnya, lapisan udara yang bersentuhan dengan permukaan panci ikut terpanaskan, mengembang, menjadi lebih ringan, dan bergerak naik ke atas. Posisinya kemudian digantikan oleh udara yang lebih dingin dari lingkungan. Sirkulasi udara alami ini berlangsung terus-menerus selama pengujian dan menyebabkan sebagian energi termal dari panci terbang ke lingkungan. Mekanisme ini disebut konveksi alami (*natural convection*) karena pergerakan udara terjadi akibat perbedaan densitas, bukan akibat aliran paksa seperti kipas atau angin. Besarnya kehilangan panas melalui konveksi dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_{\text{konv}} = h \cdot A_{\text{permukaan}} \cdot (T_{\text{permukaan}} - T_{\text{ambient}}) \quad (2.7)$$

Keterangan:

- h = koefisien konveksi alami udara ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
- $A_{\text{permukaan}}$ = luas permukaan luar panci yang terekspos udara (m^2)
- $T_{\text{permukaan}}$ = suhu permukaan luar panci/receiver ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{ambient} = suhu udara lingkungan sekitar ($^{\circ}\text{C}$)

Nilai koefisien konveksi alami h untuk permukaan yang terekspos udara bebas umumnya berada pada rentang $5\text{--}25 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$. Pada penelitian ini,

penghitungan Q_{konv} tidak dilakukan secara eksplisit karena keterbatasan instrumentasi untuk mengukur h secara langsung. Estimasi Q_{konv} dapat dilakukan pada penelitian lanjutan.

c) Kehilangan Panas melalui Konduksi (*Conduction Loss*)

Kehilangan panas melalui konduksi terjadi pada dinding panci presto dan titik sambungan antara panci dengan rangka penyangga *receiver*. Ketika dinding aluminium panci menyerap panas dari permukaan luar dan meneruskannya ke air di dalam, sebagian panas juga merambat melalui molekul aluminium menuju titik-titik kontak fisik dengan komponen lain, seperti baut, klem, dan rangka besi penyangga. Energi yang merambat ke struktur penyangga ini tidak berkontribusi pada pemanasan air dan menjadi kehilangan panas melalui konduksi. Besarnya kehilangan panas melalui konduksi pada dinding panci dinyatakan menggunakan Hukum Fourier sebagai berikut :

$$Q_{kond} = k \cdot A_{dinding} \cdot (\Delta T / L) \quad (2.8)$$

Keterangan:

- k = konduktivitas termal aluminium = 237 (W/m·K)
- $A_{dinding}$ = luas penampang dinding panci (m²)
- ΔT = beda suhu permukaan luar dan dalam panci (K)
- L = tebal dinding panci (m)

Pada penelitian ini, kehilangan konduksi tidak dihitung secara eksplisit karena tebal dinding panci (L) tidak terukur langsung. Pengukuran tebal dinding dan perhitungan Q_{kond} secara eksplisit dapat dilakukan pada penelitian lanjutan untuk melengkapi neraca energi sistem.

2.4.3 Rasio Konsentrasi

Rasio konsentrasi merupakan salah satu parameter geometris dalam mengevaluasi kinerja sistem kolektor surya pemusat. Parameter ini menggambarkan seberapa besar energi radiasi matahari yang diterima oleh aperture reflektor dapat dipusatkan ke area receiver yang jauh lebih kecil. Semakin tinggi rasio konsentrasi, semakin tinggi pula fluks radiasi dan temperatur yang dapat dicapai pada titik fokus. Rasio konsentrasi geometris (C_g) didefinisikan sebagai perbandingan antara luas aperture reflektor (A_{aperture}) dengan luas permukaan receiver (A_{receiver}), dirumuskan sebagai berikut :

$$C_g = A_{\text{aperture}} / A_{\text{receiver}} \quad (2.9)$$

Keterangan:

C_g = rasio konsentrasi geometris

A_{aperture} = luas aperture reflektor parabola (m^2)

A_{receiver} = luas permukaan receiver/absorber (m^2)

Rasio konsentrasi secara langsung memengaruhi temperatur maksimum yang dapat dicapai sistem. Berdasarkan hukum termodinamika, batas temperatur maksimum fluida kerja pada receiver berkaitan dengan nilai C_g melalui hubungan termal. Parabolic dish umumnya memiliki C_g berkisar antara 1.000 hingga 4.000, menjadikannya jenis kolektor surya dengan rasio konsentrasi tertinggi di antara jenis kolektor surya lainnya (García-Ferrero et al., 2025). Nilai C_g yang diperoleh pada prototipe ini relatif rendah dibandingkan sistem parabolic dish industri pada umumnya. Hal ini disebabkan oleh ukuran receiver yang cukup besar (panci presto) serta keterbatasan akurasi geometri parabola pada prototipe skala laboratorium. Meskipun demikian, nilai C_g tersebut telah cukup untuk memanaskan air di atas titik didih ($>100^\circ\text{C}$) sebagaimana yang dibuktikan dalam pengujian eksperimental penelitian ini.

Peningkatan rasio konsentrasi dapat dilakukan dengan menggunakan receiver berdiameter lebih kecil atau meningkatkan diameter reflektor pada pengembangan selanjutnya.

2.5 Perbandingan *Parabolic Dish* dengan Kolektor Surya Lainnya

Terdapat beberapa jenis kolektor surya yang telah dikembangkan untuk berbagai aplikasi. Perbandingan ini menjadi dasar justifikasi ilmiah pemilihan parabolic dish dalam penelitian ini.

2.5.1 Kolektor Pelat Datar

Kolektor plat datar merupakan jenis kolektor surya paling konvensional yang umumnya diaplikasikan untuk kebutuhan energi termal bersuhu rendah hingga menengah antara 40–80°C. Meskipun menawarkan biaya fabrikasi yang ekonomis, teknologi ini tidak mampu mencapai tingkat temperatur ekstrem yang dibutuhkan oleh proses manufaktur industri skala besar. Efisiensi termal kolektor plat datar terbukti mengalami penurunan signifikan saat dioperasikan pada kondisi iklim tropis yang lembap akibat tingginya laju kehilangan panas (*heat losses*) melalui mekanisme konveksi dan konduksi menuju lingkungan sekitar (Rakasiwi et al., 2022). Karakteristik tersebut berbeda mendasar dengan teknologi *parabolic dish*, di mana kolektor plat datar tidak dilengkapi dengan aspek pemfokusan radiasi surya sehingga nilai rasio konsentrasi geometrisnya selalu mendekati satu.

2.5.2 Kolektor Parabola Trough

Kolektor *parabolic trough* memanfaatkan permukaan reflektor berbentuk parabola silindris memanjang yang berfungsi memfokuskan radiasi matahari menuju satu garis fokus (*line-focus*). Karakteristik geometri ini menghasilkan rasio konsentrasi yang berada pada rentang menengah antara 10 hingga 100 kali dengan capaian

temperatur operasi maksimum hingga 400°C. Meskipun konfigurasi sistem ini lebih sederhana karena hanya memerlukan mekanisme pelacak surya satu sumbu (*single-axis tracking*), implementasi operasionalnya membutuhkan area lahan yang luas dan dinilai kurang efektif untuk diaplikasikan pada skala industri rumah tangga atau skala kecil (Mondal & Maji, 2025).

2.6 Aplikasi *Parabolic Dish* di Indonesia

Indonesia sebagai negara tropis yang terletak di garis khatulistiwa memiliki potensi intensitas radiasi surya harian rata-rata yang sangat masif, yaitu antara 4,8 hingga 5,8 kWh/m²/hari, sehingga menjadikannya lokasi yang ideal bagi pengembangan teknologi kolektor surya pekat seperti tipe *parabolic dish* (Kementerian ESDM, 2025). Beberapa aplikasi termal yang relevan meliputi sistem pemanas air industri, alat pengering hasil pertanian, sterilisasi peralatan medis pedesaan, hingga sistem pemasakan fungsional skala komunitas (Asrori et al., 2022). Dalam konteks penelitian ini, teknologi *parabolic dish* dikembangkan untuk keperluan skala laboratorium guna mengkaji potensi pemanfaatan energi surya termal pada kondisi terkontrol. Langkah riset ini selaras dengan target penyesuaian bauran EBT primer sebesar 17–19% dalam rencana revisi Kebijakan Energi Nasional (Renewable Energy Indonesia, 2024) serta komitmen nasional dalam pengurangan emisi CO₂ sebesar 29% pada tahun 2030. Selain itu, implementasi material *silvered glass mirror* komersial pada prototipe ini diproyeksikan mampu menekan biaya perawatan struktural jangka panjang, sehingga meningkatkan kelayakan nilai ekonomis untuk adopsi teknologi surya pekat secara lebih luas di Indonesia (Aramesh et al., 2019).

2.7 Studi Literatur

Bagian ini merangkum dan menganalisis hasil-hasil penelitian terdahulu yang

relevan dengan perancangan *point-focus parabolic dish* untuk aplikasi temperatur tinggi.

2.7.1 Studi Review dan Analisis *Kolektor Surya Pemusat (Concentrated Solar Collector)*

1. Mondal dan Maji (2025) meninjau secara komprehensif pengembangan *parabolic trough collector* (PTC) untuk peningkatan kinerja termal dengan fokus mendalam pada komponen utamanya. Pada bagian reflektor, studi tersebut mengumpulkan analisis berbagai material (aluminium, kaca berlapis perak, poliester) dan tingkat akurasi bentuk parabola, di mana degradasi akibat sinar UV ditemukan menyebabkan penurunan reflektivitas sebesar 10–20% dalam jangka waktu 3 tahun, yang memengaruhi efisiensi optik hingga 15%. Komponen *receiver* juga dibahas secara rinci meliputi desain geometris (bentuk tabung *concentric/annular*), material (baja, tembaga, atau aluminium dengan nilai absorptansi $>0,9$), serta penggunaan komponen sisipan seperti *twisted tapes* atau sirip (*fins*) untuk meningkatkan turbulensi aliran fluida (angka *Nusselt* naik 20–30%) dan media berpori untuk mencapai efisiensi termal $>60\%$. Karakteristik *heat transfer fluid* (HTF) yang dieksplorasi meliputi minyak termal (stabilitas hingga 400°C), air (efisiensi 50–70%), dan penggunaan nanofluida ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CuO}$) dengan konsentrasi 1–5%) yang mampu meningkatkan nilai konduktivitas termal sebesar 5–25% namun meningkatkan *pressure drop* sebesar 10–40%. Penutup kaca silindris juga dikaji, di mana lapisan vakum terbukti

mengurangi rugi panas (*heat loss*) sebesar 20% dan lapisan *anti-reflective* mampu meningkatkan nilai transmitansi hingga 5%. Hasil keseluruhan menunjukkan penggunaan *molten salt* dapat mencapai efisiensi 70,5%, nanofluida tembaga memberikan kontribusi peningkatan sebesar 5%, tabung absorber berbasis aluminium menghasilkan performa 25% lebih tinggi daripada material baja, serta modifikasi sirip atau media berpori terbukti meningkatkan perpindahan panas harian berkisar antara 15–35%.

2. Ibrahim et al. (2020) menyajikan modifikasi pada *parabolic trough solar collector* dengan menambahkan komponen penutup berbahan polimer yang berfungsi untuk mengendalikan suhu keluaran sekaligus melindungi lapisan kaca penutup absorber dari risiko kerusakan akibat cuaca ekstrem seperti hujan es. Desain perancangan tersebut mempertimbangkan posisi garis fokus secara presisi, sehingga mekanisme *slider* penutup ditempatkan tepat di atas pipa absorber. Pengujian prototipe dilakukan di atas atap gedung Fakultas Teknik, *Tshwane University of Technology*, Pretoria, Afrika Selatan, dengan fokus parameter analisis pada pencapaian efisiensi tinggi, kerapatan daya penyerapan yang besar, serta durabilitas material yang tinggi terhadap faktor kelembapan lingkungan sekitar.
3. Suwito dan Darsopuspito (2013) menganalisis performa termal kolektor surya tipe *parabolic trough* sebagai substitusi sumber energi pemanas pada generator sistem pendingin difusi absorpsi. Eksperimen

dilakukan dengan mendesain ulang dimensi kolektor surya melalui variasi ukuran pipa absorber, diameter bukaan parabola, dan fluida kerja berupa oli termal yang dialirkan pada variasi debit 4, 5, dan 6 liter/jam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengoperasian dengan debit 4 liter/jam mampu mencapai temperatur keluaran oli tertinggi sebesar $106,1^{\circ}\text{C}$ pada kondisi intensitas radiasi matahari harian (*Direct Normal Irradiation* / DNI) sebesar $980,39\text{W/m}^2$ tepat pada pukul 12.00 WIB. Sementara itu, nilai efisiensi kolektor surya tertinggi diperoleh pada pengoperasian debit 5 liter/jam yaitu sebesar 36,97% dengan kondisi nilai DNI sebesar $1.019,61\text{W/m}^2$.

4. Pourfallah dan Languri (2025) melakukan optimasi karakteristik perpindahan panas pada *parabolic trough collector* menggunakan pemodelan desain *turbulator spiral-fin* canggih (variasi 4, 7, dan 10 *blade*) serta implementasi media nanofluida (SWCNT, CuO, dan *hybrid* SWCNT-CuO pada rentang konsentrasi volume 1%, 3%, dan 5%). Hasil simulasi numerik berbasis perangkat lunak ANSYS-FLUENT menunjukkan bahwa penerapan *turbulator* dengan konfigurasi 10 *blade* mampu meningkatkan koefisien perpindahan panas harian sebesar 12,25% . Di sisi lain, penggunaan jenis nanofluida *hybrid* terbukti meningkatkan nilai konduktivitas termal sebesar 24,8%, meskipun harus mengorbankan peningkatan nilai *pressure drop* aliran sebesar 44% pada kondisi bilangan *Reynolds* (Re) 12.500. Secara keseluruhan, nilai *Performance Evaluation Criterion* (PEC) dari media *hybrid* tersebut mengalami kenaikan sebesar 15,6% jika dibandingkan

dengan penggunaan nanofluida tunggal jenis CuO.

5. Xu et al.(2020) menyelidiki secara numerik dan eksperimental karakteristik performa dari kolektor surya kombinasi *compound parabolic concentrator-capillary tube* (CPC-CSC) yang dirancang menggunakan spesifikasi diameter tabung absorber sebesar 4 mm, nilai rasio konsentrasi geometris sebesar 4,22, dan ketebalan alat total hanya sebesar 75 mm. Berdasarkan standar prosedur pengujian metode GB/T 4271-2007, hasil analisis menunjukkan bahwa kurva efisiensi termal alat akan menurun seiring dengan meningkatnya laju konveksi pada lapisan udara dalam kolektor. Temperatur pada tabung absorber juga tercatat meningkat secara linier terhadap kenaikan intensitas radiasi matahari, sementara peningkatan laju alir massa air terbukti mampu menaikkan efisiensi total sistem. Studi ini menyimpulkan bahwa rugi-rugi panas (*heat loss*) utama dari sistem kolektor ini bersumber dari lapisan konveksi udara yang terperangkap di antara kaca penutup luar dan permukaan reflektor CPC.

2.7.2 Penelitian Terkait di Indonesia

Asrori et al. (2022) melakukan pengujian eksperimental terhadap performa termal sistem kompor surya pekat menggunakan konsentrator jenis lensa Fresnel di Indonesia. Penelitian ini memanfaatkan mekanisme sistem pelacak surya otomatis berbasis hidrolik dengan variasi interval pergerakan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pada kondisi intensitas radiasi matahari puncak sebesar 789W/m^2 , temperatur pada titik fokus (*focal point*) mampu mencapai suhu ekstrem hingga $930,10^\circ\text{C}$. Studi

ini juga menyimpulkan bahwa kerapatan frekuensi jeda pergerakan kolektor berpengaruh drastis terhadap unjuk kerja sistem, di mana interval pelacakan yang lebih rapat (setiap 5 menit) menghasilkan efisiensi termal tertinggi sebesar 33,66% .

Robiandi et al. (2022) melakukan rancang bangun kolektor surya pemusat tipe *parabolic trough* skala laboratorium yang diaplikasikan sebagai pemanas udara pada lemari pengering hasil pertanian. Penelitian tersebut menguji penggunaan material reflektor alternatif berupa *aluminum tape* yang dilapisi poliester untuk memantulkan radiasi matahari. Hasil pengujian menunjukkan suhu udara di dalam pipa absorber berhasil ditingkatkan hingga mencapai temperatur maksimal 51,5°C. Namun, studi ini menggarisbawahi bahwa penggunaan material lembaran tipis tersebut di luar ruangan sangat rentan terhadap pengaruh kecepatan angin lingkungan (di atas 0,6 m/s) yang secara signifikan menurunkan temperatur udara absorber dan membatasi efisiensi termal sistem hanya pada rentang 0,11% hingga 0,24%.

Handoyo et al. (2020) mengembangkan metode peningkatan unjuk kerja kolektor surya melalui integrasi lensa Fresnel di atas permukaan kolektor surya plat datar skala laboratorium. Pengujian dilakukan dengan memfokuskan berkas radiasi matahari menuju permukaan plat penyerap guna menekan rugi-rugi panas ke lingkungan sekitar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan komponen pemusat optik tersebut terbukti efektif meningkatkan temperatur fluida kerja serta menaikkan efisiensi termal kolektor plat datar konvensional secara signifikan, sehingga sangat potensial untuk dikembangkan sebagai sistem pemanas fungsional di wilayah dengan karakteristik intensitas iradiasi harian yang tinggi

2.7.3 Celah Penelitian

Dari keseluruhan literatur yang ditinjau, teridentifikasi bahwa sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada sistem *parabolic trough* dan Fresnel dengan material reflektor non-kaca yang rentan mengalami degradasi reflektivitas sebesar 20–30% dalam dua tahun pertama operasi. Sistem *photovoltaic-thermal* (PVT) yang dikombinasikan dengan pendinginan air pun tidak mampu mencapai suhu fokus di atas 800°C. Lebih jauh, belum ditemukan studi yang secara spesifik mengembangkan prototipe *parabolic dish* skala laboratorium di Indonesia menggunakan *silvered glass mirror* komersial, dengan pengukuran suhu fokus pada rentang waktu pukul 10.00–14.00 WIB. Kesenjangan inilah yang menjadi justifikasi utama dan kontribusi kebaruan dari penelitian ini.

