

Efektivitas Penambahan Aditif Pasir Silika pada Paraffin Wax untuk Media Penyimpan Panas Water Heater

Putu Riska Resita Dewi^{1*}, Diana Alia², Dirhamsyah Dirhamsyah³, Henna Nurdiansari⁴, Femmy Asdiana⁵

¹⁻⁵ Diploma IV Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal, Politeknik Pelayaran Surabaya

Email: ptriska64@gmail.com, diana.alia@poltekpel-sby.ac.id, dirhamsyah1515@gmail.com,
henna.nurdiansari@poltekpel-sby.ac.id, femmy.asdiana@poltekpel-sby.ac.id

Korespondensi penulis: ptriska64@gmail.com*

Abstract. *This research develops an automated temperature control system for water heaters, that is both efficient and stable, driven by the need for energy-saving heating solutions, particularly for marine applications. The main objective was to create an automatic system capable of maintaining water temperature within an optimal range while maximizing energy efficiency through the use of thermal storage materials. The methodology involved an on-off control system based on a microcontroller as the main controller, capable of processing temperature sensor data in real time. This system intelligently activates and deactivates the heater to keep the water temperature stable. Paraffin wax was used as a latent heat storage medium, playing a crucial role in gradually storing and releasing thermal energy to support temperature stability. An automatic water heater system based on the ESP32 microcontroller with an on-off control mechanism was successfully designed using paraffin wax combined with silica sand as a thermal storage medium. The addition of silica sand significantly enhanced heat conductivity and temperature stability. Test results showed a substantial reduction in energy consumption, with daily savings reaching Rp12,762.88, equivalent to 67% of total daily energy costs. Over a one-year period, the total savings amounted to Rp4,658,103.20, demonstrating that the paraffin wax-silica sand combination is highly effective in improving energy efficiency and reducing long-term operational costs.*

Keywords: *Automation System, Temperature Control, Water Heater, Paraffin Wax, Heat Storage, On-off Control, Microcontroller, Energy Efficiency, Maritime Industry.*

Abstrak. Penelitian ini mengembangkan sistem otomasi pengaturan suhu *water heater* yang efisien dan stabil, didasari kebutuhan solusi pemanas air hemat energi, khususnya untuk aplikasi di kapal. Tujuan utamanya adalah menciptakan sistem otomatis yang mampu menjaga suhu air dalam rentang optimal, sekaligus memaksimalkan efisiensi energi melalui material penyimpan panas. Metodologi yang digunakan adalah kontrol *on-off* berbasis mikrokontroler sebagai pengendali utama, yang dapat memproses data dari sensor suhu secara *real-time*. Sistem ini mengaktifkan/menonaktifkan pemanas secara cerdas untuk menjaga suhu air tetap optimal. *Paraffin wax* digunakan sebagai media penyimpanan panas laten, berperan krusial dalam menyimpan dan melepaskan energi termal secara bertahap untuk stabilisasi suhu. Sistem pemanas air otomatis berbasis mikrokontroler ESP32 dengan kontrol *on-off* telah berhasil dirancang menggunakan media penyimpan panas *paraffin wax* dan aditif pasir silika. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan pasir silika meningkatkan efisiensi penyimpanan panas dan kestabilan suhu. Sistem ini mampu menurunkan konsumsi energi secara signifikan, dengan penghematan mencapai Rp12.762,88 per hari atau setara dengan 67% dari total konsumsi energi harian. Jika dihitung dalam jangka waktu satu tahun, total penghematan mencapai Rp4.658.103 membuktikan bahwa kombinasi *paraffin wax* dan pasir silika sangat efektif untuk efisiensi energi dan penghematan biaya operasional jangka panjang.

Kata Kunci: Sistem Otomasi, Pengaturan Suhu, *Water Heater*, *Paraffin Wax*, Penyimpanan Panas, Kontrol *On-off*, Mikrokontroler, Efisiensi Energi, dan Industri Maritim.

1. PENDAHULUAN

Heater adalah salah satu teknologi yang banyak dikembangkan karena *heater* tidak menggunakan api untuk memanaskan benda melainkan dengan menginduksi yang didapat dari arus listrik bolak-balik mengalir melalui koil yang terbuat dari tembaga (Mukhlis dkk).

Water heater di kapal adalah sistem yang dirancang untuk memanaskan air guna memenuhi

kebutuhan kru selama berlayar. Ketersediaan air panas sangat penting untuk berbagai aktivitas, termasuk mandi, memasak, dan keperluan sanitasi lainnya.

Arus listrik bolak-balik yang didapat akan menimbulkan medan elektromagnetik yang besarnya berubah-ubah. Karena kebutuhan daya yang cukup besar maka pemakaian listrik juga akan meningkat sehingga konsumsi dan biaya akan cukup besar dikeluarkan. Beberapa kajian dilakukan untuk pemanfaatan *Phase Change Material* (PCM) dari hidrat garam, parafin dan senyawa organik (Abhat, 1981). Parafin merupakan salah satu bahan penyimpan panas laten yang telah banyak diaplikasikan sebagai penyimpan panas. Selain memiliki kemampuan menyimpan panas laten yang besar, jenis parafin yang beragam menyebabkan ketersediaannya untuk dimanfaatkan pada rentang suhu yang dibutuhkan (Sharma dan Chen, 2009). Kelebihan lainnya dari parafin yaitu aman, terpercaya, sifat yang mampu diprediksi, tidak terlalu mahal, dan tidak korosif. Parafin tidak mudah bereaksi secara kimia dan stabil dibawah suhu 500 °C.

Sebagaimana diuraikan sebelumnya bahwa untuk meningkatkan sifat perpindahan kalor *Phase Change Material* (PCM) ialah dengan memberi campuran bahan aditif. Sifat bahan aditif yang baik ialah mempunyai konduktivitas termal yang tinggi dan mudah didapatkan. Salah satu material yang memenuhi kriteria tersebut ialah pasir silika. Pasir silika cukup banyak di Indonesia dan mudah didapatkan. Selain konduktivitas termal, konsentrasi partikel juga berpengaruh terhadap karakteristik perpindahan kalor. Dengan demikian, konduktivitas termal dan konsentrasi partikel pasir silika juga berpengaruh terhadap efisiensi pemanas air surya.

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan metode terbaik dalam pemanasan dan penghematan energi. Dengan cara membandingkan respons sistem dengan metode kontrol *on-off* pada media *paraffin wax* dan aditif pasir silika. Sistem yang dirancang diharapkan mampu menjaga suhu air secara optimal, mengurangi konsumsi energi berlebih, mencegah terjadinya *overheat* dan meningkatkan keandalan dalam kondisi operasional di lingkungan maritim.

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tubular Heater

Heater yang digunakan ada jenis *Tubular heater*. *Tubular Heater* adalah sebuah komponen pemanas yang biasanya berbentuk lempengan dan dirancang untuk mentransfer panas secara merata ke permukaan benda yang bersentuhan dengannya. Komponen ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi industri, laboratorium, dan

rumah tangga, seperti untuk memanaskan cairan, bahan padat, atau komponen elektronik (Arsenyeva *et al.*, 2023).

B. SSR 220VAC Aktuaktor

Solid State Relay (SSR) memiliki pengertian dan fungsi yang serupa dengan relay elektromekanik atau *Magnetic Contactor* (MC), yaitu berperan sebagai saklar elektronik yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi industri sebagai alat pengendali. Namun, *relay* elektromekanik memiliki sejumlah keterbatasan dibandingkan dengan *Solid State Relay* (SSR), seperti usia pakai kontak yang terbatas, ukuran yang lebih besar, serta konsumsi daya yang tinggi. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, banyak produsen *relay* kini menawarkan *Solid State Relay* (SSR) yang menggunakan teknologi semikonduktor modern, seperti SCR, TRIAC, atau transistor sebagai pengganti kontak mekanik. Output perangkat ini, berupa SCR, TRIAC, atau transistor, dihubungkan secara optik dengan sumber cahaya LED yang terdapat di dalam relay (Eko Kustiawan, 2018).

C. Sensor DS18B20

Sensor DS18B20 digunakan untuk mendeteksi suhu air. Sensor ini dikenal memiliki akurasi yang tinggi dengan biaya yang relatif ekonomis, sehingga menjadi pilihan yang sangat disarankan. Keunggulan lainnya adalah kemampuan tahan air dan data keluaran berbentuk digital. Fitur ini sangat berguna untuk pengukuran suhu air, terutama pada jarak jauh, karena panjang kabel tidak memengaruhi akurasi data keluaran sensor. (Ramadhani, 2016).

D. ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler yang dikembangkan sebagai penerus dari ESP8266. Salah satu perbedaan utama antara keduanya adalah jumlah GPIO pin (ADC/DAC) yang dimiliki. ESP32 memiliki 36 pin (18 ADC dan 2 DAC), sedangkan ESP8266 hanya memiliki 17 pin (1 ADC dan tanpa DAC). Selain itu, ESP32 telah dilengkapi dengan modul WiFi bawaan, memungkinkan pengguna untuk mengontrol mikrokontroler dari jarak jauh melalui jaringan internet (Imran dan Rasul 2020).

E. LCD 16x2 I2c

Liquid Crystal Display (LCD) 16x2, merupakan salah satu jenis display elektronik yang dibuat menggunakan teknologi CMOS *logic* yang dalam penelitian ini dimanfaatkan untuk menampilkan informasi sistem. LCD (*Liquid Crystal Display*) adalah jenis media tampilan atau *Display* dari bahan cairan kristal sebagai penampil utama. LCD I2C 16x2 dapat menampilkan sebanyak 32 karakter yang terdiri dari 2

baris dengan tiap baris menampilkan 16 karakter. Di perancangan alat ini, LCD berfungsi untuk menampilkan data voltase dan arus yang terbaca (Fauziah, Munazilin and Santoso, 2024).

F. Paraffin Wax

Paraffin wax merupakan salah satu material perubahan fasa (*Phase Change Material* atau PCM) yang memiliki berbagai keunggulan, seperti densitas energi yang tinggi, stabilitas termal, tidak berbahaya, tidak reaktif, dan rentang suhu leleh yang luas, yaitu antara 8 hingga 106°C (Nadjib et al., 2015). Parafin dianggap ideal sebagai bahan penyimpan panas laten karena tersedia dalam berbagai rentang suhu dan memiliki kapasitas panas laten yang besar.

G. Pasir Silika

Silika merupakan material yang tersedia dialam dan secara kuantitatif memiliki jumlah yang banyak. Silika merupakan salah satu senyawa oksida dengan rumus kimia SiO_2 dimana senyawa ini memiliki daya tahan terhadap temperatur, dan stabilitas termal yang tinggi (Katsuki, 2005). Silika biasanya diperoleh melalui proses penambangan yang di mulai dari menambang pasir kuarsa sebagai bahan baku. Pasir silika sangat banyak dan mudah didapatkan di Indonesia.

H. Pipa *Stainless Steel*

Pipa *stainless steel* adalah pipa yang terbuat dari *stainless steel* (atau baja tahan karat), yang dikenal karena ketahanannya terhadap korosi, oksidasi, dan kondisi lingkungan yang keras. Pipa ini banyak digunakan dalam berbagai industri seperti minyak dan gas, konstruksi, sistem perpipaan air, serta peralatan industri lainnya yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap bahan kimia dan suhu ekstrem.

I. Pompa Air

Pompa adalah perangkat mekanis yang digunakan untuk memindahkan cairan atau gas dari satu tempat ke tempat lain. Pompa bekerja dengan mengubah energi mekanik menjadi energi potensial atau kinetik untuk mendorong *fluida*. Pompa banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk sistem perpipaan, pemompaan air, proses industri, dan banyak lagi.

J. Plat *Stainless Steel*

Plat *stainless steel* digunakan sebagai media penghantar panas dari elemen pemanas menuju *paraffin wax* atau air. Dibandingkan tembaga, *stainless steel* memiliki ketahanan terhadap korosi, terutama di lingkungan lembap atau yang mengandung air panas. Meski konduktivitas termalnya termasuk lebih rendah dibandingkan dengan

tembaga, *stainless steel* tetap banyak dipilih karena daya tahannya yang tinggi, sifat non-toksik, dan kemampuan mempertahankan kekuatan struktural pada suhu tinggi (Santoso, B.2020).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menitik beratkan pada pengontrolan suhu dengan menggunakan sistem kontrol *on-off* pada *water heater* diatas kapal. Untuk dibaca oleh sensor nilai *setpoint* minimum dan maksimum suhu yang dicapai kemudia *controller* akan merespon sesuai suhu yang terdeteksi. Apabila suhu kurang dari sama dengan 35° maka sensor akan memerintahkan sistem kontrol untuk “on” dan apabila suhu lebih dari sama dengan 40° maka sensor akan memerintahkan sistem kontrol untuk “off”. Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D). Pengujian statis akan dilakukan dengan cara menguji setiap bagian alat berdasarkan karakteristik dan fungsi masing – masing komponen. Pengujian dinamis dilakukan sesudah semua komponen selesai dirangkai dan terpasang. Pengujian dinamis bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem penyimpanan panas pada *paraffin wax* dengan tambahan pasir silika dalam *water heater* yang beroperasi dengan adanya kontrol *on-off*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Statis

a. Pengujian Sensor DS18B20

Pengujian pada sensor suhu DS18B20 akan dilakukan secara statis untuk memastikan sensor mampu membaca suhu secara akurat. Selanjutnya, sensor diletakkan pada beberapa media dengan suhu berbeda, seperti air hangat atau air dingin. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa sensor DS18B20 mampu membaca suhu dengan tingkat akurasi yang stabil, dengan deviasi pembacaan tidak melebihi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dari alat pembanding. Hasil pembacaan suhu dapat dilihat melalui alat pengukur ataupun dari LCD yang menampilkan suhu yang terbaca. Hal ini menunjukkan bahwa sensor bekerja dengan baik dan layak digunakan dalam sistem pengendalian suhu. Hasil dari pengujian Sensor DS18B20 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian Sensor DS18B20

Pengukuran Ke-	Pembacaan Sensor DS18B20
1	26°
2	38°
3	46°

Sumber: Dokumen Pribadi

b. Pengujian ESP32

Pengujian mikrokontroler ESP32 dilakukan untuk memastikan bahwa unit mampu menjalankan program kendali secara normal serta dapat berkomunikasi dengan sensor dan aktuator yang terhubung. Pengujian dimulai dengan mengunggah program sederhana menggunakan Arduino IDE untuk membaca data dari sensor suhu dan menyalakan output digital seperti LED atau relay, maka lampu indikator berkedip secara berkala. Maka hasil pengujian menunjukkan bahwa ESP32 dapat merespon input, memproses data, dan mengendalikan output sesuai logika program yang diberikan. Hal ini membuktikan bahwa ESP32 berfungsi dengan baik sebagai otak dari sistem pengendalian suhu otomatis.

c. Pengujian Tubular Heater

Pengujian tubular heater dilakukan secara statis untuk memastikan bahwa elemen pemanas dapat menghasilkan panas saat diberi tegangan listrik, serta bekerja dengan stabil dalam waktu tertentu. Pengamatan difokuskan pada seberapa cepat suhu meningkat, kestabilan panas yang dihasilkan, dan apakah terjadi lonjakan arus atau gangguan saat pemanasan berlangsung. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tubular heater berfungsi dengan baik, mampu menaikkan suhu media secara bertahap, dan tidak menunjukkan adanya kerusakan maupun ketidakteraturan saat beroperasi. Dengan demikian, tubular heater layak digunakan sebagai komponen pemanas dalam sistem.

Tabel 2. Pengujian Tubular Heater

Pengukuran Ke-	Suhu Tubular Heater Per 5 Menit
1	34°
2	46°
3	60°

d. Pengujian LCD

Pengujian LCD dilakukan secara statis untuk memastikan bahwa tampilan dapat menampilkan informasi dengan jelas dan merespons perintah dari mikrokontroler secara tepat. LCD dihubungkan dengan ESP32 menggunakan

komunikasi I2C. Pengujian dimulai dengan menampilkan teks statis dan dinamis seperti suhu, status pemanas, serta pesan sistem lainnya.

Selanjutnya, dilakukan uji perubahan data secara real-time untuk memastikan bahwa tampilan dapat memperbarui informasi sesuai pembacaan sensor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa LCD mampu menampilkan karakter dan angka dengan baik, tidak terdapat kesalahan tampilan, dan kontras layer terlihat jelas. Dengan demikian, LCD siap digunakan sebagai media antarmuka pengguna dalam sistem.

e. Pengujian SSR

Pengujian SSR dilakukan secara statis untuk memastikan bahwa komponen ini dapat berfungsi sebagai saklar elektronik yang menghubungkan dan memutuskan arus listrik ke beban (tubular heater) berdasarkan sinyal dari mikrokontroler ESP32. Pengujian dilakukan dengan memberikan sinyal logika HIGH dan LOW dari pin output ESP32 ke input SSR, kemudian diamati apakah SSR merespons dengan mengalirkan atau memutuskan arus AC ke heater. Hasil pengujian menunjukkan bahwa SSR merespons perintah dengan baik, tidak terjadi keterlambatan atau kegagalan switching, dan komponen tetap bekerja dalam batas suhu aman. Dengan demikian, SSR layak digunakan sebagai pengendali beban pada sistem.

B. Pengujian Dinamis

a. Pengujian Sistem Rancangan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dari seluruh komponen yang tergabung didalam sistem kontrol *On-Off* pada *Water Heater* dengan menggunakan Media *Paraffin Wax* dan juga Aditif Pasir Silika berjalan dengan baik sesuai dengan fungsinya.

Sistem pengatur suhu ini dirancang untuk menjaga suhu air secara otomatis dalam rentang 35°C hingga 40°C. Komponen utama terdiri dari sensor suhu DS18B20, mikrokontroler ESP32, *Solid State Relay* (SSR), pemanas (Tubular Heater), dan LCD sebagai tampilan. Sensor DS18B20 nantinya akan membaca suhu air secara *real-time* dan mengirimkan data ke ESP32 untuk diproses. Jika suhu di bawah atau tepat di 35°C, ESP32 mengaktifkan SSR sehingga pemanas menyala (*On*) dan memanaskan air.

Sebaliknya, saat suhu mencapai atau diatas 40°C, ESP32 mematikan SSR sehingga pemanas berhenti bekerja (*Off*).

Selama pengujian, sistem berjalan dengan baik dan menunjukkan respons yang cepat terhadap perubahan suhu. Data suhu juga ditampilkan pada layar LCD sehingga pengguna dapat memantau kondisi secara langsung. Sistem ini mampu bekerja stabil dan efisien, serta dapat diandalkan untuk mengatur suhu air tanpa intervensi manual.

b. Pengujian Media *Paraffin Wax*

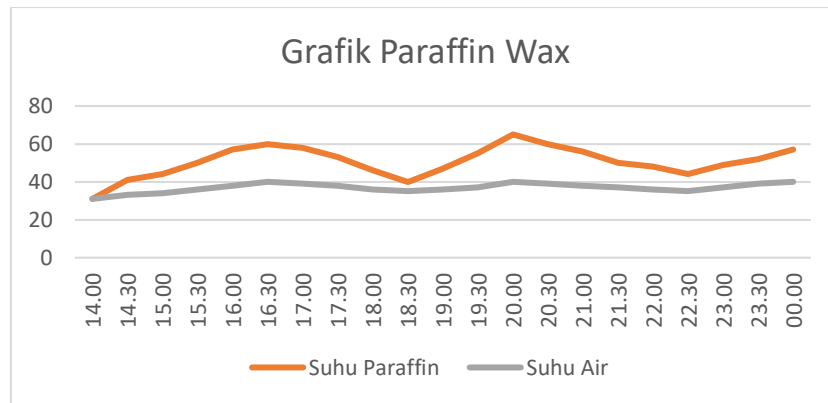
Pengujian dilakukan dengan memanaskan *paraffin wax* menggunakan tubular heater hingga mencapai suhu lebih dari $\pm 100^{\circ}\text{C}$, lalu pemanas dimatikan. Selanjutnya suhu media dipantau secara berkala untuk mengetahui kemampuan dalam menyimpan dan melepaskan panas secara alami. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *paraffin wax* mampu mempertahankan panas dalam waktu tertentu, namun terjadi penurunan suhu yang relatif cepat setelah sumber panas dihentikan.

Tabel 3. Pengujian Media *Paraffin Wax*

Sumber:

Pengujian Menggunakan <i>Paraffin Wax</i>					
Waktu	Suhu Heater	Suhu Pipa	Suhu Paraffin	Suhu Air	Ket
14.00	31	31	31	31	Heater ON
14.30	55	40	41	33	Heater ON
15.00	95	42	44	34	Heater ON
15.30	102	45	50	36	Heater ON
16.00	105	47	57	38	Heater ON
16.30	111	49	60	40	Heater OFF
17.00	70	45	58	39	Heater OFF
17.30	40	39	53	38	Heater OFF
18.00	36	35	46	36	Heater OFF
18.30	34	34	40	35	Heater ON
19.00	60	38	47	36	Heater ON
19.30	85	42	55	37	Heater ON
20.00	110	50	65	40	Heater OFF
20.30	90	48	60	39	Heater OFF
21.00	79	46	56	38	Heater OFF
21.30	68	40	50	37	Heater OFF
22.00	44	37	48	36	Heater OFF
22.30	34	35	44	35	Heater ON
23.00	57	39	49	37	Heater ON
23.30	86	42	52	39	Heater ON
00.00	98	43	57	40	Heater OFF

Dokumen Pribadi



Gambar 1. Grafik Pengujian Media *Paraffin Wax*

Sumber : Dokumen Pribadi

Pengujian dilakukan mulai pukul 14.00 hingga 00.00 dengan pencatatan data setiap 30 menit. Selama uji coba, diamati suhu heater, suhu pipa, suhu *paraffin wax*, dan suhu air. *Paraffin wax* digunakan sebagai media penyimpan panas, yaitu menyerap panas saat proses pemanasan dan melepaskannya perlahan saat suhu mulai turun, agar suhu air tetap stabil tanpa sering menyalakan heater.

Pada awal pengujian pukul 14.00, suhu air, pipa, dan *paraffin wax* berada di angka 31°C. Heater dinyalakan dan suhu air mulai naik secara bertahap hingga mencapai 40°C pada pukul 16.30. Proses pemanasan awal ini berlangsung lama karena *paraffin wax* masih padat dan membutuhkan energi tambahan untuk mencair. Energi ini diserap oleh paraffin dan belum langsung meningkatkan suhu air.

Setelah suhu air mencapai 40°C, sistem mematikan heater secara otomatis. Antara pukul 16.30 hingga 18.30, suhu air hanya turun sedikit, dari 40°C ke 35°C. Ini menunjukkan bahwa panas yang tersimpan dalam *paraffin wax* dilepaskan secara perlahan, membantu menjaga suhu air. Saat suhu turun hingga 35°C pada pukul 18.30, heater kembali menyala. Pada siklus kedua, proses pemanasan lebih cepat karena air sudah cukup hangat dan sebagian *paraffin* masih dalam kondisi cair. Hal ini membuat sistem bekerja lebih efisien dibandingkan pemanasan awal.

c. Pengujian Media *Paraffin Wax* dengan Aditif Pasir Silika

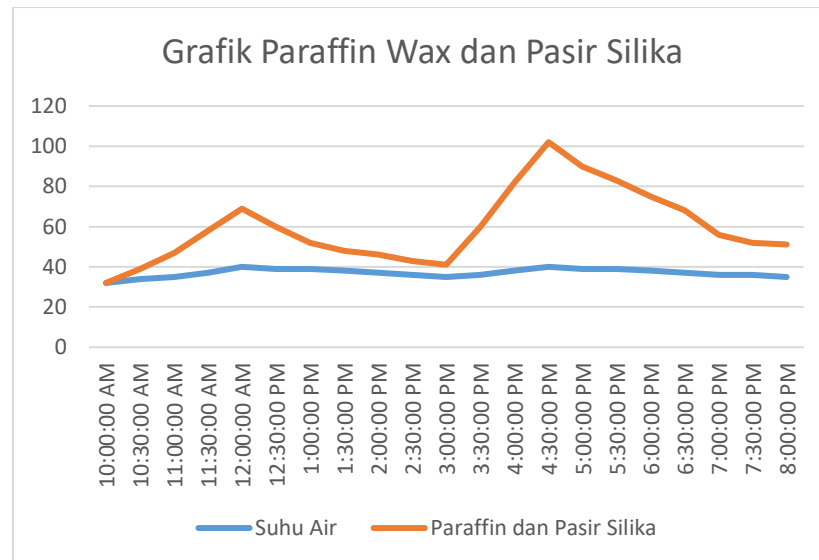
Campuran *paraffin wax* dan pasir silika diuji dalam kondisi sama seperti pengujian sebelumnya. Proses pemanasan dilakukan hingga suhu $\pm^{\circ}\text{C}$, lalu proses pelepasan panas diamati. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan pasir silika memperlambat penurunan suhu dan membantu mempertahankan panas lebih lama daripada hanya dengan menggunakan media *paraffin wax* saja. Hal ini

membuktikan bahwa pasir silika meningkatkan efektivitas penyimpanan panas *paraffin wax* secara signifikan.

Tabel 4. Pengujian Media *Paraffin Wax* dan Aditif Pasir Silika

Pengujian Dengan Media <i>Paraffin Wax</i> dan Aditif Pasir Silika						
No	Waktu	Suhu Heater	Suhu Air	<i>Paraffin</i> dan Pasir Silika	Suhu Pipa	Keterangan
1	10:00:00 AM	31	32	32	31	Heater On
2	10:30:00 AM	60	34	39	34	Heater On
3	11:00:00 AM	97	35	47	36	Heater On
4	11:30:00 AM	118	37	58	38	Heater On
5	12:00:00 AM	136	40	69	42	Heater Off
6	12:30:00 PM	112	39	60	41	Heater Off
7	1:00:00 PM	91	39	52	40	Heater Off
8	1:30:00 PM	83	38	48	39	Heater Off
9	2:00:00 PM	72	37	46	37	Heater Off
10	2:30:00 PM	55	36	43	35	Heater Off
11	3:00:00 PM	40	35	41	34	Heater On
12	3:30:00 PM	87	36	60	37	Heater On
13	4:00:00 PM	126	38	82	40	Heater On
14	4:30:00 PM	142	40	102	42	Heater Off
15	5:00:00 PM	120	39	90	41	Heater Off
16	5:30:00 PM	104	39	83	40	Heater Off
17	6:00:00 PM	93	38	75	39	Heater Off
18	6:30:00 PM	76	37	68	37	Heater Off
19	7:00:00 PM	55	36	56	36	Heater Off
20	7:30:00 PM	43	36	52	36	Heater Off
21	8:00:00 PM	42	35	51	35	Heater On

Sumber: Dokumen Pribadi



Gambar 2. Grafik Pengujian Media *Paraffin Wax* dan Pasir Silika

Sumber : Dokumen Pribadi

Penggunaan campuran *paraffin wax* dengan aditif pasir silika dalam sistem pemanas otomatis terbukti memberikan peningkatan performa dalam proses penyimpanan dan pelepasan panas. Pasir silika berfungsi meningkatkan konduktivitas termal dari *paraffin wax*, sehingga panas dari elemen pemanas dapat tersalurkan lebih cepat dan merata ke seluruh media. Hal ini terlihat dari waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu maksimum. Pada pengujian siklus pemanasan awal, suhu air meningkat dari 32°C menjadi 40°C dalam waktu sekitar 2,5 jam, karena seluruh *paraffin* masih dalam kondisi padat dan memerlukan energi besar untuk mencair. Namun, pada pengujian siklus kedua, suhu air hanya membutuhkan waktu sekitar 1 jam untuk kembali naik ke 40°C, menandakan bahwa pemanasan terjadi lebih cepat. Ini menunjukkan bahwa pasir silika membantu mempercepat proses perpindahan panas dari *heater* ke air melalui media penyimpan panas.

Selain mempercepat proses pemanasan, pasir silika juga berperan dalam memperlambat pelepasan panas dari media ke lingkungan sekitar. Setelah *heater* dimatikan pada suhu 40°C, suhu air tidak langsung turun drastis. Pada dua siklus pengujian, yaitu pukul 12:00 PM hingga 2:30 PM dan pukul 4:30 PM hingga 8:00 PM, suhu air tetap berada di atas batas bawah 35°C selama lebih dari dua jam. Ini membuktikan bahwa panas yang telah diserap oleh *paraffin wax* dan pasir silika selama proses pemanasan dilepaskan secara perlahan dan stabil, sehingga membantu menjaga kestabilan suhu air tanpa harus sering mengaktifkan *heater*.

Efektivitas ini menunjukkan bahwa kombinasi *paraffin wax* dan pasir silika tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga memperpanjang durasi kenyamanan termal sistem. Sistem tidak perlu bekerja terlalu sering, karena energi panas disimpan dan dilepaskan secara bertahap. Dengan demikian, penggunaan pasir silika sebagai aditif dalam media penyimpan panas memberikan dua keuntungan utama yaitu mempercepat pemanasan dan memperlambat pendinginan, yang secara keseluruhan menjadikan sistem lebih hemat energi dan stabil dalam menjaga suhu air sesuai batas kerja yang diinginkan.

Kemampuan pasir silika dalam menyerap dan melepaskan panas tidak secara langsung berkaitan dengan perubahan fase seperti pada *paraffin wax*, tetapi lebih pada kemampuannya menghantarkan dan menyimpan panas secara efisien.

Adapun pengujian yang dilakukan dalam skala kecil untuk mengetahui efektivitas penambahan pasir silika pada *paraffin wax* sebagai berikut dijelaskan pada tabel 4.5 dan 4.6 serta rumus dibawah ini.

Tabel 3. Pengujian *Paraffin Wax* Skala Kecil

<i>Paraffin Wax</i>						
T awal (°C)	T akhir (°C)	ΔT	$Q = m \cdot C \cdot \Delta T$ (kJ)	t (waktu)	Q/t (kJ/menit)	Q/t (watt)
120	30	90	0,7704	5 jam 20 menit	0,00241	0,0402
120	50	70	0,5992	3 jam 50 menit	0,00261	0,0435
120	70	50	0,4280	2 jam 30 menit	0,00285	0,0475
120	80	40	0,3424	1 jam 25 menit	0,00403	0,0672
120	100	20	0,1712	40 menit	0,00428	0,0713

Sumber: Dokumen Pribadi

Tabel di atas menunjukkan data hasil uji coba pelepasan energi panas oleh *paraffin wax* saat mengalami penurunan suhu dari 120°C ke berbagai suhu akhir. Dari data tersebut terlihat bahwa semakin besar selisih suhu (ΔT), maka semakin besar pula energi panas (Q) yang dilepaskan. Misalnya, pada ΔT sebesar 90°C, energi yang dilepaskan mencapai 0,7704 kJ, sedangkan pada ΔT 20°C hanya 0,1712 kJ. Namun, waktu yang dibutuhkan untuk melepaskan energi tersebut juga sangat memengaruhi laju pelepasannya. Ketika suhu turun dari 120°C ke 30°C (ΔT 90°C), waktu yang dibutuhkan mencapai 5 jam 20 menit, sehingga laju pelepasan energi (Q/t) relatif kecil, yaitu 0,00241 kJ/menit atau 0,0402 watt.

Sebaliknya, saat suhu hanya turun 20°C, waktu pelepasannya hanya 40 menit, sehingga laju pelepasannya lebih tinggi, yaitu 0,00428 kJ/menit atau 0,0713 watt. Dari analisis ini dapat disimpulkan bahwa *paraffin wax* memiliki karakteristik pelepasan panas yang lambat ketika perbedaan suhunya besar, dan melepaskan panas lebih cepat saat ΔT kecil. Hal ini menjadikan *paraffin wax* sangat cocok sebagai media penyimpan panas yang mampu mempertahankan suhu dalam jangka waktu yang relatif lama.

Tabel 4. Pengujian Paraffin Wax dan Pasir Silika Sekala Kecil

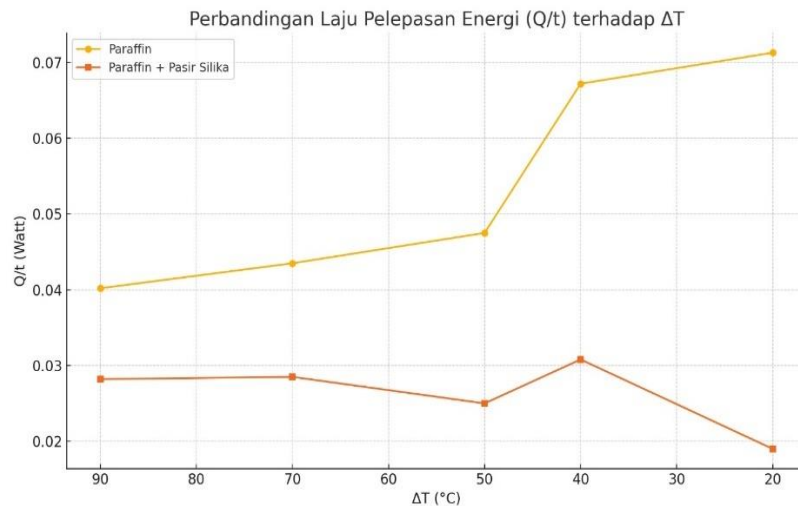
<i>Paraffin dan Pasir</i>						
T awal (°C)	T akhir (°C)	ΔT	$Q = m \cdot C \cdot \Delta T$	t (waktu)	Q/t (kJ/menit)	Q/t (watt)
120	30	90	0,7704	7 jam 35 menit	0,00169	0,0282
120	50	70	0,5992	5 jam 50 menit	0,00171	0,0285
120	70	50	0,4280	4 jam 45 menit	0,00150	0,0250
120	80	40	0,3424	3 jam 5 menit	0,00185	0,0308
120	100	20	0,1712	2 jam 30 menit	0,00114	0,0190

Sumber: Dokumen Pribadi

Tabel di atas menampilkan data pelepasan energi panas dari media campuran *paraffin wax* dan pasir silika saat terjadi penurunan suhu dari 120°C ke berbagai suhu akhir. Secara umum, nilai energi panas (Q) yang dilepaskan tetap sama pada setiap selisih suhu (ΔT) karena massa dan kalor jenis dianggap konstan.

Namun, yang menarik adalah perbedaan signifikan pada waktu pelepasan dan laju pelepasan energinya. Misalnya, untuk ΔT sebesar 90°C, energi sebesar 0,7704 kJ dilepaskan selama 7 jam 35 menit, menghasilkan laju pelepasan panas sebesar 0,00169 kJ/menit atau 0,0282 watt. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi *paraffin wax* dan pasir silika membuat proses pelepasan panas menjadi lebih lambat dan stabil dibanding *paraffin wax* saja. Bahkan ketika ΔT hanya 20°C, waktu pelepasan tetap cukup lama yakni 2 jam 30 menit, dengan laju pelepasan yang paling rendah sebesar 0,00114 kJ/menit atau 0,0190 watt.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penambahan pasir silika ke dalam *paraffin wax* berfungsi sebagai penstabil termal yang memperlambat pelepasan panas, sehingga memperpanjang durasi penyimpanan energi panas. Karakteristik ini sangat bermanfaat dalam aplikasi thermal energy storage, di mana kestabilan suhu dalam jangka waktu lama sangat dibutuhkan.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Laju Pelepasan Energi

Sumber : Dokumen Pribadi

Karakter ini dapat dianalisis melalui perhitungan kapasitas kalor dan konduktivitas termalnya yaitu dengan rumus (1):

$$k = \frac{m \cdot L}{A} \dots\dots\dots (1)$$

k = konduktivitas termal

m = laju perpindahan panas

L = panjang/jarak material

A = luas penampang

Berdasarkan pengujian yang diperoleh untuk membuktikan media tersebut merupakan suatu campuran yang dapat memaksimalkan proses pencairan dari *paraffin wax* oleh pasir silika dan *paraffin wax* itu sendiri diketahui dengan perhitungan rumus sebagai berikut :

$$m = 0,014 \text{ W/k}$$

$$L = 10 \text{ cm} = 0,10 \text{ m}$$

$$A = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$$

$$\text{ketebalan} = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$$

$$\text{massa} = 4 \text{ gram}$$

Untuk mendapatkan hasil dari konduktivitas termal, harus menghitung luas penampang A dengan rumus (2) :

$$A = \text{lebar} \times \text{ketebalan} \dots\dots\dots (2)$$

$$= 0,04 \times 0,02$$

$$= 0,0008 \text{ m}^2$$

$$k = \frac{m \cdot L}{A}$$

$$k = \frac{0,014 \cdot 0,10}{0,0008} = \frac{0,0014}{0,0008} = 1,75 \text{ W/m.K}$$

Nilai konduktivitas termal sebesar 1,75 W/m.K menunjukkan bahwa material ini sangat baik dalam menghantarkan panas yaitu merupakan campuran *paraffin wax* dengan pasir silika. Material seperti ini cocok digunakan untuk aplikasi penyimpanan panas yang membutuhkan kecepatan respons tinggi terhadap perubahan suhu.

Selanjutnya, untuk menghitung jumlah energi panas yang mampu disimpan atau dilepaskan oleh material, digunakan rumus (3) :

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T \dots\dots\dots (3)$$

Q = jumlah kalor (Joule)

m = massa pasir silika (kg)

c = kalor jenis pasir silika (J/kg°C)

ΔT = perubahan suhu (°C)

Dengan :

$$massa = 4 \text{ gram} = 0,004\text{kg}$$

$$C = 2,14 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 90^\circ\text{C} \text{ (selisih suhu dari } 120^\circ\text{C ke } 30^\circ\text{C)}$$

Maka, berikut penyelesaiannya dengan rumus (3) :

$$Q = 0,004 \cdot 2,14 \cdot 90 = 0,7704 \text{ kJ}$$

Nilai ini menunjukkan bahwa material mampu menyimpan atau melepaskan energi panas sebesar 0,7704 kJ saat terjadi perubahan suhu sebesar 90°C. Jumlah ini menggambarkan total energi laten yang terlibat selama proses pemanasan atau pendinginan.

Dari kedua hasil perhitungan ini, dapat disimpulkan bahwa material campuran *paraffin* dan pasir silika tidak hanya mampu menyimpan energi panas dalam jumlah cukup signifikan, tetapi juga menghantarkan panas dengan efisiensi yang lebih tinggi. Karakteristik ini sangat menguntungkan untuk digunakan sebagai media penyimpan panas dalam sistem pemanas air hemat energi, khususnya untuk aplikasi di lingkungan terbatas seperti kapal atau sistem mandiri berbasis energi terbarukan.

Panas inilah yang nantinya akan membantu untuk menjaga kalor atau panas air ketika Tubular Heater dalam keadaan mati atau *off*. Siklus ini akan terus berulang sesuai skema waktu yang tertera pada tabel. Dengan menggunakan *paraffin wax* dan aditif Pasir Silika frekuensi nyala heater menjadi sangat jarang dan durasinya lebih singkat dibandingkan system hanya dengan *paraffin wax* saja. Total durasi kerja heater (*On*) dalam periode 24 jam tercatat selama 8 jam, sedangkan heater dalam kondisi (*Off*) selama 16 jam lamanya.

C. Analisis

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi dan membandingkan tingkat efektivitas serta efisiensi antara dua media yang digunakan pada sistem pemanas air. Media pertama hanya menggunakan *paraffin wax* saja, sedangkan media kedua dilengkapi dengan tambahan media penyimpan panas berupa pasir silika pada *paraffin wax*. Kedua media tersebut diuji dalam kondisi yang sama dan dalam durasi waktu yang setara, yaitu selama 24 jam. Parameter utama yang dianalisis meliputi durasi waktu heater dalam kondisi menyala (*ON*), waktu dalam kondisi mati (*OFF*), serta total konsumsi daya listrik dan biaya energi yang dibutuhkan selama pengujian berlangsung. Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh penggunaan media penyimpan panas terhadap efisiensi energi dalam sistem tersebut.

Sistem pemanas air yang menggunakan *paraffin wax* dan aditif pasir silika sebagai media penyimpan panas menunjukkan kinerja yang lebih efisien dibandingkan hanya menggunakan media *paraffin wax* saja. *Paraffin* memiliki karakteristik termal yang memungkinkan material ini menyerap energi panas dalam bentuk kalor laten saat terjadi proses peleburan, dan kemudian melepaskannya secara perlahan saat suhu lingkungan mulai menurun. Dalam proses pengujian, *paraffin wax* menyerap panas dari tubular heater saat dalam kondisi aktif (*ON*), lalu berperan dalam menjaga kestabilan suhu air ketika heater dalam kondisi mati (*OFF*), dengan cara melepaskan panas yang telah tersimpan secara bertahap.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem hanya membutuhkan 10 jam waktu kerja heater, sementara selama 14 jam heater dalam kondisi mati. Ini menunjukkan adanya pengurangan durasi kerja heater sebesar 5 jam dalam sehari, yang secara langsung mengindikasikan peningkatan efisiensi energi yang cukup signifikan, terutama jika diterapkan dalam penggunaan jangka panjang.

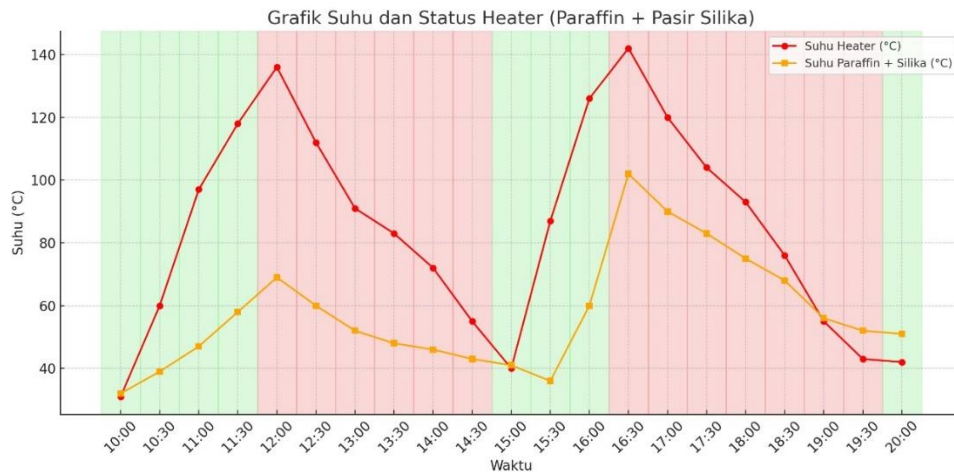
Selain itu, terdapat perbedaan karakteristik pemanasan antara siklus pertama dan siklus berikutnya. Pada siklus awal, proses pemanasan menuju suhu target 40°C

membutuhkan waktu lebih lama karena seluruh *paraffin* masih dalam fase padat dan membutuhkan tambahan energi untuk mencairkan material tersebut. Namun, pada siklus kedua dan seterusnya, waktu pemanasan menjadi lebih singkat. Hal ini terjadi karena suhu awal air sudah berada pada kisaran 35°C dan sebagian *paraffin* masih berada dalam kondisi cair atau setengah mencair, sehingga energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu jauh lebih kecil dibandingkan siklus awal. Dengan demikian, kerja sistem yang memanfaatkan media *paraffin wax* cukup untuk menghemat energi.

Berbeda pula dengan hasil yang diberikan oleh Pasir Silika yang digabungkan bersama *Paraffin Wax*. Penggunaan kombinasi *paraffin wax* dan pasir silika sebagai media penyimpan panas terbukti mampu meningkatkan efektivitas dan efisiensi sistem pemanas air secara signifikan. Pasir silika, yang memiliki konduktivitas termal tinggi, membantu mempercepat penyerapan panas oleh *paraffin wax* selama proses pemanasan, serta memperlambat pelepasan panas saat sistem berada dalam kondisi *OFF*. Kombinasi ini menghasilkan kinerja yang jauh lebih baik dibandingkan penggunaan *paraffin wax* saja.

Berdasarkan data yang diperoleh, sistem diuji selama 24 jam dengan pencatatan suhu setiap 30 menit. Hasilnya menunjukkan bahwa *heater* hanya menyala selama 3,5 jam, yaitu pada pukul 10:00–12:00 (2 jam), pukul 15:00–16:30 (1,5 jam), dan kembali *On* pada pukul 20:00. Sisanya, selama 6,5 jam penuh, *heater* dalam kondisi *Off*, namun suhu air tetap stabil di atas batas minimum berkat panas yang dilepaskan perlahan dari media penyimpan. Ini menandakan bahwa kombinasi media tersebut berhasil mengurangi waktu kerja heater hingga 65%, tanpa mengorbankan kestabilan suhu sistem.

Sedangkan, fase pendinginan yang lebih lama terlihat pada rentang waktu 16:30 hingga 20:00, di mana *heater* tidak aktif selama 3,5 jam, namun suhu air tetap bertahan di atas 35°C. Ini membuktikan bahwa campuran *paraffin* dan pasir silika memiliki kapasitas penyimpanan dan pelepasan panas yang lebih baik, menjaga suhu air dalam rentang kerja tanpa bantuan energi eksternal. Efek ini bahkan lebih jelas dibandingkan sistem hanya dengan *paraffin*, di mana fase pendinginan cenderung lebih cepat.



Gambar 4. Grafik Suhu dan Status Heater

Sumber : Dokumen Pribadi

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara suhu *heater* dan suhu media campuran *paraffin wax* dengan pasir silika terhadap waktu selama pengujian berlangsung dari pukul 10.00 hingga 20.00. Garis merah pada grafik menggambarkan perubahan suhu heater, sedangkan garis kuning menggambarkan suhu media *paraffin* dengan aditif pasir silika. Latar belakang grafik diberi warna hijau muda untuk menandai periode saat *heater* menyala (*ON*), dan merah muda untuk saat heater dimatikan (*OFF*).

Pada saat *heater* menyala (antara pukul 10.00 hingga 12.00), suhu *heater* meningkat tajam dari 31°C hingga mencapai 136°C. Seiring dengan itu, suhu media juga mengalami peningkatan bertahap dari 32°C menjadi 69°C. Ketika *heater* dimatikan mulai pukul 12.00 hingga 15.00, suhu *heater* dan media menurun secara bertahap. Namun, penurunan suhu media tidak terjadi secara drastis, melainkan cenderung lambat, yang menunjukkan bahwa material campuran *paraffin* dan pasir silika mampu menyimpan panas dengan baik.

Setelah itu, *heater* kembali dinyalakan pada pukul 15.00 hingga 16.30. Pada periode ini, suhu *heater* kembali meningkat pesat hingga 142°C, dan suhu media juga ikut naik secara signifikan hingga mencapai 102°C. Saat *heater* kembali dimatikan mulai pukul 16.30 hingga 20.00, suhu media turun perlahan dari 102°C menjadi 51°C. Kecenderungan penurunan suhu yang tidak cepat ini menunjukkan efektivitas media dalam menyimpan panas dan melepaskannya secara perlahan.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa media campuran *paraffin* dan pasir silika mampu menyerap panas dengan baik saat *heater* aktif dan mempertahankan suhu tinggi lebih lama saat *heater* dimatikan. Hal ini menjadikan

media tersebut sangat potensial digunakan sebagai penyimpan panas laten pada sistem pemanas air berbasis energi terbarukan, karena dapat mengurangi beban kerja *heater* dan menghemat konsumsi energi secara signifikan.

Dengan demikian, penggabungan pasir silika ke dalam *paraffin wax* bukan hanya memberikan keuntungan dari segi efisiensi energi, tetapi juga memperpanjang masa kerja sistem dalam kondisi stabil. Kinerja ini sangat bermanfaat untuk penggunaan jangka panjang, karena mampu mengurangi konsumsi listrik dan memperpanjang umur perangkat pemanas. Bahwa sistem ini merupakan solusi termal yang jauh lebih unggul dan hemat energi. Dapat dilihat hasil kalkulasi dari Tabel 7 dibawah ini.

Tabel 5. Biaya Dengan *Paraffin Wax*

<i>Paraffin Wax</i>					
Pemakaian /24 jam	Waktu	Konsumsi Listrik (Kwh)	Total Konsumsi	Biaya per Kwh (Rp)	Total (Rp)
Heater ON	10	0.59	5.90	1,352.00	7,976.80
Heater OFF	14	0	0	1,352.00	-
				Total	7,976.80

Sumber: Dokumen Pribadi

Tabel 6. Presentase Dengan *Paraffin Wax*

Presentase Pengujian <i>Paraffin Wax</i>			
Presentase Penggunaan Heater Nonstop 24 Jam	:	IDR	19,144.32
Konsumsi Pengujian <i>Paraffin Wax</i>	:	IDR	7,976.80
Total Penghematan	:	IDR	11,167.52
Presentase Hemat	:	58%	

Sumber: Dokumen Pribadi

Berdasarkan pengujian, Tubular *Heater* menggunakan daya sebesar 500 Watt (0.59 kWh). Waktu pengujian dengan *Paraffin* selama 24 jam *Heater On* selama 10 jam. Maka energi Listrik yang dikonsumsi bisa diketahui dengan rumus (4) :

$$E = \frac{(P \times t)}{1000} \dots\dots\dots (4)$$

E = energi listrik yang dikonsumsi (kWh)

P = Daya (Watt)

Pembagian dengan 1000 adalah untuk mengonversi Watt-jam ke Kilowatt/jam(1 kWh = 1000 Watt-jam).

Maka,

$$E = 0,59 \times 10$$

$$= 5,90 \text{ kWh}$$

Untuk menghitung biaya Listrik per hari dengan tarif Listrik Rp. 1.352,00/kWh sesuai dengan simulasi biaya PLN. Maka nominal yang didapat adalah:

$$\begin{aligned}\text{Biaya} &= E \times \text{Rp.1.352,00} \\ &= \text{Rp.7.976,80}\end{aligned}$$

Pada pengujian dengan menggunakan media *paraffin wax*, *heater* hanya menyala selama 10 jam dalam 24 jam pengoperasian. Dengan konsumsi Listrik per jam sebesar 0,59 kWh, total konsumsi energi mencapai 5,90 kWh. Jika dikalikan dengan tarif listrik Rp1.352,00 per kWh, maka total biaya listrik yang dikeluarkan sebesar Rp7.976,80.

Jika dibandingkan dengan penggunaan *heater nonstop* selama 24 jam yang memerlukan biaya Rp19.144,32, maka penggunaan *paraffin wax* berhasil menghemat biaya sebesar Rp11.167,52 atau sekitar 58%. Ini menunjukkan bahwa penggunaan *paraffin wax* sebagai penyimpan panas memberikan efisiensi energi yang baik.

Tabel 9. Biaya Dengan *Paraffin Wax* dan Pasir Silika

Paraffin Wax dan Pasir Silika					
Pemakaian/ 24 jam	Waktu	Konsumsi Listrik (Kwh)	Total Konsumsi	Biaya per kwh (Rp)	Total (Rp)
Heater ON	8	0.59	9.44	1,352.00	12,762.88
heater OFF	16	0	0	1,352.00	-
				Total	12,762.88

Sumber: Dokumen Pribadi

Tabel 7. Presentase Dengan *Paraffin Wax* dan Pasir Silika

Presentase Pengujian Paraffin Wax dan Pasir Silika			
Presentase Penggunaan Heater Nonstop 24 Jam	:	IDR	19,144.32
Konsumsi Pengujian <i>Paraffin Wax</i> dan Pasir Silika	:	IDR	6,381.44
Total Penghematan	:	IDR	12,762.88
Presentase Hemat	:	67%	

Sumber: Dokumen Pribadi

Berdasarkan pengujian, Tubular Heater menggunakan daya sebesar 500 Watt (0.59 kWh). Waktu pengujian dengan *Paraffin Wax* dan Pasir Silika selama 24 jam pengoperasian, *Heater On* selama 8 jam. Maka energi Listrik yang dikonsumsi bisa diketahui dengan rumus (2) :

$$\begin{aligned}E &= 0,59 \times 8 \\ &= 4,72 \text{ kWh}\end{aligned}$$

Untuk menghitung biaya Listrik per hari dengan tarif Listrik Rp. 1.352,00/kWh sesuai dengan simulasi biaya PLN. Maka nominal yang didapat adalah:

$$\begin{aligned}\text{Biaya} &= E \times \text{Rp.1.352,00} \\ &= \text{Rp.6.381,44}\end{aligned}$$

Pada pengujian dengan menggunakan media *paraffin wax* dan Pasir Silika *heater* hanya menyala selama 8 jam dalam 24 jam pengoperasian. Dengan konsumsi Listrik per jam sebesar 0,59 kWh, total konsumsi energi mencapai 5,90 kWh. Jika dikalikan dengan tarif listrik Rp1.352,00 per kWh, maka total biaya listrik yang dikeluarkan sebesar Rp.6.381,44. Jika dibandingkan dengan penggunaan *heater* nonstop selama 24 jam yang memerlukan biaya Rp19.144,32, maka penggunaan *paraffin wax* dan Pasir Silika berhasil menghemat biaya sebesar Rp.12.762,88 atau sekitar 67%. Ini menunjukkan bahwa penggunaan *paraffin wax* dan aditif Pasir Silika sebagai penyimpan panas memberikan efisiensi energi yang sangat tinggi dalam system kerja *Water Heater*.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan mengenai efektivitas media *Paraffin Wax* dan aditif Pasir Silika.

- a. Pengaruh penambahan pasir silika terhadap konduktivitas termal *paraffin wax* pada *water heater* dengan *control On-Off* berbasis mikrokontroler ESP32 berhasil dirancang dan diimplementasikan. Sistem ini mampu bekerja secara otomatis untuk menghidupkan dan mematikan elemen pemanas berdasarkan *setpoint* suhu yang ditentukan yaitu dari rentang (35°C - 40°C). Penambahan pasir silika pada *paraffin wax* mampu menyimpan dan melepaskan panas secara bertahap dengan sangat baik, sehingga mendukung kestabilan suhu sistem serta meningkatkan efisiensi penyimpanan energi panas pada *Water Heater*.
- b. Penghematan yang diperoleh dari pemanas air dengan kontrol *on-off* menggunakan media *paraffin wax* dan aditif pasir silika terbukti mampu memberikan efisiensi energi yang signifikan, di mana dalam waktu 24 jam tercatat terjadi penghematan sebesar Rp3.988,40, atau sekitar 20% dari total biaya konsumsi energi sebesar Rp19.144,32. Jika penghematan ini dikalkulasikan dalam jangka waktu lebih panjang, maka dalam 1 bulan (30 hari) dapat

menghemat biaya operasional hingga Rp119.652,00, dan dalam waktu 1 tahun (365 hari) dan penghematan yang diperoleh mencapai Rp1.456.766,00. Sementara itu, sistem yang menggunakan kombinasi *paraffin wax* dan aditif pasir silika menunjukkan efisiensi yang jauh lebih tinggi, dengan penghematan harian sebesar Rp 12.762,88, per hari (24 jam) atau sekitar 67% dari total konsumsi energi harian. Dalam waktu 1 bulan (30 hari) sistem ini mampu menghemat hingga Rp 382.886,40, dan dalam waktu 1 tahun (365 hari) total penghematan yang dicapai sebesar Rp 4.658.103,20. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan kombinasi *paraffin wax* dan pasir silika sebagai media penyimpan panas sangat efektif dalam menurunkan konsumsi daya dan mampu memberikan penghematan biaya operasional yang signifikan baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

B. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, berikut adalah beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut agar menjadi lebih optimal:

- a. Salah satu kendala utama yang ditemukan adalah keterbatasan kapasitas baterai dalam menopang beban heater sebesar 500 Watt. Oleh karena itu, disarankan untuk menggunakan baterai dengan kapasitas yang lebih besar atau menerapkan sistem catu daya alternatif yang lebih andal dan stabil, guna menjamin kontinuitas suplai daya selama proses pemanasan berlangsung.
- b. Agar sistem dapat beroperasi dengan aman dan efisien, perlu dipastikan bahwa kabel yang digunakan memiliki luas penampang yang sesuai dengan arus yang dialirkan menuju heater. Kabel dengan ukuran yang tidak memadai berisiko mengalami penurunan tegangan dan pemanasan berlebih, yang tidak hanya mengganggu kinerja sistem, tetapi juga berpotensi menimbulkan bahaya keselamatan.
- c. Desain keseluruhan dan penggunaan media serta peletakkan komponen – komponennya perlu dioptimalkan untuk meningkatkan efektivitas transfer panas dan efisiensi penyimpanan energi termal. Penyesuaian dimensi, bentuk, posisi komponen dapat disesuaikan dengan kebutuhan untuk memberikan dampak signifikan terhadap kinerja sistem secara keseluruhan.
- d. Disarankan untuk melakukan pengujian terhadap jenis *Phase Change Material* (PCM) lain selain *paraffin wax*, atau mengevaluasi kombinasi PCM dengan aditif seperti pasir silika. Hal ini bertujuan untuk mengidentifikasi material yang

- mampu memberikan efisiensi penyimpanan panas terbaik, baik dari segi kapasitas kalor laten, konduktivitas termal, maupun stabilitas termal dalam jangka panjang.
- e. Selain menggunakan kontrol ON/OFF konvensional, sistem dapat dikembangkan dengan menerapkan algoritma kontrol yang lebih adaptif, seperti (PWM) *Pulse Width Modulation* untuk mengatur daya heater secara bertahap, atau sistem kontrol PID untuk menjaga suhu lebih stabil dan presisi. Ini akan meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang umur komponen.
 - f. Perlu dipertimbangkan penambahan komponen proteksi seperti fuse, thermal cutoff, atau sensor arus berlebih untuk menghindari risiko korsleting, panas berlebih, atau kerusakan pada sistem akibat arus tinggi. Hal ini penting untuk menjamin keselamatan dalam pengoperasian jangka panjang, terutama jika digunakan dalam lingkungan yang tidak diawasi terus-menerus.

DAFTAR PUSTAKA

- Abhat, A. (1981). *Performance Studies of a Finned Heat Pipe Latent Heat Thermal Energy Storage System*. Pergamon Press, 541–546.
- Ardiansya, H., Setiawan, H., & Harijanto, B. (2022). *Rekayasa Pembangkit Listrik Tenaga Bayu HYBRID Portable Secara Real Time Berbasis IoT untuk Penyuplai Kebutuhan Listrik*. Jurnal Elkasista, 3, Mei 2022. ISSN: 2723-1291.
- Arsenyeva, O. et al. (2023). *Review of Developments in Plate Heat Exchanger Heat Transfer Enhancement for Single-Phase Applications in Process Industries*. Energies, 16(13).
- Fauziah, N., Munazilin, A., & Santoso, F. (2024). *Rancang Bangun Sistem Pengontrol Irigasi Otomatis Menggunakan Mikrokontroler Arduino Uno*. G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan, 8(3), 1464–1473.
- Guntara, V.C. (2021). *Rancang Bangun Alat Penggiling dan Pengering Cabai Menggunakan Atmega 328*. Journal of Energy and Electrical Engineering, 3(1), 39–45.
- Katsuki, H., Furuta, S., Watari, T., & Komarneni, S. (2005). *ZSM-5 Zeolite/Porous Carbon Composite: Conventional- and Microwave-Hydrothermal Synthesis from Carbonized Rice Husk*. Microporous and Mesoporous Materials, 86, 145–151.
- Kustiawan, E. (2018). *Meningkatkan Efisiensi Peralatan dengan Menggunakan Solid State Relay (SSR) dalam Pengaturan Suhu Pack Pre-Heating Oven (PHO)*. CIR Jurnal STT YUPPENTEK, 9(1), 1–6.
- Mukhlis, Y., & Yapie, A.K. (2010). *Pemanas dengan Sistem Pendeteksi Suhu Otomatis dan Pengaman Kebocoran Panas*. Jurnal Ilmiah Teknologi dan Rekayasa, 13(3), 186–192.
- Okpatrioka, O. (2023). *Research and Development (R&D) Penelitian yang Inovatif dalam Pendidikan*. Dharma Acariya Nusantara: Jurnal Pendidikan, Bahasa, dan Budaya, 1(1), 86–100.
- Prayogo, T., & Budiman, B. (2009). *Survei Potensi Pasir Kuarsa di Daerah Ketapang, Provinsi Kalimantan Barat*. Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia, 11(2), 126–132.

- Ramadhani, A. (2016). *Water Temperature Control Using PID Control System Based on LabVIEW*. Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali, dan Elektronika Terapan, 4(2), 35–46.
- Sharma, A., & Chen, C.R. (2009). *Solar Water Heating System with Phase Change Materials*. *International Review of Chemical Engineering (I.RE.CH.E.)*, 1(4), 297–307.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., & Buddhi, D. (2009). *Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews (RSER)*, 13(10), 318–345.
- Ummah, M.S. (2019). *Analisis Unjuk Kerja Pemanas Air Surya dengan Aditif Pasir Silika pada Parafin Wax sebagai Material Penyimpan Panas Laten*. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–14.