

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam perkembangan teknologi saat ini, kebutuhan akan sumber energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan semakin mendesak. Energi surya, sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang melimpah, menawarkan solusi yang menjanjikan ini. Panel surya berfungsi mengkonversi energi matahari menjadi listrik, namun tantangan utama adalah mengoptimalkan konversi dan transfer energi termal ke sistem penyimpanan yang efisien. Penyimpanan energi termal merupakan salah satu solusi penting dalam mendukung sistem terbarukan, terutama ketika terjadi ketidaksesuaian Antara waktu produksi dan kebutuhan energi. Salah satu media penyimpanan panas yang mulai banyak diteliti adalah pasir, yang kemudian dikenal dengan istilah baterai pasir (*sand battery*). Teknologi ini memanfaatkan karakteristik pasir yang memiliki kapasitas panas spesifik cukup tinggi dan stabilitas termal yang baik. Penggunaan baterai pasir sebagai media penyimpanan panas menawarkan kapasitas yang baik dengan biaya rendah, diharapkan dapat mengurangi kehilangan energi dan meningkatkan efisiensi sistem pemanas udara. Penelitian ini bertujuan untuk eksplorasi dan mengoptimalkan proses konversi dan transfer energi termal dari panel surya ke baterai pasir. Tinjauan pustaka berikut akan membahas teknologi panel surya, metode penyimpanan energi, mekanisme transfer energi, dan sistem pemanas udara yang efisien sebagai landasan teori untuk pengembangan sistem yang lebih baik.

Penggunaan energi surya sebagai sumber energi alternative telah banyak dikembangkan, khususnya dalam bentuk sistem pemanas udara. Panel surya bekerja berdasarkan prinsip efek fotovoltaiik, di mana cahaya matahari diubah menjadi energi listrik. Menurut *National Renewable Energy Laboratory* (2022), teknologi panel surya telah berkembang pesat, dengan efisiensi sel surya polikristalin rata – rata mencapai 15 – 18% tergantung kondisi radiasi dan suhu

lingkungan. Namun, efisiensi ini cenderung menurun jika tidak dikombinasikan dengan sistem penyimpanan atau pemanfaatan energi secara langsung [1].

Penyimpanan energi termal merupakan solusi untuk mengatasi intermittensi energi terbarukan seperti tenaga surya, pasir, khususnya pasir silica, telah diidentifikasi sebagai media penyimpanan energi termal yang menjanjikan karena kapasitas panas spesifiknya yang tinggi, stabilitas termal, dan ketersediaannya yang melimpah. Studi oleh Rizeiqi, Nasser Al Jedda, Mariam, Liew, Peng Yen. (2023) menunjukkan bahwa pasir silica murni (99,65% SiO₂) dapat mencapai suhu operasi hingga 1.200°C tanpa mengalami degradasi termal, menjadikannya pilihan yang ekonomis dan efisien untuk penyimpanan energi termal [2].

Sistem pemanas udara tenaga surya (*solar air heater*) adalah teknologi yang memanfaatkan energi matahari untuk memanaskan udara, yang kemudian dapat digunakan untuk berbagai aplikasi seperti pengeringan hasil pertanian, pemanasan ruangan, dan proses industri. Desain dan kinerja dari pemanas udara surya sangat dipengaruhi oleh konfigurasi kolektor surya yang digunakan. Studi oleh Hamdoon (2020) mengulas berbagai teknik peningkatan kinerja termal pemanas udara surya, termasuk penambahan pelat penyerap berelombang, sirip, dan bahan perubahan fasa (PCM) untuk meningkatkan efisiensi termal sistem [3].

Berdasarkan tinjauan tersebut penyusun melakukan Tugas Akhir berjudul “KONVERSI DAN TRANSFER ENERGI TERMAL DARI PANEL SURYA KE BATERAI PASIR SEBAGAI MEDIA PENYIMPANAN PANAS UNTUK SISTEM PEMANAS UDARA”

2.2 Landasan Teori

Pada bagian landasan teori akan dijelaskan mengenai dasar – dasar teori yang memiliki keterkaitan dengan komponen - komponen yang penyusun gunakan dalam melakukan pembuatan alat. Penjelasan ini diberikan sebagai bahan literatur yang secara mendasar untuk dipahami dalam melakukan rancangan terhadap pembuatan suatu alat.

2.2.1 Panel Surya



Gambar 2. 1 Panel Surya Polikristalin 200 Wp

Panel surya adalah perangkat yang berfungsi untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik menggunakan efek fotovoltaiik. Efek ini terjadi ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya yang terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon, lalu memicu pergerakan elektron sehingga menghasilkan arus listrik searah (DC). Panel surya umumnya terbagi menjadi tiga jenis berdasarkan struktur kristalnya, yaitu monokristalin, polikristalin, dan *thin-film*. Panel monokristalin memiliki efisiensi tinggi dan umur panjang, namun dengan biaya lebih mahal. Sebaliknya, panel polikristalin lebih ekonomis dengan efisiensi sedikit lebih rendah, tetapi masih banyak digunakan dalam berbagai aplikasi energi surya karena keandalannya. Adapun panel *thin-film* dikenal karena ringan dan fleksibel, namun memiliki efisiensi terendah di antara ketiganya.

Panel surya polikristalin 200 Wp merupakan salah satu jenis panel yang banyak digunakan dalam aplikasi skala kecil hingga menengah seperti sistem pompa air, sistem penerangan jalan, dan *solar home system*. Daya puncak sebesar 200 Wp menunjukkan bahwa panel ini dapat menghasilkan daya maksimum 200 Watt dalam kondisi penyinaran ideal. Berdasarkan datasheet dari YUNDAsolar (2023), panel polikristalin 200 Wp memiliki tegangan maksimum (V_{mp}) sebesar 35,2 Volt dan arus maksimum (I_{mp}) sebesar 5,69 Ampere. Tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}) sebesar 45,6 Volt dan arus hubung singkat (I_{sc})

sebesar 6,02 Ampere. Efisiensi konversinya mencapai sekitar 17,2%, dengan dimensi $1480\text{mm} \times 670\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ dan berat sekitar 12,5 kg [4].

Kinerja panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti intensitas cahaya matahari, suhu lingkungan, dan sudut pemasangan panel terhadap posisi matahari. Semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima, maka semakin besar daya listrik yang dihasilkan. Namun, suhu lingkungan yang terlalu tinggi dapat menurunkan efisiensi kerja panel. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Siregar (2020), penggunaan panel surya 200 Wp untuk kebutuhan listrik rumah petani di daerah terpencil menunjukkan bahwa cuaca cerah, panel dapat menghasilkan daya actual sebesar 202,8 W dengan tegangan 39 V dan arus 5,2 A. ini menunjukkan bahwa panel surya 200 Wp mampu memberikan kinerja mendekati kapasitas nominal dalam kondisi optimal [5]. Aplikasi panel surya 200 Wp cukup luas, termasuk sebagai sumber energi dalam sistem pompa air tenaga surya untuk irigasi lahan pertanian. Panel 200 Wp digunakan untuk menggerakkan pompa DC dalam sistem irigasi sawah tadah hujan, yang mampu meningkatkan efisiensi pengairan dan mengurangi ketergantungan terhadap pasokan listrik konvensional [6].

Dalam tugas akhir ini digunakan dua buah panel surya polikristalin 200 Wp (*Watt Peak*). Kedua panel ini disusun secara seri, sehingga sistem menjadi 400 Wp. Penyusunan secara seri ini bertujuan untuk meningkatkan tegangan output sistem tanpa mengubah besar arusnya. Berdasarkan karakteristik umum panel 200 Wp, masing – masing memiliki tegangan maksimum pada saat daya puncak (V_{mp}) sekitar 18 – 20 volt dan arus maksimum (I_{mp}) sekitar 10 – 11 ampere. Oleh karena itu, ketika disusun seri, sistem dapat menghasilkan tegangan total sekitar 36 – 40 volt DC, dengan arus maksimum tetap berkisar 10 – 11 ampere. Tegangan arus ini kemudian digunakan secara langsung untuk mengoperasikan elemen pemanas listrik (*heater*) DC berkapasitas 40V 500W, tanpa melalui sistem penyimpanan energi seperti baterai maupun konversi arus seperti inverter. Dengan kata lain, sistem ini mengadopsi konfigurasi *direct bypass*, di mana energi dari panel surya dialirkan secara langsung ke beban pemanas. Tujuan dari pendekatan ini adalah untuk menyederhanakan sistem, mengurangi biaya pengadaan komponen, serta menghindari potensi degradasi

dan risiko keselamatan dari penggunaan baterai. Walaupun tanpa baterai menyebabkan fluktuasi tegangan tergantung intensitas cahaya matahari, pemilihan heater dengan spesifikasi lebih besar dari output daya panel membuat sistem tetap aman dan heater tidak akan mengalami kelebihan arus.

Tabel 2. 1 Spesifikasi Panel Surya Polikristalin 200 Wp

Spesifikasi	Keterangan
Tipe Panel	Polikristalin
Model Number	ST200W-32-M
Max Power	200W
Max Power Voltage	18.24V
Max Power Current	10.96A
Open-Circuit Voltage	21.8V
Short-Circuit Current	11.62A
Net Weight	21KGS
Size	1290*760*30MM
Temperature Range	-40°C hingga +85°C
Frame Material	Alumunium
Max System Voltage	1000V DC

2.2.2 Baterai Pasir Silika



Gambar 2. 2 Baterai Pasir Silika

Baterai pasir adalah sistem penyimpanan energi termal yang menggunakan pasir sebagai media penyimpanan panas. Teknologi ini bekerja dengan menyerap energi panas ke dalam material pasir, lalu melepaskan kembali saat dibutuhkan, melalui proses konveksi dan konduksi termal. Baterai pasir termasuk dalam kategori sistem penyimpanan energi termal suhu tinggi (*high-temperature thermal energy storage/HT-TES*), yang menawarkan solusi hemat biaya dan ramah lingkungan untuk penyimpanan energi jangka menengah hingga panjang.

Pasir memiliki beberapa karakteristik penting yang menjadikannya cocok sebagai media penyimpanan panas, anatar lain kapasitas panas spesifik tinggi (sekitar $830\text{J/kg}\cdot\text{K}$), stabil secara termal, tidak beracun, melimpah di alam, dan biaya sangat rendah. Ketika dipanaskan, pasir dapat mencapai suhu Antara 300°C hingga lebih dari 1000°C tergantung desain sistem, dan mampu menyimpan panas dalam waktu yang cukup lama, terutama jika diisolasi dengan baik.

Menurut studi oleh Faisal et al. (2025), ”simulasi perpindahan panas dalam sistem baterai pasir menunjukan perangkat lunak COMSOL menunjukan bahwa pasir dapat menyimpan energi panas secara signifikan dan mampu mempertahankan suhu tinggi selama beberapa jam. Dalam eksperimen tersebut, pasir dipanaskan menggunakan elemen pemanas listrik hingga mencapai suhu $\pm 500^{\circ}\text{C}$, lalu dilepaskan melalui aliran udara yang dialirkan secara paksa”. Studi ini juga menekankan pentingnya penggunaan material isolasi termal seperti rockwool, glasswool dan *fire blanket* untuk meminimalkan kehilangan panas ke lingkungan [7].

Baterai pasir dapat menjadi alternatif penyimpanan energi jangka panjang sebagai penanti baterai kimia dalam aplikasi energi terbarukan. Sistem ini dianggap lebih stabil dan tahan lama karena tidak melibatkan reaksi kimia, serta tidak memiliki risiko ledakan atau kebakaran seperti pada baterai lithium. Selain itu, pasir memiliki kemampuan retensi panas yang sangat baik, yang berarti dapat melepaskan panas secara bertahap dalam waktu yang panjang ketika dibutuhkan. Sementara itu, dalam laporan dari Infinity Turbine (2023), dijelaskan bahwa baterai pasir mampu menyimpan panas hingga 1000°C , dan jika dikombinasikan dengan sistem pemanas berbasis tenaga surya atau listrik murah (*off-peak*), sistem

ini dapat digunakan untuk pemanas industri, pemanas ruangan, bahkan untuk mendukung pembangkit listrik melalui uap [8]. Dari sisi teknis, energi panas yang dapat disimpan dalam pasir dapat dihitung dengan rumus:

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

Dimana Q adalah energi panas (Joule), m adalah massa pasir (kg), c adalah kapasitas panas pasir (J/kg·K), ΔT adalah perubahan suhu pasir. Rumus ini digunakan untuk menghitung total energi yang disimpan dalam proses pemanasan pasir dan seberapa banyak panas yang dapat dilepaskan untuk memanaskan udara. Dengan mempertimbangkan keunggulan teknis, ketersediaan material, dan kestabilan termal, teknologi baterai pasir menjadi salah satu solusi inovatif untuk sistem penyimpanan energi terbarukan. Untuk mendukung analisis tersebut, dilakukan perhitungan massa pasir yang digunakan pada baterai pasir. Massa pasir dihitung menggunakan hubungan antara massa jenis dan volume wadah penyimpanan. Massa jenis pasir silika yang digunakan adalah 1.600 kg/m³ atau setara dengan 1,6 gram/cm³. Volume wadah berbentuk tabung ditentukan dengan rumus:

$$V = \pi \times r^2 \times T = 3.14 \times 7.5^2 \times 15 = 2.649,37 \text{ cm}^3$$

Selanjutnya, volume ini dikalikan dengan massa jenis pasir untuk mendapatkan massa total, yaitu :

$$2.649,37 \times 1.6 = 4.238,99 \text{ gram} = 4.2 \text{ kg}$$

Nilai massa ini menjadi parameter penting dalam menghitung kapasitas penyimpanan panas baterai pasir, karena semakin besar massa pasir, semakin besar pula energi panas yang dapat disimpan dan dimanfaatkan. Pada penelitian ini, nilai massa pasir dibulatkan menjadi 4 kg untuk mempermudah proses perhitungan energi panas yang tersimpan dan analisis kinerja sistem.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Baterai Pasir Silika

Spesifikasi	Keterangan
Media Penyimpanan Panas	Pasir Silika (SiO ₂ > 95%)
Kapasitas Panas Spesifik (c)	±830 J/kg·K
Kepadatan Massa Jenis (ρ)	±1600 kg/m ³

Kisaran Suhu Operasi	30°C – 300°C (eksperimen skala kecil)
Massa Pasir yang Digunakan	4 kg (disesuaikan dengan volume tabung dan energi input)
Jenis Pemanas	Elemen Pemanas Listrik 40V 500W
Bahan Wadah	Tabung logam berdiameter ± 15 cm dan tinggi ± 15 cm
Isolasi Termal	Glasswool + Alumunium Foil
Metode Transfer Panas ke Udara	Konveksi paksa dengan kipas angin 6 inch
Efisiensi Estimasi Penyimpanan	± 60 –70%
Durasi Retensi Panas	± 30 –60 menit
Total Energi Disimpan	± 400 –500 kJ

2.2.3 Isolasi Termal

Isolasi termal merupakan teknik untuk memperlambat laju perpindahan panas dari suatu sistem bersuhu tinggi ke lingkungan bersuhu lebih rendah, sehingga energi panas dapat dipertahankan lebih lama. Prinsip kerja isolasi didasarkan pada penghambatan tiga mekanisme utama perpindahan panas, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui kontak langsung antar molekul dalam padatan, konveksi terjadi melalui pergerakan fluida (udara atau cairan), sedangkan radiasi terjadi melalui gelombang elektromagnetik tanpa medium. Material isolasi yang baik umumnya memiliki konduktivitas termal (λ) yang rendah ($< 0,05$ W/m·K), struktur berpori, serta banyak mengandung udara atau gas yang memiliki kemampuan hantar panas buruk. Semakin rendah nilai konduktivitas termal suatu material, semakin baik kemampuan isolasinya dalam menahan panas [11].

Salah satu material isolasi yang banyak digunakan pada sistem penyimpanan energi panas adalah *rockwool* (*stone wool*). *Rockwool* dibuat dari hasil peleburan batuan basalt atau diabase yang dipintal menjadi serat-serat halus sehingga menghasilkan material dengan densitas rendah dan struktur berongga. Struktur ini efektif menghambat perambatan panas secara konduksi, sementara rongga udara yang terperangkap di dalam seratnya memperkecil perpindahan panas secara konveksi. *Rockwool* memiliki konduktivitas termal rata-rata 0,035–0,045

W/m·K dan mampu menahan suhu hingga 600 °C, sehingga sangat sesuai digunakan pada aplikasi penyimpanan panas dengan suhu tinggi seperti baterai pasir [12]. Selain itu, *rockwool* bersifat tahan api, tidak mudah terbakar, serta memiliki ketahanan kimia dan dimensi yang baik sehingga tidak mudah menyusut atau berubah bentuk meskipun digunakan pada suhu ekstrem.

Untuk meningkatkan performanya, *rockwool* sering dilapisi dengan aluminium foil pada salah satu sisinya. Aluminium foil berperan sebagai radiant barrier dengan reflektivitas tinggi (90–97%) dan emisivitas rendah (~0,03–0,05), sehingga efektif memantulkan radiasi termal keluar dan mencegah hilangnya panas dari sistem melalui mekanisme radiasi [13]. Lapisan aluminium foil juga berfungsi sebagai *vapor barrier*, yang mencegah kelembapan masuk ke dalam *rockwool*. Hal ini sangat penting, karena *rockwool* yang menyerap kelembapan dapat mengalami penurunan drastis pada kemampuan isolasinya. Studi menunjukkan bahwa kombinasi *rockwool* dengan aluminium foil dapat meningkatkan performa isolasi sebesar 20–30% dibandingkan *rockwool* tanpa lapisan foil, sehingga penggunaannya menjadi pilihan umum dalam aplikasi industri maupun sistem penyimpanan energi [14]. Selain meningkatkan kinerja termal, lapisan foil juga melindungi permukaan *rockwool* dari abrasi, penumpukan debu, serta mempermudah proses instalasi [15].

Terkait dengan warna permukaan isolasi, penelitian menunjukkan bahwa pada material isolasi bulk seperti *rockwool*, warna visual (gelap atau terang) tidak terlalu memengaruhi kemampuan insulasi karena performa utamanya ditentukan oleh nilai konduktivitas termal material tersebut [12]. Namun, pada permukaan luar yang langsung terpapar radiasi, sifat reflektif permukaan sangat berpengaruh terhadap jumlah panas yang diserap atau dipantulkan. Permukaan berwarna gelap cenderung menyerap panas lebih banyak, sedangkan permukaan reflektif atau berwarna terang mampu menurunkan penyerapan panas. Dalam konteks sistem baterai pasir, penggunaan lapisan aluminium foil pada isolasi *rockwool* memberikan efek reflektif yang signifikan, sehingga panas dari pasir tetap dipertahankan di dalam wadah dan kehilangan energi ke lingkungan dapat diminimalkan.

Dengan demikian, pemilihan kombinasi *rockwool* dan aluminium foil sebagai isolasi termal pada baterai pasir didasarkan pada konduktivitas termal yang rendah, ketahanan suhu tinggi, sifat tahan api, dan kemampuan foil dalam memantulkan radiasi serta melindungi material dari kelembapan. Penerapan isolasi ini berkontribusi langsung pada peningkatan efisiensi penyimpanan panas, menjaga kestabilan suhu pasir lebih lama, dan mendukung kinerja sistem pemanas udara berbasis energi terbarukan.

2.2.4 Breaker DC



Gambar 2. 3 Breaker DC

Breaker DC adalah komponen proteksi penting dalam sistem tenaga surya berbasis arus searah (DC). Fungsinya adalah memutus aliran arus listrik secara otomatis ketika terjadi kelebihan arus (*overcurrent*) atau hubungan pendek (*short circuit*), guna mencegah kerusakan pada komponen sistem dan menjaga keselamatan pengguna. Berbeda dengan sistem AC yang memiliki titik nol tegangan (*zero crossing*) sehingga mudah diputus, sistem DC memiliki karakteristik arus yang konstan, sehingga lebih sulit dihentikan dan berpotensi menimbulkan loncatan busur listrik (*arc flash*) jika tidak diputus dengan benar. Oleh karena itu, breaker khusus DC dirancang dengan kemampuan pemutusan cepat dan sistem pemadam arc untuk menghindari risiko kebakaran dan kerusakan komponen.

Pada sistem ini, breaker DC tipe mekanik digunakan karena lebih ekonomis dan cukup andal untuk sistem skala kecil seperti pemanas tenaga surya tanpa baterai. Breaker ini dirangkai seri dan memiliki rating arus 10A, sesuai dengan daya maksimal yang bisa ditarik oleh lemen pemanas (*heater*) 40V 500W. meskipun rating arus sedikit melebihi breaker, namun breaker dapat bekerja sebagai proteksi awal ketika terjadi kondisi abnormal seperti *short circuit* atau kenaikan

suhu berlebih. Pemilihan breaker DC harus mempertimbangkan kemampuan pemutusan arus, tegangan maksimum sistem, serta karakteristik beban (induktif, resistif, atau campuran). Penggunaan breaker DC sangat direkomendasikan untuk sistem tenaga surya yang terhubung langsung ke beban tanpa perantara baterai, karena dapat melindungi peralatan dari fluktuasi arus dan tegangan yang tidak stabil akibat variasi sinar matahari [9].

Tabel 2. 3 Spesifikasi Breaker DC

Spesifikasi	Keterangan
Nomor Model	TOB1Z-63
Nama Merk	TOMZN
Standard	IEC60947, IEC60898
Poles Number	2
Rated Current DC	10A
Mounting	35mm Din Rail
Breaking Capacity	6KA
Characteristic Curve	C Type
Rated Voltage DC	440V

2.2.5 Wattmeter DC



Gambar 2. 4 Wattmeter DC

Wattmeter DC merupakan alat ukur yang digunakan untuk memantau dan mencatat parameter kelistrikan pada sistem arus searah (*DC*), terutama tegangan (*volt*), arus (*ampere*), dan daya listrik (*watt*). Dalam sistem energi surya, *wattmeter*

DC memiliki peranan penting dalam memantau efisiensi konversi energi dari panel surya ke beban, dalam hal ini elemen panas (*heater*). Alat ini bekerja berdasarkan prinsip pengukuran simultan antara tegangan dan arus yang mengalir, kemudian mengalikan kedua parameter tersebut untuk mendapatkan nilai daya aktual. Sebagian besar *wattmeter DC* menggunakan sensor *shunt resistor* atau sensor berbasis efek *hall* untuk mendeteksi arus, dan mengukur tegangan melalui input parallel terhadap sumber atau beban. Hasil pengukuran ditampilkan secara *real – time* melalui layar *LCD* atau *LED*, dan beberapa model bahkan dilengkapi fitur pencatat energi (*Wh*) serta penyimpanan data.

Pada penelitian ini, *wattmeter DC* digunakan untuk menggantikan fungsi *Solar Charge Controller (SCC)* karena sistem ini tidak lagi menggunakan baterai penyimpanan listrik. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya langsung digunakan untuk mengaktifkan elemen pemanas yang tertanam dalam media pasir. Oleh karena itu, pemantauan *real – time* terhadap konsumsi daya menjadi lebih relevan dibandingkan pengaturan arus dan tegangan seperti pada *SCC*. *Wattmeter* akan dipasang secara seri pada jalur arus ke elemen pemanas, dan secara parallel untuk pengukuran tegangan. Energi listrik ini kemudian dibandingkan dengan energi panas yang tersimpan di dalam pasir menggunakan rumus kalor $Q = m \times c \times \Delta T$, di mana c merupakan kapasitas panas spesifik pasir silika.

Keberadaan *wattmeter* dalam sistem ini sangat penting untuk melakukan evaluasi efisiensi transfer energi dari listrik ke panas. Efisiensi ini dihitung dengan membandingkan energi panas yang disimpan terhadap energi listrik yang masuk, sehingga dapat diketahui seberapa besar kehilangan energi yang terjadi selama proses konversi. Selain itu, dengan pemantauan daya secara *real-time*, pengguna dapat menentukan waktu pemanasan yang optimal dan menghindari pemborosan energi. *Wattmeter DC* juga dapat digunakan sebagai alat bantu dalam eksperimen untuk mengetahui pengaruh variabel tertentu, seperti durasi pemanasan atau massa pasir, terhadap performa sistem penyimpanan panas.

Alat ini mendukung aplikasi sistem tenaga surya skala kecil hingga menengah, serta kompatibel dengan sistem monitoring berbasis digital. Beberapa

model wattmeter juga memiliki fitur logging data yang dapat terhubung ke komputer atau mikrokontroler untuk keperluan dokumentasi hasil pengujian.

Penelitian terkait pemanfaatan wattmeter DC dalam sistem energi terbarukan banyak ditemukan dalam jurnal-jurnal seperti *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *Renewable Energy*, serta *Scientific Reports*, yang membahas penggunaan wattmeter berbasis *shunt* dan mikrokontroler untuk mengukur performa panel surya dan konsumsi daya beban secara presisi. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan wattmeter tidak hanya terbatas pada pemantauan, tetapi juga sebagai alat evaluasi penting dalam pengembangan dan optimasi sistem energi berbasis *DC*.

Tabel 2. 4 Spesifikasi *Wattmeter* DC

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan	0-60V (Resolusi 0.01V)
Arus	0-150A (Resolusi 0.01A)
Daya	0-6554W (Resolusi 0.01W)
Material	Plastic Rubber
Layar	LCD Biru Terang 24 Inchi

2.2.6 Elemen Panas (*Heater*) DC



Gambar 2. 5 *Heater* DC

Pemanas listrik bertenaga DC dengan kapasitas daya 500 watt merupakan salah satu komponen pemanas yang umum digunakan dalam sistem energi skala kecil, khususnya dalam aplikasi yang terintegrasi dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya. Prinsip kerjanya menandalkan efek joule, di mana energi listrik dikonversi menjadi energi panas melalui resistansi dalam elemen pemanas. Jenis pemanas ini memiliki karakteristik efisiensi yang tinggi dan ukuran kompak, sehingga cocok untuk sistem yang memiliki keterbatasan daya namun tetap membutuhkan keluaran panas yang cukup untuk proses pengeringan, pemanasan ruangan, atau pemanasan udara.

Penggunaan elemen pemanas (*heater*) berdaya 500 watt dalam penelitian ini dipilih secara spesifik untuk menyesuaikan dengan kebutuhan energi termal dalam sistem pemanas udara berbasis energi surya yang dirancang. Daya 500 watt dianggap ideal karena berada dalam batas konsumsi energi yang masih dapat didukung oleh panel surya 200 Wp, namun tetap cukup untuk menghasilkan panas yang signifikan ketika digunakan dalam volume pasir yang terbatas. *Heater* ini akan digunakan untuk memanaskan media pasir hingga suhu yang mampu mentransfer panas secara efektif ke udara melalui proses konveksi paksa.

Keselarasan *heater* dengan sistem baterai pasir juga terlihat dari karakteristik *heater* yang bekerja dengan tegangan rendah, yang sejalan dengan output umum panel surya. Hal ini membuat proses konversi energi menjadi lebih efisien tanpa perlu rangkaian *step – down* tambahan.

Untuk mengetahui besar arus listrik yang dibutuhkan oleh elemen pemanas berdaya 500 watt dengan tegangan kerja 40V DC, digunakan rumus dasar hubungan daya, tegangan, dan arus, yaitu $I = \frac{P}{V}$. Dengan memasukkan nilai daya sebesar 500 watt dan tegangan sebesar 40 volt, maka diperoleh arus sebesar $I = \frac{500}{40} = 12.5 \text{ Ampere}$. Nilai ini menunjukkan bahwa heater akan menarik arus sekitar 12,5 ampere dari sumber daya selama beroperasi pada daya maksimum.

2.2.7 Kipas Angin



Gambar 2. 6 Kipas Angin

Kipas merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pemanas udara berbasis media penyimpanan panas. Fungsi utamanya adalah untuk mengalirkan udara melalui media pasir panas agar terjadi perpindahan panas secara konveksi dari pasir ke udara, sehingga udara yang dialirkan menjadi hangat dan dapat digunakan untuk memanaskan ruangan simulasi. Kipas angin konvensional berukuran 6 *inch* yang memiliki debit aliran udara lebih besar, sehingga lebih efektif dalam mendorong udara melalui lapisan pasir panas. Kipas jenis ini umumnya menggunakan daya listrik AC dan memiliki kecepatan aliran udara yang lebih tinggi dibanding kipas DC kecil, menjadikannya cocok untuk sistem pemanas udara berskala kecil sampai menengah.

Penggunaan kipas 6 *inch* juga mempengaruhi estimasi laju aliran udara. Berdasarkan data spesifikasi umum, kipas angin 6 *inch* mampu menghasilkan laju aliran udara sekitar 200-300 CFM (*Cubic Feet per Minute*). Jika di konversi ke m^3/s :

$$1 \text{ CFM} = 0.00047195 \text{ m}^3/s$$

$$Q_{udara} = 250 \times 0.00047195 = 0.1179 \text{ m}^3/s$$

Nilai ini sangat berpengaruh terhadap besarnya energi panas yang dapat ditransfer ke udara. Dalam sistem ini, kipas ditempatkan di bagian atas wadah terluar baterai pasir dan diarahkan ke bawah agar udara masuk melewati pasir panas. Posisi ini memaksimalkan konveksi paksa dan efisiensi pemanas udara.

Tabel 2. 5 Spesifikasi Kipas Angin

Spesifikasi	Keterangan
Merek / Tipe	Sekai DFN-601
Jenis Kipas	Kipas Meja (Desk Fan)
Diameter Baling - Baling	6 Inch ($\pm$ 15 Cm)
Tegangan Operasi	220V AC / 50 Hz
Daya Listrik	$\pm$ 18 – 20 Watt
Jumlah Kecepatan	2 Tingkat Kecepatan (Low Dan High)
Material Baling-Baling	Plastik Polipropilena (PP)
Bahan Rangka	Plastik ABS Tahan Panas
Dimensi Produk	$\pm$ 25 Cm (T) X 20 Cm (L) X 15 Cm (P)
Berat Unit	$\pm$ 1.5 Kg
Saklar	<i>Manual Rotary Switch</i>
Debit Udara (Estimasi)	$\pm$ 250–300 CFM (Sekitar 0.12–0.14 M ³ /S)
Aplikasi	Sirkulasi Udara Lokal, Sistem Pemanas Udara

2.2.8 Sistem Pemanas Udara

Sistem pemanas udara berbasis energi surya merupakan salah satu bentuk pemanfaatan energi terbarukan yang efisien dan ramah lingkungan, terutama untuk memenuhi kebutuhan pemanasan di lingkungan domestik maupun industri. Sistem ini dirancang untuk mengubah energi matahari menjadi energi panas yang kemudian ditransfer ke udara melalui media penyimpanan panas. Dalam penelitian ini, media penyimpanan yang digunakan adalah pasir, yang berperan sebagai baterai panas (*thermal battery*) untuk menyimpan energi termal dari listrik hasil konversi panel surya.

Prinsip dasar sistem ini dimulai dari panel surya yang menangkap cahaya matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik DC menggunakan efek fotovoltaiik. Energi listrik ini digunakan untuk menyalakan elemen pemanas (*heater*) yang tertanam di dalam media pasir. *Heater* bekerja dengan prinsip resistansi listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi panas melalui konduksi termal. Panas ini kemudian merambat melalui butiran pasir secara konduksi padat ke padat, menyebabkan suhu pasir meningkat secara bertahap.

Pasir memiliki kapasitas panas spesifik yang cukup tinggi, yaitu sekitar 830 J/kg·K, serta stabil pada suhu tinggi, sehingga dapat menyimpan energi panas dalam bentuk energi panas sensible. Ketika pasir sudah mencapai suhu tertentu, proses pemanasan udara dapat dimulai. Udara dari lingkungan sekitar dialirkan melewati media pasir menggunakan kipas angin berukuran 6 *inch*. Di sinilah terjadi proses konveksi paksa, yaitu perpindahan panas dari media padat (pasir) ke fluida (udara) akibat dorongan kipas. Selama proses tersebut, molekul – molekul udara yang melewati celah Antara butiran pasir mengalami kontak termal, menyerap panas dari pasir, dan suhunya meningkat. Proses ini menghasilkan udara panas yang kemudian diarahkan melalui saluran pipa menuju ruang simulasi atau ruang target. Suhu udara hasil proses ini tergantung pada suhu pasir saat awal pemanasan, laju aliran udara (semakin lambat, semakin panas), efisiensi konduksi antar butir pasir, efektivitas isolasi termal wadah penyimpanan panas.

Secara termodinamika, proses ini dapat dijelaskan dengan hukum konservasi energi, di mana energi panas yang tersimpan dalam pasir ditransfer ke udara, yang menyebabkan peningkatan suhu udara tanpa adanya reaksi kimia. Rumus yang digunakan untuk menghitung energi panas udara adalah:

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

Dengan Q adalah energi panas (Joule), m adalah massa udara per detik (kg/s), c kapasitas panas spesifik udara (1005 J/kg·K) dan ΔT adalah selisih suhu udara masuk dan keluar.

2.2.9 Hukum Konversi Energi

Hukum konservasi energi merupakan prinsip fundamental dalam ilmu fisika yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, tetapi hanya dapat berubah bentuk dari satu bentuk ke bentuk lain. Dalam konteks sistem teknik, termasuk sistem pemanas udara berbasis energi surya, prinsip ini menjadi acuan utama dalam menganalisis aliran energi dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Secara matematis, hukum ini dapat dituliskan sebagai:

$$E_{masuk} = E_{keluar} + E_{hilang}$$

Artinya, total energi yang masuk ke suatu sistem akan sama dengan total energi yang keluar dari sistem ditambah dengan energi yang hilang (baik dalam

bentuk panas ke lingkungan, esekan, atau bentuk kehilangan lainnya). Dalam sistem pemanas udara pada tugas akhir ini, energi masuk berasal dari panel surya yang mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Energi listrik ini kemudian dikonversikan oleh *heater* menjadi energi panas, yang selanjutnya diserap oleh pasir sebagai media penyimpanan panas, dan pada akhirnya di transfer ke udara melalui proses konveksi paksa oleh kipas angin.

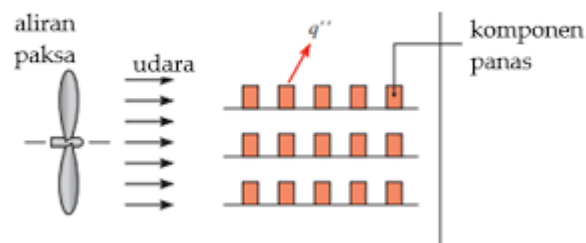
Proses konveksi tersebut mengikuti prinsip konservasi energi karena setiap tahapan melibatkan perubahan bentuk energi tanpa menghilangkan energi itu sendiri, meskipun sebagian kecil energi bisa hilang dalam bentuk panas lingkungan (losses). Oleh karena itu, untuk menilai kinerja sistem, digunakan persamaan efisiensi yang diturunkan dari hukum ini:

$$\eta = \frac{E_{keluar}}{E_{masuk}} \times 100\%$$

Dengan efisiensi η , kita dapat mengukur seberapa besar energi yang benar – benar dimanfaatkan dibandingkan dengan energi yang disuplai dari sumber utama.

Dalam parktiknya, sistem yang dirancang harus memperhatikan efisiensi pada setiap tahap konversi, seperti efisiensi panel surya dalam menghasilkan listrik, efisiensi heater dalam mengubah listrik menjadi panas, dan efisiensi media penyimpanan (pasir) dalam mempertahankan suhu. Sistem insulasi dan kontrol juga berperan penting untuk meminimalkan kehilangan energi selama proses transfer panas ke udara.

2.2.10 Konveksi Paksa



Gambar 2. 7 Proses Konveksi Paksa

Konveksi paksa adalah mekanisme perpindahan panas di mana fluida, baik berupa gas maupun cairan, digerakkan oleh gaya eksternal seperti kipas, pompa,

atau blower, sehingga memindahkan panas melintasi permukaan padat secara lebih efektif dibandingkan dengan konveksi alami. Pada proses ini, perpindahan panas terjadi melalui kombinasi konduksi di lapisan boundary layer fluida yang tipis (dengan gradien suhu tajam dekat permukaan) dan adveksi—yakni perpindahan panas oleh aliran massa fluida yang bergerak. Ketika kecepatan fluida meningkat, ketebalan boundary layer menurun, gradien temperatur antara permukaan dan fluida menjadi lebih besar, dan koefisien perpindahan panas (h) meningkat secara signifikan. Agar dapat diukur dan dianalisis secara kuantitatif, konsep-konsep seperti bilangan Reynolds, Prandtl, dan Nusselt digunakan dalam konveksi paksa. Bilangan Reynolds menggambarkan perbandingan antara gaya inersia dan viskositas, serta menentukan apakah aliran laminar atau turbulen; bilangan Prandtl menunjukkan rasio difusivitas momentum terhadap difusivitas termal; dan bilangan Nusselt mengekspresikan efektivitas perpindahan panas konvektif dibandingkan dengan konduksi murni di fluida. Melalui korelasi antara bilangan-bilangan ini, nilai h dapat dihitung—sering menggunakan korelasi empiris atau semi-empiris yang telah divalidasi lewat eksperimen maupun simulasi.

Konveksi paksa bisa terjadi dalam konfigurasi aliran eksternal, seperti udara yang mengalir melewati permukaan pelat datar atau sirip, maupun dalam geometri aliran internal seperti di dalam tabung atau saluran. Di aliran internal, efek rugi tekanan, profil kecepatan berkembang (yang memengaruhi karakter distribusi suhu), dan transisi dari aliran laminar ke turbulen menjadi sangat penting dalam merancang sistem yang efisien. Kondisi laminar cenderung menghasilkan perpindahan panas lebih rendah karena mixing fluida minimal, sedangkan aliran turbulen meningkatkan perpindahan melalui turbulensi dan pencampuran intensif.[10]

Dalam aplikasi teknik, konveksi paksa memainkan peran krusial di berbagai sistem seperti pendinginan elektronik, radiator kendaraan, penukar panas, hingga sistem HVAC. Khusus pada sistem penyimpan panas seperti media pasir dalam aplikasi surya, kipas digunakan untuk mengalirkan udara melalui media tersebut secara terkendali—ini mempercepat pemanasan, meningkatkan efisiensi perpindahan panas, dan memperpendek waktu pemanasan. memahami mekanisme,

parameter yang memengaruhi, dan metode perhitungannya sangat membantu dalam mendesain sistem termal yang optimal dan tahan uji.

Namun, karena adanya aliran udara, risiko keluarnya kalor dari media penyimpan juga meningkat. Untuk mengantisipasi hal ini, digunakan isolasi termal (seperti *rockwool* dan lapisan aluminium foil) yang berfungsi mengurangi rugi panas akibat konveksi eksternal maupun radiasi. Selain itu, beberapa strategi lain dapat diterapkan untuk menekan kehilangan panas, seperti memperkecil rongga pada wadah penyimpan agar tidak ada jalur konveksi bebas yang berlebihan, mempertebal lapisan isolasi sehingga tahanan termalnya meningkat, serta memastikan sambungan antarbagian wadah rapat sehingga tidak ada kebocoran udara panas. Penggunaan lapisan reflektif seperti aluminium foil juga membantu memantulkan kembali radiasi panas ke dalam sistem. Dengan kombinasi strategi ini, panas yang tersimpan di dalam pasir dapat dipertahankan lebih lama, sehingga efisiensi penyimpanan energi meningkat dan kalor yang terbuang ke lingkungan dapat diminimalkan.