

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. Penggunaan baterai pasir sebagai media penyimpanan panas menawarkan kapasitas yang baik dengan biaya rendah, diharapkan dapat mengurangi kehilangan energi dan meningkatkan efisiensi sistem pemanas air. 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 air yang efisien sebagai landasan teori untuk pengembangan sistem yang lebih baik.

Jurnal	Metode	Hasil
Kosonen, R., dkk. (2022). "Sand Battery for Large Scale Thermal Energy Storage." Polar Night Energy, Finland. [1]	Penelitian merancang sistem penyimpanan energi termal menggunakan pasir silika sebagai media penyimpan panas. Energi listrik dari sumber terbarukan dikonversi menjadi energi panas menggunakan elemen pemanas resistif dan disimpan pada pasir dalam tangki berisolasi.	Sistem mampu menyimpan energi termal hingga temperatur lebih dari 500°C dengan kehilangan panas yang rendah. Penelitian menunjukkan bahwa pasir merupakan media penyimpanan energi termal yang ekonomis, aman, dan memiliki umur pakai yang panjang dibandingkan baterai elektrokimia.

Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). "A Review on Phase Change Energy Storage." Energy Conversion and Management. [2]	Penelitian melakukan kajian berbagai metode penyimpanan energi termal menggunakan sensible heat, latent heat, dan thermochemical storage untuk meningkatkan efisiensi sistem energi terbarukan.	Hasil menunjukkan bahwa penyimpanan energi termal mampu meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan dengan mengurangi fluktuasi suplai energi. Media sensible heat seperti pasir memiliki biaya investasi yang rendah dan konstruksi yang sederhana sehingga cocok untuk aplikasi skala menengah.
Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R. (2014). "Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability." Elsevier. [3]	Penelitian membahas berbagai teknologi penyimpanan energi termal beserta karakteristik material penyimpan panas, mekanisme perpindahan panas, dan implementasinya pada sistem pemanas air tenaga surya.	Penelitian menyimpulkan bahwa sistem Thermal Energy Storage dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi surya dengan menyediakan suplai panas meskipun sumber energi matahari tidak tersedia. Media penyimpan panas berbasis pasir memiliki keunggulan pada aspek biaya, keamanan, dan

		kemudahan implementasi.
--	--	-------------------------

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Perancangan *Thermal Energy Storage* (TES) untuk Pemanas Air

Perancangan sistem penyimpanan energi termal atau Thermal Energy Storage (TES) pada proyek ini bertujuan untuk menyimpan panas yang diperoleh dari energi matahari dan kemudian digunakan untuk memanaskan air. Sistem TES yang digunakan menggunakan pasir silika sebagai media penyimpanan panas karena sifat termalnya yang baik serta ketersediaannya yang melimpah. Dalam konteks ini, proses perancangan mencakup estimasi kebutuhan energi, kapasitas penyimpanan panas, serta efisiensi transfer panas ke media pemanas air.

Energi panas yang dibutuhkan untuk memanaskan air dihitung menggunakan rumus dasar termodinamika:

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

di mana Q adalah energi panas (Joule), m adalah massa air (kg), c adalah kalor jenis air ($4180 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$), dan ΔT adalah perubahan suhu air. Sebagai contoh, untuk memanaskan 5 liter air dari suhu 25°C ke 60°C , energi panas yang dibutuhkan adalah sekitar 731.500 Joule.

Sementara itu, energi yang dapat disimpan oleh pasir silika dihitung menggunakan rumus serupa. Dengan asumsi massa pasir sebesar 10 kg, kalor jenis pasir silika sebesar $830 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, dan perubahan suhu dari 30°C ke 300°C , maka energi panas yang dapat disimpan mencapai $\pm 2.247.000$ Joule [8]. Hal ini menunjukkan bahwa pasir memiliki kapasitas yang cukup besar untuk menyimpan panas dan memanaskan air dalam jumlah tertentu, menjadikannya media penyimpanan yang efektif untuk sistem berbasis energi surya.

Energi listrik yang diperoleh dari panel surya 400 Wp dihitung dengan memperhitungkan efisiensi sistem (termasuk MPPT, kabel, dan elemen pemanas), menggunakan rumus:

$$E = P \cdot t \cdot \eta$$

Dengan asumsi efisiensi total sistem sebesar 0,75 dan durasi penyinaran efektif 5 jam per hari, maka energi listrik harian yang dapat dihasilkan adalah sekitar 5.400.000 Joule. Energi ini cukup untuk memanaskan pasir hingga suhu tinggi dalam waktu tertentu. Efisiensi transfer panas dari pasir ke air juga menjadi parameter penting dan dihitung dengan membandingkan energi yang diserap oleh air terhadap energi yang disimpan dalam pasir. Nilai efisiensi ini menentukan kinerja sistem secara keseluruhan.

2.2.2 Panel Surya

Panel surya adalah perangkat yang berfungsi untuk menangkap dan mengubah energi matahari menjadi energi lain, seperti listrik atau panas, melalui proses fotovoltaiik atau termal. Panel surya fotovoltaiik (PV) bekerja dengan prinsip efek fotovoltaiik, di mana sel surya yang terbuat dari bahan semikonduktor, seperti silikon monokristalin atau polokristalin, menyerap sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik dalam bentuk arus searah (DC). Panel ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari sistem tenaga surya rumah tangga, pembangkit listrik skala besar, hingga sistem pemanas dan penyimpanan energi terbarukan. Keunggulan utama panel surya adalah sifatnya yang ramah lingkungan, memiliki sumber energi yang melimpah, [2] serta dapat beroperasi dalam jangka panjang dengan perawatan yang minimal.

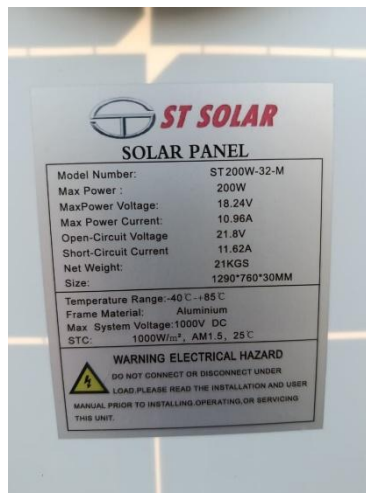
Panel fotovoltaiik 200Wp (Watt-peak) dipilih karena kapasitas yang cukup mendukung sistem pemanas air berbasis baterai pasir dalam skala kecil hingga menengah. Panel ini memiliki daya output maksimal 100 watt per jam dalam kondisi ideal, sehingga dapat digunakan untuk mengisi baterai yang akan menyuplai energi bagi elemen pemanas (heater). Pemilihan panel ini didasarkan pada efisiensi dan kemudahan integrasi dengan sistem yang menggunakan tegangan 40V DC, serta ukurannya yang tidak terlalu besar, sehingga lebih fleksibel dalam pemasangan. Fungsi utama panel fotovoltaiik dalam sistem ini adalah untuk mengubah energi matahari menjadi listrik yang dapat digunakan secara langsung untuk mengoperasikan elemen pemanas atau disimpan dalam baterai untuk digunakan saat sinar matahari tidak tersedia, memastikan sistem pemanas air tetap beroperasi secara optimal.



Gambar 2. 1 Panel Surya

Dalam tugas akhir ini digunakan dua buah panel surya berkapasitas masing-masing 200Wp yang disusun seri menjadi 400Wp, sehingga menghasilkan tegangan sekitar 36–40V DC dan arus maksimum sekitar 10–11A. Tegangan ini digunakan langsung untuk mengoperasikan pemanas listrik (heater) tanpa melalui inverter maupun baterai.

2.2.1.2 Spesifikasi Panel Surya



Gambar 2. 2 Spesifikasi panel surya

Panel surya yang digunakan dalam sistem ini merupakan tipe ST200W-32-M dari merek ST Solar, dengan daya maksimal sebesar 200 Watt. Panel ini dirancang untuk menghasilkan listrik dari sinar matahari dan digunakan sebagai sumber energi utama dalam sistem pemanas air berbasis baterai pasir.

Dalam kondisi Standar Uji (STC) yaitu intensitas cahaya 1000 W/m^2 , suhu 25°C , dan spektrum cahaya AM1.5, panel ini menghasilkan tegangan maksimum (V_{mp}) sebesar 18,24 Volt dan arus maksimum (I_{mp}) sebesar 10,96 Ampere. Artinya, pada titik daya maksimum (Maximum Power Point), panel ini mampu menghasilkan daya listrik sebesar:

$$P = V_{mp} \times I_{mp} = 18,24V \times 10,96 A = 200W$$

Selain itu, tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}) dari panel ini adalah 21,8 Volt, yang menunjukkan tegangan maksimum saat panel tidak dibebani. Sedangkan arus hubung singkat (I_{sc}) tercatat sebesar 11,62 Ampere, menunjukkan [3] arus maksimum yang dapat dicapai saat kedua terminal panel dihubungkan secara langsung (tanpa beban).

Panel ini memiliki dimensi $1290 \times 760 \times 30 \text{ mm}$ dengan berat 21 kilogram, dan menggunakan rangka aluminium yang tahan terhadap korosi serta mendukung kekuatan mekanis dalam berbagai kondisi cuaca. Panel ini juga memiliki rentang suhu operasional yang sangat luas, yaitu dari -40°C hingga $+85^\circ\text{C}$, sehingga mampu bekerja pada berbagai kondisi lingkungan [3].

Panel ini dirancang untuk digunakan pada sistem dengan tegangan maksimum hingga 1000 Volt DC, menjadikannya kompatibel untuk instalasi skala menengah hingga besar, baik secara paralel maupun seri, tergantung dari konfigurasi sistem dan kebutuhan beban. [7]

Secara keseluruhan, panel surya ini cocok untuk diaplikasikan dalam sistem pemanas air berbasis energi terbarukan, terutama pada sistem tanpa baterai, yang langsung memanfaatkan energi matahari untuk memanaskan elemen pemanas dan menyimpan panas dalam media pasir sebagai thermal battery [4].

2.2.3 Wattmeter

Dalam sistem pemanas pasir yang dirancang tanpa menggunakan baterai maupun MPPT (Maximum Power Point Tracker), pemantauan dan pencatatan konsumsi daya menjadi sangat penting untuk mengevaluasi kinerja sistem secara menyeluruh. Oleh karena itu, salah satu komponen penting yang digunakan dalam sistem ini adalah wattmeter.

Wattmeter digunakan untuk mengukur daya listrik yang secara langsung disuplai dari panel surya ke elemen pemanas (heater) [5]. Alat ini bekerja dengan mengukur besarnya tegangan (Volt) dan arus (Ampere) secara real time, kemudian mengalikan keduanya untuk mendapatkan nilai daya dalam satuan Watt.

Tujuan utama pemasangan wattmeter pada sistem ini adalah untuk mengetahui berapa besar daya aktual yang digunakan oleh heater dalam berbagai kondisi penyinaran matahari. Mengingat bahwa sistem ini tidak memiliki media penyimpanan energi, maka fluktuasi daya dari panel surya akan langsung memengaruhi performa pemanas pasir. Dengan adanya wattmeter, data daya listrik yang digunakan dapat dicatat dan dianalisis, sehingga diketahui bagaimana respons sistem terhadap variasi intensitas cahaya matahari sepanjang hari.

Selain itu, penggunaan wattmeter juga sangat berguna dalam mengevaluasi efisiensi sistem. Dengan membandingkan output daya dari panel surya dan daya yang diterima oleh heater, dapat dianalisis seberapa besar kehilangan daya yang terjadi akibat resistansi kabel, sambungan, atau karakteristik heater itu sendiri. Hal ini menjadi penting terutama dalam sistem DC langsung yang tidak memiliki kontrol elektronik seperti MPPT, karena kinerja [2] sistem sangat dipengaruhi oleh kesesuaian beban terhadap karakteristik panel.

Secara keseluruhan, fungsi wattmeter dalam sistem ini dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Memantau konsumsi daya heater secara langsung.
2. Menganalisis efisiensi transfer energi dari panel ke beban pemanas.
3. Mendeteksi kondisi kerja heater, apakah berada pada rentang daya yang aman atau melebihi batas.
4. Merekam variasi performa sistem akibat perubahan kondisi cuaca.
5. Menyediakan data kuantitatif yang dapat digunakan dalam proses analisis kinerja sistem untuk kepentingan laporan tugas akhir.

Dengan memasukkan data dari wattmeter ke dalam tabel dan grafik, mahasiswa dapat menunjukkan performa aktual sistem, serta melakukan pengujian lanjutan seperti durasi pemanasan pasir, pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap suhu pasir, hingga waktu

pemanasan yang optimal. Oleh karena itu, wattmeter merupakan alat yang esensial dalam proses perancangan, pengujian, dan analisis sistem pemanas pasir berbasis panel surya ini.



Gambar 2. 3 Wattmeter DC

2.2.3 Circuit Breaker DC

DC *Circuit Breaker* (DC MCB) 10 A digunakan sebagai perangkat proteksi utama pada sisi keluaran panel surya menuju beban pemanas (*heater*) dalam sistem penyimpanan energi termal berbasis baterai pasir. Komponen ini berfungsi untuk melindungi rangkaian listrik dari gangguan arus lebih (*overcurrent*) maupun hubung singkat (*short circuit*) yang dapat terjadi akibat kerusakan komponen, kesalahan instalasi, ataupun kondisi operasi yang tidak normal. Dengan adanya DC Circuit Breaker, aliran arus listrik dapat diputus secara otomatis ketika arus yang mengalir melebihi kapasitas nominal sebesar 10 A sehingga kerusakan pada panel surya, kabel, heater, maupun komponen lainnya dapat diminimalkan.

Pemilihan kapasitas **10 A** didasarkan pada karakteristik sistem yang menggunakan panel surya berkapasitas **400 Wp** dengan tegangan kerja sekitar **25–40 VDC**. Berdasarkan hasil pengujian, arus maksimum yang mengalir pada sistem berada pada kisaran **9 A**, sehingga penggunaan DC Circuit Breaker 10 A masih berada dalam batas operasi normal namun tetap memberikan margin proteksi yang memadai apabila terjadi lonjakan arus. Pemilihan kapasitas proteksi yang terlalu kecil berpotensi menyebabkan pemutus bekerja (*trip*) pada kondisi operasi normal, sedangkan kapasitas yang terlalu besar dapat mengurangi efektivitas sistem proteksi terhadap gangguan.

Selain sebagai perangkat pengaman, DC Circuit Breaker juga berfungsi sebagai **sakelar isolasi (isolator)** yang memungkinkan proses pemeliharaan (*maintenance*), inspeksi, maupun penggantian komponen dilakukan dengan aman tanpa harus melepas sambungan kabel secara langsung. Pada saat proses pengujian atau perawatan sistem, operator dapat memutus suplai listrik dari panel surya dengan mengubah posisi tuas DC Circuit Breaker ke kondisi **OFF**, sehingga seluruh rangkaian berada dalam kondisi bebas tegangan (*de-energized*). Hal ini meningkatkan aspek keselamatan kerja (*electrical safety*) sekaligus mempermudah proses pengoperasian sistem. Penggunaan DC Circuit Breaker pada sistem arus searah memiliki peranan yang sangat penting karena karakteristik pemutusan arus DC berbeda dengan sistem AC. Pada rangkaian DC, tidak terdapat titik **zero crossing** sehingga busur listrik (*electric arc*) yang terbentuk saat proses pemutusan cenderung lebih sulit dipadamkan. Oleh karena itu, digunakan DC Circuit Breaker yang memang dirancang khusus untuk aplikasi arus searah dengan kemampuan pemadaman busur listrik yang lebih baik dibandingkan pemutus arus AC. Dengan demikian, keberadaan DC Circuit Breaker 10 A tidak hanya meningkatkan keandalan sistem penyimpanan energi termal, tetapi juga menjamin aspek keselamatan operasi selama proses pengisian energi (*charging*), penyimpanan panas, maupun pengujian sistem berlangsung.



Gambar 1 Circuit Breaker DC

2.2.3 Elemen Pemanas

Elemen panas (heater) adalah perangkat yang berfungsi untuk mengubah energy listrik menjadi energy panas melalui prinsip resistansi listrik. Ketika arus listrik mengalir melalui elemen pemanas, resistansi material di dalamnya akan mengubah energy listrik menjadi panas yang kemudian dapat digunakan untuk berbagai keperluan, seperti pemanasan udara, pemanas air, atau penyimpanan energi termal. Heater umumnya terbuat dari bahan dengan resistansi tinggi seperti kawat nichrome, keramik, atau karbon, yang dapat menghasilkan panas secara efisien dan tahan

terhadap suhu tinggi. Dalam sistem pemanas berbasis baterai pasir, heater digunakan untuk mentransfer energy panas ke pasir agar dapat disimpan dan digunakan sesuai kebutuhan [5].

Heater 40 volt DC 300 W dipilih karena kompatibel dengan sistem tenaga surya yang umumnya menggunakan baterai bertegangan rendah, seperti 12V atau 40V. penggunaan heater dengan tegangan 40V lebih aman dan efisien untuk aplikasi skala kecil hingga menengah, karena tidak memerlukan inverter tambahan untuk mengubah tegangan DC ke AC, sehingga mengurangi kehilangan daya dalam proses konversi. Selain itu, heater 40V DC dapat bekerja langsung dengan baterai yang diisi dari panel surya, memungkinkan sistem bekerja lebih stabil dan hemat energy. Fungsinya dalam sistem ini adalah untuk mengonversi energy listrik dari baterai ke energy panas secara langsung, yang kemudian digunakan untuk memanaskan baterai pasir sebagai media penyimpanan energy termal untuk sistem pemanas air.



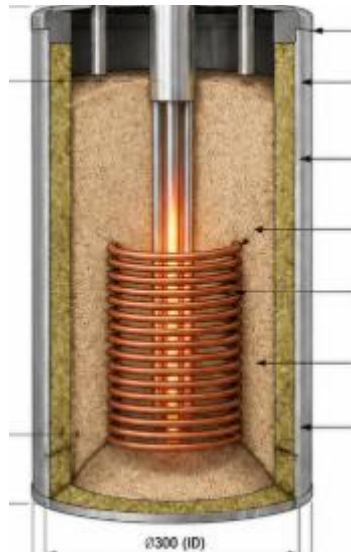
Gambar 2. 4 Elemen Pemanas DC

2.2.4 Baterai Pasir

Baterai pasir adalah sistem penyimpanan energi termal yang menggunakan pasir sebagai media untuk menyimpan dan melepaskan panas. Pasir dipilih sebagai material penyimpanan panas karena memiliki kapasitas panas yang spesifik yang tinggi, ketersediaan yang melimpah, serta biaya yang relative rendah dibandingkan dengan media penyimpanan lainnya. Prinsip kerja baterai

pasir didasarkan pada kemampuan pasir untuk menyerap panas dari sumber energy, seperti elemen pemanas listrik atau kolektor surya termal, dan mempertahankan suhu tinggi dalam jangka waktu yang lama. Panas yang tersimpan dalam pasir dapat digunakan kembali untuk berbagai aplikasi, seperti pemanas udara, pembangkit listrik tenaga panas, atau pemanas industri.

Fungsi utama baterai pasir ini dalam sistem ini adalah sebagai media penyimpanan energi panas yang efisien dan tahan lama. Energy panas dari panel surya atau elemen pemanas diserap oleh pasir dan dapat dilepaskan kembali saat dibutuhkan untuk memanaskan air. Dengan teknologi ini, energy yang dihasilkan dari sumber terbarukan dapat dimanfaatkan lebih optimal, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, serta meningkatkan efisiensi dalam sistem pemanas berbasis tenaga surya.



Gambar 2. 5 Ilustrasi baterai pasir

2.2.5 Pompa Sirkulasi

Pompa adalah sebuah perangkat mekanik yang berfungsi untuk mengalirkan fluida (baik cair maupun gas) dari satu tempat ke tempat lain dengan cara memberikan tekanan atau energi kinetik pada fluida tersebut. Dalam konteks sistem pemanas air berbasis baterai pasir, pompa berperan penting untuk mensirkulasikan air melalui sistem penukar panas (heat exchanger), sehingga panas yang tersimpan di dalam media pasir dapat ditransfer secara efisien ke air yang dialirkan menuju tangki penyimpanan.

Pompa yang digunakan dalam sistem ini umumnya termasuk dalam kategori pompa sirkulasi air panas, yang dirancang khusus untuk tahan terhadap suhu tinggi dan bekerja secara kontinu

dalam sistem tertutup. Kinerja pompa sangat menentukan efisiensi perpindahan panas, kestabilan tekanan, dan distribusi air panas ke seluruh sistem.



Gambar 2. 6 Pompa DC 5V

2.2.6 Power Supply 5V

Power supply untuk pompa sirkulasi pada pemanas air untuk baterai pasir adalah sistem penyedia energi listrik yang digunakan untuk mengoperasikan pompa yang mengalirkan air melalui sistem pemanas. Pompa sirkulasi ini berfungsi untuk memastikan aliran air yang kontinu melalui komponen pemanas air, yang memungkinkan air untuk dipanaskan oleh baterai pasir dan kemudian didistribusikan ke tempat yang dibutuhkan (seperti pipa atau sistem pemanas air lainnya).

Berikut adalah komponen utama dari power supply ini:

1. Sumber Energi: Power supply dapat berupa listrik dari jaringan utama, energi terbarukan (misalnya, panel surya), atau bahkan generator cadangan. Pilihan sumber energi tergantung pada kebutuhan sistem dan sumber daya yang tersedia.
2. Kontrol Daya: Sistem kontrol daya diperlukan untuk mengatur besaran daya yang diteruskan ke pompa agar aliran air tetap stabil dan efisien. Kontrol ini juga memastikan pompa beroperasi pada tingkat efisiensi terbaik dan dapat berfungsi dalam rentang suhu yang ditentukan oleh sistem pemanas.
3. Konverter Daya: Jika menggunakan sumber energi yang berbeda, seperti panel surya atau baterai, konverter daya (misalnya inverter) digunakan untuk mengubah energi DC (arus

searah) menjadi AC (arus bolak-balik) yang diperlukan oleh pompa, atau untuk menyesuaikan tegangan dan arus yang dibutuhkan pompa.

4. Distribusi Daya: Setelah sumber daya dan kontrol daya terhubung, distribusi daya diteruskan ke pompa untuk menggerakkan motor pompa dan memastikan aliran air yang lancar melalui sistem pemanas berbasis baterai pasir.
5. Secara keseluruhan, power supply untuk pompa sirkulasi ini sangat penting untuk menjaga operasi sistem pemanas air berbasis baterai pasir, memastikan bahwa air mengalir dengan lancar dan dipanaskan dengan efisien.



Gambar 2. 7 Power Supply

2.2.7 Sistem Pemanas Air

Sistem pemanas air dirancang untuk memenuhi berbagai kebutuhan, seperti mandi, mencuci, atau pemanasan ruangan. Ada berbagai jenis sistem pemanas air yang umum digunakan, di antaranya pemanas air tenaga listrik yang menggunakan elemen pemanas untuk menghasilkan panas. Meskipun mudah digunakan, pemanas listrik bisa menambah biaya listrik yang cukup tinggi. Pemanas air tenaga gas, yang menggunakan gas alam atau LPG, lebih efisien dan dapat memanaskan air dengan lebih cepat, namun membutuhkan instalasi sistem pipa gas yang tepat. Pemanas air tenaga surya memanfaatkan energi matahari, yang ramah lingkungan dan dapat mengurangi biaya energi, tetapi efektivitasnya tergantung pada cuaca.

Pemanas air heat pump bekerja dengan memindahkan panas dari air atau tanah ke dalam air, menawarkan efisiensi energi yang sangat baik meskipun memiliki biaya instalasi awal yang tinggi. Di sisi lain, pemanas air instant atau tankless memanaskan air langsung tanpa menggunakan tangki penyimpanan, menjadikannya lebih efisien dalam penggunaan energi, terutama karena hanya memanaskan air saat dibutuhkan. Namun, pemanas jenis ini bisa kesulitan memenuhi kebutuhan

air panas secara bersamaan di beberapa titik. Sementara itu, sistem pemanas air terpusat menggunakan satu unit pemanas untuk melayani banyak titik penggunaan dalam gedung besar atau kompleks perumahan.

Pemilihan sistem pemanas air yang tepat sangat bergantung pada berbagai faktor, seperti kebutuhan energi, efisiensi, dan biaya operasional. Setiap jenis sistem memiliki kelebihan dan kekurangan yang perlu dipertimbangkan. Misalnya, meskipun pemanas air tenaga surya ramah lingkungan, ia bergantung pada cuaca, sementara pemanas gas lebih cepat namun memerlukan instalasi pipa gas. Pemilihan sistem yang sesuai dengan kebutuhan pengguna akan memastikan efisiensi energi yang optimal [7].

2.2.8 Rockwool

Rockwool adalah material isolasi termal yang terbuat dari serat batu vulkanik (biasanya basalt) yang dilelehkan pada suhu tinggi lalu dipintal menjadi serat-serat halus. Bahan ini memiliki sifat tahan panas yang sangat baik dan digunakan secara luas dalam aplikasi industri, konstruksi bangunan, hingga proyek termal seperti sistem penyimpanan energi panas. Rockwool mampu menahan suhu hingga lebih dari 600 °C, menjadikannya pilihan yang ideal untuk melindungi komponen yang menghasilkan atau menyimpan panas dalam jangka waktu lama, seperti wadah baterai pasir.

Dalam konteks penelitian ini, rockwool digunakan sebagai lapisan isolasi termal pada wadah penyimpanan pasir. Fungsinya adalah untuk meminimalkan kehilangan panas dari dalam wadah ke lingkungan luar, sehingga panas yang dihasilkan oleh elemen pemanas dapat disimpan secara efisien dalam media pasir. Penggunaan rockwool juga memberikan perlindungan terhadap risiko kontak langsung dengan permukaan panas dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Keunggulan lain dari rockwool adalah ketahanannya terhadap api, daya serap air yang rendah, serta sifatnya yang tidak mudah terurai, sehingga sangat cocok digunakan dalam sistem penyimpanan panas berbasis energi terbarukan [8].



Gambar 2. 8 Rockwool

2.2.9 Pipa Tembaga

Pipa tembaga adalah pipa berbahan dasar logam tembaga murni yang dikenal memiliki konduktivitas termal dan listrik yang sangat baik. Tembaga juga tahan terhadap korosi dan tekanan tinggi, sehingga menjadi salah satu material paling andal untuk sistem perpipaan dalam berbagai aplikasi. Karena sifatnya yang tidak mudah bereaksi secara kimiawi dan tahan lama, pipa tembaga banyak digunakan dalam instalasi pemanas air, sistem pendingin, serta peralatan industri yang membutuhkan kestabilan suhu dan keandalan material.

Dalam konteks sistem pemanas air berbasis baterai pasir, pipa tembaga berfungsi sebagai komponen utama heat exchanger. Pipa dibentuk spiral atau melingkar dan ditanam dalam media pasir panas, sehingga air yang mengalir di dalamnya dapat menyerap panas secara langsung dari pasir. Dengan konduktivitas termal yang tinggi, pipa tembaga memungkinkan transfer panas yang cepat dan merata ke air, sehingga efisiensi pemanasan dapat meningkat secara signifikan. Proses ini memungkinkan sistem bekerja secara pasif tanpa memerlukan energi tambahan untuk memindahkan panas.

Selain efisiensi termal, pipa tembaga juga memiliki fleksibilitas yang tinggi dalam proses pembentukan dan instalasi. Material ini mudah ditebuk dan disesuaikan dengan bentuk wadah atau sistem yang digunakan, sehingga dapat diatur untuk meningkatkan waktu kontak air dengan sumber panas. Ketahanan terhadap suhu tinggi dan sifat anti-mikroba alami dari tembaga juga memberikan keunggulan tambahan dalam menjaga kualitas air serta mencegah pertumbuhan bakteri di dalam sistem. Oleh karena itu, penggunaan pipa tembaga menjadi pilihan yang tepat dan strategis dalam desain sistem pemanas berbasis energi terbarukan [3].



Gambar 2. 9 Pipa Tembaga

2.2.10 Pasir Silika

Pasir silika adalah material granular yang tersusun terutama dari mineral silika (SiO_2) dalam bentuk kuarsa [6]. Pasir ini dikenal memiliki titik leleh yang tinggi, konduktivitas termal yang cukup baik, serta kestabilan kimia yang tinggi, menjadikannya sangat ideal untuk berbagai aplikasi industri dan teknologi. Pasir silika juga memiliki sifat tahan panas dan tahan terhadap degradasi termal, sehingga sering digunakan dalam industri pengecoran logam, pembuatan kaca, serta sebagai media filtrasi dan bahan penyimpanan energi panas.

Table 2.3 Tabel kapasitas panas spesifik macam-macam pasir

Jenis Pasir	Kondisi	Konduktivitas Termal $k(\text{W/m}\cdot\text{K})$
Pasir silika (Quartz sand)	Kering	0,15 – 0,25
Pasir silika	Lembab	0,25-2,0
Pasir alam	Kering	0,20-0,35
Pasir bangunan biasa	Kering	0,25-0.33
Pasir Padat dan Basah	Basah dan terpadatkan	1.5-2,5
Pasir Lempung	Dipadatkan	0,40-0.60
Pasi Padat dan basah	Campuran batu/serpih	0.30-0,45
Pasir Silika (dipadatkan)	Campuran batu/serpih	0,22-0,28
Pasir Halus	Kering	022-0,28
Pasir Kasar	Kering	0,27-0,35

Pasir dengan kandungan air	Kadar air 10-20%	0,4-1,0
----------------------------	------------------	---------

Dalam penelitian ini, pasir silika kering digunakan sebagai media penyimpan panas dalam sistem baterai pasir yang dipanaskan oleh elemen pemanas bertenaga surya. Ketika dipanaskan hingga suhu tinggi, pasir silika mampu menyimpan energi termal dalam jumlah besar dan melepaskannya secara bertahap ke media lain seperti air melalui pipa heat exchanger. Keunggulan pasir silika dalam menyimpan panas secara stabil dalam waktu lama membuatnya sangat cocok untuk aplikasi pemanas air berbasis energi terbarukan. Selain itu, ketersediaannya yang melimpah dan harga yang relatif terjangkau menjadi nilai tambah dalam perancangan sistem penyimpanan energi termal skala kecil maupun besar [7].



Gambar 2. 10 Pasir Silika

2.2.11 Termometer

Termometer adalah alat ukur yang digunakan untuk mengetahui suhu suatu benda, zat, atau lingkungan. Prinsip kerja termometer bergantung pada perubahan sifat fisik suatu bahan akibat perubahan suhu, seperti pemuaian cairan, perubahan resistansi, atau perubahan tekanan gas. Jenis-jenis termometer yang umum digunakan meliputi termometer air raksa, alkohol, bimetal, inframerah, dan termometer digital. Setiap jenis memiliki karakteristik dan keunggulan masing-masing tergantung pada aplikasi dan tingkat akurasi yang dibutuhkan.

Dalam konteks sistem pemanas air berbasis baterai pasir, termometer berfungsi sebagai alat bantu untuk memverifikasi suhu pasir dan air secara langsung, baik saat pengujian laboratorium maupun dalam penggunaan lapangan. Termometer digital sering dipilih karena kemudahan pembacaan, kecepatan respon, dan akurasi yang memadai. Dengan menggunakan termometer, peneliti dapat mencatat suhu aktual secara berkala untuk kemudian dianalisis dalam rangka mengevaluasi efisiensi pemanasan, kestabilan suhu penyimpanan panas, serta performa keseluruhan sistem energi termal berbasis panel surya [10].



Gambar 2. 11 Termometer

2.213 Komponen Thermal Storage

Komponen Thermal Energy Storage (TES) dalam sistem pemanas air bertenaga surya terdiri dari beberapa bagian utama yang saling mendukung untuk menyimpan dan mendistribusikan energi panas secara efisien. Komponen inti dari TES adalah wadah penyimpanan panas yang diisi dengan pasir silika sebagai media penyimpan panas. Pasir silika dipilih karena memiliki kapasitas panas spesifik yang cukup baik dan stabil pada suhu tinggi [9]. Wadah ini biasanya dibuat dari bahan tahan panas seperti baja atau drum logam yang dilapisi isolator termal (seperti rockwool) guna meminimalkan kehilangan panas ke lingkungan.

Di dalam wadah tersebut terdapat elemen pemanas (heater), seperti cartridge heater DC, yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi panas dan memanaskan pasir di sekitarnya. Untuk memanfaatkan panas yang tersimpan, digunakan pipa tembaga spiral sebagai heat exchanger, di mana air mengalir melewati pipa dan menerima panas dari pasir panas secara konduktif. Seluruh sistem ini dirancang agar mampu mempertahankan suhu tinggi selama beberapa jam, bahkan

setelah sumber pemanas dimatikan, sehingga tetap dapat memanaskan air dengan efisien melalui proses penyaluran panas secara berkelanjutan [5].

2.2.10 Heat Exchanger

Heat exchanger merupakan komponen penting dalam sistem pemanas air yang berfungsi untuk mentransfer panas dari media penyimpan (pasir silika) ke air yang mengalir di dalam pipa. Dalam perancangan ini, digunakan pipa tembaga berbentuk spiral yang tertanam di dalam media pasir. Pipa tembaga dipilih karena memiliki konduktivitas termal yang tinggi, sehingga sangat efisien dalam menyerap dan menghantarkan panas dari pasir ke air. Konsep kerja heat exchanger ini memanfaatkan prinsip konduksi dan konveksi untuk memaksimalkan pemanasan air saat melewati pipa.

Desain spiral pada pipa tembaga bertujuan untuk memperpanjang lintasan aliran air di dalam media panas, sehingga waktu kontak antara air dan permukaan panas menjadi lebih lama. Hal ini akan meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan memungkinkan air mencapai suhu yang diinginkan dalam waktu yang relatif singkat. Selain itu, bentuk spiral juga mempermudah pemasangan pipa dalam ruang terbatas dan menjaga distribusi panas tetap merata di seluruh bagian pipa selama proses pemanasan berlangsung. Heat exchanger dalam sistem ini menjadi kunci utama dalam proses transfer energi panas dari penyimpan (pasir silika) ke fluida (air) [11].



Gambar 2. 12 Ilustrasi Pipa Tembaga

2.2..11 Hukum Ohm

Hukum Ohm merupakan salah satu hukum dasar dalam kelistrikan yang menyatakan bahwa arus listrik (I) yang mengalir melalui suatu penghantar sebanding dengan tegangan (V) dan berbanding terbalik dengan hambatan (R). Rumusnya dinyatakan sebagai:

$$V = I \times R$$

Dalam konteks sistem pemanas berbasis panel surya ini, Hukum Ohm digunakan untuk menganalisis perilaku arus dan tegangan saat heater disambungkan ke panel surya secara langsung.

Pada eksperimen, panel surya yang digunakan memiliki tegangan open circuit sekitar 40 volt dengan daya maksimum 400 Wp. Heater yang digunakan adalah resistif DC 500 watt, dengan resistansi terukur sebesar 3,3 ohm. Saat panel disambungkan ke heater, terjadi penurunan tegangan (drop voltage) dari 40V menjadi sekitar 25V, dan arus yang terukur mencapai sekitar 8,5 ampere. Jika diterapkan Hukum Ohm untuk kondisi ini:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{25V}{3.3\Omega} = 7,58A$$

Dalam konteks sistem pemanas berbasis panel surya ini, Hukum Ohm digunakan untuk menganalisis perilaku arus dan tegangan saat heater disambungkan ke panel surya secara langsung.

Pada eksperimen, panel surya yang digunakan memiliki tegangan open circuit sekitar 40 volt dengan daya maksimum 400 Wp. Heater yang digunakan adalah resistif DC 500 watt, dengan resistansi terukur sebesar 3,3 ohm. Saat panel disambungkan ke heater, terjadi penurunan tegangan (drop voltage) dari 40V menjadi sekitar 25V, dan arus yang terukur mencapai sekitar 8,5 ampere. Jika diterapkan Hukum Ohm untuk kondisi ini:

$$P = V \times I = 25V \times 8.5A = 212,5Watt$$

Perhitungan ini menunjukkan bahwa meskipun heater berkapasitas 500W, daya aktual yang digunakan bergantung pada tegangan keluaran panel dan resistansi heater, sesuai prinsip dasar Hukum Ohm.

Fenomena tegangan drop saat arus mengalir juga selaras dengan hukum ini. Ketika heater dihubungkan, arus mulai mengalir dan menyebabkan beban menyesuaikan titik kerja panel surya di daerah tegangan rendah – arus tinggi, yang merupakan konsekuensi alami dari sistem resistif DC tanpa pengatur daya seperti MPPT.

2.2.12 Hukum Termodinamika

Dalam perancangan sistem pemanas air tenaga surya dengan media penyimpan panas berupa pasir silika, prinsip termodinamika menjadi dasar utama dalam proses transfer dan konversi energi. Sistem ini memanfaatkan energi radiasi matahari yang dikonversi menjadi energi listrik oleh panel surya, lalu diubah menjadi energi panas oleh elemen pemanas, dan disimpan dalam bentuk panas laten dan sensibel oleh media pasir. Proses ini melibatkan penerapan Hukum Termodinamika Pertama dan Kedua [5].

Hukum Termodinamika I (Hukum Kekekalan Energi)

Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, hanya bisa diubah dari satu bentuk ke bentuk lain. Dalam konteks ini, energi listrik dari panel surya dikonversi oleh elemen pemanas menjadi energi panas yang disimpan dalam pasir. Energi panas tersebut kemudian dialirkan melalui pipa tembaga (heat exchanger) untuk memanaskan air. Secara matematis [6]:

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

- Q = energi panel (joule)
- m = massa pasir (kg)
- c = kalor jenis pasir ($J/kg^{\circ}C$)
- ΔT = perubahan suhu pasir ($^{\circ}C$)

Prinsip ini digunakan untuk menghitung kebutuhan energi yang diperlukan untuk menaikkan suhu pasir hingga suhu target (misalnya $300^{\circ}C$) serta untuk menentukan seberapa banyak energi panas dapat disimpan dan digunakan kembali untuk memanaskan air.

Hukum Termodinamika II (Irreversibilitas dan Efisiensi)

Hukum ini menyatakan bahwa dalam setiap proses energi, selalu terjadi kehilangan energi dalam bentuk entropi (panas tak berguna). Artinya, tidak semua energi listrik dari panel dapat dikonversi menjadi panas yang berguna — sebagian hilang melalui konduksi, konveksi, dan radiasi, terutama jika isolasi wadah penyimpan tidak optimal. Oleh karena itu, efisiensi termal sistem ini sangat dipengaruhi oleh kualitas insulasi (misalnya penggunaan rockwool) dan desain heat exchanger agar transfer panas ke air bisa maksimal [12].

2.2.13 Hukum Joule

Pemanas listrik tipe resistif bekerja berdasarkan Hukum Joule, yang menyatakan bahwa panas (Q) yang dihasilkan oleh suatu konduktor ketika dialiri arus listrik adalah:

$$Q = I^2 \times R \times T, \text{ atau dalam bentuk daya: } P = \frac{V^2}{R}$$

Dalam sistem ini digunakan heater DC dengan berdaya 500W dengan resistansinya 3,3 Ohm. Tegangan dari panel yang mencapai sekitar 36-40V menghasilkan daya pemanasan 390-400W nilai ini cukup untuk memanaskan pasir dan menyimpan panas secara bertahap [7].